

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ADILSON AROCHA PEDROSO

**METODOLOGIA PARA PARAMETRIZAÇÃO DE SOLDAGEM PELO PROCESSO
FCAW AUXILIADA POR VISÃO COMPUTACIONAL DE JUNTAS COM CHANFRO
EM “V” NA POSIÇÃO PLANA**

RIO GRANDE
2019

ADILSON AROCHA PEDROSO

**METODOLOGIA PARA PARAMETRIZAÇÃO DE SOLDAGEM PELO PROCESSO
FCAW AUXILIADA POR VISÃO COMPUTACIONAL DE JUNTAS COM CHANFRO
EM “V” NA POSIÇÃO PLANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Henara Lillian Costa
Co-orientador: M.Sc. Daniel Souza

RIO GRANDE

2019

Ficha Catalográfica

P372m Pedroso, Adilson Arocha.

Metodologia de parametrização de soldagem plana FCAW de chanfros “V” auxiliada por visão computacional / por Adilson Arocha Pedroso. – 2019.

74 f.: il.; 30cm.

“Orientadora: Profa. Dra. Henara Lillian Costa; Coorientador: M.S.C. Daniel Souza”.

Dissertação (mestrado) — Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Mestrado em Engenharia Mecânica, Rio Grande, RS, 2019.

1. Soldagem – FCAW. 2. Visão computacional. 3. Eficiência de deposição. 4. Distorção. I. Costa, Henara Lillian. II. Souza, Daniel. III. Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG. IV. Título.

CDD 671.52

Catalogação na Publicação:

Bibliotecária Camila Quaresma Martins – CRB 10/1790



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº 05/2019 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos quinze dias do mês de março de dois mil e dezenove, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas no Auditório do Prédio C3, no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu o mestrando **Adilson Arocha Pedroso**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPGMec, com o seguinte título: **METODOLOGIA BASEADA EM VISÃO COMPUTACIONAL PARA PARAMETRIZAÇÃO DE SOLDAGEM A ARCO COM ELETRODO COSUMÍVEL DE JUNTAS COM CHANFRO EM "V"**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Kleber Eduardo Bianchi e Ruham Pablo Reis, sob a orientação da Professora Henara Lillian Costa Murray e Coorientação do Engenheiro Mestre Daniel Souza. Analisando o trabalho, a Banca Examinadora o considerou: **APROVADO**.

1. Henara Lillian Costa Murray: _____
2. Daniel Souza: _____
3. Kleber Eduardo Bianchi: _____
4. Ruham Pablo Reis: _____

Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____
CPF: 847.359.106-20
 2. _____
CPF: 038.828.186-38
 3. _____
CPF: 440.783.230-49
 4. _____
CPF: 029.515.626-08
- Adilson Arocha Pedroso: _____

Dedico este trabalho à minha esposa Giovana, aos meus filhos João, Isabel e Rafael, como gratidão por todo o tempo ausente do convívio familiar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por me dar mais uma vitória em minha vida.

Agradeço a Furg por me oportunizar realizar este curso através de professores e técnicos qualificados.

Agradeço ao projeto Ocelus por me aceitar como integrante e suprir meios e recursos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao meu co-orientador Daniel por todo o apoio técnico dedicado a este trabalho.

Agradeço a minha orientadora Henara por toda a dedicação e paciência comigo.

Agradeço ao meu pai Pedroso pelo apoio e exemplo para mim.

Por fim, agradeço de forma especial à minha esposa Giovana pelo amor e cumplicidade durante este período.

*“Tudo posso naquele que me fortalece.”
(Filipenses 4, 13)*

RESUMO

A expansão da indústria naval mundial trouxe a necessidade pela busca de tecnologia própria para fazer frente à demanda de construção de navios sonda e plataformas de petróleo. A montagem dos painéis dos navios e plataformas é feita manualmente com mão de obra altamente qualificada devido à falta de padronização dos processos e também pela dificuldade das posições de soldagem. Efeitos da distorção das peças soldadas são um fator complicador para a perfeita execução da operação de soldagem, pois dentre várias variáveis envolvidas no processo, o volume correto de material a ser depositado na junta varia à medida em que o cordão é depositado. Além disso, deve-se considerar perdas de material devido à eficiência de deposição do processo FCAW. Neste estudo propõe-se parametrizar o processo de soldagem FCAW para soldagem linear de chapas com chanfro em V onde o volume de material a ser depositado é determinado e avaliado por visão computacional. O primeiro passo consistiu em determinar a eficiência de deposição em cada passe de soldagem através da relação entre o volume de material depositado e o volume de arame fundido para aberturas de raiz entre 3,0 e 9,2 mm e ângulos de chanfro entre 45° e 55°. Para identificar como acontece a distorção foram avaliados três tipos de ancoragem durante a fabricação dos cobre-juntas. Observou-se que a eficiência de deposição variou muito pouco com a geometria do chanfro, mas que ela aumentou para o último passe de deposição. A distorção ocorreu no sentido de fechar a abertura de raiz de forma significativa somente no primeiro passe de deposição. Já o ângulo do chanfro reduziu em todos os passes de deposição. De posse dessas informações, montou-se um algoritmo para estimativa dos volumes reais de material a serem depositados em cada passe de soldagem. A implementação experimental deste algoritmo levou ao preenchimento adequado dos chanfros, produzindo cordões de boa qualidade, sem defeitos de soldagem como falta de fusão, mordedura textura superficial excessiva ou reforço excessivo. Este algoritmo tem grande potencial para implementação em robôs de soldagem lineares que utilizem a visão computacional antes da soldagem e entre os passes de soldagem para avaliar a geometria do chanfro a ser preenchido, devendo então contribuir significativamente para a automatização de processos de soldagem de chapas espessas.

Palavras-chave: FCAW. Soldagem. Visão computacional. Eficiência de deposição. Distorção.

ABSTRACT

The expansion of the world shipbuilding industry has raised the need for searching new technologies to meet the demands involved, particularly for the construction of oil probe ships and offshore platforms. The assembly of the panels of the ships and platforms is done manually using highly qualified workmanship due to the lack of process standardization, as well as the difficult welding positions. Effects of distortion of the welded parts are a complicating factor for the perfect execution of the welding operation, because among several variables involved in the process, the correct volume of material to be deposited in the joint varies as each bead is deposited. In addition, material losses due to the deposition efficiency of the FCAW process should be considered. In this study it is proposed to parameterize the FCAW welding process for linear welding of V-grooved sheets where the volume of material to be deposited is determined and evaluated by computer vision. The first step was to determine the deposition efficiency at each welding pass through the ratio between the volume of deposited material and the volume of molten wire for root gaps between 3.0 and 9.2 mm and bevel angles between 45 ° and 55 °. To identify how distortion occurs, three types of anchorage were evaluated during the manufacture of backing. It was observed that the deposition efficiency varied very little with the chamfer geometry, but that it increased for the last pass. The distortion closed the root gap significantly only for the first, whereas the bevel angle reduced for all deposition passes. Using this information, an algorithm was set up to estimate the actual volumes of material to be deposited for each welding pass. The experimental implementation of this algorithm led to the adequate filling of the chamfers, producing good quality beads, without welding defects such as lack of fusion, undercut, excessive surface texture or excessive reinforcement. This algorithm has great potential for implementation in linear welding robots that use computer vision before welding and between the welding passes to evaluate the geometry of the chamfer to be filled and should therefore contribute significantly to the automation of welding processes of sheets thick.

Key words: FCAW. Welding. Computer vision. Deposition efficiency. Distortion.

LISTA DE ABREVIATURAS

$\Delta\beta$	Distorção angular
δ, e	Espessura da chapa
α_1	Ângulo de chanfro após a soldagem do primeiro passe
α	Ângulo de chanfro
W_n	Largura do cordão de solda
V_n	Volume teórico de material a ser depositado no passe n
Vd_n	Volume efetivo de material depositado no passe n
UC	Altura da última camada
STT	Surface tension transfer
NC	Número de camadas
h_n	Altura do passe n
GMAW	Gas Metal Arc Welding
FCAW	Flux Core Arc Welding
ED	Eficiência de deposição
$DBCP$	Distância entre o bico de contato e a peça
$d_{1'}$	Abertura do chanfro após a soldagem do primeiro passe
d_1	Abertura do chanfro anterior à soldagem
d	Diâmetro do arame
Cp	Corpo de prova
CCC	Curto circuito controlado
b_n	Base maior da área trapezoidal da seção transversal do passe n
A_i	Área da seção transversal do passe i
AC	Altura da camada
$a_{1'}$	Abertura de raiz após a soldagem do primeiro passe
a_1	Abertura de raiz anterior à soldagem
σ_y	Tensão residual longitudinal

σ_x	Tensão residual transversal
V_{sold}	Velocidade de soldagem do trator
V_i	Volume unitário do passe i
V_{fc}	Volume de material fundido corrigido
V_f	Volume de material fundido
V_{alim}	Velocidade de alimentação do arame
$\forall_{cam}$	Volume da camada
$\forall_{af}$	Volume de arame fundido
$\forall_{ad}$	Volume de arame depositado

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	37
Equação 2	37
Equação 3	37
Equação 4	44
Equação 5	44
Equação 6	47
Equação 7	47
Equação 8	47
Equação 9	47
Equação 10	48
Equação 11	48
Equação 12	49
Equação 13	49
Equação 14	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema do processo FCAW	19
Figura 2. Remoção de energia para os diferentes tipos de junta	21
Figura 3. Principais tipos de distorção em soldagem	22
Figura 4. Tipos de tensões residuais	23
Figura 5. Distribuição típica de tensões residuais (a) transversais (σ_x) e (b) longitudinais (σ_y)	24
Figura 6. Influência do calor imposto na distorção angular baseada em modelo matemático	25
Figura 7. Organograma de definição dos grupos de experimentos	30
Figura 8. Diferença entre camada e passe de soldagem	31
Figura 9. Modelo de corpo de prova usado	31
Figura 10. Organograma dos ensaios para medição da eficiência de deposição	32
Figura 11. Metodologia para determinação do número de camadas de soldagem.....	33
Figura 12. Gabarito de montagem dos corpos de prova	34
Figura 13. Padronização dos pontos de ancoragem do cobre-junta: (a) pontos de ancoragem utilizando diferentes parâmetros de soldagem; (b) macrografia relativa à melhor condição de ancoragem.....	35
Figura 14. Pontos de ancoragem utilizados nos experimentos para medição da eficiência de deposição	35
Figura 15. Posições dos cortes dos CPs para análise macrográfica	37
Figura 16. Exemplo de determinação do volume de material fundido por metalografia.....	38
Figura 17. Organograma dos ensaios para avaliação da distorção angular em diferentes condições de ancoragem do cobre junta.....	39
Figura 18. Ancoragens utilizadas na análise da distorção angular: (a) tipo 1 - três pontos de ancoragem; (b) tipo 2 - dois pontos de ancoragem; (c) tipo 3 - cinco pontos de ancoragem	39
Figura 19. Exemplo de medição da distorção angular através de macrografia: (a) Primeiro passe; (b) Terceiro passe	40
Figura 20. Fluxograma para determinação do número de camadas necessárias para preenchimento do chanfro.	41
Figura 21. Chanfro original esquematizado a partir das imagens digitais obtidas da abertura de raiz (a_f) e da abertura do chanfro (d_f) e do valor da espessura da chapa (e).....	41
Figura 22. Vista frontal do chanfro original.....	42
Figura 23. Chanfro com os n passes em função da espessura da chapa	42

Figura 24. Volumes teóricos dos n passes a serem depositados em função do escaneamento de imagens inicial	42
Figura 25. Chanfro com as variáveis necessárias para o cálculo da área para o primeiro passe	44
Figura 26. Esquema do chanfro após deposição do primeiro passe	45
Figura 27. Esquema do escaneamento de imagens de topo após o primeiro passe, através do qual d_1 é medido.	45
Figura 28. Chanfro após a deposição do segundo passe.	46
Figura 29. Chanfro com as variáveis necessárias para o cálculo da área para o terceiro passe	47
Figura 30. Chanfro com as variáveis necessárias para o cálculo da área para o passe n	48
Figura 31. Eficiência de deposição	49
Figura 32. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 1, abertura de raiz de 3mm e ângulo de chanfro de 45°	51
Figura 33. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 2, abertura de raiz de 3 mm e ângulo de chanfro de 45°	53
Figura 34. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 3, abertura de raiz de 3 mm e ângulo de chanfro de 45°	54
Figura 35. Obtenção das dimensões por visão computacional: (a) Imagem inicial do chanfro; (b) montagem experimental para medição do chanfro após deposição do primeiro passe... ..	55
Figura 36. Imagens de cordões produzidos nos ensaios de verificação da metodologia proposta: (a) 3,0 mm, 55° , sem metodologia de correção; (b) 3,0 mm, 55° , com metodologia de correção; (c) 9,2 mm, 55° , sem metodologia de correção; (d) 9,2 mm, 55° , com metodologia de correção.....	56
Figura 37. Macrografias dos cordões abertura de raiz de 3.0 mm e ângulo de chanfro de 55° : (a) sem metodologia de correção dos parâmetros; (b) com a metodologia de correção proposta.....	57
Figura 38. Macrografias dos cordões abertura de raiz de 9,2 mm e ângulo de chanfro de 55° : (a) sem metodologia de correção dos parâmetros; (b) com a metodologia de correção proposta.....	57
Figura 39. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 3, abertura de raiz de 9.2 mm e ângulo de chanfro de 45°	69
Figura 40. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 3, abertura de raiz de 3 mm e ângulo de chanfro de 55°	70
Figura 41. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 3, abertura de raiz de 9.2 mm e ângulo de chanfro de 55°	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de velocidade de soldagem para os diferentes tipos de passes produzidos	36
Tabela 2. Valores de eficiência de deposição (ED) para os diferentes tipos de passes reproduzidos; média ($\bar{x}$) $\pm$ desvio padrão (S).....	49
Tabela 3. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 1, abertura de raiz 3mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, Δd = variação percentual da abertura do chanfro, Δa = variação percentual da abertura de raiz, com base nos respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando-se o sentido de soldagem de e para a.	51
Tabela 4. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 2, abertura de raiz 3mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, Δd = variação percentual da abertura do chanfro, Δa = variação percentual da abertura de raiz, com base nos respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando-se o sentido de soldagem de e para a.	53
Tabela 5. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 3, abertura de raiz 3 mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a.	54
Tabela 6. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 3, abertura de raiz 9.2 mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a.	69
Tabela 7. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 3, abertura de raiz 3 mm e ângulo de chanfro 55°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a.	70
Tabela 8. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 3, abertura de raiz 9.2 mm e ângulo de chanfro 55°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a.	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo Geral	18
1.2 Objetivos específicos	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 Distorções devidas à soldagem.....	20
2.2 Efeito das variáveis de soldagem sobre a distorção	24
2.3 Efeito dos Parâmetros de Soldagem sobre a Eficiência de Deposição	27
2.2 Automação de Soldagem com Eletrodos Consumíveis e Proteção com Gás	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 Determinação da eficiência de deposição (<i>ED</i>).....	32
3.2 Avaliação da distorção angular devido a soldagem	38
3.3 Metodologia de parametrização de soldagem de chapas espessas usando visão computacional	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
5 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE A.	63
APÊNDICE B.	64
APÊNDICE C.	65
APÊNDICE D.	66
APÊNDICE E.	67
APÊNDICE F.....	68
APÊNDICE G.....	69
APÊNDICE H.	70
APÊNDICE I.....	71

1 INTRODUÇÃO

A indústria de construção naval brasileira apresentou crescimento atingindo seu ápice na década de 1970, onde ficou atrás somente do Japão (GITAHY, 2009). Na década seguinte, as crises internacionais do petróleo propiciaram a criação de estaleiros asiáticos com custos menores de produção, o que atingiu diretamente a indústria naval mundial. A abertura do mercado da navegação trouxe em 1990 a concorrência internacional aos estaleiros brasileiros. Ocorreu então uma perda de competitividade outrora conquistada. A indústria naval mundial passou a ser dominada pelos países asiáticos, incluindo Coréia do Sul, Japão e China. Tal indústria despontou devido a fortes investimentos em automação dos estaleiros, garantindo aumento da qualidade dos produtos com menor custo e repetibilidade das operações. Na década atual, vimos uma expansão da indústria petrolífera brasileira, sobretudo após a descoberta da camada do Pré-Sal. Com isso, ocorreu uma busca de tecnologia própria para fazer frente à demanda de construção dos navios sonda e plataformas de extração de petróleo (PASIN, 2002). Problemas conjunturais, políticos e econômicos levaram novamente a uma queda muito significativa da indústria brasileira para a construção de navios sonda e plataformas. Qualquer possibilidade de recuperação deste setor passa necessariamente por um aumento da qualidade técnica e competitividade da construção naval brasileira.

A construção dos navios e plataformas envolve montagem de painéis dos chamados sub-blocos (estruturas primárias) para a formação dos blocos (estruturas maiores que juntas formam a estrutura completa dos cascos das embarcações) (PINTO, ANDERSON, CARDOSO, & STUPELLO, 2007). Nesta etapa, grande parte das soldagens são feitas manualmente devido à falta de padronização dos processos e também ao fato de haver diferentes posições de soldagem, o que dificulta o acesso aos pontos de soldagem. Além disso, os painéis e sub-blocos apresentam alto nível de distorção dimensional devido ao seu processo construtivo. A etapa final da montagem requer o alinhamento para a união dos blocos que compõem a estrutura das embarcações. Como os blocos são estruturas muito grandes, essa etapa é a mais crítica do processo de montagem (PINTO et al., 2007). Os desvios dimensionais das estruturas produzidas nas etapas anteriores devem estar dentro das tolerâncias admitidas para a união dos blocos. Este trabalho de alinhamento das peças consome

muito tempo do processo de montagem, o que é agravado pela necessidade de redução do peso das embarcações para melhorar sua dirigibilidade e também para economia de combustível. Como o processo de soldagem envolve grande transferência de calor às peças a serem soldadas, a otimização das espessuras envolvidas torna mais significativas as alterações dimensionais das peças. Desta forma, a automatização em soldagem tornou-se um meio essencial para suprir tais dificuldades, à medida em que se busca atingir qualidade com redução de defeitos, diminuição de retrabalhos e custos, ou seja, a eficiência do processo. À medida em que se controlam os processos de soldagem através da automação, a qualificação da mão de obra passa a ter outra função, deixando de ser manual para ser operacional de equipamentos de controle. Esta é uma tendência do seguimento, redirecionando profissionais altamente qualificados para funções como por exemplo operação de robôs, buscando processos mais eficientes.

A soldagem industrial requer um controle elevado do processo devido ao grande número de variáveis envolvidas. Muitas dessas variáveis estão inter-relacionadas, ou seja, a alteração de uma implica alteração de outras, o que aumenta a complexidade para monitorar o processo.

Além do alto número de variáveis envolvidas no processo, ocorrem distorções nas peças soldadas, o que não apenas pioram o desempenho do processo como também aumentam seus custos de fabricação (ARAUJO, 2012).

Para se automatizar um processo de soldagem, é necessário preparar corretamente as juntas a serem soldadas, assim como configurar corretamente os parâmetros de soldagem, com a finalidade de garantir a qualidade do produto final. A visão computacional é uma ferramenta que auxilia na análise dimensional da junta e também na inspeção dos cordões de solda produzidos (SILVA, 2016). Com a possibilidade de controles robotizados, através de manipuladores mecânicos, podem ser feitos ajustes precisos dos parâmetros de atuação. A rastreabilidade das operações passa a ser possível devido à repetibilidade dos processos.

Para que a automatização de processos de soldagem seja possível, a preparação das juntas a serem soldadas e a correta configuração dos parâmetros do equipamento são essenciais para garantir a qualidade do produto final. O uso de visão computacional como tecnologia de apoio na análise dimensional da junta a ser

soldada, aliada a um controle robotizado do equipamento, pode auxiliar no correto ajuste dos seus parâmetros de atuação. Isso, além de reduzir tempo e horas-homem trabalhadas, deve permitir a identificação, o registro e a recuperação futura de cada soldagem realizada na planta.

Robôs para Soldagem de juntas chanfradas são hoje importantes ferramentas na indústria de construção e montagem de grandes estruturas metálicas, permitindo a soldagem automatizada de chapas de grande espessura. O uso de soldagem robotizada de chanfros tem se tornado bastante adequado para a automatização de processos tradicionalmente semiautomáticos, como o GMAW (gas metal arcwelding, também conhecido por MIG/MAG) e o FCAW (flux core arc welding, também conhecido por eletrodo tubular). A montagem, fixação e controle da tocha nestes dispositivos torna o sistema versátil e de fácil manutenção.

Apesar dessa versatilidade, a parametrização do processo, a preparação das superfícies a serem soldadas e dos consumíveis e a habilidade própria do soldador são de difícil identificação, rastreamento e registro. Existe dificuldade em customizar os parâmetros da máquina em função das diferentes características da junta a ser soldada, o que requer um operador treinado. Além disso, são necessários ajustes pelo operador durante o processo. Todos estes fatores podem tanto comprometer a qualidade do produto final quanto atrasar a finalização do processo, aumentando seus custos. Essas limitações restringem os ganhos competitivos associados à soldagem robotizada, reduzindo a eficiência do processo.

Uma das etapas fundamentais na automatização de processos de soldagem é a preparação das juntas a serem soldadas. Porém, em virtude de pequenos erros de fabricação ou possíveis desvios durante a fixação das chapas chanfradas, é difícil garantir a repetibilidade das características geométricas da junta. Como a correta configuração dos parâmetros de controle do equipamento depende das características geométricas da junta, isso pode comprometer significativamente a qualidade do produto final.

O uso de visão computacional pode ser uma importante ferramenta como tecnologia de apoio na análise dimensional da junta a ser soldada (STAROVESKI, MAJETIC, UDILJAK, & MIHLJEVIC, 2008). Esta, aliada a um controle robotizado do equipamento, pode auxiliar no correto ajuste dos seus parâmetros de atuação, bem

como reduzir tempo e horas-homem trabalhadas.

Dentro deste contexto, foi firmado um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento entre a empresa Petrobras, o Centro de Ciências Computacionais (C3) da Furg e a Escola de Engenharia da Furg, denominado projeto Ocelus, com o objetivo de utilizar a visão computacional para automatizar processos de soldagem linear FCAW com vistas à produção naval. A presente pesquisa insere-se neste projeto maior com o objetivo de fornecer uma proposta metodológica para fazer o ajuste automático dos parâmetros de soldagem.

O processo de soldagem escolhido para este estudo é o FCAW (Flux Core Arc Welding), também conhecido por Eletrodo Tubular. Isto porque é um processo que vem sendo utilizado com maior frequência na indústria naval e petrolífera pois o fluxo interno do arame apresenta benefícios (RADAJ, 2003). Quando se usa proteção gasosa, o fluxo interno tem função desoxidante e introduz alguns elementos de liga à junta. Já o gás introduzido encarrega-se das funções de proteção do arco e ionização da atmosfera. O processo FCAW com gás de proteção é apropriado para produção de peças pequenas e soldagem de elevada penetração; no processo sem proteção a gás, há uma diferenciação no interior da tocha e o arame é denominado auto protegido, ou seja, o próprio eletrodo possui um fluxo interno que se encarrega de auxiliar na proteção da poça de fusão. Além disso, o processo FCAW apresenta alta produtividade devido à utilização de arames contínuos, além de resultar em boa qualidade de solda depositada, alta taxa de deposição, cordões com boa aparência e contornos satisfatórios. No caso de eletrodo auto protegido, o processo é mais tolerante a variação do ambiente, ou seja, permite que a soldagem seja feita ao ar livre. O processo FCAW possui ainda maior tolerância para o desalinhamento da tocha devido ao seu arco ser mais largo comparativamente ao processo GMAW (ARAUJO, 2012). Com isso, apresenta redução de defeitos por falta de fusão.

No presente trabalho, através do uso da visão computacional por imagem, pretende-se fazer a análise dimensional das juntas soldadas, a qual será utilizada na parametrização do processo FCAW. Dessa forma, os objetivos são definidos como:

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia para parametrizar o processo de soldagem FCAW em soldagem linear de chapas espessas com chanfro em V, de forma a auxiliar a sua automatização utilizando visão computacional por imagem.

1.2 Objetivos específicos

Para atingir este objetivo geral destacam-se quatro objetivos específicos:

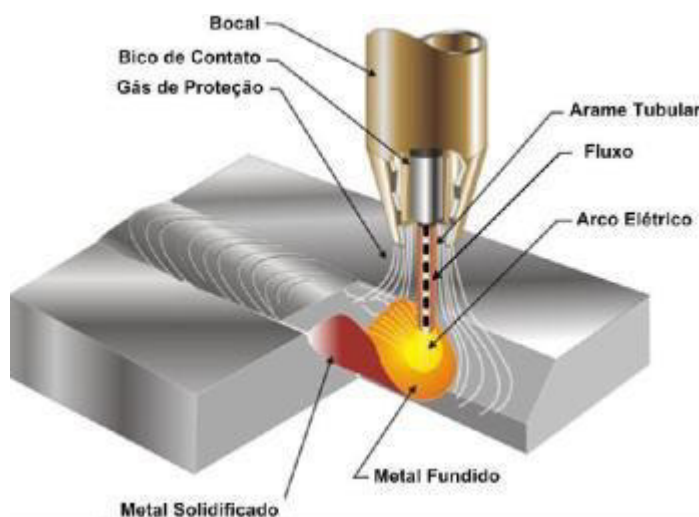
- Determinar a Eficiência de Deposição de um cordão de soldagem durante soldagem automatizada linear de uma chapa espessa com chanfro em V pelo processo FCAW considerando-se o volume de material depositado e o volume de arame fundido;
- Aceitando-se que ocorram distorções na soldagem (mas controlando-se o nível de restrição), gerar uma proposta metodológica para fazer um ajuste automático dos parâmetros de soldagem através da visão de cada passe de soldagem;
- Analisar a distorção do chanfro ao longo do cordão de solda alterando-se as restrições de movimento do corpo de prova (ancoragem do cobre-junta);
- Com base nos resultados da eficiência de deposição e da distorção angular, gerar um algoritmo que estime os volumes reais de material a ser depositado em cada passe de solda. Este algoritmo será utilizado pelo robô de soldagem do projeto Ocelus, permitindo que os parâmetros de soldagem sejam ajustados em cada passe para que a velocidade de soldagem seja corrigida de forma que o chanfro seja completamente preenchido e a soldagem não apresente defeitos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo analisa as contribuições teóricas que serão utilizadas para a estruturação deste estudo. O processo a ser utilizado neste trabalho é o FCAW (Flux Cored Arc Welding), ou soldagem por eletrodo tubular.

O processo FCAW utiliza proteção do arco elétrico através do fluxo interno do arame e também proteção complementar através de um gás de proteção. A Figura 1 mostra esquematicamente o processo. Observa-se que, além de proteger o arco elétrico da contaminação devido à atmosfera, o fluxo contido na parte interna do arame também atua como agente desoxidante formador de escória, além de acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a sua solidificação (FORTES, 2004). Por estes motivos, o processo FCAW trouxe melhorias significativas nas condições de operação e qualidade de solda, quando surgiu em meados do século passado, tornando-se uma excelente opção de soldagem com grande grau de acabamento.

Figura 1. Esquema do processo FCAW



Fonte: (ARAUJO, 2012).

Porém, nem todo o material fundido transforma-se em material realmente depositado no cordão de solda. Ocorrem perdas de material durante o processo, que podem ser medidas através da eficiência de deposição.

Pode-se afirmar, portanto que em um processo de soldagem, a eficiência de deposição serve para medir a quantidade de arame fundido que realmente transformou-se em material depositado no cordão de solda. Isto porque ocorrem perdas no processo, tais como respingos, escória, fuligem e até ebulição de material líquido.

No estudo feito por GARCIA and SCOTTI (2011), a eficiência de deposição foi medida através da pesagem dos corpos de prova antes e depois da soldagem (com a devida remoção dos respingos). Portanto, o estudo levou em consideração a taxa de deposição mássica de material considerando a taxa de fusão do arame.

No presente trabalho, propõe-se medir a eficiência de deposição como a relação entre o volume de arame realmente depositado e o volume de material fundido do arame. Porém, durante o processo de soldagem, a ocorrência de distorções pode modificar o volume real do chanfro a ser preenchido, o que terá grande influência sobre a automação de processos de soldagem. Desta forma, esta revisão foi dividida em algumas sub-sessões, que servirão de embasamento teórico para o presente trabalho. Inicialmente, serão apresentados conceitos fundamentais sobre as distorções em soldagem. Em seguida, as principais variáveis que influenciam a distorção serão discutidas. Assumindo-se que distorções ocorrem em processos de soldagem, apresenta-se então um apanhado sobre o efeito de algumas variáveis de soldagem sobre a eficiência de deposição. Finalmente, apresentam-se alguns aspectos relevantes para a automação de processos de soldagem linear, que é o principal foco do presente trabalho.

2.1 Distorções devidas à soldagem

Segundo WANG, RASHED, SERIZAWA, MURAKAWA, and ZHANG (2008), a definição de distorção envolve a expansão não uniforme e a contração do cordão de solda e do metal de base adjacente durante o ciclo de aquecimento e resfriamento do processo de soldagem.

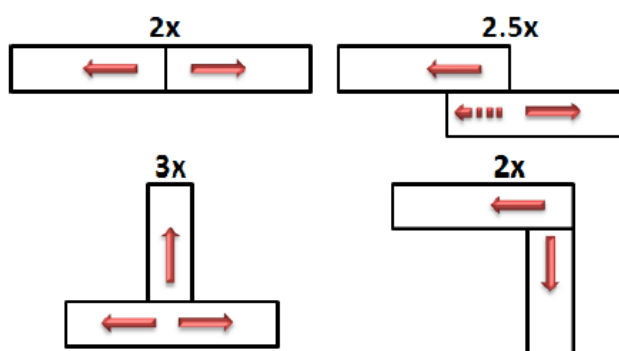
Durante o processo de soldagem ocorre uma transferência e consequente condução de calor através do material soldado. Surge então uma distribuição de

temperatura não uniforme ao longo de todo o material. Como consequência desta distribuição não uniforme, ocorrerá dilatação e contração de forma desigual no material, ocasionando uma distorção na estrutura e acúmulo de energia interna, que resultam nas tensões residuais.

As distorções ocorrem tridimensionalmente nos corpos soldados e sua avaliação torna-se mais difícil à medida em que aumenta a complexidade de suas geometrias e as diferentes formas de ancoragem. Além disso, deve-se também levar em consideração a forma de remoção da energia térmica entregue à junta através de materiais com condutividades térmicas diferentes e os tipos de juntas.

A Figura 2 apresenta a remoção de energia do local da solda para o resto do material considerando diferentes tipos de juntas.

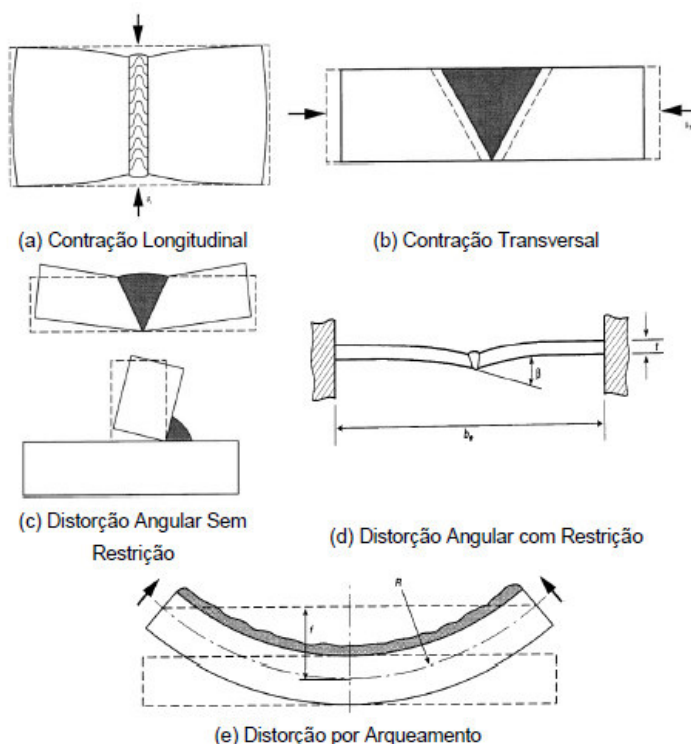
Figura 2. Remoção de energia para os diferentes tipos de junta



Fonte: (ARAUJO, 2012)

Para facilitar o estudo da distorção, que é tridimensional, ARAUJO (2012) classificou a distorção em diferentes tipos analisando seu efeito separadamente. Na Figura 3 os principais tipos de distorção que ocorrem durante e depois do processo de soldagem são ilustrados, conforme proposto por RADAJ (2003).

Figura 3. Principais tipos de distorção em soldagem

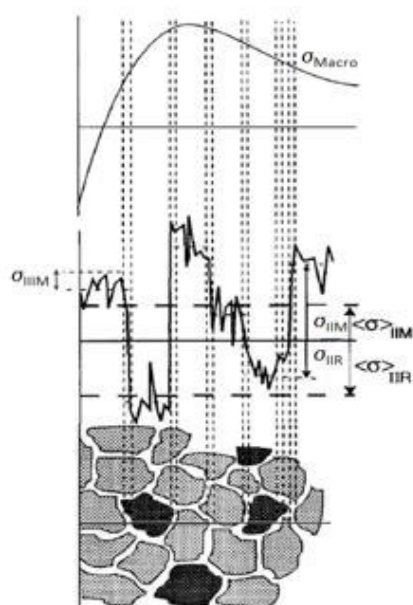


Fonte: Adaptado de RADAJ (2003)

As tensões residuais estão intimamente ligadas às distorções, uma vez que elas surgem quando as deformações que deveriam ocorrer são restringidas.

Para RADAJ (2003), pode-se considerar tanto a distorção como as tensões residuais como defeitos de qualidade da soldagem. O ciclo completo de soldagem causa alguns tipos de tensões residuais, como tensões térmicas, tensões devido a deformação plástica e tensões devido a transformação micro estrutural. Além disso, as tensões residuais podem ser classificadas como macroscópicas, microscópicas e de nível atômico, conforme detalhado na Figura 4.

Figura 4. Tipos de tensões residuais



- Macroscópicas: tensões que abrangem vários grãos e estão em equilíbrio quando estendidas em nível global do material;

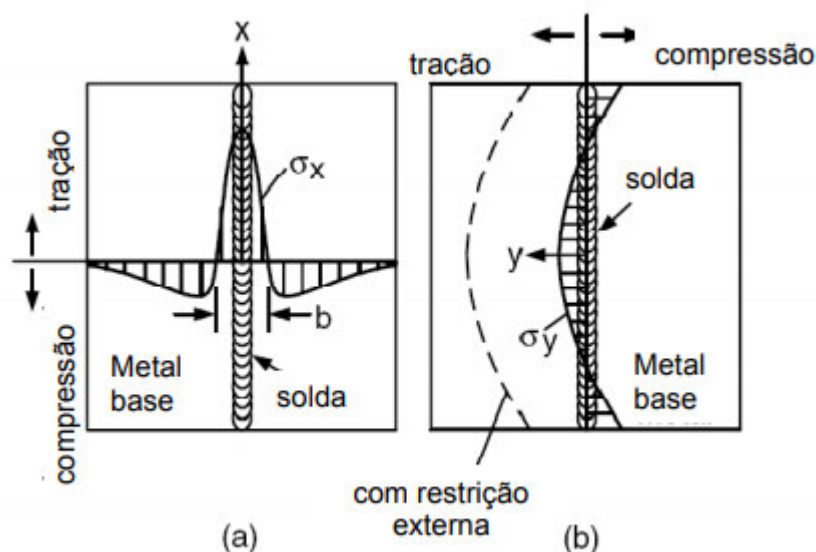
- Microscópicas: são aproximadamente homogêneas ao longo de um grão ou de parte de um grão e que estão em equilíbrio para uma zona do material abrangendo vários grãos;

- Nível Atômico: estando em equilíbrio só ao longo de regiões muito reduzidas de um grão.

Fonte: (WITHERS & BHADSHIA, 2001) (Modificado)

Estas tensões residuais distribuem-se ao longo das três dimensões da chapa como tensões de compressão e tração. Na direção longitudinal, surgem tensões devido ao resfriamento. Na direção transversal, ocorrem tensões devido à contração do cordão ao resfriar-se. Na direção transversal perpendicular ao plano da chapa, ocorrem tensões no interior da chapa quando a espessura é grande. As tensões causadas pelo processo de soldagem plana de chapas com chanfro em “V” são descritas na Figura 5.

Figura 5. Distribuição típica de tensões residuais (a) transversais (σ_x) e (b) longitudinais (σ_y)



Fonte: (KOU, 2002)

Em peças chanfradas usam-se chapas chamadas cobre-juntas para facilitar a execução do passe de raiz. Como a penetração total é exigida por norma e o espaço entre as peças (chamado abertura de raiz) deve ser preenchido totalmente, o cobre-junta precisa ser utilizado sendo fixado nas peças a serem soldadas anteriormente à soldagem. A forma de fixação do cobre-junta nas peças definirá um tipo de ancoragem imposto ao corpo.

As distorções geradas em chapas são função do nível de restrição às deformações provocadas pela soldagem. Desta forma, experimentos de soldagem voltados à análise de distorção em soldagem devem utilizar condições de ancoragem padronizadas, de forma que os resultados obtidos possam ser monitorados para análise.

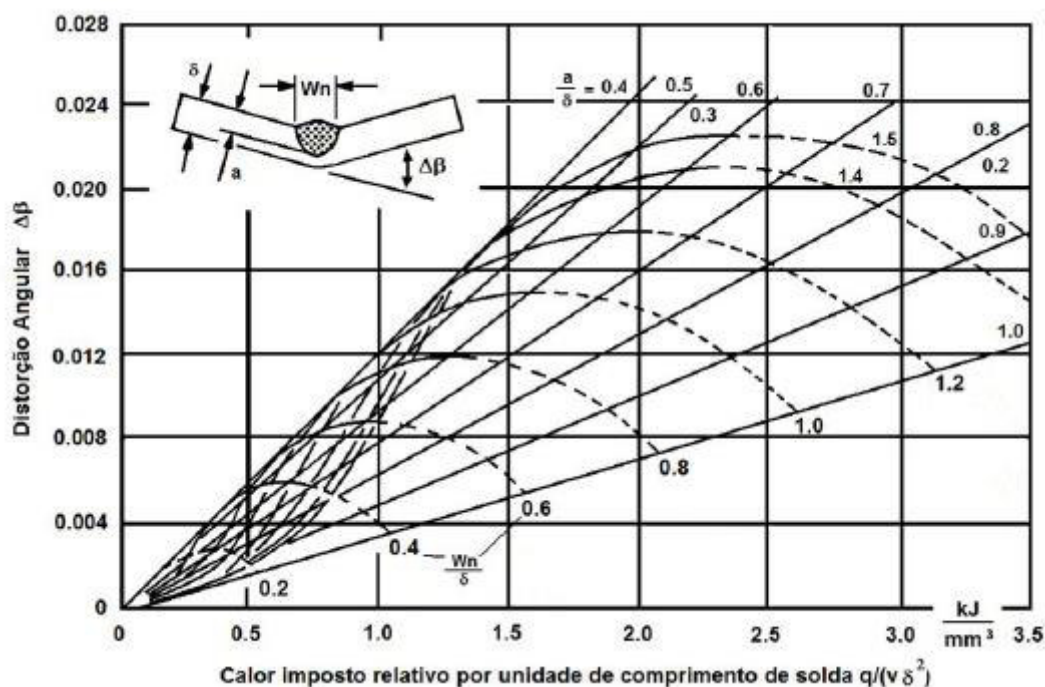
2.2 Efeito das variáveis de soldagem sobre a distorção

Entre os inúmeros fatores que afetam o tipo e a magnitude das distorções em soldagem, destacam-se os parâmetros de soldagem, conforme MURUGAN and GUNARAJ (2005) e a geometria da junta e da chapa.

Em seu estudo, RADAJ (2003) apresentou formulação matemática para

verificar a influência do formato do cordão e do calor imposto na distorção angular, conforme indicado na Figura 6.

Figura 6. Influência do calor imposto na distorção angular baseada em modelo matemático



Fonte: Adaptado de (RADAJ, 2003)

Onde:

Wn – largura do cordão de solda

a – penetração

δ – espessura da chapa

Em seu estudo, SCHENK, Richardson, Kraska, and Ohnimus (2009) consideraram a interação entre a peça soldada e as pinças de fixação da peça de junta em “T”. As pinças influenciam fortemente no sistema térmico de soldagem, principalmente no resfriamento. Os autores monitoraram a pressão exercida na peça pelas pinças. Quanto maior o tempo de fixação da pinça, menor será a distorção do material.

Segundo TENG, FUNG, CHANG, and YANG (2001), quanto mais espesso o flange da junta, maior será o nível de tensões residuais no material, pois ocorrerá uma distribuição de temperatura não uniforme ao longo da espessura e consequentemente dilatação não uniforme, gerando tensões no material. Com relação à penetração da

solda (ou calor imposto), quanto maior a penetração, menor será a distorção angular verificada. Existe uma distância ótima em que a distorção angular é minimizada com a restrição. Quanto maior a restrição, menor será a distorção angular. Quanto mais se restringe a distorção angular, mais aparece a distorção de arqueamento. A distorção angular também é afetada pelos tipos de chanfro e volumes do cordão, sendo que quanto maior o ângulo de chanfro, menor a distorção resultante.

Para reduzir as distorções e tensões residuais usa-se o método de redução do calor imposto no material (controle do calor imposto à peça). Um exemplo deste método foi testado por DERUNTZ (2003), que evidenciou algumas vantagens da utilização de fontes do tipo STT (Surface Tension Transfer), que é o nome comercial da Lincoln Electric para o processo derivativo CCC (Curto Circuito Controlado). Considerando-se transferência metálica do tipo curto circuito, pode-se afirmar que este tipo de fonte baseia-se na garantia de que o contato entre a gota metálica e a poça de fusão ocorra em baixo nível de corrente. Isto resulta no fornecimento de uma corrente responsável pela transferência da gota e na redução da corrente antes que a ponte metálica se rompa e a gota seja transferida.

Em seu estudo, MIRANDA and BRACARENSE (2007), usando o processo FCAW robotizado, mostraram que é possível utilizar resfriamento da poça de fusão para redução da distorção angular. Foram usadas chapas de baixo carbono e refrigeração forçada da poça de fusão com CO₂. As distorções angulares foram monitoradas com um sensor ótico (laser). No início da soldagem a chapa distorceu-se no sentido negativo (expansão) e, posteriormente começou a distorcer-se no sentido positivo (contração), e em poucos segundos após a soldagem, a distorção foi estabilizada. Através do resfriamento com CO₂ as tensões térmicas geradas pela solda proporcionaram uma redução significativa nas tensões compressivas nas extremidades das chapas afastadas do cordão de solda, ocorrendo também um aumento da largura da zona de tração próxima ao cordão de solda, gerando uma menor distorção da chapa devido ao resfriamento.

Um método bastante utilizado para diminuir as distorções em soldagem é o método de sequência de soldagem (TENG et al., 2001). Neste método aplica-se a soldagem intercalando os cordões de forma a tornar a distribuição do calor mais homogênea, conseqüentemente diminuindo as distorções.

XU, LIU, WANG, YANG, and FANG (2009) propuseram usar forças de impacto eletromagnéticas sem contato físico para o controle de flambagem e tensões residuais em chapas soldadas, as quais foram dimensionadas usando o método dos elementos finitos.

2.3 Efeito dos Parâmetros de Soldagem sobre a Eficiência de Deposição

No processo de soldagem existem muitas variáveis que, ajustadas de forma correta, irão definir as características do processo. Essas variáveis, também chamadas de parâmetros de soldagem, juntamente com a geometria do chanfro, influenciam significativamente a eficiência de deposição. Existem vários modos de transferência metálica que são função das variáveis do processo. Para o processo de Eletrodo Tubular (FCAW) o modo de transferência é chamada Guiada por Escória (menos afetada pela corrente), combinada com a transferência globular e por explosão (SOUZA, 2010).

Os parâmetros de soldagem alteram diretamente o modo de transferência, definem a quantidade de escória produzida no processo, além da penetração do cordão, alterando portanto a eficiência de deposição. Desta forma, busca-se ajustar tais parâmetros para atingir a maior eficiência possível.

Segundo SOEIRO JUNIOR, DA LUZ, and BRANDI (2017), alguns parâmetros influenciam diretamente na eficiência de deposição, como: Tensão desoldagem, corrente de soldagem, velocidade de soldagem, tecimento, geometria da junta e outros. Em seu experimento foram medidas taxas de deposição para cordões se solda sobre chapa sem chanfro para eletrodos com alma cheia e tubulares. O autor concluiu que o arame tubular apresentou em média uma eficiência de deposição em torno de 81% contra 93% do arame maciço. Esta diferença ocorre principalmente devido à produção de escória proveniente dos fluxos do eletrodo tubular.

As variáveis do processo de soldagem, como corrente e tensão, influenciam diretamente na formação do cordão de solda. O tipo de transferência metálica também é função destas variáveis ditando aspectos operacionais do processo como: geração de fumo e respingos.

Segundo SCOTTI and PONOMAREV (2008), aumentos de corrente proporcionam maiores taxas de consumo de arame, mas também geram cordões com maior penetração e mais largos.

Comparando-se a transferência metálica em arames maciços com arames tubulares, observa-se que no arame maciço toda a seção transversal conduz corrente (círculo) e no arame tubular, somente a fita metálica que envolve o fluxo é responsável por esta condução (anel). Resulta assim, numa maior densidade de corrente e numa maior ação do efeito joule sobre a taxa de fusão (GARCIA & SCOTTI, 2011).

Segundo NORRISH (1992), arames tubulares rutilicos quando submetidos a altos valores de corrente apresentam transferência metálica do tipo goticular (spray), onde parte do fluxo forma uma camada de escória na superfície da gota, outra parte do fluxo se decompõe formando gases de proteção e o restante do fluxo é transferido à poça de fusão formando uma camada de escória protetora.

Já para (STARLING, MODENESI, & BORBA, 2009), os arames tubulares rutilicos adquirem diferentes comportamentos com o aumento da corrente elétrica. Em correntes mais baixas observou uma transferência goticular com presença de alguns curto-circuitos.

No processo FCAW a gota e o fluxo são transferidos para a poça de forma independente, onde o fluxo fundido forma uma coluna viscosa na direção da poça, a qual parece retardar a transferência de gota para a poça. Com o aumento da corrente elétrica, a transferência passa a ser goticular (sem curtos), mas o fluxo continua tocando a poça. Com a corrente elétrica ainda maior, a coluna de fluxo não mais toca a poça, formando uma gota que se transfere ainda pelo modo goticular.

Quando se utiliza soldagem com dois gases, a transferência ainda ocorre pelo modo goticular com formação de coluna de fluxo, mas observa-se o diâmetro médio da gota reduzido e a frequência de transferência aumentada com o aumento da corrente elétrica (STARLING et al., 2009).

Considerando-se o processo FCAW, observa-se que devido às suas características, tem grande capacidade de ser aprimorado com o objetivo de trabalhar com os melhores parâmetros para se atingir os melhores resultados observando a repetibilidade, a qualidade do acabamento e também a eficiência do processo. Ou

seja, a automatização do processo FCAW é uma tendência da indústria naval, visto que se busca extrair resultados ótimos de todo o processo.

2.2 Automação de Soldagem com Eletrodos Consumíveis e Proteção com Gás

Pode-se dividir a automação em soldagem em duas grandes categorias: soldagem mecanizada e soldagem automática (BROERING, 2005). Na soldagem mecanizada o operador deve posicionar manualmente a peça a ser soldada para que um equipamento possa realizar a solda. O equipamento controla o movimento da tocha de soldagem ou da peça a ser soldada, bem como regula os parâmetros de soldagem, com o objetivo de garantir qualidade e repetibilidade da solda. Após a conclusão da soldagem o operador retira a peça manualmente.

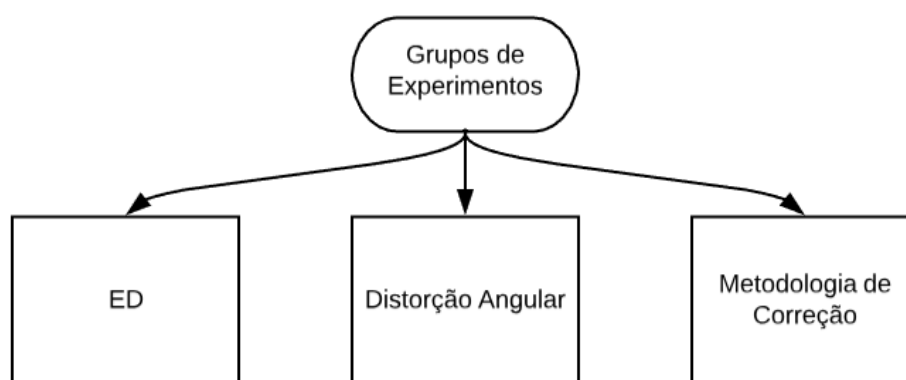
Na soldagem automática utiliza-se uma máquina dedicada, ou um conjunto delas para uma determinada aplicação. Dependendo do tipo de aplicação, o operador pode ser dispensado, visto que nesta categoria de soldagem o equipamento pode carregar a peça, posiciona-la, realizar a soldagem e também monitorar a qualidade da solda realizada.

A automação em processos de soldagem consiste também em regular os vários parâmetros envolvidos no processo, tais como: velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem, *DBCP* (distância entre o bico de contato e a peça), tensão da fonte, vazão do gás de proteção. Com relação aos gases injetados na região de soldagem, eles possuem a finalidade principal de proteger a poça e a gota em transferência. Além disso eles têm a função de estabilizar o arco e características como de influenciar sobre o modo de transferência metálica, na geometria, nas propriedades mecânicas e nas características metalúrgicas do cordão de solda.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De forma geral, este trabalho englobou três grupos de experimentos utilizando corpos de prova com dimensões e ancoragens padronizadas, conforme esquematizado na Figura 7. O primeiro grupo de experimentos serviu para determinar a eficiência de deposição da soldagem por passe depositado em função da geometria do chanfro. O cálculo da eficiência de deposição é fundamental para o posterior cálculo automático da velocidade de soldagem em função da geometria do chanfro a ser preenchido. O segundo grupo de experimentos analisou a distorção angular com base nos diferentes tipos de ancoragem impostos às chapas através da fixação do cobre junta. Estes experimentos serviram para auxiliar no entendimento de como acontece a distorção para o tipo de chanfro estudado em diferentes condições de restrição. O último grupo de experimentos objetivou a elaboração de uma metodologia para correção automática dos parâmetros de soldagem baseado na medição do volume de material a ser preenchido através de visão computacional, tanto da geometria inicial do chanfro quanto da geometria do chanfro após cada passe de soldagem.

Figura 7. Organograma de definição dos grupos de experimentos

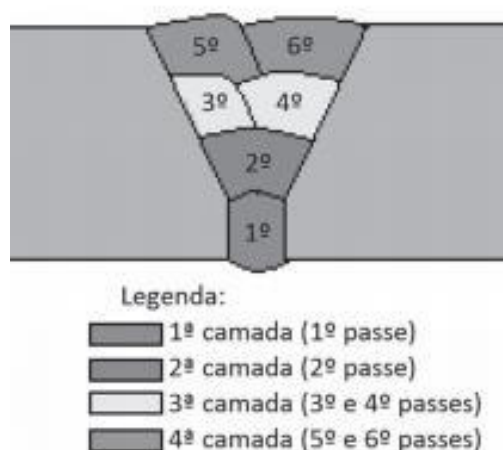


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)
Onde, *ED* - eficiência de deposição

A metodologia a ser desenvolvida neste trabalho destina-se ao preenchimento de chanfros em V de chapas espessas de forma que cada camada de solda seja depositada em um único passe, o que não é facilmente conseguido em soldagens manuais. Conforme mostrado na Figura 8, *camada de soldagem* é a deposição de um

ou mais passes consecutivos situados num mesmo plano e *passee de soldagem* é a projeção unitária da soldagem ao longo de uma junta (PAIVA et al., 2013). No presente trabalho, como cada camada contém um único passe, a largura do cordão para permitir o preenchimento adequado da largura do chanfro em cada passe é controlada pela amplitude de tecimento.

Figura 8. Diferença entre camada e passe de soldagem



Fonte: Adaptado de (PAIVA et al., 2013)

O processo de soldagem adotado neste grupo de experimento foi o FCAW utilizando CO₂ como gás de proteção com vazão regulada de 16 l/min. Os corpos de prova foram feitos de aço de baixo carbono ASTM-A36 com largura de 200 mm, comprimento 250 mm, e espessura de 12,7 mm. O cobre-junta tinha largura de 25,4 mm, espessura de 9,5 mm e comprimento de 270 mm, conforme a Figura 9.

Figura 9. Modelo de corpo de prova usado



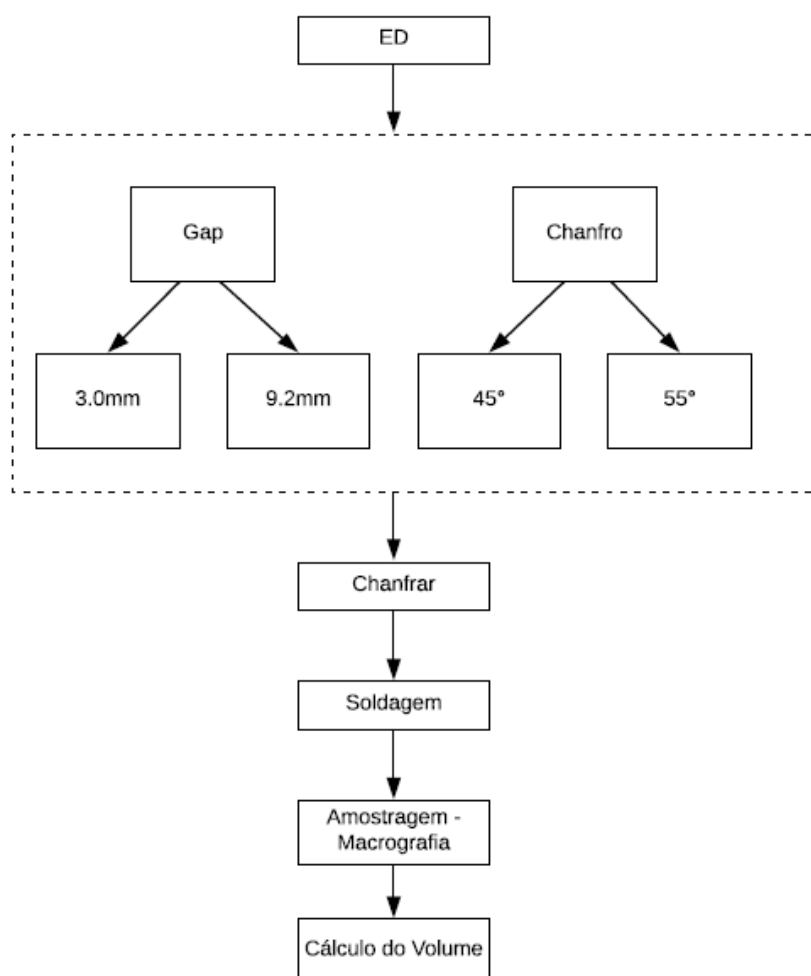
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Na sequência, os experimentos relativos a cada etapa do trabalho são detalhados separadamente.

3.1 Determinação da eficiência de deposição (*ED*)

Neste grupo de experimentos, partiu-se da hipótese que a eficiência de deposição (*ED*) possa variar com a geometria do chanfro e com o passe a ser realizado. Assim, a eficiência de deposição foi medida para diferentes geometrias de chanfro e para cada passe necessário ao preenchimento adequado do chanfro, conforme esquematizado na Figura 10.

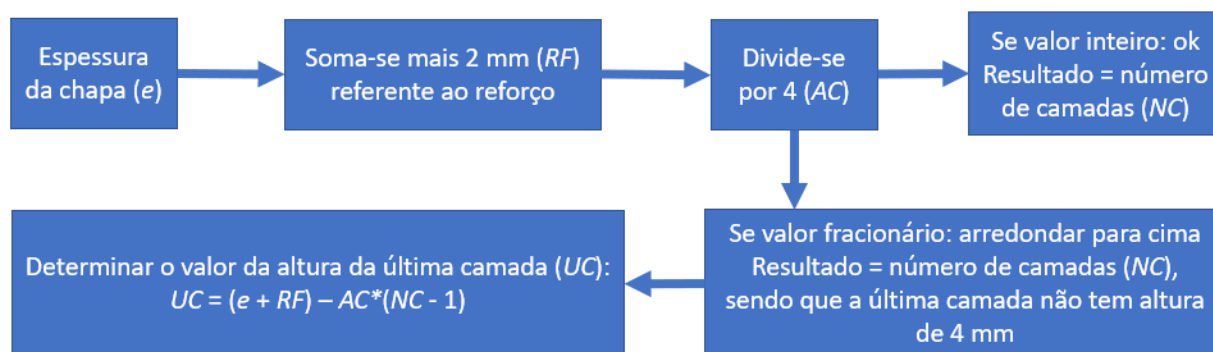
Figura 10. Organograma dos ensaios para medição da eficiência de deposição



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Para tanto, os corpos de prova possuíam as mesmas dimensões citadas anteriormente, com um chanfro em V na parte central para receber a soldagem. As diferenças entre as geometrias dos corpos de prova foram a abertura de raiz (abertura inferior do chanfro) e o ângulo do chanfro. Foram utilizados dois valores de abertura de raiz (3,0 mm e 9,2 mm) e de ângulos de chanfro (45° e 55°). Dentro da metodologia utilizada, alguns parâmetros de soldagem foram fixados: tensão de 30 V, tecimento de soldagem com amplitude igual à largura total da camada a ser soldada e velocidade de alimentação do arame entre 12, 13 e 14 m/min, sendo 12 m/min para o passe de raiz, 14 m/min para o passe de acabamento e 13 m/min para os demais passes. A utilização destes parâmetros fixos foi feita com base em experimentos prévios realizados pelo parceiro industrial no início deste trabalho, a extinta empresa Engevix. Nestas condições impostas para este experimento e, com base em informações do parceiro industrial prévio, partiu-se da premissa que cada camada deveria ter uma espessura de 4 mm. Assim, como utilizou-se uma chapa de 12,7 mm de espessura e considerando-se um reforço máximo de 3,0 mm, conforme estabelecido pela norma AWS (2010), seriam necessários quatro passes para preenchimento da junta. Desta forma, 16 corpos de prova foram utilizados para a medição da *ED*, sendo quatro com abertura de raiz 3,0 mm e ângulo 45°, quatro com abertura de raiz 3,0 mm e ângulo 55°, quatro com abertura de raiz 9,2 mm e ângulo 45° e quatro com abertura de raiz 9,2 mm e ângulo 55°. O número de passes necessários foi determinado em função da espessura da chapa a ser soldada, conforme descrito no esquema apresentado na Figura 11.

Figura 11. Metodologia para determinação do número de camadas de soldagem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Onde:

e – espessura da chapa

AC – altura da camada

NC – número de camadas

UC – altura da última camada

Os corpos de prova foram usinados e montados com rigoroso critério dimensional, visto que dever-se-ia reproduzir as mesmas condições de soldagem para todos eles. O corte das chapas foi feito por plasma e os chanfros confeccionados na plaina.

A fixação do cobre-junta nos corpos de prova foi realizada utilizando-se o processo MIG/MAG, fonte modelo Lincoln Electronic LF33, a qual possui um temporizador para controle da abertura de arco. O processo de ancoragem precisava ser padronizado para garantir a repetibilidade do experimento. Para isso, na montagem dos corpos de prova utilizou-se o mesmo gabarito que garantiu condições idênticas de montagem para todos os corpos de prova, pois impunha as mesmas condições de ancoragem e consequentes tensões residuais de montagem, conforme Figura 12.

Figura 12. Gabarito de montagem dos corpos de prova

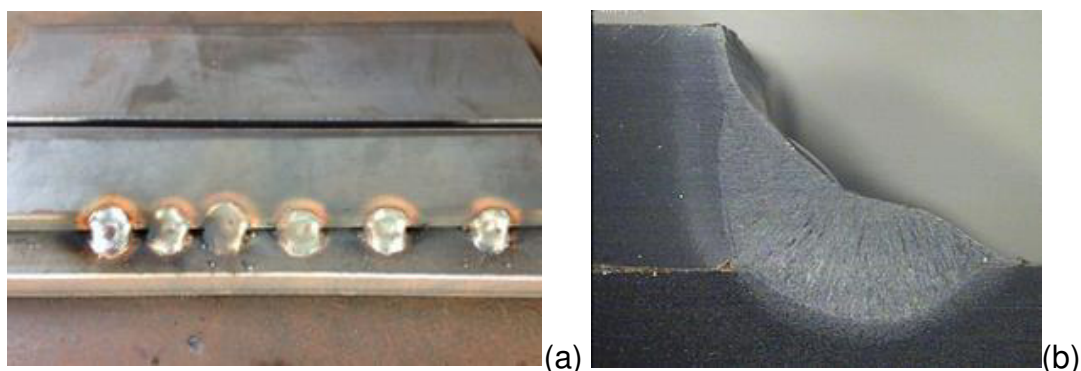


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

A padronização dos corpos de prova não depende somente da posição dos pontos de solda para montagem dos cobre-juntas, mas também da ancoragem efetiva que eles proporcionam pois, alguns testes preliminares levaram à perda de corpos de prova devido a ancoragem inadequada. Foram realizados alguns testes com os

pontos de soldagem do cobre-junta nas chapas utilizando diferentes parâmetros de soldagem, conforme mostrado na Figura 13(a). Após estas soldagens, foram realizados cortes transversais e preparação metalográfica para caracterização visual da qualidade do ponteamto. Esta análise identificou uma condição que levou a uma ancoragem homogênea, tanto do cobre-junta quanto da chapa, conforme mostrado na Figura 13(b). Os resultados destes experimentos levaram à definição dos seguintes parâmetros de soldagem para a realização da ancoragem: Velocidade de alimentação = 5 m/min; tempo de abertura do arco = 4 s; tensão da fonte = 26 V e corrente = 200 A.

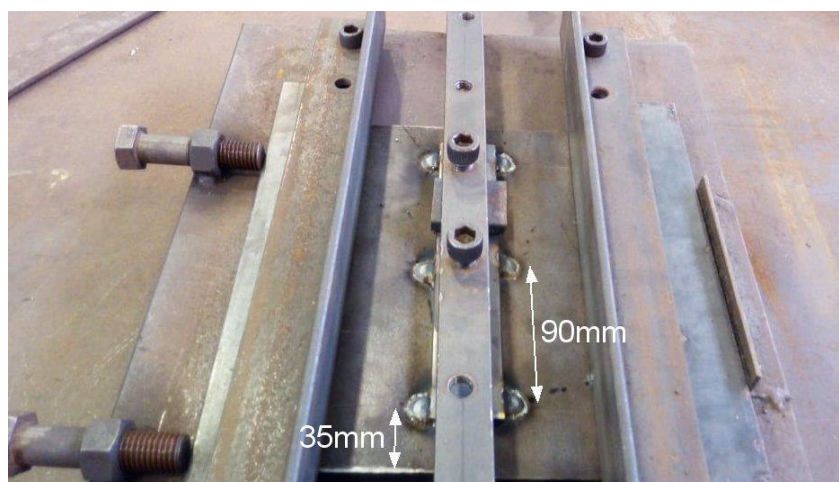
Figura 13. Padronização dos pontos de ancoragem do cobre-junta: (a) pontos de ancoragem utilizando diferentes parâmetros de soldagem; (b) macrografia relativa à melhor condição de ancoragem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

O posicionamento dos pontos de ancoragem ao longo do comprimento do chanfro é apresentado na Figura 14.

Figura 14. Pontos de ancoragem utilizados nos experimentos para medição da eficiência de deposição



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

As velocidades de soldagem em casa passe foram calculadas de forma a garantir o preenchimento adequado do chanfro. Para tanto, a abertura da raiz e a largura do cordão foram medidos em cada passe com um paquímetro, de forma a permitir o volume de material a ser preenchido em cada passe (V_{cam}). Assim, foi possível calcular a velocidade de soldagem em cada passe através da Eq.1. Os valores utilizados de velocidade de soldagem através destes cálculos são apresentados na Tabela 1.

$$V_{sold} = \frac{\pi d^2 V_{alim}}{4V_{cam}} \quad (1)$$

Tabela 1. Valores de velocidade de soldagem para os diferentes tipos de passes produzidos

	Abertura de raiz 3mm							
	45°				55°			
	passe1	passe2	passe3	passe4	passe1	passe2	passe3	passe4
Corpo de Prova	(CP01)	(CP02)	(CP03)	(CP04)	(CP05)	(CP06)	(CP07)	(CP08)
Vel Soldagem (m/min)	0,729	0,526	0,396	0,528	0,668	0,460	0,332	0,437
	Abertura de raiz 9.2mm							
	45°				55°			
	passe1	passe2	passe3	passe4	passe1	passe2	passe3	passe4
Corpo de Prova	(CP09)	(CP10)	(CP11)	(CP12)	(CP13)	(CP14)	(CP15)	(CP16)
Vel Soldagem (m/min)	0,313	0,291	0,250	0,363	0,301	0,269	0,222	0,315

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Para o cálculo da eficiência de deposição, este trabalho compara o volume de arame depositado no cordão de solda com o volume de arame fundido no processo. Para esse cálculo leva-se em consideração que nem todo o volume de arame fundido (V_{af}) transforma-se em cordão depositado na forma de solda (V_{ad}), conforme mostrado na Eq.2.

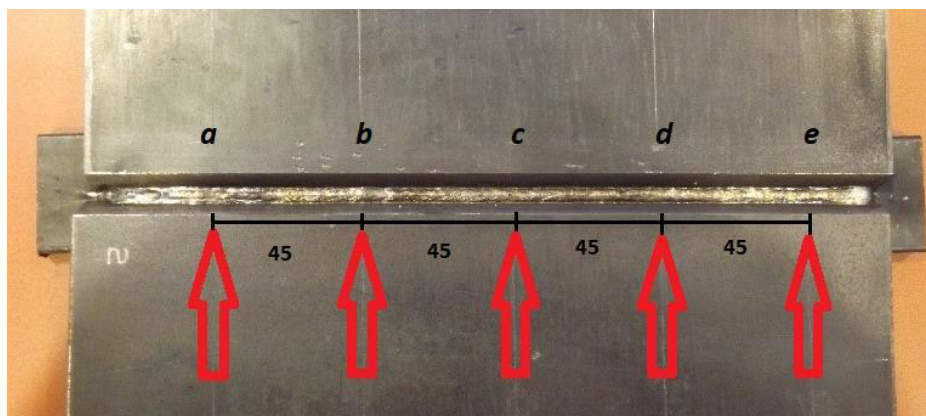
$$ED = \frac{V_{arame\ depositado}}{V_{arame\ fundido}} = \frac{V_{ad}}{V_{af}} \quad (2)$$

Onde, o volume de arame fundido é dado pela Eq.3

$$V_{af} = \frac{\pi d^2 V_{alim}}{4V_{sold}} \quad (3)$$

O volume de arame fundido foi avaliado por análise macrográfica. Para isso, cortou-se todos os corpos de prova em cinco posições, conforme indicado na Figura 15.

Figura 15. Posições dos cortes dos CPs para análise macrográfica



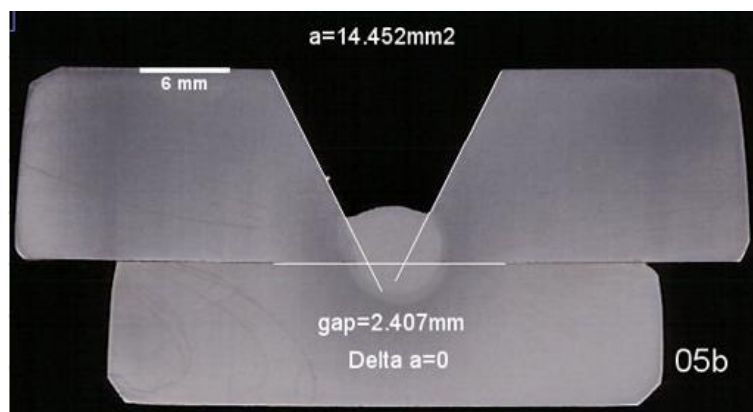
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Além de verificar a sanidade da junta, isto é, se ocorreram defeitos de soldagem como falta de penetração na solda ou mordedura, a análise macrográfica serviu para medir a área de material realmente depositado na junta.

A preparação das amostras para essa análise passou por alguns processos de usinagem. O corte das amostras utilizou corte a plasma para os cortes de maiores dimensões. Os cortes de menores dimensões foram feitos utilizando disco de corte refrigerado, de forma a gerar cinco amostras por corpo de prova. Em seguida, as amostras foram lixadas com o objetivo de remover os desnivelamentos da superfície da amostra, tornando-a plana, lisa e isenta de incrustações. Foi usado o processo de lixamento manual e úmido devido ao tamanho da amostra e tipo de material. As amostras foram lixadas sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) até desaparecerem os traços da lixa anterior. Esse processo elimina os riscos e marcas mais profundas possivelmente deixados pelo disco de corte. O ataque químico foi realizado por esfregamento utilizando Nital 8%.

As análises metalográficas foram feitas com macrografia em microscópio óptico e as imagens foram analisadas em Software Image-J, conforme Figura 16.

Figura 16. Exemplo de determinação do volume de material fundido por metalografia.



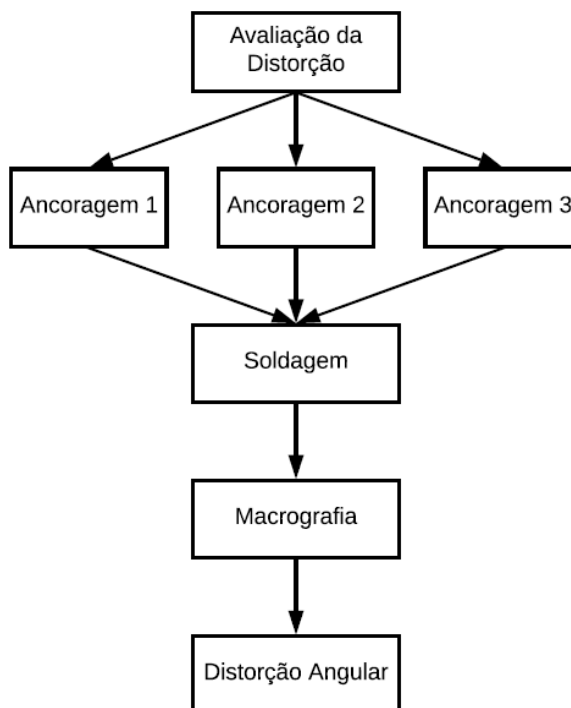
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Assim, para cada chanfro soldado, foram gerados cinco outros corpos de prova a serem analisados nos ensaios metalográficos, o que totalizou para esta etapa 80 corpos de prova.

3.2 Avaliação da distorção angular devido a soldagem

Em função da distorção de origem térmica que ocorre na soldagem, foram realizados experimentos para avaliar como ocorre a distorção e como ela varia em função das condições de ancoragem do cobre-junta. A Figura 17 apresenta esquematicamente o organograma dos experimentos realizados para o cálculo da distorção angular.

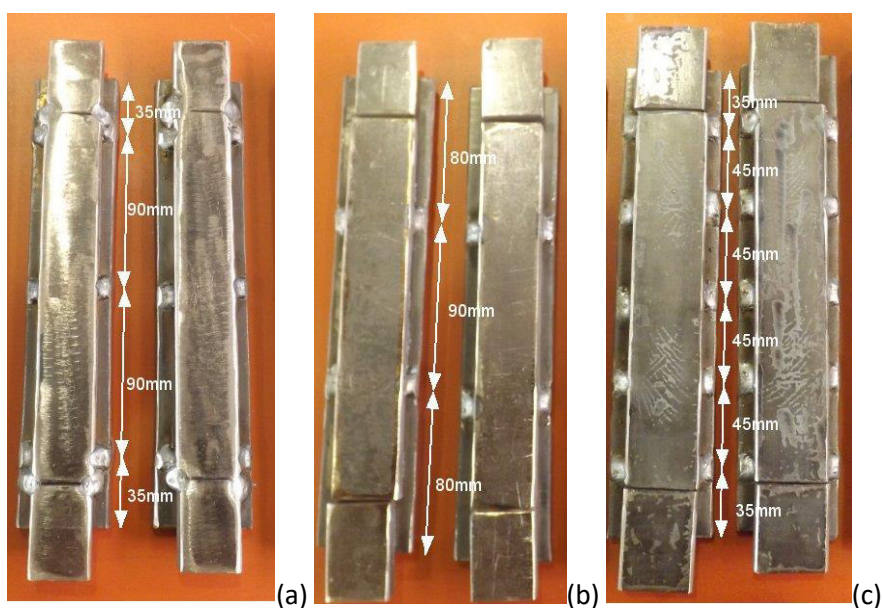
Figura 17. Organograma dos ensaios para avaliação da distorção angular em diferentes condições de ancoragem do cobre junta



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Foram montados três conjuntos de corpos de prova, chamados Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, cada um com diferentes ancoragens do cobre junta, conforme indicado na Figura 18.

Figura 18. Ancoragens utilizadas na análise da distorção angular: (a) tipo 1 - três pontos de ancoragem; (b) tipo 2 - dois pontos de ancoragem; (c) tipo 3 - cinco pontos de ancoragem



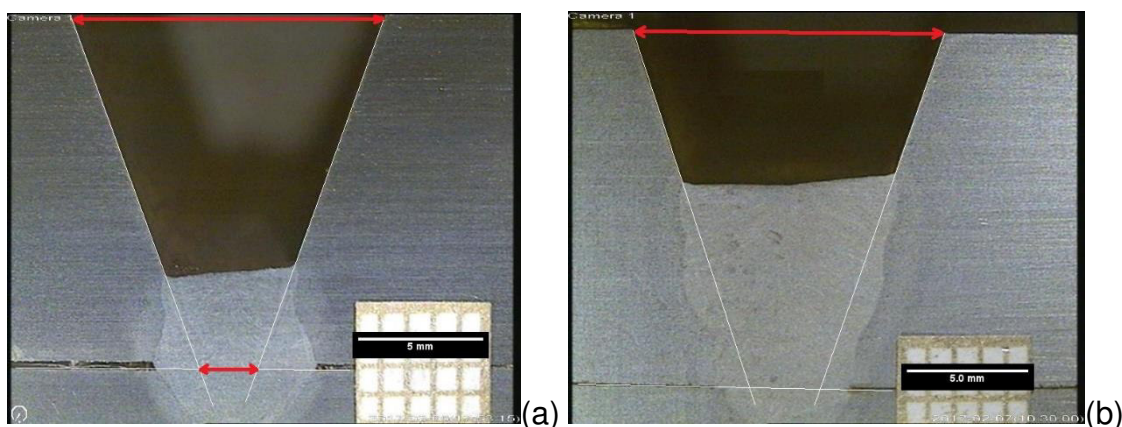
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Para a análise da distorção, foram utilizadas doze amostras com as variáveis: Ancoragens tipo 1, 2 e 3, ângulo de chanfro 45° e 55° e abertura de raiz 3.0 mm e 9.2 mm. Para cada configuração de ancoragem e geometria, foram utilizados dois tipos de amostras, uma após a deposição do primeiro passe e outra após a deposição do terceiro passe, totalizando 24 cordões analisados.

Após as soldagens, cada cordão produzido foi cortado nas cinco posições mostradas anteriormente na Figura 15, totalizando 120 corpos-de-prova. O procedimento de preparação metalográfica para a avaliação macrográfica foi o mesmo apresentado para a medição da eficiência de deposição.

A partir das imagens macrográficas, foi possível medir, para cada passe, a abertura superior do chanfro, utilizando-se o software Image J. A abertura de raiz foi estimada pela projeção das paredes do chanfro obtidas em cada passe, conforme exemplificado na Figura 19. Estes valores foram comparados com a geometria inicial do chanfro e utilizados para o cálculo da distorção em cada passe.

Figura 19. Exemplo de medição da distorção angular através de macrografia: (a) Primeiro passe; (b) Terceiro passe



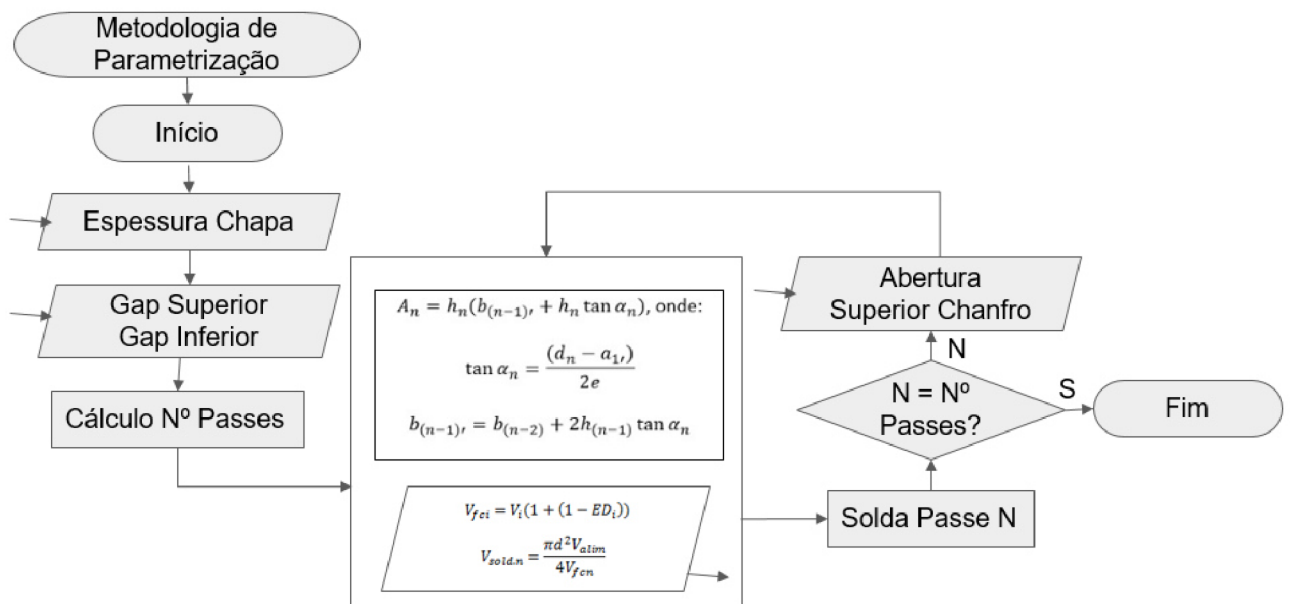
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

3.3 Metodologia de parametrização de soldagem de chapas espessas usando visão computacional

O resultado deste estudo servirá como entrada de dados para ajuste de um robô de solda automatizada auxiliado por visão computacional. Para tanto, um robô

comercial de soldagem linear foi adaptado dentro do projeto Ocelus. A descrição de todo o aparato experimental para este fim pode ser encontrada em (WEIS et al., 2017). O preenchimento total da junta é condição necessária para validar a operação de soldagem. Como existem várias espessuras de chapas a serem soldadas nos blocos de plataformas, montou-se uma lógica para determinar o número de camadas de soldagem necessárias, conforme indicado na Figura 20.

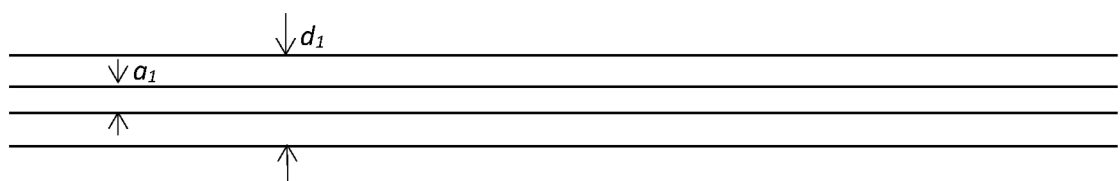
Figura 20. Fluxograma para determinação do número de camadas necessárias para preenchimento do chanfro.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

O primeiro passo do processo consiste em obter a imagem do chanfro inicial. Esta imagem é representada esquematicamente na Figura 21. A partir dessa imagem, um sistema de análise de imagens obtém as dimensões da abertura superior do chanfro d_1 e da abertura de raiz do chanfro a_1 .

Figura 21. Chanfro original esquematizado a partir das imagens digitais obtidas da abertura de raiz (a_1) e da abertura do chanfro (d_1) e do valor da espessura da chapa (e).

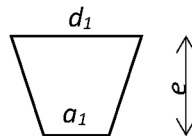


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Como a espessura e da chapa é conhecida, pode-se desenhar o chanfro mostrado na Figura 22.

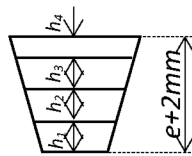
Em seguida, divide-se a espessura em n fatias, conforme esquematizado na Figura 23, onde cada fatia ou passe deve ter uma altura pré-determinada. Pode-se então calcular o volume teórico de material para o primeiro passe e para os n passes a serem depositados com base na imagem inicial do chanfro ($v_1, v_{i+1}, \dots, v_n$), conforme indicado na Figura 24

Figura 22. Vista frontal do chanfro original



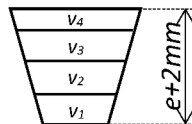
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 23. Chanfro com os n passes em função da espessura da chapa



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 24. Volumes teóricos dos n passes a serem depositados em função do escaneamento de imagens inicial



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Os volumes de material efetivamente depositados em cada passe, denominados $v_{d1}, v_{di+1}, \dots, v_{dn}$ são medidos por macrografia. Considerando-se as condições de soldagem utilizadas neste experimento, os parâmetros de soldagem: DBCP, diâmetro do arame (d), gás de proteção e medindo-se o volume de arame depositado (V_{ad}) e a velocidade de soldagem (V_{sold}) em cada passe, é possível

calcular a eficiência de soldagem em cada passe (ED_1, ED_2, ED_3, ED_4).

Desta forma, para soldar-se utilizando o robô, a velocidade de soldagem a ser utilizada deve ser calculada para levar em consideração que nem todo o material fundido é realmente depositado. Se não houvesse distorção do chanfro, a velocidade de soldagem deveria ser corrigida somente pela eficiência de deposição. Assim, um novo volume de material a ser fundido deveria ser calculado, que seria chamado de volume fundido corrigido (V_{fc}), conforme Eq. 4.

$$V_{fci} = V_{fi} * (1 + (1 - ED_i)) \quad (4)$$

Por outro lado, como ocorre distorção do chanfro, o volume de material fundido também precisa ser corrigido pela distorção angular. Nas soldagens realizadas neste trabalho, observou-se que a distorção angular ocorreu no sentido de fechar o chanfro, ou seja, o volume a ser depositado deveria ser menor que o teórico fundido calculado em função das velocidades de alimentação e soldagem. Por outro lado, como a eficiência de deposição não é 100%, o volume depositado é de fato menor.

Assim, o cálculo dos volumes de cada passe deverá ser corrigido em função tanto da eficiência de deposição quanto da distorção angular do chanfro.

O cálculo do volume unitário necessário por passe será feito através da área da seção transversal de cada passe, considerando-se cada cordão como sendo um prisma reto, conforme Eq. 5.

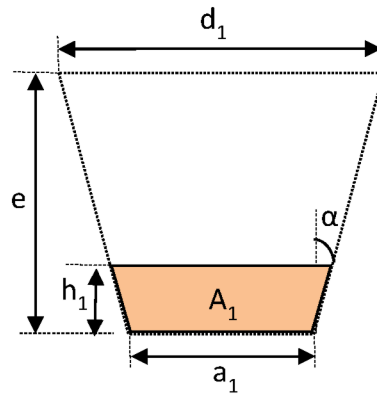
$$A_i(mm)^2 = V_i(mm)^3 / l_i(mm) \quad (5)$$

Portanto, neste trabalho será utilizado o termo área ao invés de volume.

Para o primeiro passe, não é possível fazer correção com relação ao fechamento causado pela distorção angular, uma vez que essa somente seria detectada pelo escaneamento de imagens após a soldagem do primeiro passe. Assim, na metodologia proposta, não será feita correção nenhuma no primeiro passe. Isso obviamente acarreta um erro, mas como os efeitos da eficiência de deposição ser menor que 100% e da distorção fechar o chanfro se contrabalanceiam, esse erro no primeiro passe é minimizado e corrigido com os próximos passes a serem depositados.

Assim, a área A_1 é conhecida, conforme indicado na Figura 25.

Figura 25. Chanfro com as variáveis necessárias para o cálculo da área para o primeiro passe

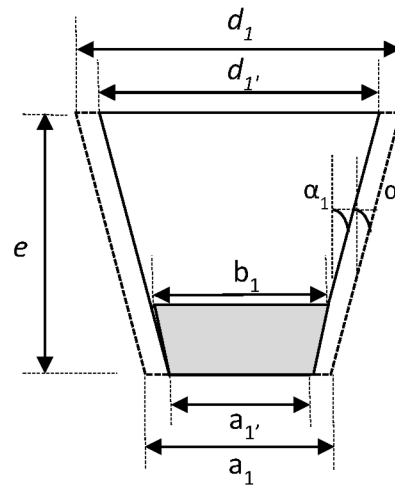


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Para a soldagem dos passes seguintes, propõe-se metodologia de correção baseada no escaneamento de imagens entre passes para avaliar a distorção, bem como na utilização da eficiência de deposição de cada passe obtida pelos ensaios de parametrização.

Após a soldagem do primeiro passe, tem-se a situação representada na Figura 26. Nesta figura, as linhas sólidas representam o chanfro após a distorção que ocorreu no primeiro passe.

Figura 26. Esquema do chanfro após deposição do primeiro passe

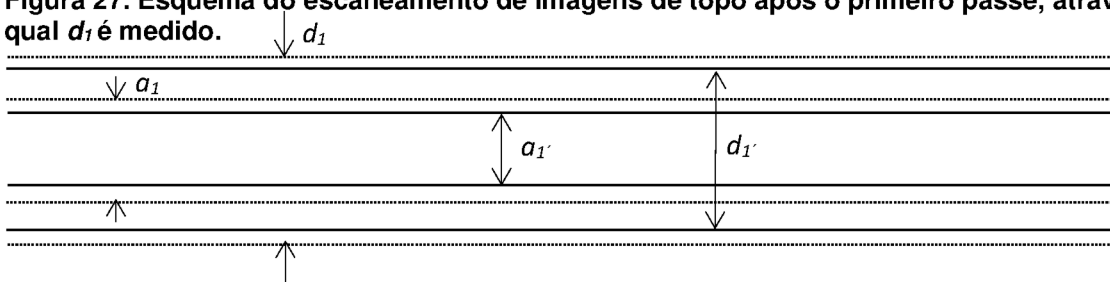


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Os valores de a_1 e d_1 são avaliados com o escaneamento de imagens do chanfro original. Porém, o volume realmente preenchido por material, indicado na figura pela área cinza, é diferente do volume v_1 previsto após o escaneamento de imagens do chanfro inicial.

Com o escaneamento de imagens após o primeiro passe, obtém-se duas linhas paralelas, distantes de d_1' . A imagem obtida com o escaneamento de imagens após o primeiro passe é representada esquematicamente na Figura 27, onde as linhas tracejadas representam o escaneamento de imagens inicial do chanfro, antes da deposição do primeiro passe e as linhas cheias representam o escaneamento de imagens após o primeiro passe.

Figura 27. Esquema do escaneamento de imagens de topo após o primeiro passe, através do qual d_1 é medido.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Porém, a altura do primeiro passe que realmente foi depositada não é

conhecida. Contudo, o escaneamento de imagens permitiu a medição de d_1 . Considerando-se o esquema mostrado na Figura 27, não é possível conhecer o valor de a_1 . Porém, pode-se fazer a aproximação que o ângulo do chanfro α_1 se mantém igual a α e assim estimar a_1 através da Eq. 6.

$$\tan \alpha = \frac{(d_1 - a_1)}{2e} \quad (6)$$

Dispondo destas informações, e considerando-se que a altura do primeiro passe h_1 tenha sido 4 mm (previamente definido), pode-se estimar o valor de b_1 através da Eq. 7.

$$b_1 = a_1 + 8 \tan \alpha \quad (7)$$

Para o cálculo da área do passe 2 a altura do passe h_2 também será considerada como 4 mm. Será ainda considerado que tanto a abertura da raiz a_1 quanto o ângulo α , não se alteram, podendo-se assim calcular o valor de b_2 através da Eq. 8.

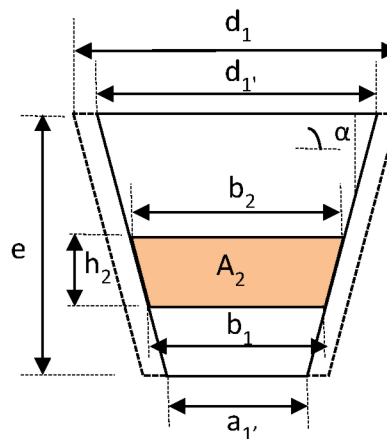
$$b_2 = b_1 + 8 \tan \alpha \quad (8)$$

Calcula-se então a área a ser depositada para o segundo passe através da Eq. 9.

$$A_2 = h_2(b_1 + h_2 \tan \alpha) \quad (9)$$

Assim, a área A_2 é conhecida (sendo esquematizada na Figura 28)

Figura 28. Chanfro após a deposição do segundo passe.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

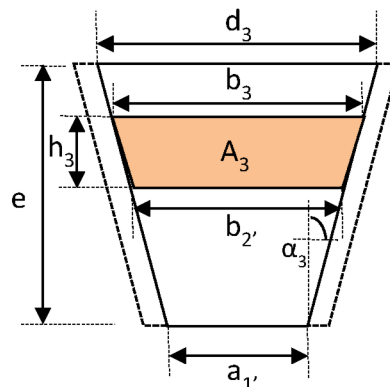
Os experimentos deste trabalho mostraram que, após a deposição do segundo passe, o ângulo α é alterado para α_3 , mas não é possível estima-lo antes da deposição do terceiro passe. Porém, como o escaneamento de imagens fornece o valor de d_3 (ver Figura 29), consegue-se calcular a área a ser depositada para o terceiro passe através da Eq.10.

$$A_3 = h_3(b_{2'} + h_3 \tan \alpha_3) \quad (10)$$

, onde:

$$\left| \begin{array}{l} \tan \alpha_3 = \frac{(d_3 - a_{1'})}{2e} \\ b_{2'} = b_1 + 8 \tan \alpha_3 \end{array} \right.$$

Figura 29. Chanfro com as variáveis necessárias para o cálculo da área para o terceiro passe



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

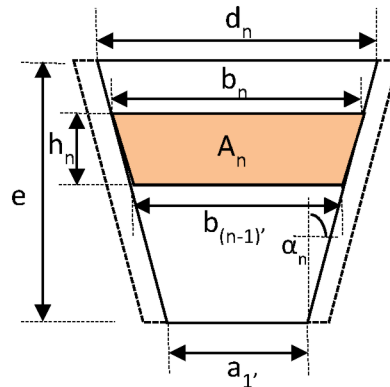
Para os próximos passes, repete-se o procedimento anterior, de forma a calcular a área necessária para execução do passe n (ver Figura 30), através da Eq. 11.

$$A_n = h_n(b_{(n-1)'} + h_n \tan \alpha_n) \quad (11)$$

, onde:

$$\left| \begin{array}{l} \tan \alpha_n = \frac{(d_n - a_{1'})}{2e} \\ b_{(n-1)'} = b_{(n-2)} + 2h_{(n-1)} \tan \alpha_n \end{array} \right.$$

Figura 30. Chanfro com as variáveis necessárias para o cálculo da área para o passe n .



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Conhecidas as áreas da seção transversal de todos os passes, define-se o volume unitário de material a ser depositado para cada passe como representado na Eq. 12.

$$V_i = A_i * 1(mm) \quad (12)$$

Porém, como a eficiência de deposição é menor que 100%, a partir do segundo passe, para cada passe o volume a ser fundido (V_{fci}) precisa ser corrigido através da Eq. 13.

$$V_{fci} = V_i(1 + (1 - ED_i)) \quad (13)$$

Com o valor de V_{fcn} , pode-se calcular a velocidade de soldagem a ser usada no passe n através da Eq. 14.

$$V_{sold.n} = \frac{\pi d^2 V_{alim}}{4V_{fcn}} \quad (14)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

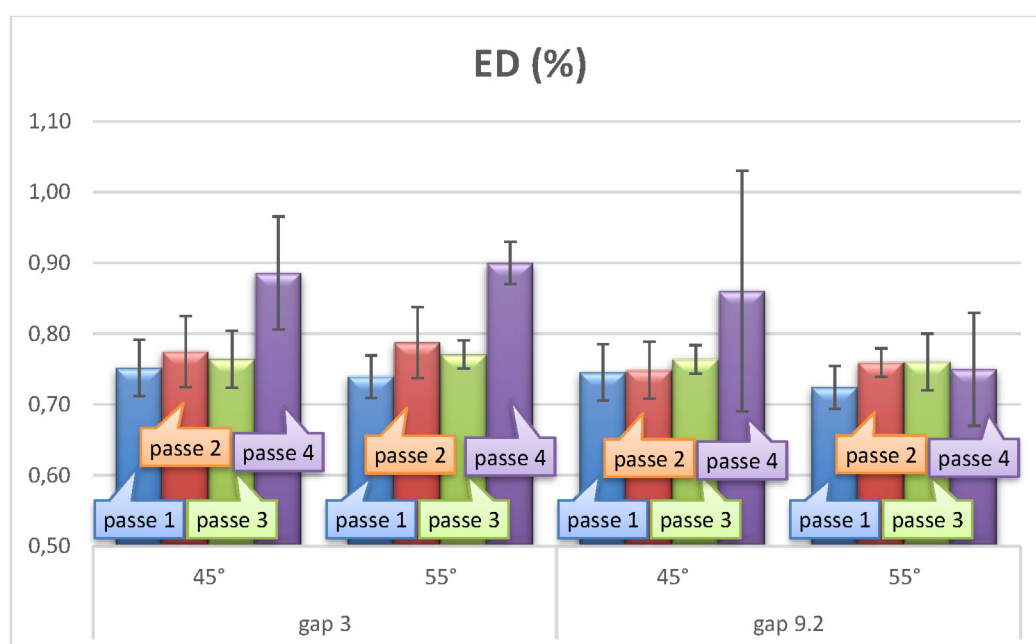
Os volumes de arame depositado (V_{ad}) foram obtidos da análise metalográfica dos 80 cps, obtendo-se a média entre os 5 valores medidos por cordão de solda em cinco sessões transversais. Os volumes de arame fundido foram obtidos através da Equação 01. Desta forma, obteve-se os valores de eficiência de deposição (ED) conforme Tabela 2 e Figura 31.

Tabela 2. Valores de eficiência de deposição (ED) para os diferentes tipos de passes reproduzidos; média ($\bar{X}$) $\pm$ desvio padrão (S)

ED	$gap\ 3mm$							
	45°				55°			
	passe1	passe2	passe3	passe4	passe1	passe2	passe3	passe4
$\bar{X}$	0,75	0,77	0,76	0,89	0,74	0,79	0,77	0,90
S	0,04	0,05	0,04	0,08	0,03	0,05	0,02	0,03
ED	$gap\ 9.2mm$							
	45°				55°			
	passe1	passe2	passe3	passe4	passe1	passe2	passe3	passe4
$\bar{X}$	0,75	0,75	0,76	0,86	0,72	0,76	0,76	0,75
S	0,04	0,04	0,02	0,17	0,03	0,02	0,04	0,08

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 31. Eficiência de deposição



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Observa-se nestes resultados que a *ED* não teve variação significativa com a variação da abertura de raiz. O ângulo do chanfro também não apresentou influência nos valores de *ED*. Uma pequena elevação de seu valor foi observada à medida em que os passes foram sendo executados do primeiro até o terceiro passe. No quarto e último passe observou-se um salto em seu valor praticamente igual em todas as variações das condições de soldagem impostas, exceto para a condição com maior abertura de raiz (9,2 mm) e maior ângulo de chanfro (55°).

A justificativa para estes dados encontrada é que a quantidade de respingos gerados no processo influencia diretamente nos valores da *ED*. Para este tipo de junta com chanfro em V e com estas condições de abertura de raiz e ângulo de chanfro, as restrições físicas aos respingos impostas pelas paredes foram semelhantes para os três primeiros passes. Assim, teve-se provavelmente uma condição de produção de respingos semelhante para a soldagem. Na execução do quarto e último passe, não mais existia uma parede do chanfro capaz de influenciar significativamente na formação de respingos. Sendo assim, o último passe de uma junta com chanfro em V pode ser comparada como uma soldagem plana de duas chapas sem chanfro. Isto pode ser comprovado quando comparam-se os resultados de *ED* para o último passe com os resultados obtidos por SOEIRO JUNIOR et al. (2017) para soldagem FCAW plana, os quais são bastante semelhantes. Apenas no último passe essa condição de restrição geométrica que leva à formação de respingos apresentou-se diferente. Deve-se lembrar que para uma maior abertura de raiz e um maior ângulo de chanfro, existe maior quantidade de material a ser depositado. Assim, provavelmente o último passe não se comportou ainda como cordão sobre chapa, de forma que a formação de respingos ainda foi relativamente alta, justificando um valor de eficiência de deposição semelhante aos demais passes.

A medição da distorção angular do chanfro foi feita através da análise dos 120 corpos de prova descritos na metodologia deste trabalho, onde foram medidas as aberturas dos chanfros antes e após a soldagem. Os valores apresentados na Tabela 3 são relativos ao corpo de prova com ancoragem 1, abertura de raiz 3mm e ângulo de chanfro 45°.

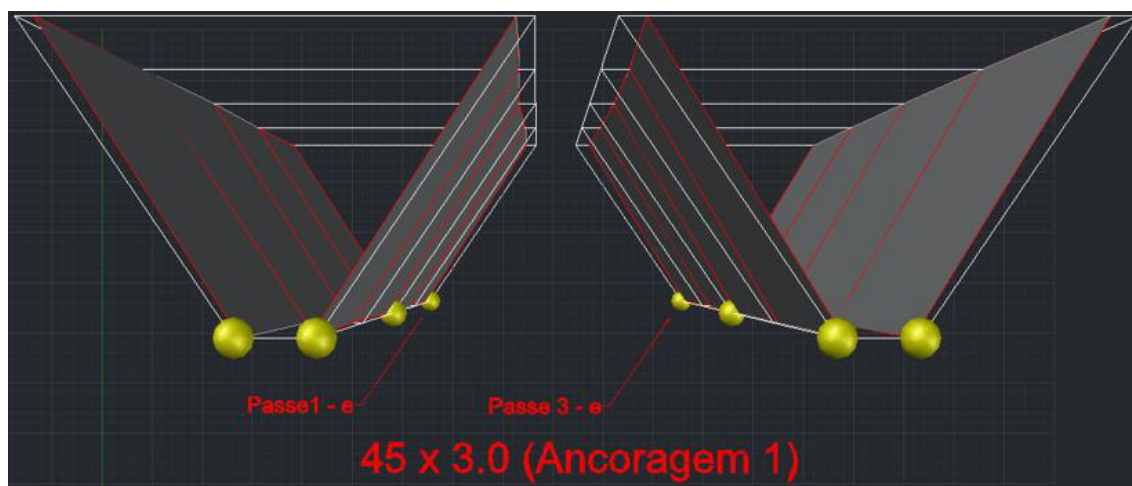
Tabela 3. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 1, abertura de raiz 3mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, Δd = variação percentual da abertura do chanfro, Δa = variação percentual da abertura de raiz, com base nos respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando-se o sentido de soldagem de e para a .

				d_1 (mm)	13,52				
				a_1 (mm)	3,00				
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	12,60	-6,8	2,63	-12,3	12,17	-10,0	2,69	-10,3
	d	12,61	-6,7	2,59	-13,7	11,92	-11,8	2,37	-21,0
	c	12,30	-9,0	2,60	-13,3	11,74	-13,2	2,60	-13,3
	b	12,52	-7,4	2,45	-18,3	11,79	-12,8	2,72	-9,3
	a	12,60	-6,8	2,67	-11,0	12,16	-10,1	2,66	-11,3
$\bar{X}$		12,53	-7,4	2,59	-13,7	11,96	-11,6	2,61	-13,1
S		13,1%	1,0	0,08	2,8	0,20	1,5	0,14	4,7

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

A Figura 32 representa o chanfro em escala com as distorções angulares medidas, onde as linhas brancas indicam as dimensões originais do chanfro e as linhas vermelhas as dimensões após a soldagem. As esferas amarelas indicam os pontos de ancoragem do cobre junta na parte inferior do chanfro.

Figura 32. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 1, abertura de raiz de 3mm e ângulo de chanfro de 45°



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

As análises da Tabela 3 e da Figura 32 evidenciam que após o primeiro passe ocorre um fechamento da abertura de raiz e do ângulo de chanfro. Observa-se ainda que o fechamento do chanfro tende a ser maior no centro do comprimento do chanfro,

onde havia um ponto de ancoragem. Entre o primeiro e o terceiro passe, a abertura de chanfro tende a fechar ainda mais, passando de $-7,4 \pm 1,0\%$ para $11,6 \pm 1,5\%$. Já para a abertura da raiz, os desvios das medições mostram que as diferenças não são significativas ($-13,7 \pm 2,8\%$ no primeiro passe para $-13,1 \pm 4,7\%$ no terceiro passe). Portanto, pode-se considerar que o maior fechamento da abertura de raiz ocorre no primeiro passe, mas que o fechamento do ângulo do chanfro continua aumentando à medida em que mais passes vão sendo depositados. Tendências semelhantes foram observadas para este mesmo tipo de ancoragem (tipo 1) com maior abertura de raiz e ângulo de chanfro. Os valores de distorção e as representações gráficas para um chanfro com ancoragem tipo1, para as demais combinações de abertura de raiz e ângulo de chanfro de 55° são apresentadas nos Apêndices A a C. A única diferença significativa observada é que para os chanfros com maior ângulo de abertura (55° , ver Apêndices B e C) o fechamento que ocorreu no ângulo de chanfro foi ligeiramente menor.

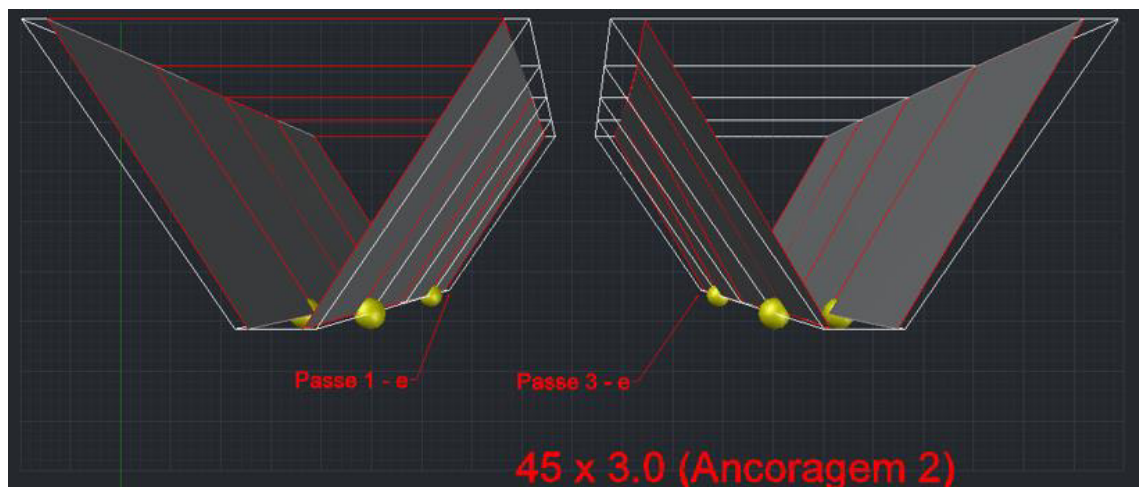
Para a ancoragem do tipo 2, os valores de distorção angular são apresentados na Tabela 4 e representados esquematicamente na Figura 33 para uma abertura de raiz de 3 mm e um ângulo de chanfro de 45° . As distorções observadas com este tipo de ancoragem para as demais combinações de geometria do chanfro são mostradas nos Anexos D a F. Novamente observa-se o fechamento da abertura de raiz e do ângulo de chanfro. Entre o primeiro e o terceiro passe, a abertura de chanfro tende a abrir ainda mais, passando de $8,4 \pm 0,8\%$ para $14,5 \pm 1,2\%$. Já a abertura da raiz, apesar de ter mostrado um valor médio de abertura de raiz menor no terceiro passe, os desvios das medições mostram que as diferenças não são de fato significativas ($-16,8 \pm 6,8\%$ no primeiro passe para $-12,0 \pm 8,1\%$ no terceiro passe). Portanto, também para a ancoragem do tipo 2 pode-se considerar que o fechamento da abertura de raiz ocorre de forma significativa no primeiro passe, mas que a abertura do chanfro continua fechando para os demais passes. Uma diferença em relação à ancoragem tipo 1 foi que não ocorreu um fechamento do ângulo de chanfro maior no centro do comprimento do chanfro.

Tabela 4. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 2, abertura de raiz 3mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, Δd = variação percentual da abertura do chanfro, Δa = variação percentual da abertura de raiz, com base nos respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando-se o sentido de soldagem de e para a .

		d_1 (mm)				13,52			
		a_1 (mm)				3,00			
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	12,48	-7,7%	2,57	-14,3%	11,61	-14,1%	2,66	-11,3%
	d	12,44	-8,0%	2,75	-8,3%	11,45	-15,3%	2,83	-5,7%
	c	12,44	-8,0%	2,58	-14,0%	11,44	-15,4%	2,82	-6,0%
	b	12,27	-9,2%	2,23	-25,7%	11,49	-15,0%	2,23	-25,7%
	a	12,27	-9,2%	2,35	-21,7%	11,83	-12,5%	2,66	-11,3%
$\bar{X}$		12,38	-8,4%	2,50	-16,8%	11,56	-14,5%	2,64	-12,0%
S		0,10	0,8%	0,21	6,9%	0,16	1,2%	0,24	8,1%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 33. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 2, abertura de raiz de 3 mm e ângulo de chanfro de 45°



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

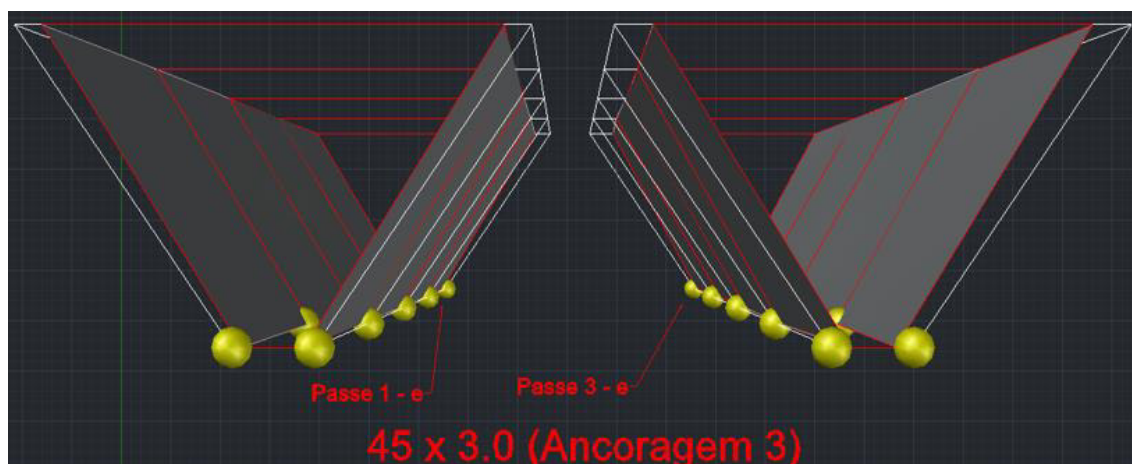
Aumentando-se a restrição do chanfro para a ancoragem do tipo 3, as tendências observadas em termos de distorção foram semelhantes às observadas para as ancoragens dos tipos 1 e 2. Isto pode ser observado através da Tabela 5, da Figura 34 e dos Apêndices G a I.

Tabela 5. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 3, abertura de raiz 3 mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a .

				d_1 (mm)	13,52				
				a_1 (mm)	3,00				
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	11,98	-11,4%	2,66	-11,3%	11,17	-17,4%	2,75	-8,3%
	d	12,06	-10,8%	2,59	-13,7%	11,47	-15,2%	2,39	-20,3%
	c	12,01	-11,2%	2,71	-9,7%	11,42	-15,5%	2,47	-17,7%
	b	12,01	-11,2%	2,55	-15,0%	11,50	-14,9%	2,69	-10,3%
	a	12,19	-9,8%	2,53	-15,7%	11,64	-13,9%	2,13	-29,0%
$\bar{X}$		12,05	-10,9%	2,61	-13,1%	11,44	-15,4%	2,49	-17,1%
S		0,08	0,6%	0,08	2,5%	0,17	1,3%	0,25	8,3%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 34. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 3, abertura de raiz de 3 mm e ângulo de chanfro de 45°

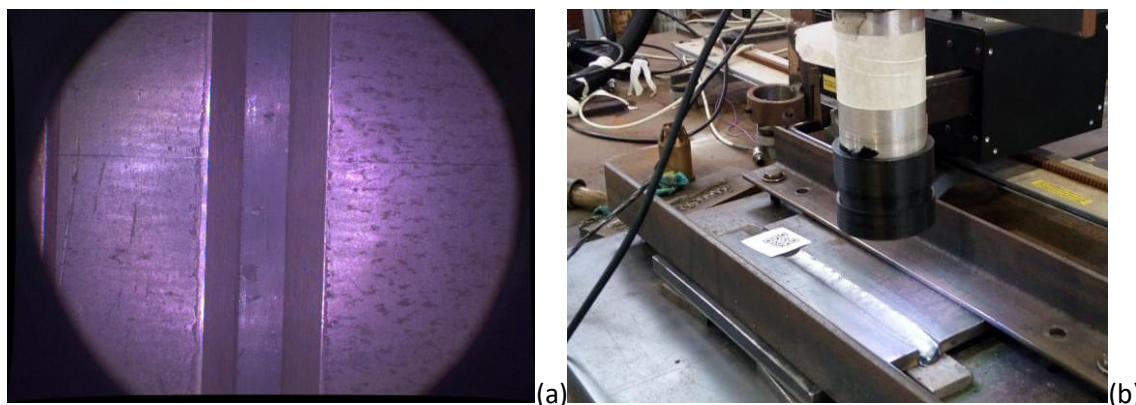


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Portanto, observa-se que para os tipos de restrição impostas neste trabalho, não houve uma variação significativa da distorção. Ela ocorreu no sentido de fechar o chanfro ao longo de todo o seu comprimento. O fechamento da abertura de raiz ocorreu de forma significativa somente após o primeiro passe, o qual não variou muito entre o primeiro e o terceiro passe. Já o fechamento do ângulo de chanfro ocorreu em todos os passes. Estas informações são fundamentais para validar a metodologia proposta neste trabalho de parametrização do processo FCAW baseado em escaneamento de imagens do chanfro antes da soldagem e entre os passes de soldagem.

A terceira e última etapa deste trabalho foi elaborar uma metodologia de soldagem levando-se em consideração a eficiência de deposição e a distorção angular medidas nas etapas anteriores. Primeiramente obteve-se as dimensões de d_1 e a_1 , através de imagens obtidas diretamente do robô de solda, conforme exemplificado na Figura 35.

Figura 35. Obtenção das dimensões por visão computacional: (a) Imagem inicial do chanfro; (b) montagem experimental para medição do chanfro após deposição do primeiro passe.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Através desta figura, foi possível reproduzir a seção transversal do chanfro uma vez que a espessura da chapa a ser soldada era conhecida. Estas dimensões foram utilizadas para calcular as áreas de soldagem de cada camada.

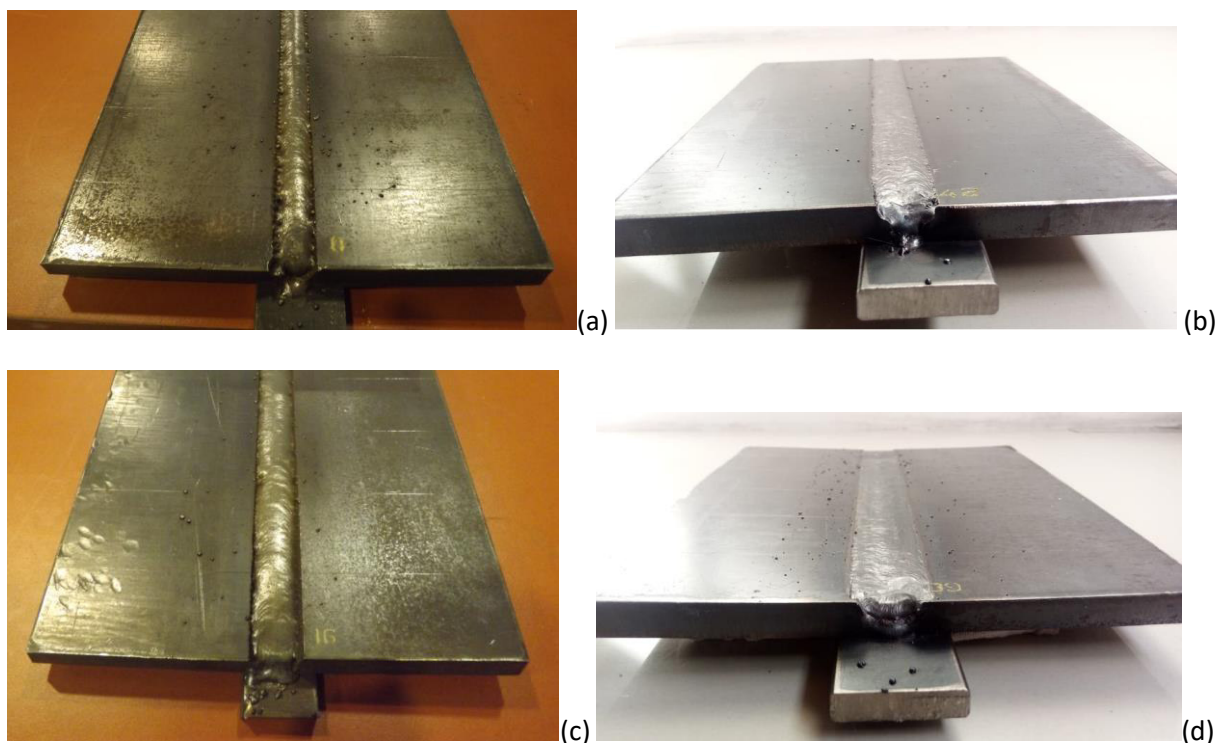
De forma semelhante, após cada passe de soldagem, fez-se a medição da abertura superior do chanfro. Assim considerou-se a correção devido à distorção angular. A outra correção foi devido à eficiência de deposição do processo de soldagem, conforme descrito na metodologia apresentada na subseção 3.3.

Para verificar a metodologia proposta, foram soldados dois corpos de prova, utilizando-se ancoragem do tipo 1, sendo o primeiro com abertura de raiz de 3 mm e ângulo de 55° e o segundo com abertura de raiz de 9,2 mm e ângulo de chanfro de 55°. Estes corpos de prova foram comparados com corpos de prova para os quais os parâmetros de soldagem foram calculados com base somente nas dimensões iniciais nominais do chanfro, sem que nenhuma forma de correção fosse aplicada.

Imagens mostrando os cordões após o quarto passe de deposição são apresentadas na Figura 36. Estas figuras mostram claramente que cordões com melhor qualidade foram produzidos quando a metodologia de correção proposta foi

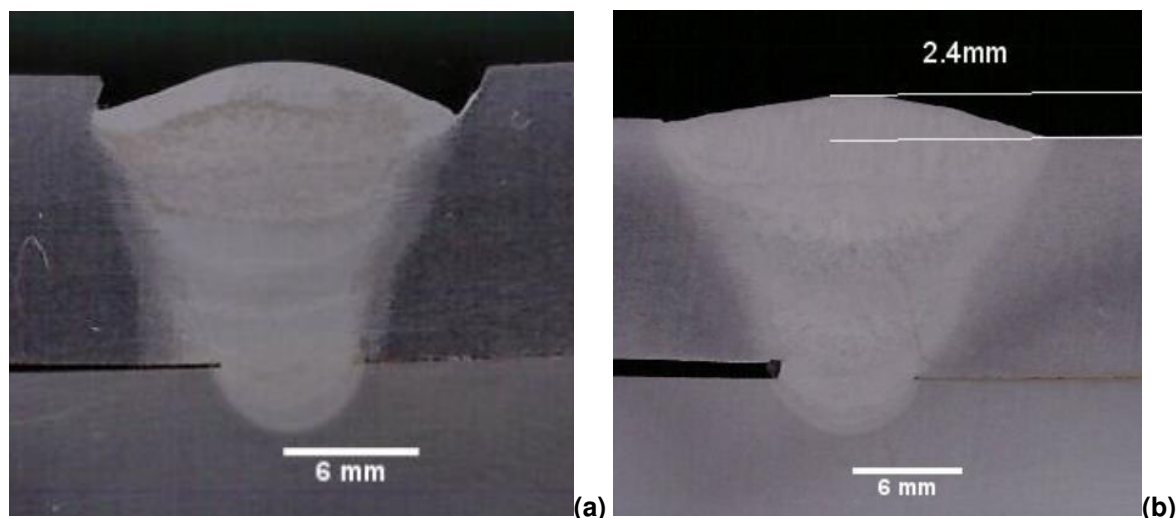
aplicada. Para uma análise mais fundamentada da qualidade das soldas produzidas, macrografias das seções transversais na região central de cada cordão (posição c, conforme Figura 15) foram preparadas. A Figura 37 apresenta as imagens da macrografia para uma abertura de raiz de 3 mm e um ângulo de chanfro de 55°, tanto sem a utilização da metodologia (Figura 37.a) quanto aplicando-se a metodologia descrita (Figura 37.b). Imagens semelhantes são mostradas na Figura 38 para o chanfro com abertura de raiz de 9,2 mm e ângulo de chanfro de 55°.

Figura 36. Imagens de cordões produzidos nos ensaios de verificação da metodologia proposta: (a) 3,0 mm, 55°, sem metodologia de correção; (b) 3,0 mm, 55°, com metodologia de correção; (c) 9,2 mm, 55°, sem metodologia de correção; (d) 9,2 mm, 55°, com metodologia de correção.



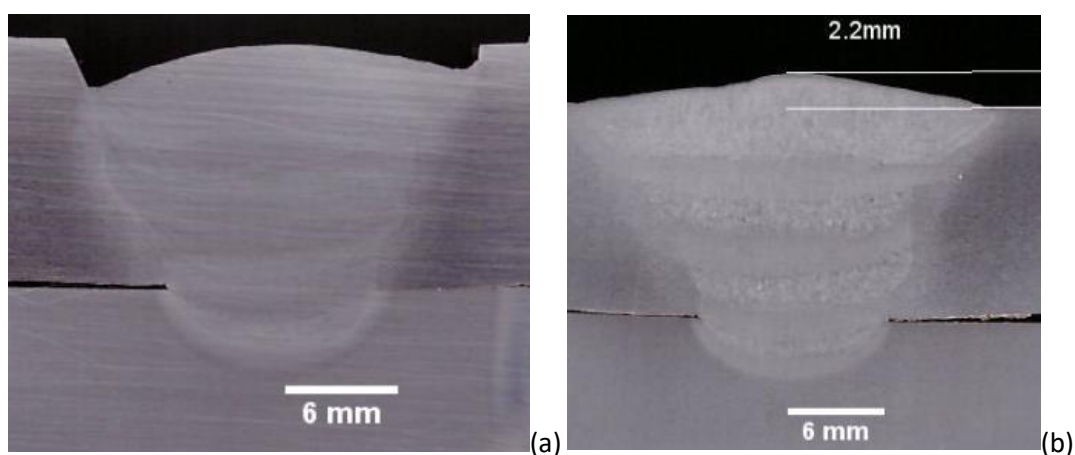
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 37. Macrografias dos cordões abertura de raiz de 3.0 mm e ângulo de chanfro de 55°: (a) sem metodologia de correção dos parâmetros; (b) com a metodologia de correção proposta.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Figura 38. Macrografias dos cordões abertura de raiz de 9,2 mm e ângulo de chanfro de 55°: (a) sem metodologia de correção dos parâmetros; (b) com a metodologia de correção proposta.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

A análise das macrografias mostra claramente que para ambas as geometrias de chanfro a metodologia de correção proposta mostrou-se adequada. Para os chanfros preenchidos utilizando-se parâmetros de soldagem baseados apenas na geometria inicial nominal dos chanfros (Figura 37.a e Figura 38.a), o chanfro não foi completamente preenchido, pois a distorção sofrida pelo chanfro e o fato da eficiência de deposição não ser 100% não foram considerados. Ao aplicar-se a metodologia de correção, os chanfros foram completamente preenchidos (Figura 37.b e Figura 38.b) e o reforço foi inferior a 3 mm, conforme estabelecido por norma. Além disso, os ângulos de molhabilidade obtidos foram adequados de forma a não gerar

concentração de tensões excessiva e não foram verificados outros defeitos de soldagem, como falta de fusão e mordedura. Desta foram, acredita-se que tal metodologia possa ser utilizada com sucesso para o preenchimento de chanfros em chapas espessas pelo processo FCAW, de forma a contribuir com a automatização de processos de soldagem linear.

Salienta-se ainda que apesar de todas as soldagens terem sido realizadas com chapas de espessura de 12,7 mm, esta metodologia poder adequar-se perfeitamente chapas espessas de outras dimensões. Uma limitação poderia ser a necessidade de tecimentos muito largos para o caso de chapas muito espessas, sendo que tal ponto precisaria ser investigado.

5 CONCLUSÕES

O estudo realizado neste trabalho permitiu estabelecer uma metodologia para a parametrização do processo de soldagem linear FCAW de chapas espessas com chanfro em V baseada na medição por visão computacional das dimensões do chanfro antes e entre os passes de soldagem. Para que tal metodologia fosse alcançada, as seguintes conclusões foram obtidas com o desenvolvimento do trabalho:

- Os resultados de eficiência de deposição mostraram que não houve variações significativas da *ED* com a variação da abertura de raiz ou com o ângulo de chanfro. Observou-se uma pequena elevação na *ED* do primeiro até o terceiro passe, apresentando um salto significativo no último passe. A *ED* do último passe foi semelhante à de uma soldagem de cordão sobre chapa, provavelmente porque a restrição imposta pelas paredes do chanfro era bem pequena no último passe, produzindo poucos respingos.
- Os resultados de distorção angular obtidos mostraram que não houve variação significativa para as diferentes condições de soldagem e ancoragem impostas. A distorção promoveu um significativo fechamento da raiz somente após o primeiro passe. À medida em que os cordões foram depositados houve um fechamento do ângulo de chanfro em todos os passes para todas as condições impostas
- Através da visão computacional pôde-se validar o estudo de forma que o algoritmo proposto atendeu a necessidade de automação do robô de soldagem, tornando possível o ajuste de parâmetros entre os passes de soldagem.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se verificar a possibilidade de aplicação desta metodologia para outros processos de soldagem voltados à soldagem de preenchimento, como é o caso do processo MIG/MAG, bem como em outras situações de soldagem, como é o caso da soldagem orbital de tubos de grandes diâmetros e espessuras, os quais apresentam condições de montagem e alinhamento específicos.

Sugere-se também aplicar esta metodologia com as mesmas condições impostas nesse estudo, porém para ângulos de chanfro diferentes, aberturas de raiz diferentes e espessuras de chapas maiores, formando-se um envelope de condições no qual as velocidades de tecimento e soldagem do robô sejam compatíveis para execução do cordão de soldagem.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, D. (2012). *Estudos de Distorção em Soldagem com Uso de Técnicas Numéricas e de Otimização*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- AWS. (2010). Qualify procedures and personnel according to AWS D1. 1/D1. 1M, ". *Structural Welding Code-Steel*.
- BROERING, C. E. (2005). Desenvolvimento de sistemas para automação da soldagem e corte térmico.
- DERUNTZ, B. D. (2003). Assessing the benefits of surface tension transfer welding to industry. *Journal of Industrial Technology*, 19(4), 55-62.
- FORTES, C. (2004). Apostila Arames Tubulares. *ESAB BR, Maio*.
- GARCIA, R. P., & SCOTTI, A. (2011). Uma metodologia para análises comparativas da capacidade produtiva entre arames maciços (MIG/MAG) e tubulares (eletrodo tubular) A methodology for comparative analyses of the productive capacity between solid (GMAW) and tubular wires (FCAW). *Soldagem & Inspeção*, 16(2), 146-155.
- GITAHY, L. (2009). *Transformações na indústria de Construção Naval Brasileira e seus impactos no mercado de trabalho (1997-2007)*. Paper presented at the 15o Congresso da APDR.
- LISKÉVYCH, O., REZENDE, G., PONOMAREV, V., & SCOTTI, A. (2009). *Um Estudo Exploratório da Influência do Teor de CO₂ na Transferência de Metafile Estabilidade do Processo GMAW*. Paper presented at the XXXV Congresso Nacional de Soldagem—Consolda.
- MIRANDA, L. H., & BRACARENSE, A. Q. (2007). Redução das distorções angulares em cordões de solda sobre chapa de aço de baixo carbono com a utilização da refrigeração forçada da poça de fusão. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, 4(2).
- MURUGAN, V. V., & GUNARAJ, V. (2005). Effects of process parameters on angular distortion of gas metal arc welded structural steel plates. *Weld. J*, 84(11), 165s-171s.
- NORRISH, J. (1992). *Advanced Welding Process*.: IOP Publishing Ltd.
- PAIVA, T. C. C., de Brito Martins, T. R., de Souza, G. C., Pardal, J. M., Tavares, S. S. M., Fonseca, M. C., & Filho, I. C. (2013). Análise da Influência do Gás de Purga na Raiz de Juntas Soldadas pelo Processo GTAW em Aço Inoxidável Superduplex UNS S32750.
- PASIN, J. A. B. (2002). Indústria naval do Brasil: panorama, desafios e perspectivas.
- PINTO, M., ANDERSON, V., CARDOSO, J., & STUPELLO, B. (2007). Desenvolvimento e Aplicação de Método para Definição da Estrutura de Produto de um Navio Tanque (SUEZMAX) com Aplicação de Planejamento, Programação e Controle da Produção em um Estaleiro. *Centro de Estudos em Gestão Naval—Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo*.
- RADAJ, D. (2003). Welding residual stresses and distortion. *Calculation and measurement*, DVS-Verlag, Dusseldorf.
- SCHENK, T., Richardson, I., Kraska, M., & Ohnimus, S. (2009). Influence of clamping on distortion of welded S355 T-joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(4), 369-375.
- SCOTTI, A., & PONOMAREV, V. (2008). *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*: Artliber.
- SILVA, F. F. P. (2016). *Desenvolvimento de um sensor de visão para monitoramento dos parâmetros geométricos da poça de solda no processo GTAW pulsado*. Dissertação de mestrado, Universidade do Passo Fundo.
- SOEIRO JUNIOR, J. C., DA LUZ, M. A., & BRANDI, S. D. (2017). Comparison of deposition rate and deposition efficiency between ER70S-6 and E71T-1C consumables. *Welding international*, 31(2), 79-89.
- SOUZA, D. (2010). Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana.

- STARLING, C. M. D., MODENESI, P. J., & BORBA, T. M. D. (2009). Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares. *Soldagem & Inspeção*, 14(1), 010-025.
- STAROVESKI, T., MAJETIC, D., UDILJAK, T., & MIHLJEVIC, V. (2008). Machine vision system for seam weld detection in longitudinally welded pipes. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 1303-1305.
- TENG, T.-L., FUNG, C.-P., CHANG, P.-H., & YANG, W.-C. (2001). Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78(8), 523-538.
- WANG, R., RASHED, S., SERIZAWA, H., MURAKAWA, H., & ZHANG, J. (2008). Numerical and experimental investigations on welding deformation. *Transactions of JWRI*, 37(1), 79-90.
- WEIS, A. A., MOR, J. L., SOARES, L. B., STEFFENS, C. R., DREWS-Jr, P. L., DE FARIA, M. F., . . . BOTELHO, S. S. d. C. (2017). *Automated seam tracking system based on passive monocular vision for automated linear robotic welding process*. Paper presented at the 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany.
- WITHERS, P. J., & BHADESHIA, H. (2001). Residual stress. Part 1—measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17(4), 355-365.
- XU, D., LIU, X., WANG, P., YANG, J., & FANG, H. (2009). New technique to control welding buckling distortion and residual stress with non-contact electromagnetic impact. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(8), 753-759.

APÊNDICE A.

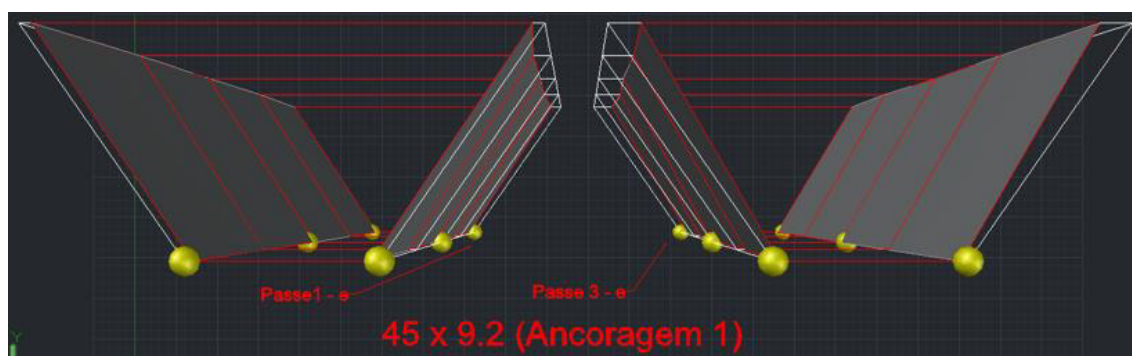
DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 1, ABERTURA DE RAIZ 9.2MM E ÂNGULO DE CHANFRO 45°

Distorção Angular medida com ancoragem tipo 1, abertura de raiz 9.2 mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a.

Tabela e representação gráfica da distorção

		d_1 (mm)		19,72					
		a_1 (mm)		9,20					
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	18,62	-5,6%	8,65	-6,0%	17,54	-11,1%	8,45	-8,2%
	d	18,18	-7,8%	8,55	-7,1%	17,15	-13,0%	8,55	-7,1%
	c	18,34	-7,0%	8,53	-7,3%	17,44	-11,6%	8,53	-7,3%
	b	18,35	-6,9%	8,67	-5,8%	17,28	-12,4%	8,58	-6,7%
	a	18,92	-4,1%	8,68	-5,7%	17,58	-10,9%	8,80	-4,3%
$\underline{X}$		18,48	-6,3%	8,62	-6,3%	17,40	-11,8%	8,58	-6,7%
S		0,29	1,5%	0,07	0,8%	0,18	0,9%	0,13	1,4%

Representação gráfica da deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 1, abertura de raiz de 9.2 mm e ângulo de chanfro de 45°

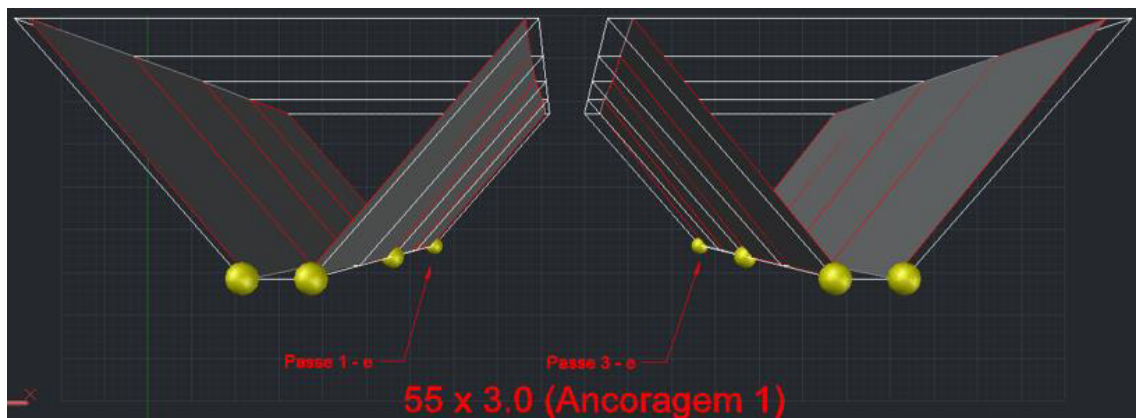


APÊNDICE B.

DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 1, ABERTURA DE RAIZ 3.0MM E ÂNGULO DE CHANFRO 55°

Distorção Angular medida com ancoragem tipo 1, abertura de raiz 3,00 mm e ângulo de chanfro 55°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a . São apresentados os valores em Tabela e uma representação gráfica da distorção.

		d_1 (mm)		16,22					
		a_1 (mm)		3,00					
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	15,74	-3,0%	2,69	-10,3%	14,40	-11,2%	2,41	-19,7%
	d	15,69	-3,3%	2,66	-11,3%	14,61	-9,9%	2,59	-13,7%
	c	15,35	-5,4%	2,65	-11,7%	14,49	-10,7%	2,56	-14,7%
	b	15,35	-5,4%	2,41	-19,7%	14,66	-9,6%	2,44	-18,7%
	a	15,43	-4,9%	2,53	-15,7%	14,75	-9,1%	2,41	-19,7%
$\underline{X}$		15,51	-4,4%	2,59	-13,7%	14,58	-10,1%	2,48	-17,3%
S		0,19	1,2%	0,12	3,9%	0,14	0,9%	0,09	2,9%

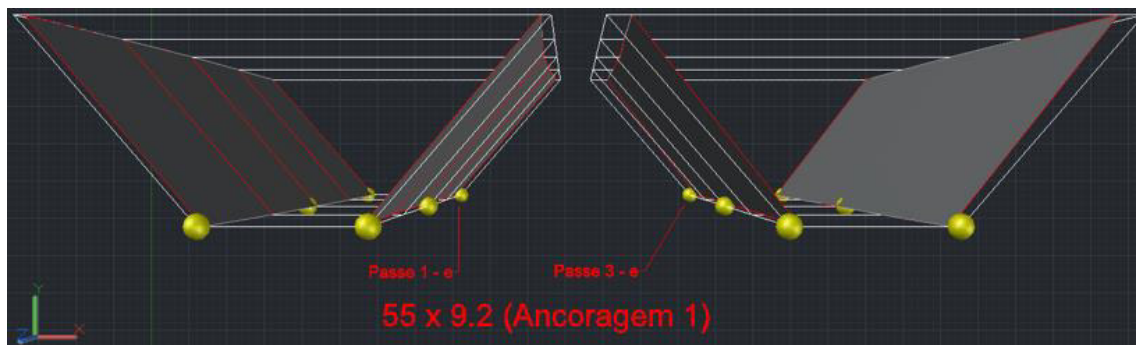


APÊNDICE C.

DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 1, ABERTURA DE RAIZ 9.2MM E ÂNGULO DE CHANFRO 55°

Distorção Angular medida com ancoragem tipo 1, abertura de raiz 9.2 mm e ângulo de chanfro 55°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a . São apresentados os valores em Tabela e uma representação gráfica da distorção.

		d_1 (mm)		22,42					
		a_1 (mm)		9,20					
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	21,83	-2,6%	8,50	-7,6%	20,17	-10,0%	8,34	-9,3%
	d	21,35	-4,8%	8,20	-10,9%	20,07	-10,5%	8,12	-11,7%
	c	21,10	-5,9%	8,20	-10,9%	20,00	-10,8%	8,20	-10,9%
	b	21,34	-4,8%	8,21	-10,8%	20,33	-9,3%	8,11	-11,8%
	a	21,69	-3,3%	8,70	-5,4%	20,59	-8,2%	8,44	-8,3%
$\underline{X}$		21,46	-4,3%	8,36	-9,1%	20,23	-9,8%	8,24	-10,4%
S		0,29	1,3%	0,23	2,5%	0,24	1,1%	0,14	1,6%

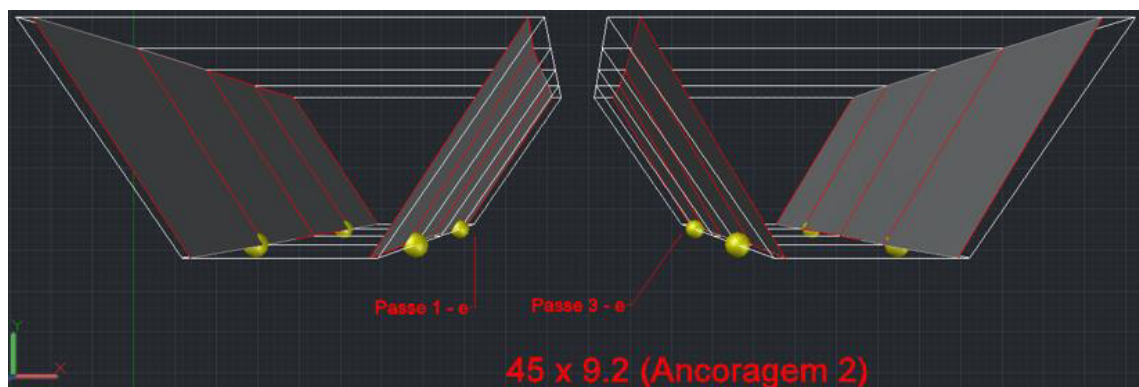


APÊNDICE D.

DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 2, ABERTURA DE RAIZ 9.2MM E ÂNGULO DE CHANFRO 45°

Distorção Angular medida com ancoragem tipo 2, abertura de raiz 9.2 mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a . São apresentados os valores em Tabela e uma representação gráfica da distorção.

		d_1 (mm)		19,72					
		a_1 (mm)		9,20					
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	18,62	-5,6%	8,46	-8,0%	17,51	-11,2%	8,27	-10,1%
	d	18,67	-5,3%	8,41	-8,6%	17,25	-12,5%	8,21	-10,8%
	c	18,41	-6,6%	8,52	-7,4%	17,28	-12,4%	8,47	-7,9%
	b	18,37	-6,8%	8,45	-8,2%	17,43	-11,6%	8,12	-11,7%
	a	18,71	-5,1%	8,67	-5,8%	17,65	-10,5%	8,47	-7,9%
$\bar{X}$		18,56	-5,9%	8,50	-7,6%	17,42	-11,6%	8,31	-9,7%
S		0,16	0,8%	0,10	1,1%	0,17	0,8%	0,16	1,7%

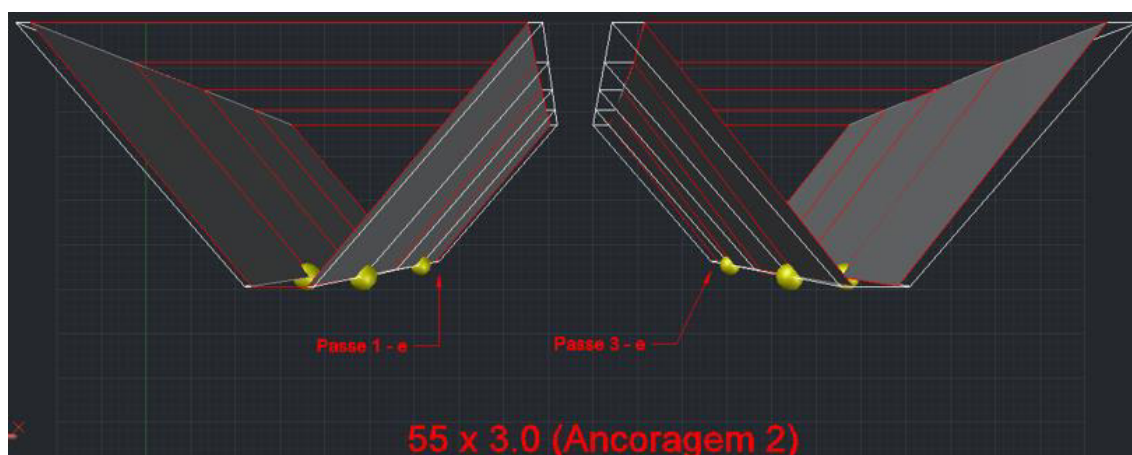


APÊNDICE E.

DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 2, ABERTURA DE RAIZ 3.0MM E ÂNGULO DE CHANFRO 55°

Distorção Angular medida com ancoragem tipo 2, abertura de raiz 3,00 mm e ângulo de chanfro 55°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a . São apresentados os valores em Tabela e uma representação gráfica da distorção.

		d_1 (mm)				16,22			
		a_1 (mm)				3,00			
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	E	15,45	-4,7%	2,66	-11,3%	14,41	-11,2%	2,23	-25,7%
	d	15,35	-5,4%	2,57	-14,3%	14,21	-12,4%	2,70	-10,0%
	c	15,33	-5,5%	2,63	-12,3%	14,24	-12,2%	2,58	-14,0%
	b	15,33	-5,5%	2,54	-15,3%	14,13	-12,9%	2,49	-17,0%
	a	15,37	-5,2%	2,63	-12,3%	14,36	-11,5%	2,30	-23,3%
$\bar{X}$		15,37	-5,3%	2,61	-13,1%	14,27	-12,0%	2,46	-18,0%
S		0,05	0,3%	0,05	1,6%	0,11	0,7%	0,19	6,5%

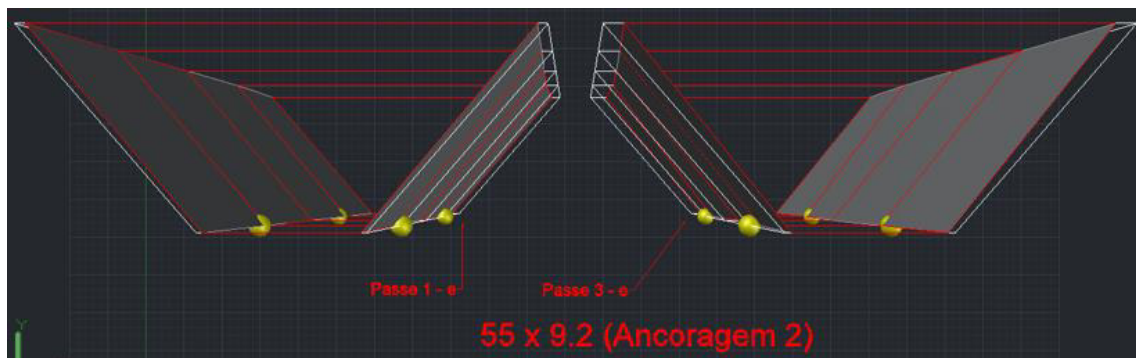


APÊNDICE F.

DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 2, ABERTURA DE RAIZ 9.2MM E ÂNGULO DE CHANFRO 55°

Distorção Angular medida com ancoragem tipo 2, abertura de raiz 9,20 mm e ângulo de chanfro 55°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a . São apresentados os valores em Tabela e uma representação gráfica da distorção.

				d_1 (mm)		22,42			
				a_1 (mm)		9,20			
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	E	21,41	-4,5%	8,32	-9,6%	20,33	-9,3%	7,97	-13,4%
	d	21,02	-6,2%	8,33	-9,5%	19,99	-10,8%	8,47	-7,9%
	c	21,23	-5,3%	8,47	-7,9%	20,24	-9,7%	7,79	-15,3%
	b	21,48	-4,2%	8,61	-6,4%	20,55	-8,3%	8,23	-10,5%
	a	21,64	-3,5%	8,78	-4,6%	20,89	-6,8%	8,70	-5,4%
$\underline{X}$		21,36	-4,7%	8,50	-7,6%	20,40	-9,0%	8,23	-10,5%
S		0,24	1,1%	0,20	2,1%	0,34	1,5%	0,37	4,0%



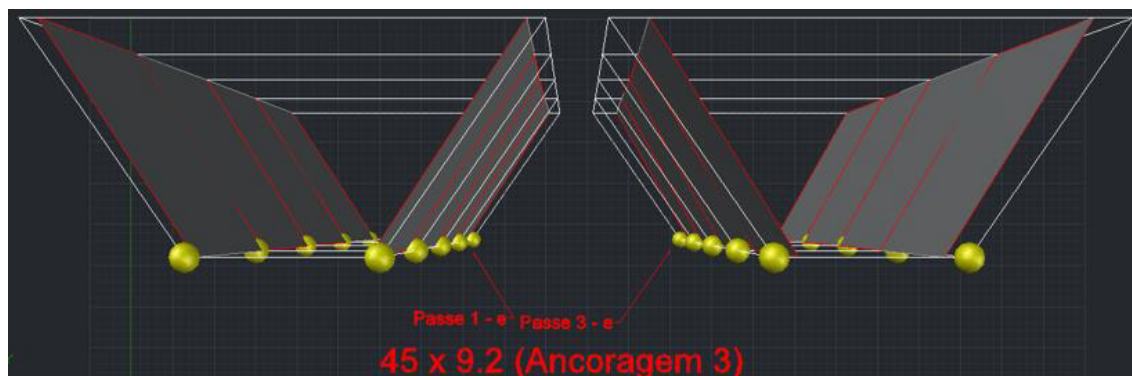
APÊNDICE G.

DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 3, ABERTURA DE RAIZ 9.2MM E ÂNGULO DE CHANFRO 45°

Tabela 6. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 3, abertura de raiz 9.2 mm e ângulo de chanfro 45°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a .

		d_1 (mm)		19,72					
		a_1 (mm)		9,20					
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	E	18,48	-6,3%	8,52	-7,4%	16,85	-14,6%	8,22	-10,7%
	d	18,38	-6,8%	8,55	-7,1%	16,93	-14,1%	8,35	-9,2%
	c	18,31	-7,2%	8,82	-4,1%	16,84	-14,6%	8,31	-9,7%
	b	18,45	-6,4%	8,53	-7,3%	16,96	-14,0%	7,89	-14,2%
	a	18,53	-6,0%	8,52	-7,4%	17,13	-13,1%	7,36	-20,0%
$\underline{X}$		18,43	-6,5%	8,59	-6,7%	16,94	-14,1%	8,03	-12,8%
S		0.09	0.4%	0.13	1.4%	0.12	0.6%	0.41	4.5%

Figura 39. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 3, abertura de raiz de 9.2 mm e ângulo de chanfro de 45°



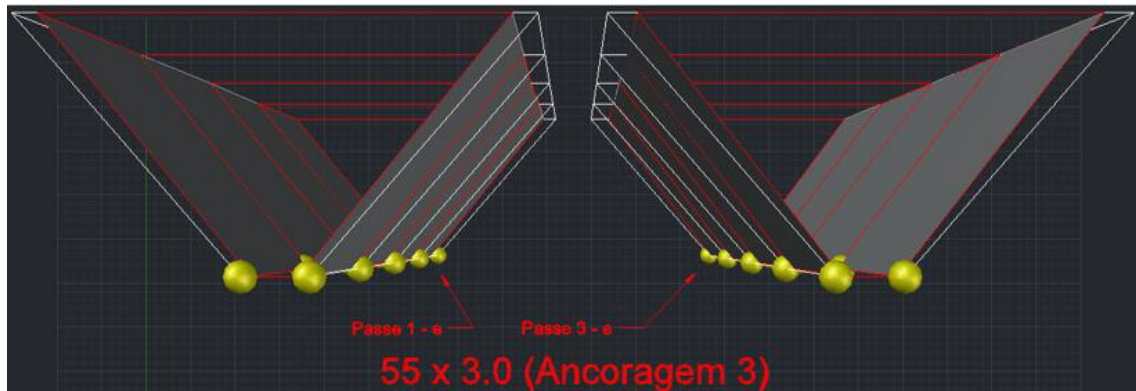
APÊNDICE H.

DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 3, ABERTURA DE RAIZ 3.0MM E ÂNGULO DE CHANFRO 55°

Tabela 7. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 3, abertura de raiz 3 mm e ângulo de chanfro 55°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a .

		d_1 (mm)		16,22					
		a_1 (mm)		3,00					
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	14,83	-8,6%	2,38	-20,7%	14,21	-12,4%	2,88	-4,0%
	d	14,86	-8,4%	2,37	-21,0%	14,20	-12,5%	2,60	-13,3%
	c	14,65	-9,7%	2,21	-26,3%	14,31	-11,8%	2,50	-16,7%
	b	14,71	-9,3%	2,55	-15,0%	14,28	-12,0%	2,56	-14,7%
	a	14,74	-9,1%	2,40	-20,0%	14,48	-10,7%	2,63	-12,3%
$\underline{X}$		14,76	-9,0%	2,38	-20,6%	14,30	-11,9%	2,63	-12,2%
S		0,09	0,5%	0,12	4,0%	0,11	0,7%	0,15	4,9%

Figura 40. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 3, abertura de raiz de 3 mm e ângulo de chanfro de 55°



APÊNDICE I.

DISTORÇÃO ANGULAR, ANCORAGEM TIPO 3, ABERTURA DE RAIZ 9.2MM E ÂNGULO DE CHANFRO 55°

Tabela 8. Distorção Angular medida com ancoragem tipo 3, abertura de raiz 9.2 mm e ângulo de chanfro 55°, onde (d) = abertura superior do chanfro, (a) = abertura de raiz, com base nos seus respectivos valores antes da soldagem (d_1) e (a_1), considerando sentido de soldagem de e para a .

		d_1 (mm)		22,42					
		a_1 (mm)		9,20					
		Passe 1				Passe 3			
		d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)	d (mm)	Δd (%)	a (mm)	Δa (%)
posição corte	e	21,00	-6,3%	8,50	-7,6%	19,63	-12,4%	8,80	-4,3%
	d	21,05	-6,1%	8,20	-10,9%	19,73	-12,0%	8,59	-6,6%
	c	25,15	-5,7%	8,37	-9,0%	19,88	-11,3%	8,37	-9,0%
	b	21,02	-6,2%	8,31	-9,7%	20,23	-9,8%	8,52	-7,4%
	a	21,12	-5,8%	8,69	-5,5%	20,62	-8,0%	8,83	-4,0%
$\underline{X}$		21,07	-6,0%	8,41	-8,5%	20,02	-10,7%	8,62	-6,3%
S		0,06	0,3%	0,19	2,0%	0,41	1,8%	0,19	2,1%

Figura 41. Deformação angular após soldagem para ancoragem tipo 3, abertura de raiz de 9.2 mm e ângulo de chanfro de 55°

