



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE SOLDAGEM NARROW GAP-
CW, DCW-GMAW e TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW.**

PAULO D'ANGELO COSTA ASSUNÇÃO

2020



ESTUDO DA VIABILIDADE DA SOLDAGEM NARROW GAP-CW, DCW-GMAW e TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW.

PAULO DANGELO COSTA ASSUNÇÃO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga

Belém-PÁ

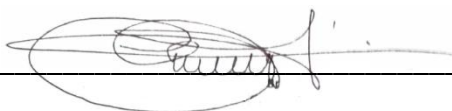
Dezembro/2020

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA SOLDAGEM NARROW GAP-
CW, DCW-GMAW e TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW.**

Paulo D'angelo Costa Assunção

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA(RODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

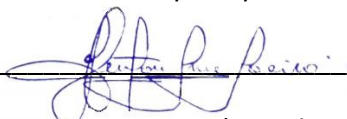
Aprovada por:



Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga (Orientador – PRODERNA/ITEC/UFPA)



Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis (Membro Interno –
PRODERNA/ITEC/UFPA)



Prof. Dr. Newton Sure Soeiro (Membro externo – ITEC/UFPA)



Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi (Membro externo - FEM/UFU)



Prof. Ph.D. Adrian P. Gerlich

(Membro externo - Universidade de Waterloo)



Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa

(Membro Externo ao programa – Campus de Abaetetuba / UFPA)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

“Até quando, Senhor, clamarei eu, e tu não me escutarás? Gritar-te-ei: Violência! e não salvarás? Por que razão me mostras a iniquidade, e me fazes ver a opressão? Pois que a destruição e a violência estão diante de mim, havendo também quem suscite a contenda e o litígio. Por esta causa a lei se afrouxa, e a justiça nunca se manifesta; porque o ímpio cerca o justo, e a justiça se manifesta distorcida.”

Habacuque 1:2-4

“Ninguém jamais parou para pensar

Na sua condição de cidadãos com direitos

Lutando em condições desiguais. Lutando

Contra preconceitos diferenças sociais”

(Tribo de Jah)

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus Cristo, ao Pai Todo Poderoso que, por intermédio do Divino Espírito Santo, me deram capacidades intelectuais, físicas e espirituais para alcançar meus objetivos, dentre eles o de apresentar esta tese.

Ao professor Dr. Eduardo Braga, por acreditar que eu teria capacidade de realizar este trabalho.

Ao meu Co-orientador, professor Ph.D. Adrian P. Gerlich por todo apoio e dedicação para realização deste trabalho.

Aos técnicos da Universidade de Waterloo, Nel Griffet e Mak Griffet, pela paciência e dedicação que foram determinantes no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Brasileiros no Canadá, Ipixuna, engenheiro da empresa Liburdi e Rafael (Lineu Silva), doutorando da Universidade de Waterloo, pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Brasileiros que conheci no Canadá, Raphael Mendonça, Raquel Meira e Izabel Alencar, pelo suporte que me deram para que eu me instalasse na cidade de Waterloo para poder realizar este trabalho.

À empresa Wood House, em especial meus amigos Conrado Andrade, Saulo Inojosa, Ricardo Ferreira e Flávio Nova. À empresa CleanMode, em especial a Fredy Fonseca e

Rose Fonseca pela oportunidade de trabalho nesses tempos de dificuldade financeira, o que foi decisivo para a realização deste trabalho.

À professora Ph.D. Donna Strickland, por todo conhecimento a mim transmitido, que certamente será de grande valia no futuro.

Aos meus amigos do Laboratório de caracterização de materiais metálicos LCAM/UFGA, em especial Cristian Loiza, Angelo Castro, José Tavares e Victor Ferreira, por toda ajuda para realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Pará e Universidade de Waterloo, e todos os professores que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos Taysa, José e Carlos Assunção, e sobrinha Carla Tayná, pela amizade.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao senhor Deus todo poderoso de Israel, à minha amada esposa Márcia Pantoja e a meu filho Paulo D'angelo Júnior, por não soltarem minha mão. Dedico também aos meus pais Ovídio Ribeiro Assunção e Eleunora Costa Assunção por tudo que me ofertaram, a meu irmão Carlos Alberto Costa Assunção pelo companheirismo e à memória do meu primo Denison Castro, por ter desejado que este dia ocorresse.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFGA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais. (Dr.Eng.)

ESTUDO DA VIABILIDADE DE SOLDAGEM NARROW GAP-CW, DCW-GMAW e TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW.

Paulo D'angelo Costa Assunção

DEZEMBRO/2020

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais

A produtividade ainda é um enclave nos processos industriais de fabricação, na soldagem especificamente. Apesar de grandes esforços e investimento em pesquisa, ainda há muito a ser feito. O processo de soldagem (CW-GMAW) se mostrou inovador, pois aumenta a produtividade sem aumentar danos ao material. Neste trabalho, serão investigados outros benefícios que o processo (CW-GMAW) pode trazer, como a soldagem de chanfro estreito e a soldagem em polaridade negativa CC-, assim como a adição de dois arames frio processo (DCW-GMAW). Foi investigada, por birrefringência acústica, a tensão residual em juntas soldadas pelo processo GMAW. As tensões residuais serão calculadas pela diferença das tensões e pela equação da tensão decomposta em dois planos. O fato de o arame frio atrair o arco elétrico viabilizou a soldagem em chanfro estreito, o que impede a erosão da parede lateral do chanfro. Esse mecanismo sugere ter suprimido o escalonamento do arco elétrico em polaridade (CC-), melhorando, conseqüentemente, a estabilidade do arco e o acabamento do cordão de solda. A solda com o DCW-GMAW mostrou melhor estabilidade de arco e menor zona afetada pelo calor HAZ. Os cálculos feitos com as diferentes equações numéricas mostraram que, apesar de necessitar de um pouco mais de trabalho, o cálculo da tensão residual decomposta possibilita uma visão mais precisa quando comparado ao cálculo realizado pelas diferenças de tensão.

Palavras chaves: (CW-GMAW), polaridade negativa CC-, chanfro estreito, (DCW-GMAW), birrefringência acústica.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

VIABILITY STUDY OF GMAW WELDING RESIDUAL STRESSES and WELDING NARROW GAP-CW, DCW-GMAW.

Paulo D'angelo Costa Assunção

DECEMBER/2020

Advisor: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga, D. Eng.

Area of Concentration: Use and Transformation of Natural Resources

The welding process (CW-GMAW) proved innovative, as it increases productivity without increasing damage to the material. This work will investigate other benefits that the process (CW-GMAW) can bring, such as narrow bevel welding and DC negative polarity welding, as well as the addition of two cold process wires (DCW-GMAW). It will be investigated by acoustic birefringence, the residual stress in joints welded by the GMAW process. The residual stresses will be calculated by the difference in stresses and the stress-decomposed equation in two planes. The fact that the cold wire attracts the electric arc made welding possible in a narrow chamfer prevents erosion of the chamfer sidewall. This mechanism suggests having suppressed the electric arc's scaling in polarity (CC-), consequently improving the arc stability and the weld bead finish. Welding with DCW-GMAW showed better arc stability and less heat affected zone HAZ. Moreover, the calculations made with the different equations showed that although it needs a little more work, the decomposed residual stress calculation allows a more accurate view compared to the calculation made by the differences in stress.

Keywords: (CW-GMAW), negative CC- polarity, narrow gap, (DCW-GMAW), acoustic birefringence

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 a) Geometria do chanfro estreito, b) configuração CW-GMAW; c) Ângulo de alimentação do arame frio e distância do bico de contato até a peça.	11
Figura 2.2 - Aparência e seção transversal do cordão para as soldas a) CW-GMAW e b) GMAW convencional. A e a seta 1 indica uma convexidade causada por falta de fusão e a seta 2 indica erosão da parede lateral devido a fusão excessiva causado pela fixação do arco.....	15
Figura 2.3 – Fimagem de alta velocidade, mostrando o comportamento da transferência de metal e o arco elétrico no chanfro estreito para o processo GMAW convencional (a) e para o processo CW-GMAW (b).....	16
Figura 2.4 - Influência da adição de arame frio no ponto do catodo do arco: a) o GMAW convencional; b) e c), representa um adicional de 60% e 140% respectivamente de arame frio de massa em relação à taxa de alimentação do arame eletrodo.	17
Figura 2.5 - Microestrutura do metal de base.....	18
Figura 2.6 - Processo CW-GMAW: a) Vista geral da microestrutura da zona afetada pelo calor HAZ; b) zona de granulação grosseira CGHAZ; c) zona de refino de grão FGHAZ e d) zona critica afetada pelo calor ICHAZ.....	18
Figura 2.7 - Processo GMAW: a) Vista geral da microestrutura da zona afetada pelo calor HAZ; b) zona de granulação grosseira CGHAZ; c) zona de refino de grão FGHAZ e d) zona critica afetada pelo calor ICHAZ	19
Figura 2.8 - Microdureza do passe acabamento (a) e passe de raiz (b)	19
Figura 3.1 - a)Configuração experimental usada para fabricar as soldas. (uma) Visão geral, da fonte soldagem, câmera e posto inicial de soldagem b) Detalhe do ângulo do arame frio.	28
Figura 3.2 - Diagrama esquemático de uma seção transversal mostrando como as características geométricas foram medidas	28
Figura 3.3 - Padrão de tensão desvio. a) CC+. b) CC-.....	29

Figura 3.4- Faixa de variação instantânea de tensão. (a) CC+. (b) CC-	31
Figura 3.5 - Resumo dos dados elétricos para todas as condições. (a, b) Tensão e corrente médias instantâneas. (c, d) tensão e corrente RMS. (e, f) Rotencia instantâneo	33
Figura 3.6 - Oscilogramas para soldas realizadas com polaridade positiva (CC+). a) GMAW conv. CC+). (b) CW-GMAW-40% (CC+). (c) CW-GMAW-60% (CC+). (d) CW-GMAW-80% (CC+).....	33
Figura 3.7 - Oscilogramas para soldas realizadas com polaridade negativa (CC-). a) GMAW convencional (CC-). (b) CW-GMAW-40% (CC-). (c) CW-GMAW-60% (CC-). d) CW-GMAW-80% (CC-).....	34
Figura 3.8 - Ciclogramas para soldas na CC+, escala indica densidade de pontos de dados. (a) CC+ GMAW.(b) CC+-CW-GMAW-40%. c)CC+-CW-GMAW-60%. d)CC+-CW-GMAW-80%	35
Figura 3.9 - Ciclogramas para soldas em polaridade CC-, escala indica densidade de pontos de dados. a) GMAW convencional CC-. (b) CW-GMAW40% CC-. (c) CW-GMAW-60% CC-. d) CWG-MAW-80% CC-.	36
Figura 3.10 - Transferência de metal com o eletrodo positivo CC+. (a) GMAW Convencional CC+. (b) CW-GMAW-40% CC+. (c) CW-GMAW-60% CC+. d) CW-GMAW-80% CC+	37
Figura 3.11 - Transferência de metal com o eletrodo negativo CC-. (a) GMAW Convencional (CC-). (b) CW-GMAW-40% (CC-). (c) CW-GMAW-60% (CC-). (d) CW-GMAW-80% (CC-)	38
Figura 3.12 - Fenômenos de curto-circuito em CW-GMAW-60% operando na CC- (DCEN). A seta vermelha indica a ponta do arame frio.	38
Figura 3.13 - Aspectos do cordão para polaridade positiva. (a) GMAW convencional. b) CW-GMAW-40%. (c) CW-GMAW-60%. d) CW-GMAW80%	39
Figura 3.14 Aspectos do cordão para polaridade negativa. (a) GMAW convencional. (b) CW-GMAW-40%. (c) CWGMAW-60%. (d) CW-GNAW80%	40

- Figura 3.15 - Seção transversal para polaridade negativa. (a) GMAW Convencional. (b) CW-GMAW40%. (c) CWGMAW-60%. d) CW-GMAW80% 3.2.3 Geometria e diluição do cordão 41
- Figura 3.16 - Seção transversal para polaridade negativa. (a) GMAW Convencional. (b) CW-GMAW-40%. (c) CWGMAW-60%. d) CW-GMAW80% 3.2.3 Geometria e diluição do cordão 42
- Figura 3.17 - Parâmetros geométricos dos cordões de solda e diluição. (a) Profundidade de penetração. (b) Largura do cordão. (c) Ângulo de molhagem do cordão. (d) Área total do cordão. e) Área HAZ. (d) diluição. Média de três seções transversais 44
- Figura 4.1 - Configuração da posição dos arames frios: a, c) Conduzindo o arco. b,d) Liderando e seguindo o arco..... 53
- Figura 4.2 - Oscilogramas e coeficiente de tensão das variações: a) GMAW Convencional. b) DCW-GMAW-20%. c) DCW-GMAW113 40%. d) DCW-GMAW-60%. e) DCW-GMAW-60%. Coplanar 55
- Figura 4.3 Ciclogramas para condições de soldagem: (a) GMAW padrão. (b) DCW-GMAW-20%. (c) DCW-GMAW-40%. d) 138 DCW-GMAW-60%. (e) DCW-GMAW-60% - coplanar..... 57
- Figura 4.4 - Imagens de alta velocidade do arco sincronizadas com sinais elétricos: GMAW Convencional A flecha branca indica o descolamento de gotículas **Erro!**
- Indicador não definido.**
- Figura 4.5 - Imagens de alta velocidade do arco sincronizadas com sinais elétricos: (a) CW-GMAW-20%, (b) CW-GMAW-40%. A seta branca indica o destacamento de gotículas. 59
- Figura 4.6- Imagens de alta velocidade do arco sincronizadas com sinais elétricos: (a) CW-GMAW-60%, (b) CW-GMAW-60% (coplanar). A seta branca indica o desprendimento de gotículas 60

Figura 4.7 - Características do cordão de solda: (a) GMAW padrão, (b) CW-GMAW-20%, (c) CW-GMAW-40%, (d) CW-GMAW 60%, (e) CW-GMAW-60 % (coplanar). A seta branca indica a direção da soldagem.....	61
Figura 4.8 - Macrografias para as condições de soldagem: (a) GMAW padrão, (b) DCW-GMAW-20%, (c) DCW-GMAW-40%, (d) DCW-GMAW-60%, (e) DCW-GMAW-60% (coplanar).....	62
Figura 4.9 - Características geométricas: (a) Penetração, (b) Diluição. O (C) significa coplanar	63
Figura 4.10- Micrografias tiradas no centro das contas: (a) GMAW padrão, (b) CW-GMAW-20%, (c) CW-GMAW-40%, (d) CW-GMAW-60%, (e) CW-GMAW-60% (coplanar).....	64
Figura 4.11 – Mapas de dureza sldas DCW . a) GMAW cnvencional, b) DCW-GMAW-20%, DCW-GMAW-40%, d) DCW250 GMAW-60%, e (e)DCW-GMAW-60% - Coplanar	65
Figura 4.12 - Variação dos números ara todas as condições. Média de quatro seções transversais	67
Figura 5.1 - a) Exemplo de sinal real. b) Sinal discreto para sete níveis. Fonte: Marqueze [4].....	78
Figura 5.2 - Faixas de tratamento térmico de aço. Fonte: F.C. Campbell [6].	79
Figura 5.3 - Esquema mostrando a deformação (degrau) utilizada nas ondas por birrefringência, e a mudança de lugar dessa deformação nos ecos subsequentes.	80
Figura 5.4 - funções do programa LabVIEW	81
Figura 5.5 - Configuração para medição de tensões residuais	82
Figura 5.6 - Sinal original e interpolado mostrando a melhoria na frequência de Fonte de amostragem: Andrino [9].	83
Figura 5.7 - Amostras do AISI 1020.....	84

Figura 5.8 - Corpo de prova para medir birrefringência em função do aumento de tensão	84
Figura 5.9 - Tela do programa Tensão residual do CAMJ 2017.	86
Figura 5.10 - Sinal antes (a) e depois (b) da interpolação.....	86
Figura 5.11 - Sinal antes e depois da correlação cruzado.	87
Figura 5.12 - Gráficos com os valores de birrefringência das amostras 01, 02 e 03.	88
Figura 5.13 - Gráficos com os valores de birrefringência da amostra para teste de tração.	89
Figura 5.14 - Gráfico da constante acústico-elástica	89
Figura 6.1 - Metal de base fixado por grampos e coordenadas usada na análise onde:x,y Coordenadas axiais, Desenho esquemático da chapa de alumínio 5052 com a divisão dos pontos para fazer as medidas de birrefringência acústica.	97
Figura 6.2 a) Dispositivo de sujeição do transdutor, junto com a placa e a madeira para evitar deflexão. (b) Montagem do sistema na servopulser para ensaio de compressão ara obtenção da constante acústico elástica. Esquema da compressão feita a 90° c) e 0° d) do sentido de laminação da placa.	102
Figura 6.3 - Gráficos da média do desvio padrão dos corpos de prova 1, 2 e 3, para SG, Mel e CB.	104
Figura 6.4 - Corpo de prova 01, 02 e 03 soldados com processo GMAW.	106
Figura 6.5 - Gráfico da constante acústico elástica na direção de laminação 90° e perpendicular a direção de laminação 0°.	108
Figura 6.6 - Gráficos da tensão residual calculada pela diferença entre as tensões.	109
Figura 6.7 - Gráficos da tensão residual calculada separadamente.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química nominal do metal de base e do arame	11
Tabela 2.2 - Parâmetros de soldagem	12
Tabela 2.3 - Velocidade de alimentação para arame eletrodo e arame frio	13
Tabela 2.4 - Taxa de fusão e energia para taxa de deposição em massa	14
Tabela 3.1 - Composição química do metal de base e arame de soldagem	27
Tabela 3.2 - Parâmetros de soldagem definidos na fonte de soldagem	27
Tabela 4.1 - Matriz experimental, com os parâmetros definidos na fonte de soldagem e variação na alimentação do arame frio.....	53
Tabela 4.2 - Composição química nominal dos arames de soldagem e do metal base... 53	
Tabela 4.3 - Valores médios de corrente, tensão e potência, amostrados durante a soldagem.....	54
Tabela 5.1 - Medidas de birrefringência.	88
Tabela 6.1 - Composição química nominal do arame eletrodo e do metal base.	99
Tabela 6.2 Parâmetros de soldagem.....	99
Tabela 6.3 - Valores médios de birrefringência para cada acoplante e corpo de prova	103
Tabela 6.4 - Valores de impedância acústica para os acoplantes.	105

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivos Geral.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	4
1.5 NOMENCLATURA.....	4
1.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	5
PARTE I – SOLDAGEM GMAW COM ARAME FRIO	6
CAPITULO 2 - ARTIGO I -VIABILIDADE DA SOLDAGEM NARROW GAP WELDING USANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM GAS METAL ARC WELDING (CW-GMAW).....	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	9
2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	11
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
2.3.1 Produtividade na Soldagem.....	13
2.3.2 Fenômeno da Parede Lateral do Chanfro.....	14
2.3.3 Microestrutura e Microdureza.....	17
2.4 CONCLUSÃO	20
2.5 NOMENCLATURA.....	20

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
CAPITULO 3 - ARTIGO II- COMPARANDO CW-GMAW EM ELETRODO DE CORRENTE CONTINUA POSITIVA (CC+) E ELETRODO DE CORRENTE CONTINUA NEGATIVO (CC-)	23
3.1 INTRODUÇÃO.....	25
3.2 METODOLOGIA.....	26
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
3.3.1 Dados Elétricos	29
3.3.2 Oscilogramas e Ciclogramas	33
3.3.3 Imagem de Alta Velocidade do Comportamento do Arco.....	37
3.4 CONCLUSÕES.....	45
3.5 NOMENCLATURA.....	45
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
CAPÍTULO 4 - ARTIGO III- UM ESBOÇO NA SOLDAGEM DE GÁS METAL ARC WELDING DOUBLE COLD WIRE DCW-GMAW	49
4.1 INTRODUÇÃO.....	51
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.3 RESULTADOS	54
4.3.1 Resumo dos Dados Elétricos.....	54
4.3.2 Oscilogramas e Estabilidade do Arco	55
4.3.3 Ciclogramas	56
4.3.4 Vídeos de Alta Velocidade e Mecanismo de Transferência de Metal ...	57
4.3.5 Características do Cordão	61

4.3.6	Macrografias, Penetração e Diluição	62
4.3.7	Micrografias.....	63
4.3.8	Dureza Vickers.....	64
4.4	DISCUSSÕES.....	65
4.4.1	Características da Dinâmica do Arco	65
4.4.2	Mecanismo de Peclet (Pe) E da Convecção da Poça de Fusão.....	66
4.4.3	Modelo Físico Proposto - Convecção de Marangoni	67
4.4.4	Diluição, Penetração e Microestruturas.....	69
4.4.5	Microdureza Vickers	69
4.5	CONCLUSÃO	70
4.6	NOMENCLATURA.....	71
4.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	PARTE II – AVALIAÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL	74
	CAPÍTULO 5 - ARTIGO IV- CONSTRUÇÃO E TESTE DO PROGRAMA PARA FAZER MEDIÇÕES DE TENSÃO RESIDUAL POR ONDA ULTRASSÔNICA	75
5.1	INTRODUÇÃO.....	77
5.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	79
5.2.1	Tratamento do Sinal do Tempo da Onda Ultrassônica	79
5.2.2	Configuração Experimental e Materiais.....	82
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
5.4	CONCLUSÃO	90

5.5 NOMENCLATURA.....	90
5.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
CAPÍTULO 6 - ARTIGO V- EFICIÊNCIA DO TIPO DE ACOPLANTE E DA DECOMPOSIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS DE ALUMÍNIO 5052, VERIFICADO POR MÉTODO ULTRASSÔNICO	93
6.1 INTRODUÇÃO.....	95
6.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	98
6.2.1 Procedimento de Soldagem.....	98
6.2.2 Avaliação de Acoplante	99
6.2.3 Equações para Calcular Tensão Residual.....	100
6.2.4 Método de Obtenção da Constante Acústico Elástica	101
6.3 RESULTADO E DISCUSSÃO	102
6.3.1 Avaliação dos Acoplantes	102
6.3.2 Procedimento de Soldagem.....	105
6.3.3 Tensão Residual e Constante Acústico Elástica.....	106
6.4 CONCLUSÕES.....	110
6.5 NOMENCLATURA.....	110
6.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
7.1 - CONCLUSÕES GERAIS.....	114
7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
7.3 APÊNDICE A :PUBLICAÇÕES EM REVISTAS	116

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O processo de soldagem GMAW foi desenvolvido nos anos finais da década de 1940 e trouxe grandes avanços no processo de fabricação industrial, principalmente pela alta produtividade e pela versatilidade de controle do tamanho da poça de fusão pelos valores de tensão e corrente, possibilitando unir chapas de várias espessuras e em várias posições sem que fosse necessária a mudança do diâmetro do eletrodo ONG, MD et al [1]. Uma variação desse processo começou a ser estudada em 2005 na Universidade Federal do Pará (UFPA), que é o processo com a adição de um arame “frio”, conhecido como processo CW-GMAW Cabral et al. [2]. Em 2012, iniciou-se os estudos com a adição de dois arames “frio” que ficou conhecido como processo DCW-GMAW Costa Assunção et al. [3]. Apesar de muitos estudos sobre esses processos já terem sido realizados, pouco se conhece sobre eles, principalmente em relação ao processo DCW-GMAW.

Apesar de o processo GMAW ter sido revolucionário na produtividade de união de materiais, esse quesito continua sendo um gargalo da indústria até os dias atuais. Por isso, técnicas como a técnica de união por *Narro –Gap* ainda está sendo muito difundida na indústria, uma vez que, com essa técnica, necessita-se de menor deposição para unir chapas de grande espessura, com menor energia de soldagem e conseqüentemente menor deformação da estrutura MALIN, V. Y. Part I [16] MALIN, V. Y. Part II [5]. Mas usar essa técnica com o processo GMAW tem sido um desafio, pois foram propostas várias mudanças no processo que ainda não têm boa aplicação industrial, devido às suas complexidades.

Pensando ainda em produtividade, quando utilizamos o processo GMAW em polaridade negativa para fazer revestimento, temos o aumento dessa produtividade, diminuindo consideravelmente a diluição. Contudo, soldar com essa polaridade tem

alguns inconvenientes, como por exemplo, respingos excessivos causados pela repulsão do escalonamento do arco elétrico Assunção, PDC, Ribeiro, RA, *et al.*[6].

A energia usada na soldagem do processo GMAW provoca deformação na estrutura soldada, como também tensão residual, o que pode prejudicar consideravelmente uma estrutura soldada, diminuindo a vida útil à fadiga ou acelerando a corrosão da mesma, podendo levar prematuramente ao colapso uma estrutura metálica, como no caso de um navio petroleiro, edifícios, e outros. Para ter consciência dos níveis de tensão residual, é necessário medi-los na elaboração do procedimento de soldagem e após a construção da estrutura estar finalizada Masubuchi [7]. Dessa forma, para avaliar a tensão residual de uma estrutura com sua fabricação finalizada, é necessário usar um método de medição de tensão residual não destrutivo, como é o caso da birrefringência acústica. Esse método utiliza ondas ultrassônicas cisalhantes, que associadas a complexas equações matemáticas torna possível medir a tensão residual de uma estrutura acabada sem causar qualquer dano à mesma.

Este trabalho tem como foco processual fazer as seguintes averiguações: Primeiro, usar o processo GMAW-CW para fazer a união de aço usando a técnica *Narrow-Gap*, uma vez que o processo GMAW convencional tem grandes dificuldades para fazer a soldagem de união usando essa técnica. Segundo, usar o processo GMAW-CW para fazer solda de revestimento em polaridade negativa, pois isso poderia melhorar problemas como o escalonamento do arco, uma vez que é observado que o arco elétrico escala o arame frio. Terceiro, fazer investigação do comportamento do arco elétrico e geometria da solda realizada com processo GMAW-DCW que utiliza a adição de dois arames “frio”. E por último, verificar tensão residual em juntas soldadas pelo processo GMAW, por método não destrutivo conhecido como birrefringência acústica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GERAL

Este trabalho tem como objetivos: 1) Aplicar o processo CW-GMAW em chanfro estreito (*Narrow Gap*), 2) Verificar o comportamento do processo CW-GMAW

na soldagem em polaridade negativa (CC-); 3) Buscar um melhor entendimento na soldagem em simples deposição com dois arames “frio”, denominado processo DCW-GMAW; 4) Avaliar a tensão residual pelo método de birrefringência acústica em juntas soldadas pelo processo GMAW.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- verificar o comportamento do arco elétrico com filmagem de alta velocidade, pareado com sistema de aquisição de corrente e tensão.
- Fazer análise mecânica e metalúrgica e geométrica dos cordões de solda.
- Fazer e calibrar um software para aquisição de sinal produzido por onda ultrassônica, usado para medir tensão residual em juntas soldadas.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

As principais contribuições desta tese são:

- Demonstrar a possibilidade de unir um chanfro reto e estreito com processo CW-GMAW.
- Demonstrar que é viável aplicar a soldagem com processo CW-GMAW em polaridade direta melhorando a estabilidade do arco elétrico.
- Propor um novo processo de soldagem que utiliza dois arames frio, que foi denominado de processo DCW-GMAW.
- Aplicar novas equações numéricas para calcular tensão residual por birrefringência acústica.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Após esta seção introdutória onde foram estabelecidos os principais objetivos da pesquisa, esta tese apresenta no próximo capítulo uma breve revisão dos conceitos fundamentais do processo de soldagem GMAW, enfatizando as modificações implementadas pelos processos CW-GMAW e DCW-GMAW, visando averiguar o comportamento do arco elétrico, as propriedades mecânica metalúrgica e geométrica do cordão de solda, bem como os níveis de tensão residual em juntas soldada pelo processo GMAW (Capítulo 1). A seguir, a tese é dividida em duas partes, que expõe e discute os resultados do processo GMAW com adição de arame “frio” (Parte I) e avaliação da tensão residual (Parte II). A maior parte do trabalho foi dedicada a soldagem com adição de arame frio. Assim, a Parte I compreende os próximos três capítulos (Capítulos 2 a 4), que investigam o comportamento do arco elétrico na soldagem em chanfro estreito, as propriedades mecânica e metalúrgica dessas juntas soldadas (Capítulo 2) e a aplicação do processo CW-GMAW na soldagem com polaridade de corrente direta CC- (Capítulo 3). Descobrimos muitos benefícios na soldagem com um arame “frio” por isso foi dado um segundo passo que é a utilização de dois arames “frio” que foi denominado de processo DCW-GMAW apresentado no (Capítulo 4).

Por fim, a Parte II enfoca a análise da tensão residual. O Capítulo 5 foi dedicado a construção e teste de um software em LabVIEW para tratar os sinais com funções de interpolação e correlação cruzada. A tensão residual foi calculada pela diferença das tensões e as tensões decompostas em peças de alumínio 5052 soldada pelo processo GMAW, Capítulo 6.

1.5 NOMENCLATURA

Ar	Argônio
CC+	Corrente Contínua Positiva
CC-	Corrente Contínua Negativa
GMAW	Gas Metal Arc Welding
CW-GMAW	Gas Metal Arc Welding - Cold Wire

DCW-GMAW	Gas Metal Arc Welding - Double Cold Wire
MB	Metal de base
NGW	Narrow Gap Welding

1.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] NGO, M. D. et al. Development of digital gas metal arc welding system. *Journal of materials processing technology*, fev. 2007.
- [2] Cabral TS, Braga EM, Mendonça EAM, et al. Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. *Weld Int*. 2015;29:928–936.
- [3]. P.D.C. Assunção, R.A. Ribeiro, E.B.F. Dos Santos, A.P. Gerlich, E.M. Braga, Feasibility of narrow gap welding using the cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process, *Weld. World*. 61 (2017) 659–666. doi:10.1007/s40194-017-0466-5.
- [5] MALIN, V. Y. The State of the Art of Narrow Gap Welding Part II. *Welding Journal*, v. 62, N° 6, 1983, p. 37-46.
- [6] Assunção, PDC, Ribeiro, RA, Dos Santos, EBF et al. Comparando CW-GMAW em eletrodo de corrente contínua positivo (DCEP) e eletrodo de corrente contínua negativo (DCEN). *Int J Adv Manuf Technol* 104, 2899–2910 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04175-2>
- [7] Masubuchi, K.. Analysis of Welded Structure. *International Series on Materials and Technology* /Vol. 33 / 1980, pp. 148-188.

PARTE I – SOLDAGEM GMAW COM ARAME FRIO

CAPITULO 2

ARTIGO I -VIABILIDADE DA SOLDAGEM NARROW GAP WELDING USANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM GAS METAL ARC WELDING (CW- GMAW)¹

O conteúdo desse capítulo foi integralmente traduzido do artigo publicado em *Welding in the World* (2017) 61:659–666 DOI 10.1007/s40194-017-0466-5 ¹

VIABILIDADE DA SOLDAGEM NARROW GAP WELDING USANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM GAS METAL ARC WELDING (CW-GMAW)

Resumo

Este artigo avalia o desempenho do Processo de soldagem a cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) para soldagem em chanfro estreito. O processo CW-GMAW é caracterizado pela introdução de uma alimentação contínua de arame não energizado (arame frio) no arco elétrico / região da poça de fusão. O arame frio é fundido usando o calor excedente disponível no arco e metal fundido poça de fusão. Chanfros estreitos de 5 mm de largura foram preparadas em placas de aço de 16 mm ASTM A131 grau A e preenchidas usando o Processo CW-GMAW. A viabilidade do processo de soldagem em chanfro estreito foi avaliada por meio da análise de microestrutura e dureza Vickers da seção transversal da junta. O mecanismo pelo qual o arame frio impede a erosão da parede lateral do chanfro é identificada usando imagens de alta velocidade. foi descoberto que para o CW-GMAW, o arco elétrico se conecta ao arame frio em vez da poça de fusão levando a mais estabilidade ao arco elétrico, evitando que o arco se fixe na parede lateral do chanfro. O metal de solda adicional depositado pelo arame frio, permitiu o preenchimento completo do chanfro estreito com apenas três passagens, demonstrando o potencial de produtividade do Processo CW-GMAW para soldagem em Chanfro estreito.

Palavras-chave: Soldagem · Welding · Gas metal arc welding · Cold-wire · GMAW · CW-GMAW · Soldagem chanfro estreito · Produtividade de soldagem.

2.1 INTRODUÇÃO

A soldagem por *Narrow Gap Welding* (NGW) visa reduzir a necessidade do volume de metal de solda e calor para fazer uma junta, por uma redução na largura do chanfro. Consequentemente, nessa técnica desacopla a relação entre o tempo de soldagem e a espessura da chapa que é comumente encontrado em técnicas de soldagem convencional.

Em termos das aplicações da técnica *Narrow Gap Welding* NGW (chanfro estreito) por meio do processo de soldagem a Gás Metal Arc Welding (GMAW), Com esse processo a baixa energia de soldagem é usada para evitar a erosão lateral da parede do chanfro estreito, o que consequentemente pode gerar falta de fusão na parede do chanfro. Para melhorar a fusão e a molhabilidade da parede lateral do chanfro, tradicionalmente é usado oscilação do arco elétrico (tecimento triangular) [1,2].

Existem muitas variações do processo GMAW convencional, que são usadas para soldagem em chanfro estreito. Recentemente, Liu et al. [3] propuseram uma modificação do processo, na qual três arames são utilizados, sendo que dois deles são fundidos indiretamente pelo arco elétrico; Phanim et al. [4] desenvolveram um processo a laser híbrido com fio quente que pode soldar com sucesso um chanfro estreito com folga de 3 mm com propriedades adequadas e fusão consistente da parede lateral. Nakamura et al. [2] propuseram um GMAW de arco oscilante processo, que demonstrou melhorar a distribuição da pressão do arco sobre a poça de fusão e, consequentemente, aumentou o molhamento das paredes laterais do chanfro. Apesar de todos os desenvolvimentos da soldagem por chanfro estreito, a falta de fusão resultante dos baixos valores de entrada de calor usados para evitar erosão da parede lateral do chanfro, essa (fusão excessiva da parede lateral) continua sendo o principal desafio dessa técnica. Esse defeito pode desempenhar um papel de ponto de concentração de tensão que pode dar início a trinca quando a solda estiver em serviço, e pode ser prejudicial ao seu desempenho mecânico. Além disso, os inconvenientes associados a esta técnica, como a confiabilidade do equipamento e os custos associados à compra e manutenção do equipamento permanecem Malin VY [5]. Uma limitação da técnica NGW é a perturbações do arco, que induzem defeitos na junta soldada, e o reparo necessário que a técnica do chanfro aberto não necessita, o que também pode aumentar o custo total do processo de fabricação. Mas a

técnica NGW apresenta como vantagem a produtividade, que melhora, pois, diminui o número de passagens para soldar chapas intermediárias e grossas.

Algumas modificações foram feitas no GMAW convencional para melhorar seu desempenho, como por exemplo o GMAW laser híbrido que melhora significativamente o processo GMAW convencional Li.R, et al [6], mas essa e outras modificações são complexas e de custo elevado. Uma modificação alternativa de baixo custo e complexidade do GMAW convencional é o processo de soldagem *Cold Wire Gas Metal Arc Welding* (CW-GMAW). Esse processo foi projetado para superar a sofisticação e o custo de algumas técnicas usadas como modificação do processo GMAW convencional. No processo CW-GMAW, um arame não energizado é introduzido no sistema arco Elétrico e poça de fusão que é fundida absorvendo o calor que seriam perdidos para os arredores ou transferidos para o metal base. Observou-se que a adição do arame fio promove um ligeiro aumento na corrente de soldagem. Contudo, de acordo com trabalhos anteriores R.A Ribeiro et al. [7], foi demonstrado que este aumento da corrente não aumenta a penetração e, portanto, especula-se que a corrente adicional seja necessária para a fusão do arame frio adicional. Embora o ligeiro aumento na corrente de soldagem, é verificada uma redução na distorção de estrutura soldada Cabral T.S et al.[12], o que permite um aumento na vida de fadiga das soldas Marques et al.[11].

Este capítulo examina a viabilidade de usar o CW-GMAW para a técnica narrow gap welding NGW, abordando especificamente as vantagens de custo do equipamento, uma vez que o CW-GMAW é uma modificação barata do processo original do GMAW sem a inerente complexidade das modificações do processo geralmente associadas ao NGW. Este trabalho apresenta vídeos de alta velocidade de fenômenos da parede lateral, macro e micrografias e dureza Vickers do metal de solda e das zonas afetadas pelo calor as juntas produzidas usando o processo CW-GMAW em comparação com o GMAW padrão. De acordo com a inspeção de raios-X, as juntas de solda produzidas usando o processo CW-GMAW estavam livres de defeitos e o mecanismo para isso foi identificado por imagens em alta velocidade.

2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Chanfros estreitos com folga de 5 mm foram feitas com aço C-Mn placas (aço ASTM A131 grau A) de 5/8 polegadas (aproximadamente 16 mm) de espessura, Fig.2. 1a. Este aço é normalmente usado na indústria de construção naval. Os arames de soldagem utilizados foram AWS A5.18 ER70S-6 [10]. A tabela 1 apresenta os valores nominais

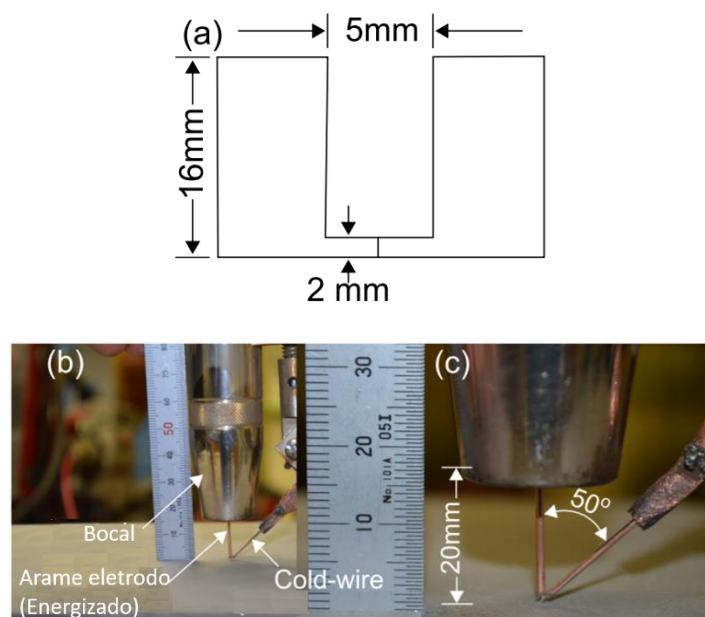


Figura 2.1 a) Geometria do chanfro estreito, b) configuração CW-GMAW; c) Ângulo de alimentação do arame frio e distância do bico de contato até a peça.

Tabela 2.1 - Composição química nominal do metal de base e do arame

Material	Composição Química Nominal (wt.%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
ASTM A131-A	0,126	0,215	0,779	0,015	0,005	0,018	Balanço
ER70S-6	0,15	1,15	1,85	0,025	0,035	0,05	Balanço

Tabela 2.2 - Parâmetros de soldagem

	Voltagem (V)		Corrente (A)		Energia de soldagem (kJ/mm)	
	CW-GMAW	GMAW conven.	CW-GMAW	GMAW conven.	CW-GMAW	GMAW conven.
	Passe de raiz	22,2	22,1	286,2	282,8	0,95
Passe de enchimento	25,1	25,1	367,6	321,8	0,92	0,81
Passe de acabamento	25,1	25,1	366,7	354,1	0,92	0,89

A composição química dos arames de soldagem é igual Mas os diâmetros são diferentes. O arame eletrodo (energizado) tem diâmetro de 1,2 mm e para o arame frio (não energizado) o diâmetro foi de 0,9 mm. O gás de proteção foi uma mistura de 85% Ar15% de CO₂ a uma vazão de 17 L.min⁻¹. Na Fig. 2.1b os detalhes da alimentação do arame frio são mostrados. O arame eletrodo (energizado) e o arame frio (não energizado) são alimentados um em relação ao outro com o ângulo de aproximadamente 50° veja a Fig. 2.1c. A distância do bico de contato peça (DBCP) foi mantida constante para todos passes e iguais a 20 mm.

As soldas foram realizadas na posição plana (1G), utilizando um braço robótico para manipulação e controle automáticos de a velocidade de soldagem. Não houve oscilação do arco (tecimento). A fonte de soldagem usada foi uma Lincoln Power Wave R500 em modo de tensão constante. O alimentador de arame frio utilizado foi um alimentador Lincoln LN-10. Uma barra de aço AISI 1020 de 5 mm de espessura foi usada como back metálico de apoio durante a soldagem. Uma vez os chanfros foram preparados, foram presos a uma mesa usando grampos “C”. As dimensões das juntas soldadas eram 304,8 mm (12 pol) de comprimento, 120,65 mm (4,75 pol) de largura e 15,875 mm (5/8 in) de espessura.

Para avaliar o desempenho e a produtividade do processo CW-GMAW, diferentes combinações de parâmetros de soldagem foram utilizadas, de modo que o calor nominal de entrada permaneça constante, conforme mostrado na Tabela 2.2. Para ambos os processos, a velocidade de soldagem foi de 40,6 cm / min para o passe de raiz e 60,9 cm / min para os passes de preenchimento e acabamento. A velocidade de alimentação do arame para ambos os processos está resumida na Tabela 2.3. O aumento na taxa de deposição de massa para o processo CW-GMAW é relativo ao GMAW convencional.

Para caracterizar o fenômeno arco / parede lateral do chanfro e a transferência de metal, uma câmera de alta velocidade, sincronizada com um sistema de aquisição de

dados (DAQ) operando em uma taxa de aquisição de 20 kHz. A câmera de alta velocidade foi operado com um (frame rate) de 5000 quadros por segundo, com uma abertura de $f/22$, velocidade do obturador de $25\mu s$. Um filtro de passagem de banda estreita de comprimento de onda de 900 ± 10 nm, foi usado para limitar a quantidade de radiação do arco que chega ao sensor da câmera.

Tabela 2.3 - Velocidade de alimentação para arame eletrodo e arame frio

	GMAW convencional	CW-GMAW		Arame frio em massa (%)
	Eletrodo (m/min)	Eletrodo (m/min)	Cold wire (m/min)	
Passe de raiz	9,0	9,0	3,2	20
Passe de enchimento	12,0	12,0	10,6	50
Passe de acabamento	12,0	12,0	10,6	50

Após o término das soldas, as juntas foram submetidas a exame radiológico. As amostras foram então cortadas na secção transversais e submetidas ao procedimento metalográfico padrão: montagem, retificação, polimento e ataque com Nital 5%. As medições de dureza foram realizadas através do chanfro estreito soldado em quatro secções transversais no passe raiz, enchimento e acabamento. As medidas de dureza foram realizadas com uma carga de 0,5 kg, tempo de permanência de 15 segundos e distância do endentado entre 0,25 mm. Os valores de dureza relatados são a média das medições realizadas com barras de erros que representam a margem de erro de cada local de medição.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Produtividade na Soldagem

Os parâmetros de soldagem foram alterados para que a entrada de calor nominal permaneça a mesma. Isso foi feito para testar a capacidade dos processos em aumentar a deposição mantendo a energia de soldagem constante. Na Tabela 2.4 pode-se observar uma variação maior nos valores de entrada de calor entre os diferentes passes de soldagem para GMAW convencional em comparação com o processo CW-GMAW. Isso é consequência da maior instabilidade do processo GMAW, quando a tensão é aumentada

de 22 para 25 V, para esta largura de chanfro. Ao mesmo tempo, quanto menor variação no valor de entrada de calor para o CW-GMAW aponta para a estabilidade do processo e sua capacidade de aumentar a taxa de deposição sem alterar a entrada de calor da soldagem. Na Tabela 2.2 a taxa de fusão do arame e a relação entre o calor de entrada são mostrados. No processo CW-GMAW, é possível aumentar a taxa de fusão de 4,9 kg / à 9,7 kg / h, levando ao preenchimento completo do chanfro de 5 mm com apenas três passagens, enquanto GMAW convencional, a taxa de fusão foi limitada a 6,5 kg / h, e conseqüentemente, não é capaz de encher completamente o chanfro com apenas três passes. Isso é mostrado na Fig. 2.2, onde podemos ver a diferença de produtividade em relação aos dois processos. O processo CW-GMAW preenche totalmente o chanfro deixando o último cordão com boa aparência e deposição total Fig. 2.2d, enquanto isso não acontece com o GMAW convencional, Fig. 2.2h. Embora a taxa de fusão do GMAW convencional aumente de 4,9 kg / ha 6,5 kg / h, o cordão final não foi satisfatório, como mostrado na Fig. 2.2e. Como pode ser visto no preenchido com o processo CW-GMAW, Fig. 2.2a, a aparência do cordão tem uma forma regular, sem sinais de imperfeições superficiais do cordão. Por outro lado, quando O processo GMAW convencional é usado para a mesma soldagem Fig. 2.2e, imperfeições de solda, como cordões convexos perfil (seta 1) e erosão excessivo da parede lateral do chanfro (seta 2) é observada. É evidente que no GMAW convencional o arco escava a parede lateral do chanfro enquanto isso não ocorre na amostra CW-GMAW.

Tabela 2.4 - Taxa de fusão e energia para taxa de deposição em massa

	Taxa de fusão do eletrodo (kg/h)		Relação energia e massa (kJ/kg)	
	CW-GMAW	GMAW convencional	CW-GMAW	GMAW convencional
Passe de raiz	5,8	4,9	3,9	4,6
Passe de enchimento	9,7	6,5	3,4	4,5
Passe de acabamento	9,7	6,5	3,3	5,1

2.3.2 Fenômeno da Parede Lateral do Chanfro

Os vídeos de alta velocidade produzidos foram capazes de revelar claramente os fenômenos ocorridos no arco elétrico. Isso é mostrado na Fig. 2.3 para ambos os processos e para o passo de preenchimento com um valor de tensão de 25 V. Os quadros na linha superior desta figura mostram o comportamento do arco para o processo CW-GMAW, enquanto a linha inferior mostra eventos que ocorrem com o processo GMAW

convencional. Pode-se observar que, para o processo CW-GMAW, a poça de fusão mostra um perfil côncavo, com um ângulo de ϕ maior que 90° , garantindo um bom molhamento das paredes laterais do chanfro estreito. Por outro lado, para o processo GMAW convencional o ângulo foi menor do que 90° e produz perfil de rebordo convexo, como mostrado na Fig.2.2e pela seta 1. Além disso, pode ser visto que para o processo GMAW convencional o arco escala a parede lateral do chanfro causando erosão na mesma e causando descontinuidades mostradas na Fig.2.2e, enquanto para CW-GMAW isso não é observado. De fato, para o CW-GMAW o arco elétrico está sempre ligado à poça de fusão e é observada pouca perturbação no arco. Isso traz uma pergunta inevitável: por que é o arco elétrico é mais regular no processo CW-GMAW, quando em comparação com GMAW padrão?

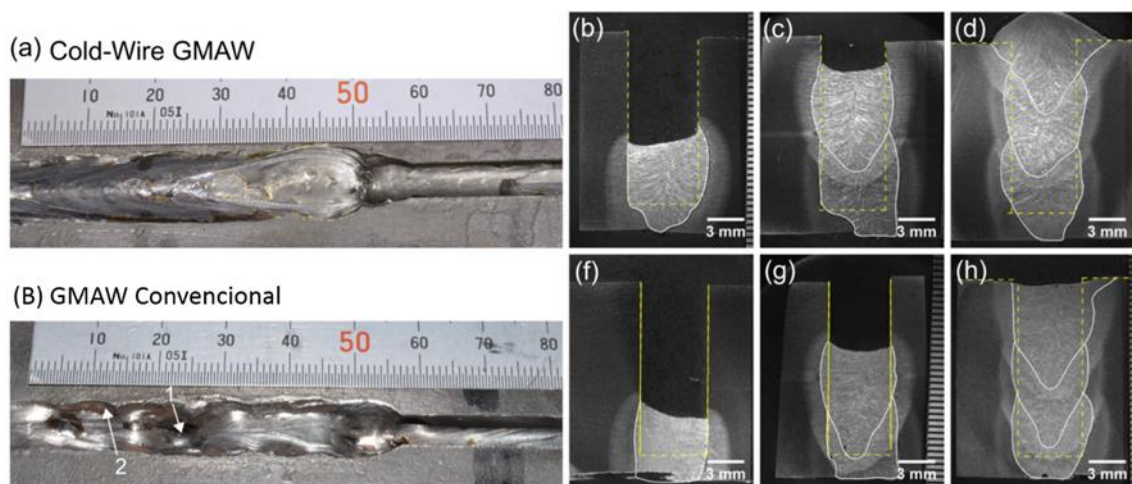


Figura 2.2 - Aparência e seção transversal do cordão para as soldas a) CW-GMAW e b) GMAW convencional. A e a seta 1 indica uma convexidade causada por falta de fusão e a seta 2 indica erosão da parede lateral devido a fusão excessiva causado pela fixação do arco.

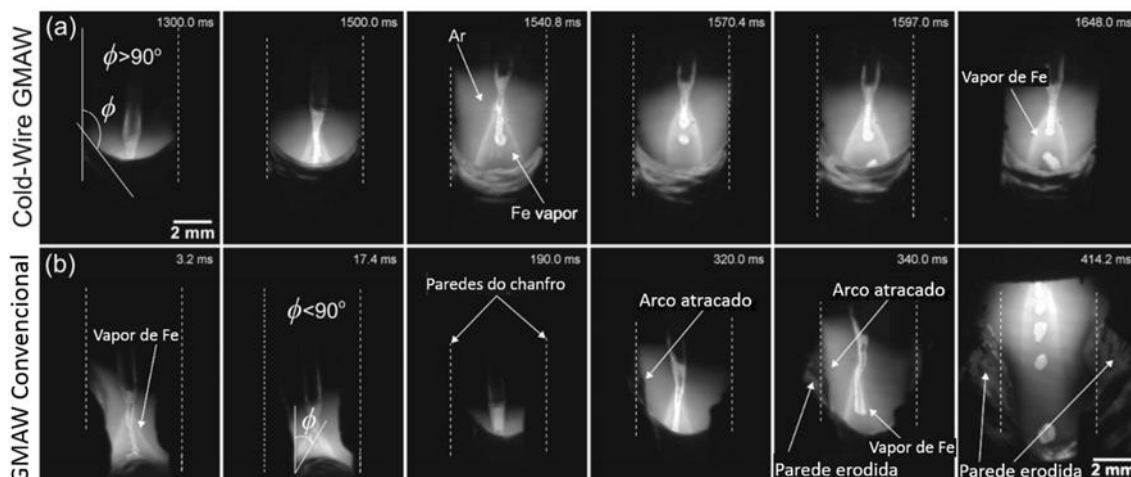


Figura 2.3 – Fimagem de alta velocidade, mostrando o comportamento da transferência de metal e o arco elétrico no chanfro estreito para o processo GMAW convencional (a) e para o processo CW-GMAW (b)

A fim de compreender o mecanismo do arco elétrico se estabilizar melhor no processo CW-GMAW foram feitas soldas em simples deposição com quantidades crescentes de arame frio Figura 2.4. Verificou-se que à medida que a quantidade de arame frio adicionado aumenta, a posição de fixação do arco muda da poça de fusão para o arame frio. Um mecanismo de deflexão e efeito estabilizador de arco semelhante devido a um arame frio fornecido centralmente em conjunto com o GMAW foi relatado por Haßler et al. [11]. De fato, para maiores quantidades de arame frio (quando 140% de massa é adicionado através do arame frio, em relação à taxa de alimentação do arame eletrodo) o ponto do cátodo se move para o arame frio que está sendo alimentado, isso é mostrado na Fig.2.4c. Essa mudança do ponto do cátodo para o arame frio fornece um ponto de cátodo mais estável do que na poça de fusão, levando a um arco mais estável Xiang T, et al [12], e portanto, isso evita uma alteração na posição de fixação do arco da poça de fusão para a parede lateral do chanfro estreito. Então o arco é fixado ao arame frio, permitindo que o processo CW-GMAW seja mais estável e evite a fixação do arco na parede lateral do chanfro estreito.

O que provoca falta de fusão da junta na soldagem de narrow gap (chanfro estreito), é a erosão da parede do chanfro estreito o que poderia ajudar a resolver esse problema no processo GMAW convencional seria o aumento de massa depositada para que a energia do arco elétrico fosse usada para fundir mais arame e assim não erodir a parede do chanfro, porem essa tentativa não é possível no processo GMAW convencional com fontes convencional de tensão constante, por que se aumentarmos a velocidade de alimentação do arame eletrodo para aumentar a deposição de massa, a fonte de soldagem

aumenta automaticamente a corrente de soldagem fazendo com que o arco elétrico continue fazendo a erosão da parede do chanfro. Com o processo CW-GMAW todo esse inconveniente pode ser resolvido, pois podemos aumentar a massa depositada sem aumentar a corrente de soldagem em valores significantes, outra vantagem é o arco elétrico ser atraído pelo arame frio Figura 2.4 (b, c) o que faz com o arco elétrico não se atraque na parede do chanfro o que evita totalmente a erosão do mesmo.

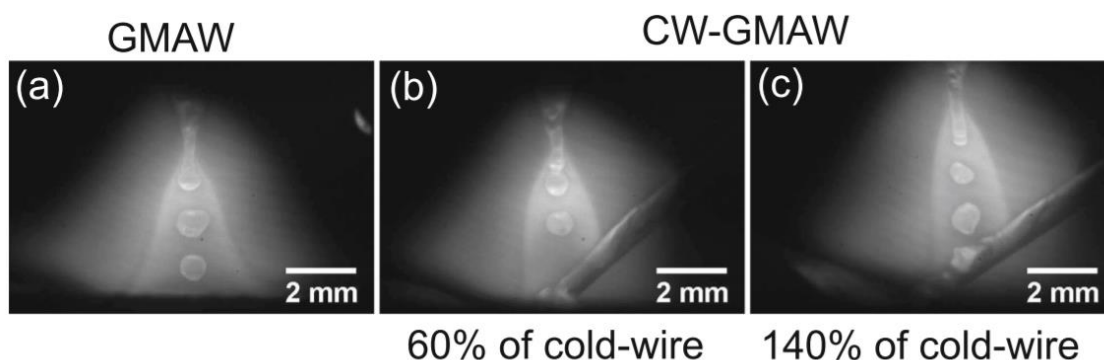


Figura 2.4 - Influência da adição de arame frio no ponto do catodo do arco: a) o GMAW convencional; b) e c), representa um adicional de 60% e 140% respectivamente de arame frio de massa em relação à taxa de alimentação do arame eletrodo.

2.3.3 Microestrutura e Microdureza

Os metais base usados nesta investigação possui uma microestrutura de ferrita e agregado de ferrita/carbeto conforme mostrado na Fig. 2.5. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram a microestrutura da zona afetada pelo calor (HAZ) para as juntas produzidas usando os processos CW-GMAW e GMAW convencional, respectivamente. Comparando as Figuras. 2.6a a 2.7a, pode-se notar que a extensão da zona criticamente afetada pelo calor (ICHAZ) do CW-GMAW é mais estreito em comparação com o processo GMAW convencional, indicando que a quantidade de calor dada ao metal base difere entre os processos, por mais que a mesma entrada de calor nominal tenha sido usada. Nas Figuras. 2.6b e 2.7b a zona afetada pelo calor de granulação grosseiras (CGHAZ) para ambas juntas são comparadas. Pode-se ver que na (CGHAZ) que nas microestruturas produzidos usando o processo GMAW convencional têm uma maior quantidade de ferrita de contorno de grão, o surgimento da maior quantidade desse microconstituente pode estar

relacionado possivelmente devido a uma taxa de resfriamento mais lenta associado a uma maior entrada de calor no metal base.

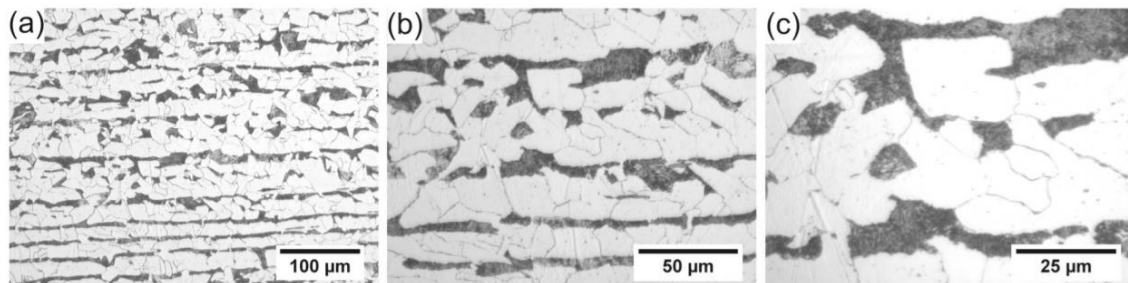


Figura 2.5 - Microestrutura do metal de base.

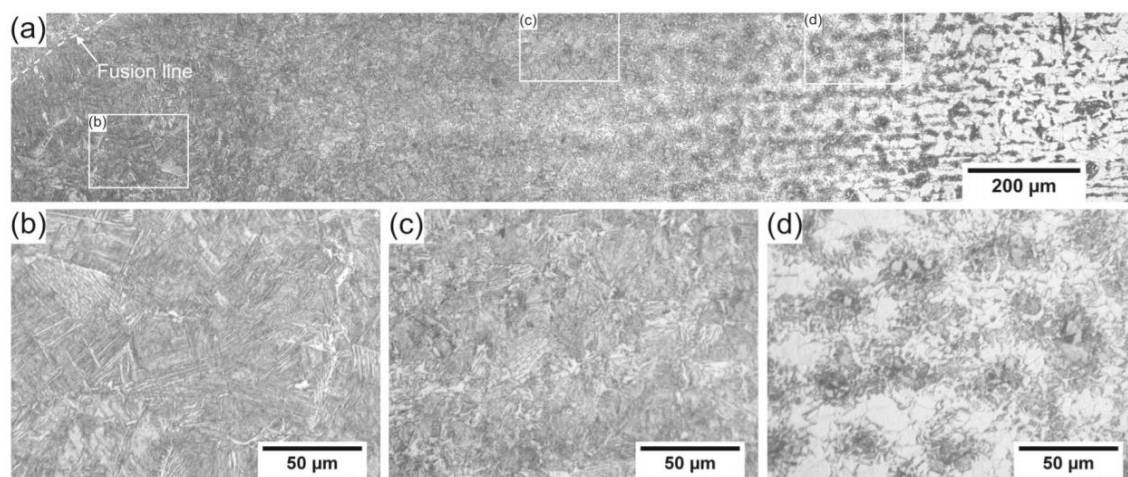


Figura 2.6 - Processo CW-GMAW: a) Vista geral da microestrutura da zona afetada pelo calor HAZ; b) zona de granulação grosseira CGHAZ; c) zona de refino de grão FGHAZ e d) zona critica afetada pelo calor ICHAZ

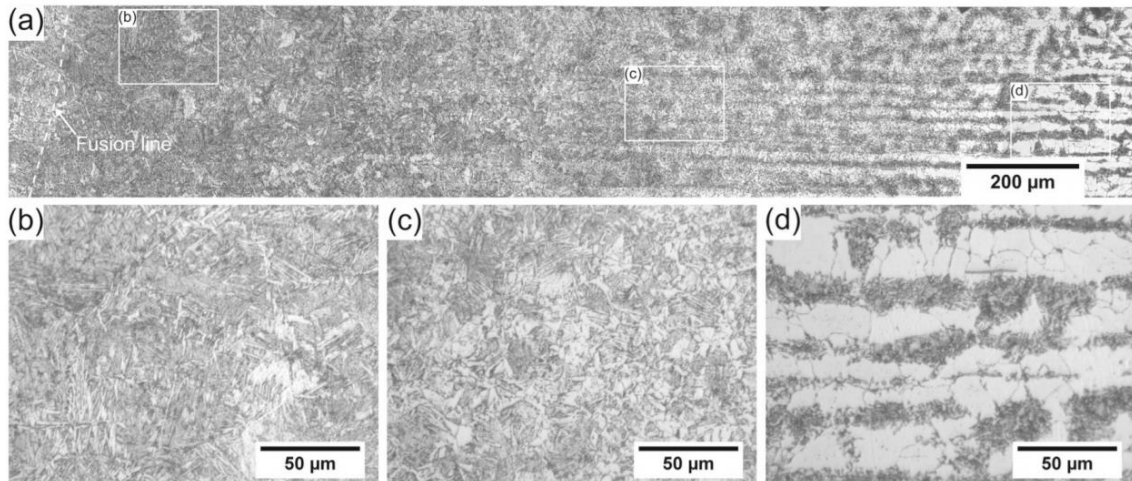


Figura 2.7 - Processo GMAW: a) Vista geral da microestrutura da zona afetada pelo calor HAZ; b) zona de granulação grosseira CGHAZ; c) zona de refino de grão FGHAZ e d) zona critica afetada pelo calor ICHAZ

A variação de microdureza Vickers no metal de solda e HAZ são mostradas na Figura. 2.8. Para o passe de acabamento, Figura. 2.8a, existe uma grande diferença entre a dureza média na zona de granulação grosseira CGHAZ entre os processos, a dureza do GMAW convencional é maior. Tendo em mente que o valor nominal da entrada de calor na soldagem é a mesma para ambos os processos, essa diferença na dureza média é devido a mudanças no calor transferido para o metal base devido à adição do arame frio. Que no caso do CW-GMAW, houve um aumento de 50% em massa foi depositado. Por outro lado, para o passe raiz Figura 2.8b, a quantidade de arame frio adicionada é de apenas 20% e, portanto, a diferença na dureza média na área da zona afetada pelo calor HAZ entre ambos os processos não são tão perceptíveis.

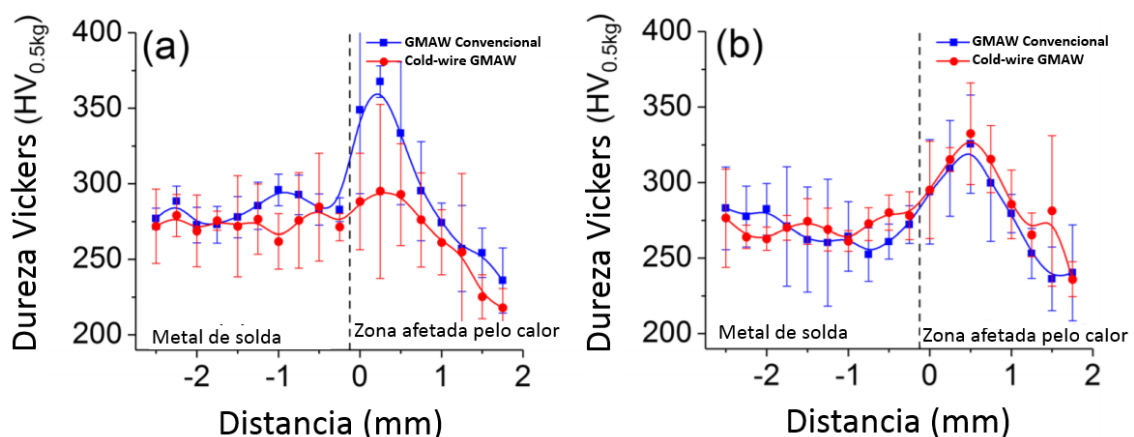


Figura 2.8 - Microdureza do passe acabamento (a) e passe de raiz (b)

2.4 CONCLUSÃO

A soldagem com chanfro estreito foi realizada em juntas com abertura de 5 mm, em chapas de aço ASTM A131 de 16 mm de espessura os processos CW-GMAW e GMAW convencional. Os fenômenos de soldagem foram monitorados usando imagens de alta velocidade e a caracterização feitas em termos de microestrutura e dureza Vickers.

Com base nos resultados, conclui-se que o processo CW-GMAW permite um aumento na taxa de fusão do eletrodo, sem a necessidade de maior entrada de calor para obter sucesso preenchimento do chanfro de 5 mm de largura. Isso não foi possível quando usando o processo GMAW convencional para as mesmas condições de soldagem, nas quais apresentaram descontinuidades, como falta de fusão, convecção excessiva, e erosão da parede lateral. A alta capacidade de produtividade do processo CW-GMAW também é aparente.

O mecanismo pelo qual o processo CW-GMAW permite o sucesso do preenchimento do chanfro sem a formação de descontinuidades de soldagem foi identificado por imagens em alta velocidade. Isto Verificou-se que o arame frio tende a se prender ao arco elétrico, estabilizando-o e evitando erosão excessiva da parede lateral do chanfro. A adição de arame frio leva a mudanças na transferência de calor para o metal base, o que pode melhorar a microestrutura e dureza da zona afetada pelo calor HAZ.

2.5 NOMENCLATURA

Ar	Argônio
CP	Corpo de prova
CV	Tensão constante
CGHAZ	Zona Afetada Pelo Calor de Granulação Grosseira
I	Corrente (A)
ICHAZ	Zona Criticamente Afetada Pelo Calor

ICHAZ	Zona Criticamente Afetada Pelo Calor
FGHAZ	Zona de Refino De Grão
GMAW	Gas Metal Arc Welding
CW-GMAW	Gas Metal Arc Welding - Cold Wire
MB	Metal de base
NGW	Narrow Gap Welding
Vs	Velocidade de soldagem (cm/min)
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZF	Zona fundida
PF(G)	Ferrita de contorno de grão
PF(I)	Ferrita poligonal intragranular
FS(A)	Ferrita com segunda fase alinhada
FS(NA)	Ferrita com segunda fase não alinhada
FA	Ferrita acicular
M.O	Microscopia Ótica

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Norrish J (2006) Narrow-gap welding techniques. in advanced welding processes, Chapter 9, vol 1. **Woodhead Publishing Limited**, Cambridge, pp 165–178.
- [2]. Nakamura T, Hiraoka K (2001) Ultranarrow GMAW process with newly developed wire melting control system. *Sci Technol Weld Join* 6(6):355–362.

- [3]. Liu L, Fang D, Song G (2015) Experimental investigation of wire arrangements for Narrow-Gap Triple-Wire gas indirect arc welding. *Mater Manuf Process* 6914(2016):1–7.
- [4]. Phaonaim R, Yamamoto M, Shinozaki K, Yamamoto M, Kadoi K (2013) Development of a heat source model for narrow-gap hotwire laser welding. *Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society* 31(4):3–6.
- [5]. Malin VY (1987) Monograph on Narrow-Gap Welding technology. *Technical report, Welding Research Council (WRC)*, New York.
- [6]. Li R, Yue J, Sun R, Mi G, Wang C, Shao X (2016) A study of droplet transfer behavior in ultra-narrow gap laser arc hybrid welding. *Int J Adv Manuf Technol* 87(9).
- [7]. R.A. Ribeiro, E.B.F. Dos Santos, P.D.C. Assunção, R.R. Maciel, E.M. Braga, Predicting Weld Bead Geometry in the Novel CW-GMAW Process, *Weld. J.* 94 (2015) 301s–311s. https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2015_09_s301.pdf.
- [8] Cabral TS, Braga EM, Mendonça EAM, et al. Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. *Weld Int.* 2015;29:928–936.
- [9] Marques LFN, Santos EBF, Gerlich AP, et al. Fatigue life assessment of weld joints manufactured by GMAW and CW-GMAW processes. *Sci Technol Weld Joining.* 2017;22:87–96.
- [10]. AWS (2005) Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding. *American Welding Society (AWS)*, Miami.
- [11]. Haßler M, Rose S, Füssel U (2016) The influence of arc interactions and a central filler wire on shielding gas flow in tandem GMAW. *Welding in the World* 60(4):713–718.
- [12]. Xiang T, Li H, Wei HL, Gao Y (2016) Effects of filling status of cold wire on the welding process stability in twin-arc integrated cold wire hybrid welding. *Int J Adv Manuf Technol* 83(9–12):1583–1593.

CAPITULO 3**ARTIGO II- COMPARANDO CW-GMAW EM ELETRODO DE
CORRENTE CONTINUA POSITIVA (CC+) E ELETRODO DE CORRENTE
CONTINUA NEGATIVO (CC-).²**

COMPARANDO CW-GMAW EM ELETRODO DE CORRENTE CONTINUA POSITIVA (CC+) E ELETRODO DE CORRENTE CONTINUA NEGATIVO (CC-)

Resumo

O processo Gas Metal Arc Welding (GMAW) em corrente contínua e eletrodo em polaridade negativa (CC-) pode oferecer algumas vantagens sobre a soldagem por corrente contínua com eletrodo positivo (CC+), como uma maior taxa de fusão de eletrodo e menor energia de soldagem imposta à peça de trabalho. Apesar dessas vantagens, a polaridade (CC-) não é comumente usada em aplicações de campo devido a instabilidades causadas pela escalada do arco e pelo modo de transferência de metal repellido volátil através do arco. Este trabalho relata uma comparação entre (CC+) e (CC-) em transferência metálica spray, usando uma fonte de soldagem operando em tensão constante (CV). O objetivo é avaliar a viabilidade do processo Cold Wire Gas Metal Arc Welding (CW-GMAW) com eletrodo em polaridade negativa (CC-) comparando os resultados obtidos com soldas realizadas com o processo Cold Wire Gas Metal Arc Welding (CW-GMAW) em polaridade positiva (CC+) para os mesmos parâmetros de soldagem. Durante os experimentos a corrente e a tensão foram adquiridas com vídeo sincronizado de alta velocidade para estudar a dinâmica do arco. Os cordões de soldas foram depositados sobre barras de aço AISI 1020. Três seções transversais foram cortadas e examinadas metalograficamente para comparar a geometria dos cordões. Os resultados sugerem que a alimentação do arame frio pode suprimir o escalonamento do arco elétrico em (CC-), melhorando conseqüentemente a estabilidade do arco e o acabamento do cordão de solda. Além disso, as soldas em (CC-) sugerem que o calor transferido para a poça de fusão é fundamental para acomodar altas taxas de alimentação de arame frio. Por fim, os resultados da metalografia da seção transversal mostram que a área de penetração, diluição e HAZ é menor em (CC-) em relação ao modo (CC+).

Palavras-chave CC+. CC-. GMAW. CW-GMAW. Escalonamento de arco. Geometria do cordão. Diluição.

3.1 INTRODUÇÃO

O uso de eletrodo de corrente contínua negativa (CC-) oferecem grandes vantagens quando comparada à soldagem com eletrodo de corrente contínua positivo (CC+), por exemplo maior taxa de fusão e o baixo calor imposto ao substrato. No entanto, essas duas vantagens potenciais são prejudicadas pela transferência repelida de metal e o escalonamento do arco que ocorre na polaridade (CC-). Conseqüentemente, a soldagem com CC- parece ser negligenciada na literatura e não tem aplicações comerciais.

No entanto, com o desenvolvimento de novas fontes de energia e o melhor entendimento do papel da proteção gasosa na soldagem, estudos começaram a analisar algumas características de soldagem oferecidas pela polaridade CC-. Por exemplo, talvez um dos primeiros trabalhos afirmar que a viabilidade da soldagem na CC- foi de Norrish [1], que indicava a viabilidade geral da técnica, mas apenas para aplicações limitadas.

Souza et al. [2] propuseram um modelo qualitativo para explicar a maior taxa de fusão usando CC- para diferentes misturas de gases de proteção; A principal conclusão foi que a escalada do arco é responsável por melhores taxas de fusão. Pesquisas posteriores do mesmo grupo usando CC- em uma configuração de duplo arame (tandem GMAW) investigou os efeitos de diferentes polaridades e liderança do arame. A principal conclusão foi que o uso da polaridade CC- nos arames desse processo aumenta a produtividade, mas diminui a faixa operacional de parâmetros do processo.

Recentemente, Li et al. [3] avaliaram cordão soldados em simples deposição com polaridade CC- usando diferentes gases de proteção e Modo de transferência spray. Eles relataram que os melhores resultados foram obtidos com Ar-6,5% O₂. Também recentemente, o interesse em soldagem a arco de metal com gás de polaridade variáveis (VP-GMAW) aumentou, pois ele pode controlar a entrada de calor no substrato e permitir a soldagem de materiais sensíveis ao calor Cho J, Lee J-J, Bae S-H [4]. Além disso, o interesse na soldagem GMAW por corrente alternada se baseia em seu potencial de maior produtividade, juntamente com a redução do calor nominal de entrada. Kim e Chung [5] estimaram os coeficientes da taxa de fusão para a forma de onda de corrente quadrada utilizando CA e concluíram que a taxa de fusão não é apenas uma função da polaridade, mas também uma função da forma das gotículas e da forma de onda atual.

A possibilidade em aumentar a produtividade sem um aumento na entrada de calor levou alguns pesquisadores a se concentrarem no processo cold wire gas metal arc welding (CW-GMAW), que envolve a alimentação de arame não energizado na poça de fusão. Pesquisas anteriores demonstraram que esse processo promove uma diminuição da temperatura transferida para o metal de base, e distorção Cabral T.S [6] na soldagem de grandes painéis para aplicações navais. Posteriormente, Costa [7] mostrou que o processo imposto menos tensões residuais do que o GMAW padrão soldado com os mesmos parâmetros. Além disso, essa diminuição nas tensões residuais pode oferecer vida útil superior à fadiga para juntas soldadas com CW-GMAW comparado com juntas soldadas pelo processo GMAW convencional Marques et al.[8].

Considerando que as informações disponíveis na literatura parecem caracterizar a variante CC- do GMAW como uma técnica promissora com produtividade aprimorada e configuração operacional bastante simples, no entanto, poucos estudos são encontrados com comparação direta com a polaridade CC+, e alguns são até contraditórios. O objetivo do presente trabalho é oferecer uma contribuição para o debate sobre a soldagem GMAW com polaridade CC-, enquanto a maioria das pesquisas se concentram em correntes constantes e formas de onda complexas para a CC-. Este trabalho utilizou uma fonte de tensão constante (CV) como este tipo de fonte é mais comum em aplicações práticas. Além disso, para melhor conhecimento dos autores, a discussão sobre a soldagem CW-GMAW com polaridade negativa é apresentada pela primeira vez neste trabalho.

3.2 METODOLOGIA

Para avaliar o comportamento do arco e as características do cordão, as soldas em simples deposição foram realizadas no aço AISI 1020 laminado a quente na forma de barras planas medindo 190,5 mm (7,5 pol.) × 50,8 (2 pol.) × 9,525 (3/8 pol.). O ER70S-6 de (1,2 mm) foi utilizado como arame eletrodo e como arame frio, foi usado o mesmo eletrodo com diâmetro de (0,9 mm). A Tabela 1 apresenta a composição química nominal do metal base e do arame de solda de acordo com as referências [9, 10], respectivamente.

Tabela 3.1 - Composição química do metal de base e arame de soldagem

Material	Composição química nominal (wt%)						Fe
	C	Si	Mn	P	S	Cr	
AISI 1020	0,18	–	0,3	Max. 0,040	Max. 0,05	–	Bal.
ER70S-6	0,15	1,15	1,85	0,025	0,035	0,05	Bal.

Foi usada uma fonte de soldagem Lincoln R500 para realizar as soldas em modo de tensão constante (CV), tanto para eletrodo de corrente contínua positivo (CC+) e quanto para eletrodo de corrente contínua negativa (CC-). Um alimentador de arame externo Lincoln foi usado para alimentar o arame frio (CW) em ambas as polaridades. Para todas as soldas, o gás de proteção empregado foi de Ar-15% CO₂ a uma vazão de 17 l / min e a distância do bico de contato à peça (DBCP) foi mantido em 17 mm para todas as soldas. O modo de transferência spray foi escolhido para permitir uma melhor visualização dos fenômenos do arco elétrico, especialmente na polaridade (CC-).

Afim de avaliar a corrente o comportamento dinâmico do arco elétrico foram medidos a tensão e corrente da soldas realizadas usando um LEM LF 505-S e um Sensor LEM LV 100 com precisão relatada de $\pm 0,6\%$ e $\pm 0,9\%$, de acordo com o fabricante, respectivamente [11,12]; os sinais de corrente e tensão foram disretizados em 16 bits usando um Sistema NI 6002 DAQ com uma frequência de 10 kHz por 2s. Paralelamente, foi feita alta imagem sincronizado com a corrente e tensão de soldagem, que foi utilizado para analisar a dinâmica do arco elétrico. Com esses sistemas foram adquiridos valores de corrente, tensão, e a energia foram calculadas usando o valor médio instantâneo, tal como recomendado em trabalhos anteriores do NAS, Batista M de A, do NVC, Scotti A [13]. A aquisição de imagens foi realizada em 5000 fps com um tempo de velocidade do obturador de 25 μ s e filtro passa-banda de 900 \pm 10 nm. Os parâmetros de soldagem definidos na fonte de energia para ambas as polaridades são apresentados na Tabela 2.

Tabela 3.2 - Parâmetros de soldagem definidos na fonte de soldagem

Velocidade de arame (in/min) (m/min)	Voltagem (V)	Velocidade de soldagem (in/min) (cm/min)
350 [8,89]	30	25 [63,5]

O arame frio (CW) foi alimentado em porcentagens com base na massa da taxa de alimentação do arame eletrodo. Essas porcentagens foram calculadas a partir da

velocidade de alimentação do arame, considerando a densidade do arame eletrodo igual a 7930 kg/m^3 e cálculo de sua área de seção transversal. As taxas de alimentação de arame frio (CW) aplicada nesse trabalho foram de 40%, 60%, e 80%. A Figura 3.1 mostra a configuração experimental usada nas experiências e os detalhes relacionados ao ângulo de alimentação do arame frio. A direção da soldagem era da esquerda (seta amarela) para a direita.

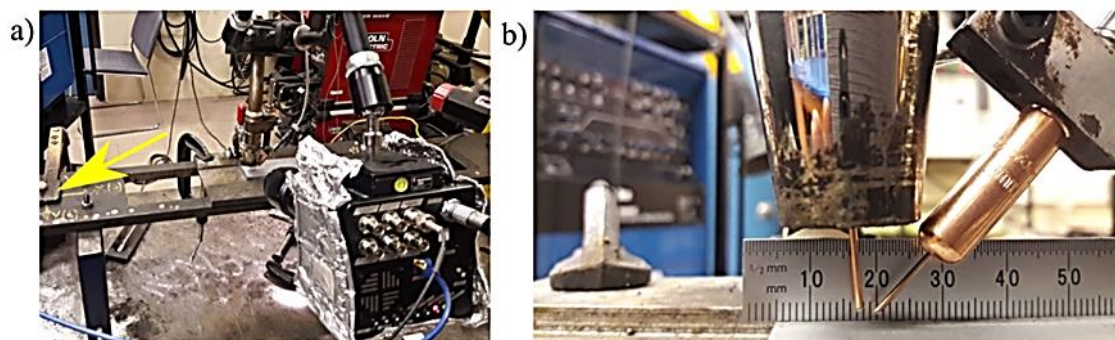


Figura 3.1 - a) Configuração experimental usada para fabricar as soldas. (uma) Visão geral, da fonte soldagem, câmera e posto inicial de soldagem b) Detalhe do ângulo do arame frio.

Após a soldagem, os cordões foram fotografados e cortados em três seções transversais, a fim de avaliar sua geometria característica. As seções transversais foram submetidas a procedimento metalográfico e atacado com Nital (2%). Então, as características geométricas, como penetração, altura do cordão, largura do cordão, área da seção transversal, diluição, zona afetada pelo calor (HAZ) e ângulo de molhamento (θ), foram medidos. A Figura 3.2 mostra um esquema de uma seção indicando como os recursos geométricos relatados nesse trabalho foi medido.

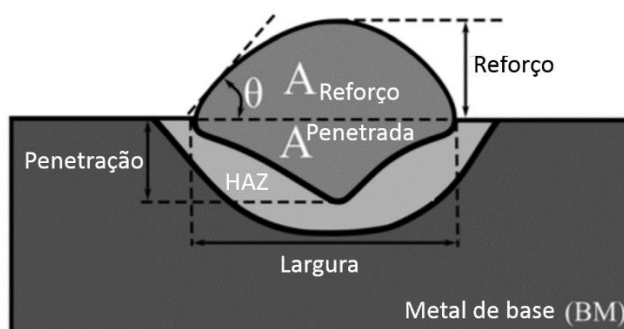


Figura 3.2 - Diagrama esquemático de uma seção transversal mostrando como as características geométricas foram medidas

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 Dados Elétricos

Os valores do desvio padrão da tensão (STD) calculados a partir da tensão adquirida durante a soldagem é apresentada na Figura.3.3.

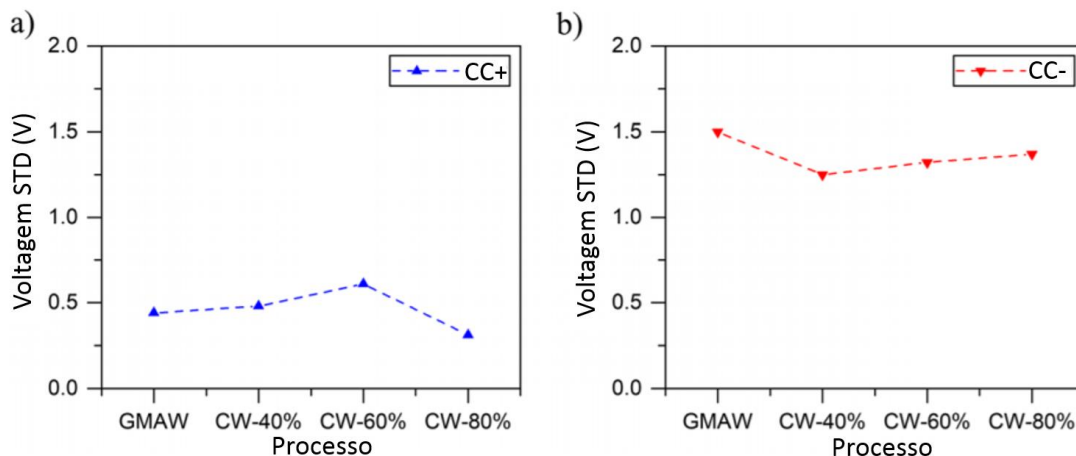


Figura 3.3 - Padrão de tensão desvio. a) CC+. b) CC-

Uma das questões relatadas na literatura sobre soldagem com a polaridade CC- é a estabilidade do arco elétrico [14]. Assumindo que o arco elétrico é um circuito ER, em que E representa a queda potencial na fonte, cabeamento e arame e R é a resistência geral ao arco. A tensão medida entre a tocha e o substrato pode ser modelado de acordo com Kodama et al.[14] como:

$$U_a = U_{a0} + R_{al} + E_a l_a \dots \dots \dots (3.1)$$

Onde U_a (V) é a tensão medida, U_{a0} (V) é uma constante componente da tensão, R_a (Ω) é a coluna do arco, E a (V / m) é o campo elétrico na coluna do arco e l_a (m) é o comprimento do arco. A estabilidade do arco depende de um comprimento uniforme do arco durante a operação de soldagem para garantir uma transferência estável de metal sem respingos. Assim, pode-se relacionar estabilidade com a tensão de arco mensurável, assumindo que todos os parâmetros permaneçam constantes. Considerando a tensão STD para polaridade CC+, foi observado que a introdução de arame fio não afeta prejudicialmente a estabilidade do processo, tomando a tensão medida em GMAW como padrão. Ao contrário, parece que a introdução do arame frio pode até ser benéfico para a

estabilidade do arco, como pode ser visto pelo desvio padrão da tensão média para alimentação de arame frio a 80%. O desvio padrão de tensão na polaridade CC+ (Fig.3.3a) para o GMAW convencional é de 0,44 V versus 0,31 V para CW-GMAW-80%, o que indica a melhor estabilidade. No processo com polaridade CC-, o desvio padrão da tensão para o GMAW convencional é de 1,5 V versus 1,38 V para CW-GMAW-80%, como pode ser observado na Fig. 3.3b.

Os dados apresentados na Fig. 3.3 sugerem que o arame frio na polaridade CC- e CC+ pode desempenhar um papel na estabilização do arco. Para determinar se esse é o caso, pode-se empregar o seguinte modelo proposto por Hajossy e Morva [15], no qual a tensão ao longo do tempo e dada por:

$$U(t) = U_c + R_a + E_{col}(t) \dots \dots \dots (3.2)$$

onde U_c é a queda de tensão do cátodo em volte, U_a é a queda de tensão do ânodo em volte e $U_{col}(t)$ é a queda de tensão da coluna de arco em volt. As quedas de tensão do cátodo e do ânodo são constantes no tempo. No entanto, a coluna do arco depende do tempo e é proporcional ao comprimento do arco. Portanto, pode-se escrever:

$$\frac{dU(t)}{dt} = \frac{dU_{col}(t)}{dt} = K \frac{dl_a}{dt} \quad (3.3)$$

Onde, $\frac{dU(t)}{dt}$ é a variação instantânea de tensão em volte por milissegundo, $\frac{dU_{col}(t)}{dt}$ é a variação instantânea da queda de tensão na coluna de arco em volte por milissegundo, $\frac{dl_a}{dt}$ é a variação instantânea variação do comprimento do arco (mm / ms) e k é a proporcionalidade constante entre $\frac{dU_{col}(t)}{dt}$ e $\frac{dl_a}{dt}$. em volt por milímetro. se observa que, com base nas unidades, k é simplesmente a força do campo elétrico dentro da coluna de arco. Essas equações plotadas são um meio de avaliar a estabilidade do arco para todos as condições deste trabalho.

A Figura 3.4 mostra a faixa da variação instantânea de tensão (V / ms); deve-se notar que esse menor intervalo de variação correlaciona-se a melhor estabilidade do arco. O intervalo foi calculado como:

$$\text{Range} = \left(\frac{dU(t)}{dt} \right)_{\max} - \left(\frac{dU(t)}{dt} \right)_{\min} \quad (3.4)$$

Onde $\left(\frac{dU(t)}{dt} \right)_{\max}$ é o valor máximo da variação instantânea de tensão e $\left(\frac{dU(t)}{dt} \right)_{\min}$ é o valor mínimo da variação instantânea de tensão.

Para o processo com polaridade CC+ (Figura. 3.4a), a introdução progressiva de arame fio leva a uma leve instabilidade progressiva até uma taxa de alimentação de arame frio de 60%. Então, com 80%, o intervalo está na ordem de magnitude do GMAW. Isso é consistente com a fixação progressiva do arco elétrico no arame frio para aumentar as taxas de alimentação do arame frio; mais detalhes podem ser encontrados em Ribeiro et al. [16] No entanto, para a polaridade CC- (Figura. 3.4b), a introdução progressiva de maiores taxas de alimentação de arame frio leva à instabilidade do arco com frações de arame frio superiores a 40%. Isso é consistente com os resultados apresentados na Fig.3.9 (mostrando os ciclogramas para polaridade CC-) em que se pode observar a mesma tendência.

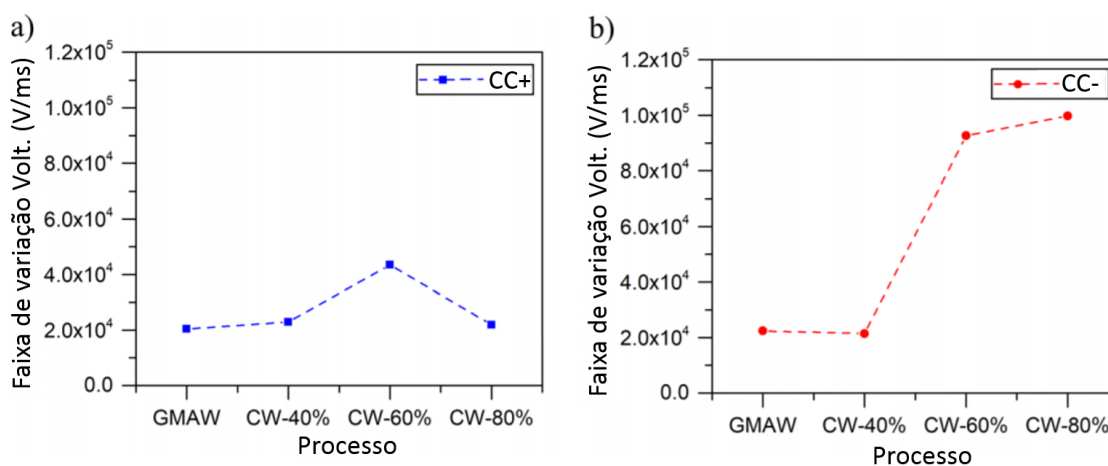
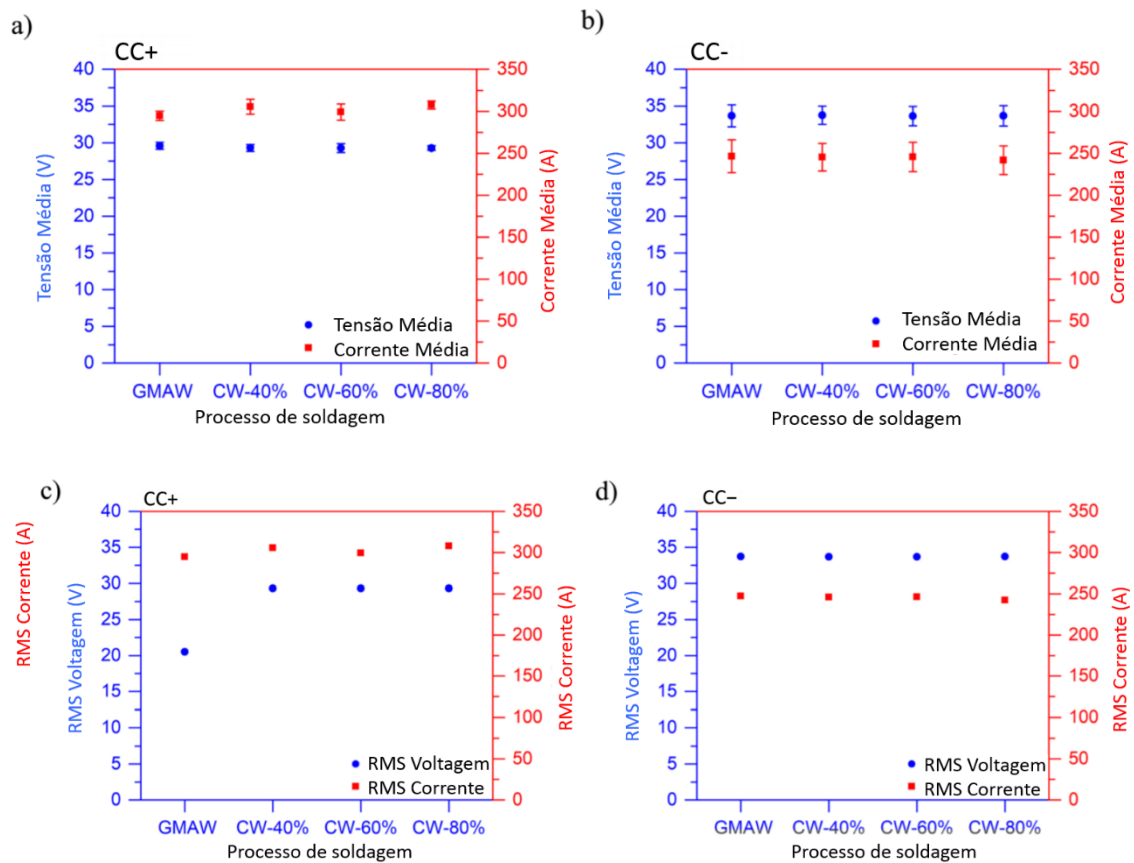


Figura 3.4- Faixa de variação instantânea de tensão. (a) CC+. (b) CC-

De acordo com Kim e Chung [17] e Cary [18], há menos entrada de calor transferida para o metal base usando polaridade CC-, e conseqüentemente menor penetração. Isso é consistente como mostrado na Fig. 3.16a, onde para os mesmos parâmetros de soldagem, a penetração na polaridade CC- é sempre menor quando

comparado com a polaridade CC+. O resumo dos dados elétricos amostrados durante a soldagem pode ser visto na Fig.3.5. Novamente, pode-se ver que na polaridade CC-, a tensão média é maior que na polaridade CC+ que indica um comprimento maior do arco na polaridade CC-, para os mesmos parâmetros de soldagem. A mesma tendência é observada na tensão efetiva (tensão RMS); na polaridade CC-, a tensão RMS é maior quando comparado a polaridade CC+. Além disso, a potência média na polaridade CC- considerando todas as condições é 8223 W, enquanto a média para todas as condições em CC+ é 8824 W. Portanto, a energia na polaridade CC+ é 6,8% menor que a energia no CC+ que pode ser visto na Figura.3.5 (e) e (f).



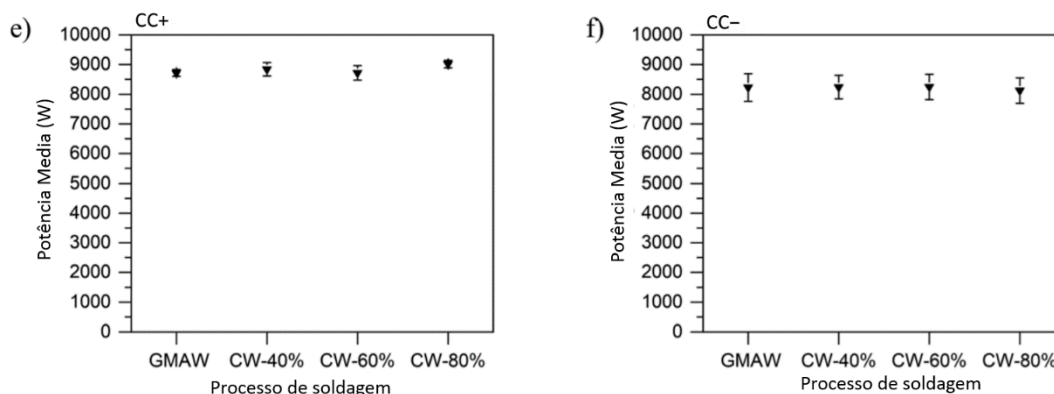


Figura 3.5 - Resumo dos dados elétricos para todas as condições. (a, b) Tensão e corrente médias instantâneas. (c, d) tensão e corrente RMS. (e, f) Rotencia instantâneo

3.3.2 Oscilogramas e Ciclogramas

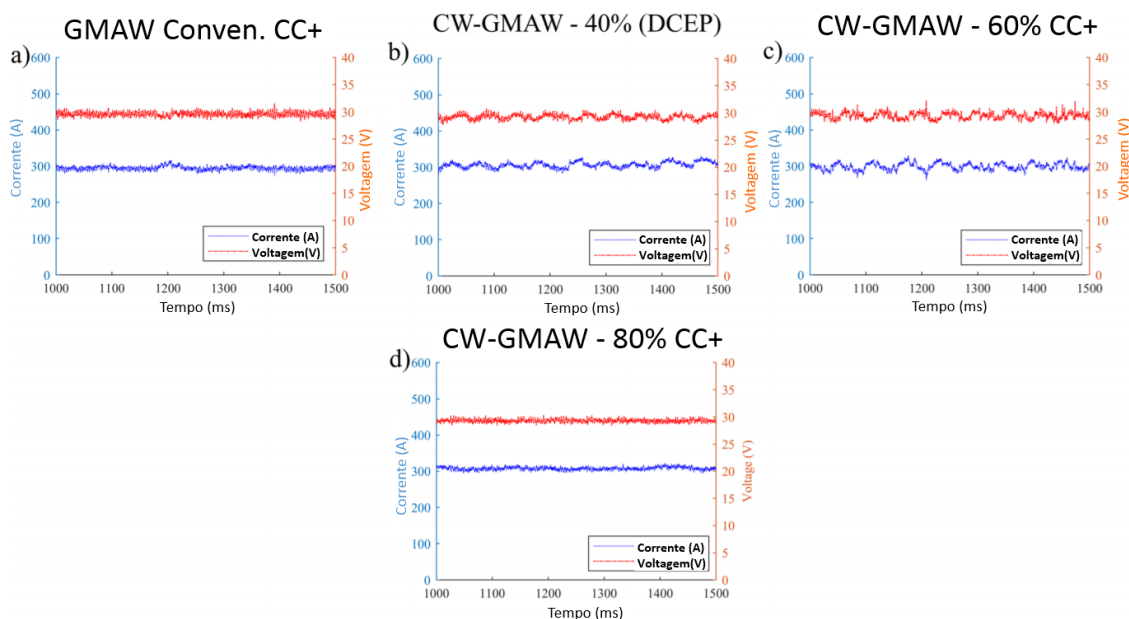


Figura 3.6 - Oscilogramas para soldas realizadas com polaridade positiva (CC+). a) GMAW conv. CC+. (b) CW-GMAW-40% (CC+). (c) CW-GMAW-60% (CC+). (d) CW-GMAW-80% (CC+)

A Figura 3.6 mostra os oscilogramas das soldas realizadas na polaridade CC+. Novamente, percebe-se que, durante o período de aquisição, a influência do arame frio evolui de uma perturbação que pode ser visto a partir dos dados comparados para CW-GMAW-40% (Figura. 3.6b) a CW-GMAW-60% (Figura. 3.6c) na forma de ondulações, que estão ausentes nos dados para CW-GMAW-80% (Figura. 3.6d).

A justificativa para explicar o efeito do arame frio sobre a estabilidade da soldagem na polaridade CC+ deve ser avaliada por imagem de alta velocidade do arco

elétrico, como será discutido na Seção 3.3. A transferência de metais repelidos e o escalonamento do arco elétrico são os principais contribuintes para perturbações durante a soldagem na polaridade CC- (Figura 3.7) o que pode ser percebido pelos picos nos oscilogramas. Outra característica que pode ser notada nos oscilogramas é que a transferência de metal em spray é dominante. Algumas pesquisas anteriores declararam que a soldagem em polaridade CC- em spray não era comum e deveria estar sob uma proteção gasosa levemente oxidativa [15].

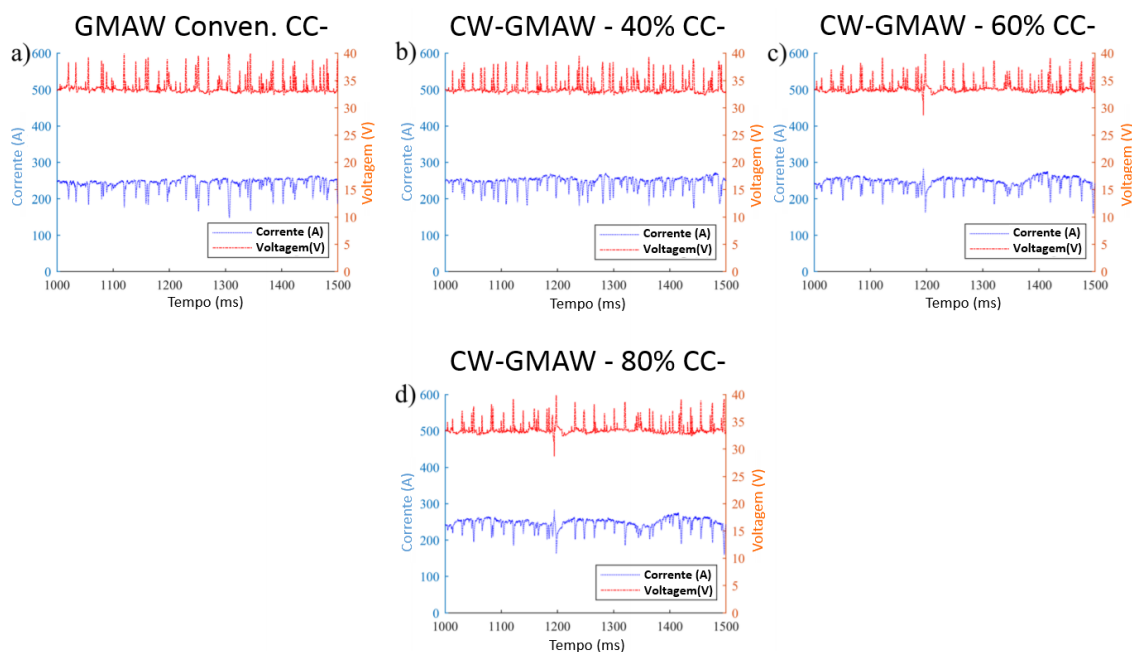


Figura 3.7 - Oscilogramas para soldas realizadas com polaridade negativa (CC-). a) GMAW convencional (CC-). (b) CW-GMAW-40% (CC-). c) CW-GMAW-60% (CC-). d) CW-GMAW-80% (CC-)

Para corroborar as afirmações relativas à estabilidade ao arco promovida pela alimentação de arame o frio na polaridade CC+, ciclogramas que são gráficos de tensão versus corrente podem ser usados para analisar o comportamento do arco durante todo o período amostrado (consulte a Figura 3.8). Pode-se ver que a condição GMAW convencional fornece uma condição de pulverização estável, com o arco permanecendo em torno da condição de tensão pelo menos 10% do tempo de amostragem (Figura. 3.8a). Quando o arame frio começa a ser alimentado, ocorre um deslocamento na direção de correntes mais altas; Ribeiro et al. [16] descreveram esse fenômeno, provavelmente relacionado ao auto-regulação do arco na tensão constante (CV), aumentando ligeiramente a corrente para fundir mais material. Percebe-se que há uma diminuição na frequência do arco elétrico em torno do ponto de ajuste da tensão, que provavelmente é

devido à interrupção que o arame frio tem quando forçando o arco a procurar um novo conjunto estável e equivalente de ponto (ver Figura. 3.8b).

Na Figura. 3.8c, pode-se ver que a frequência em torno do ponto de ajuste aumentou novamente, mas as custa de altas variações na corrente. Inversamente, quando uma taxa de alimentação de arame frio de 80% é atingida, a região que descreve as combinações de pontos do arco durante a soldagem diminui e um novo ponto estável é alcançado refletido no valor ligeiramente reduzido da tensão média entre 29,30 V (Figura. 3.8d). O mecanismo por trás dessa estabilização no CC+ é descrito em outro lugar [16].

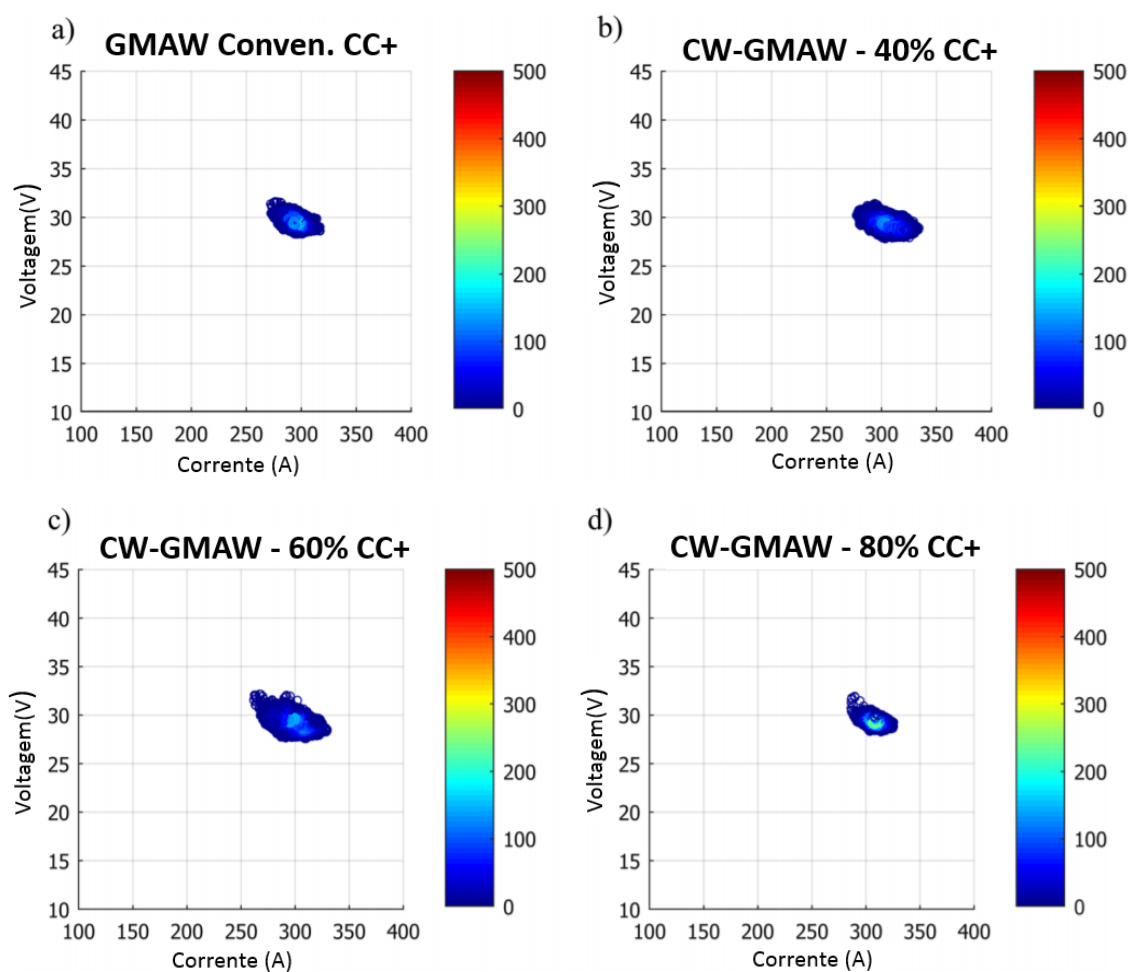


Figura 3.8 - Ciclogramas para soldas na CC+, escala indica densidade de pontos de dados. (a) CC+ GMAW. (b) CC+-CW-GMAW-40%. (c) CC+-CW-GMAW-60%. (d) CC+-CW-GMAW-80%

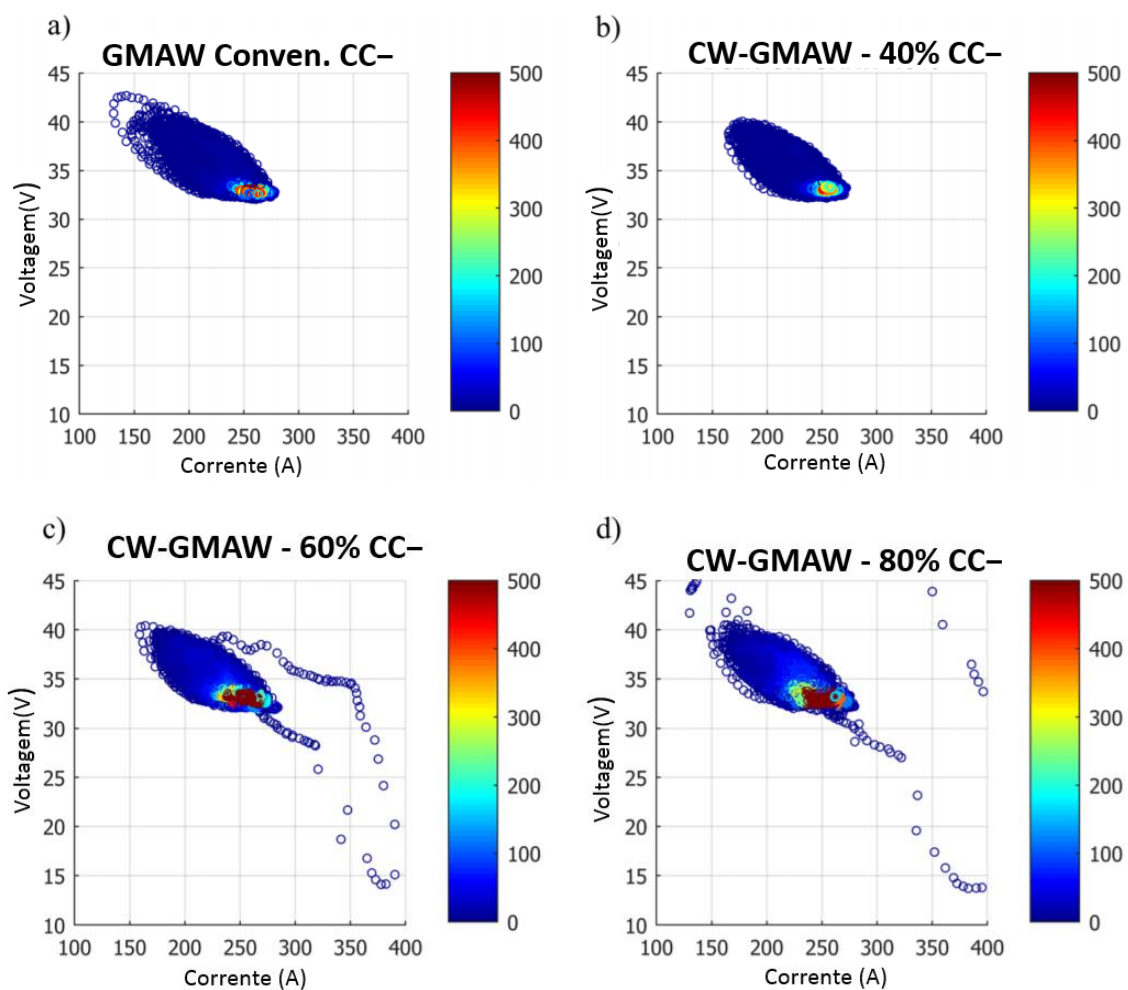


Figura 3.9 - Ciclogramas para soldas em polaridade CC-, escala indica densidade de pontos de dados. a) GMAW convencional CC-. (b) CW-GMAW40% CC-. (c) CW-GMAW-60% CC-. d) CWG-MAW-80% CC-.

A Figura 3.9 mostra os ciclogramas para o CC- e pode-se ver claramente a diferença no GMAW convencional. O arco é deslocado para regiões de maior tensão e menor corrente, conseqüentemente deslocando o ponto de ajuste dinâmico do arco para médias ligeiramente mais altas (consulte a Figura. 3.9a). Comparando a Figura 3.9 a. e Figura.3.9b, pode-se ver que há uma ligeira diminuição do arco elétrico, embora haja uma diminuição na frequência em torno do ponto de ajuste. Este efeito foi considerado restrito a uma taxa de alimentação de arame frio de 40%. Com taxas de alimentação de 60% e 80%, a introdução do arame frio promove aumento curtos-circuitos ao redor do ponto de ajuste (consulte as Figura. 3.9 (c) (e) e (d) respectivamente).

3.3.3 Imagem de Alta Velocidade do Comportamento do Arco

Nesta seção, será discutido com mais detalhes o efeito do mecanismo que está por trás da estabilidade do arco elétrico na polaridade CC- quando adicionado arame frio. Observado Na Figura 3.10, à medida que a porcentagem da alimentação do arame frio aumenta, o arco elétrico “escala” o mesmo; nesta condição, há uma ligeira diminuição do comprimento do arco elétrico confirmada por uma ligeira diminuição na tensão média medida durante a soldagem. Essa diminuição no arco o comprimento é refletido pela estabilidade do arco, uma vez que o valor da tensão não varia significativamente em torno do valor predefinido na fonte de soldagem, pois está operando em tensão constante. Comparando o comportamento do arco na polaridade CC+ e na polaridade CC-, pode-se ver que o arco escala no arame eletrodo, de modo que agora está enraizado dentro do tocha conforme indicado na Figura 3.10a

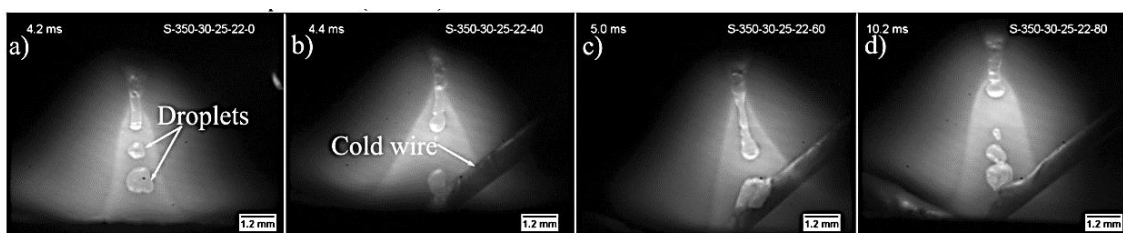


Figura 3.10 - Transferência de metal com o eletrodo positivo CC+. (a) GMAW Convencional CC+. (b) CW-GMAW-40% CC+. (c) CW-GMAW-60% CC+. d) CW-GMAW-80% CC+

À medida que o arame frio é introduzido, o fenômeno do arco preso ao arame auxiliar (arame frio) ainda é observável e esse fenômeno estabiliza levemente o arco, trazendo o arco para baixo enquanto aumenta a deposição. Pode-se ver o ponto de cátodo observados na gota pendurada na Figura 3.11c, onde os elétrons emitidos à partir dele causam uma força de reação, causando destacamento assimétrico da gota. Ao contrário do comportamento esperado, a assimetria do destacamento da gota não é tão intensa. Quando a alimentação de arame frio atinge 80%, observou-se que o arco é propenso a subir novamente, conforme sugerido pelos ciclogramas.

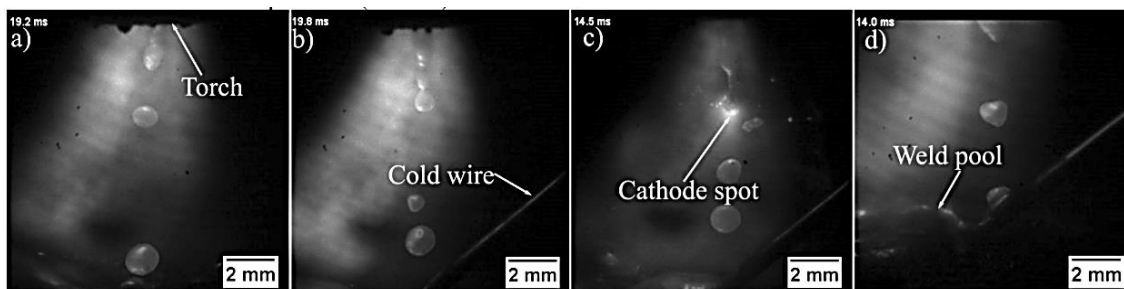


Figura 3.11 - Transferência de metal com o eletrodo negativo CC-. (a) GMAW Convencional (CC-). (b) CW-GMAW-40% (CC-). (c) CW-GMAW-60% (CC-). (d) CW-GMAW-80% (CC-)

Como no caso da polaridade CC-, há menos energia transferida para poça de fusão do substrato / solda e o calor é insuficiente para fundir completamente o arame frio. Nesta situação, o arame frio é desviado pela ação do calor na poça de fusão e, eventualmente, pode tocar gotas ainda presas ao arame do eletrodo. Este fenômeno é ilustrado na Figura 3.12, onde a seta indica a posição do arame frio até tocar na coluna da gota, causando um curto-circuito. Na polaridade CC+, essa situação não é possível, pois há calor suficiente na poça de fusão para fundir completamente o arame frio.

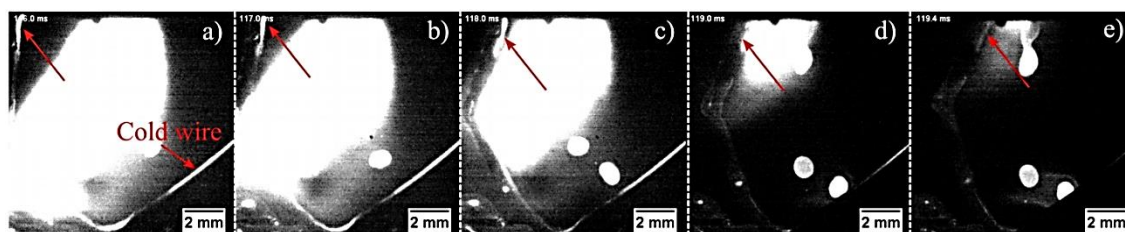


Figura 3.12 - Fenômenos de curto-circuito em CW-GMAW-60% operando na CC-(DCEN). A seta vermelha indica a ponta do arame frio.

As Figuras 3.13 e 3.14 mostram os aspectos do cordão para polaridade CC+ e CC-, respectivamente. A convexidade do cordão de solda pode ser inferida da geometria do cordão, uma vez que cordões mais largos têm ângulos de convexidade baixos, enquanto cordões mais estreitos têm ângulos de convexidade altos. Ao comparar as esferas da polaridade CC+ com as esferas da polaridade CC-, pode-se notar que as esferas em CC- são mais convexas, como esperado; isso envolve calor reduzido transferido para o substrato. Outro fato que pode ser inferido é que o calor transferido para a poça de fusão é fundamental para a acomodação de arame frio alimentado. Pode-se ver na Figura 3.13d e Figura 3.14d que, para os mesmos parâmetros de soldagem, a morfologia resultante do cordão de solda é completamente diferente. Por exemplo, ao usar a polaridade CC-, uma taxa de alimentação máxima 60% de arame frio é possível, pois ainda fornece um cordão

de solda; no entanto, a quantidade de respingos é considerável. Então, pode-se esperar que 40% seja o limite real da taxa de alimentação de arame frio.

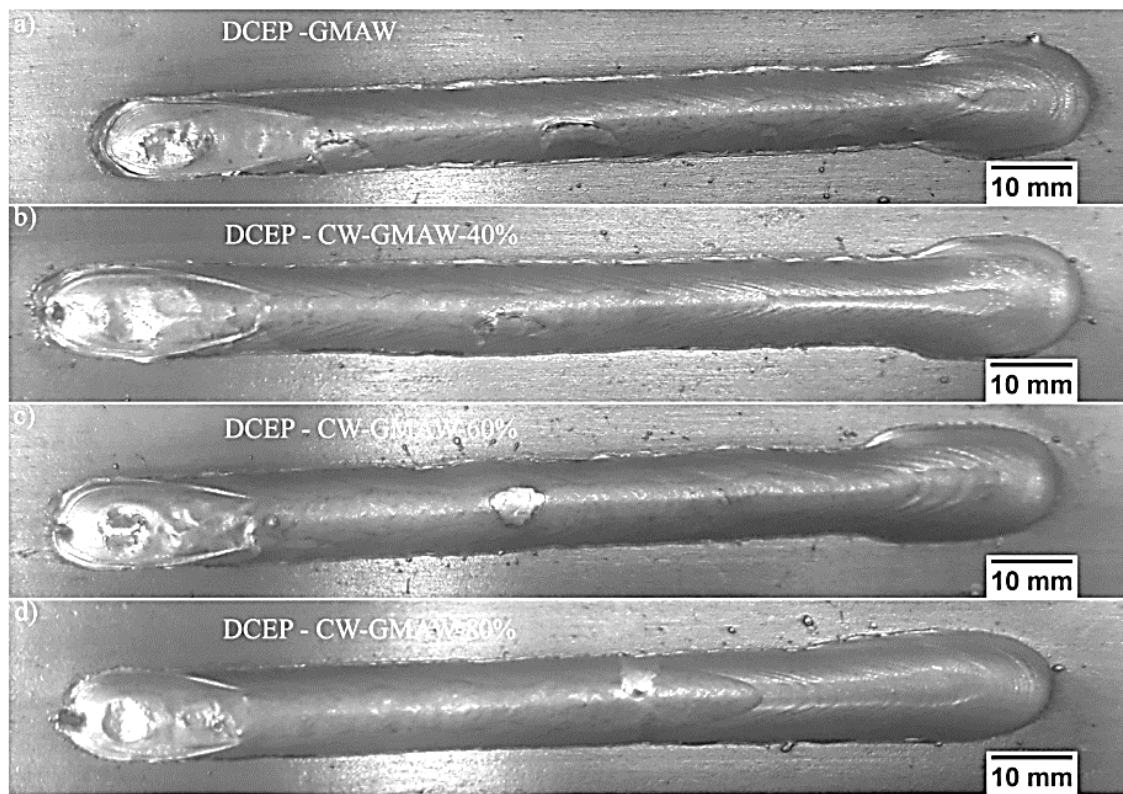


Figura 3.13 - Aspectos do cordão para polaridade positiva. (a) GMAW convencional. b) CW-GMAW-40%. (c) CW-GMAW-60%. d) CW-GMAW80%



Figura 3.14 Aspectos do cordão para polaridade negativa. (a) GMAW convencional. (b) CW-GMAW-40%. (c) CWGMAW-60%. (d) CW-GNAW80%

No geral, todas as soldas não apresentaram trincas superficiais de qualquer tipo, onde nenhuma porosidade e nenhuma mordedura foram detectados por inspeção visual. Em todas as soldas com arame frio, o volume da poça de fusão aumentou significativamente em comparação com GMAW convencional observado e nas duas polaridades CC+ e CC-, como esperado devido a um aumento na deposição através da alimentação de arame frio. Pode-se notar através das seções transversais que nenhuma das condições de soldagem apresentaram porosidades internas, trincas ou falta de fusão. A redução da penetração devido ao aumento do arame frio (CW) é mais visível na polaridade CC- do que na polaridade CC+. O mecanismo da penetração será tratada na próxima seção. Outra característica que é observada na polaridade CC+, é a penetração dediforme (finger) que é característico da transferência metálica por spray que não é suprimida, mesmo a taxa de 80% de arame frio (Figura 3.15d). Na polaridade CC- acontece o contrário no GMAW já tem uma diminuição na penetração dediforme (finger) essa diminuição prossegue com a alimentação de arame frio (Figura 3.16b), mas também não completamente suprimido. Ribeiro et al. [13] demonstraram que o alívio da penetração dediforme na polaridade CC+ ocorre apenas em altas taxas de alimentação de

arame frio. Essa diferença sugere que a diferença de transferência de calor para a peça e a polaridade desempenha um papel na redução do (finger).

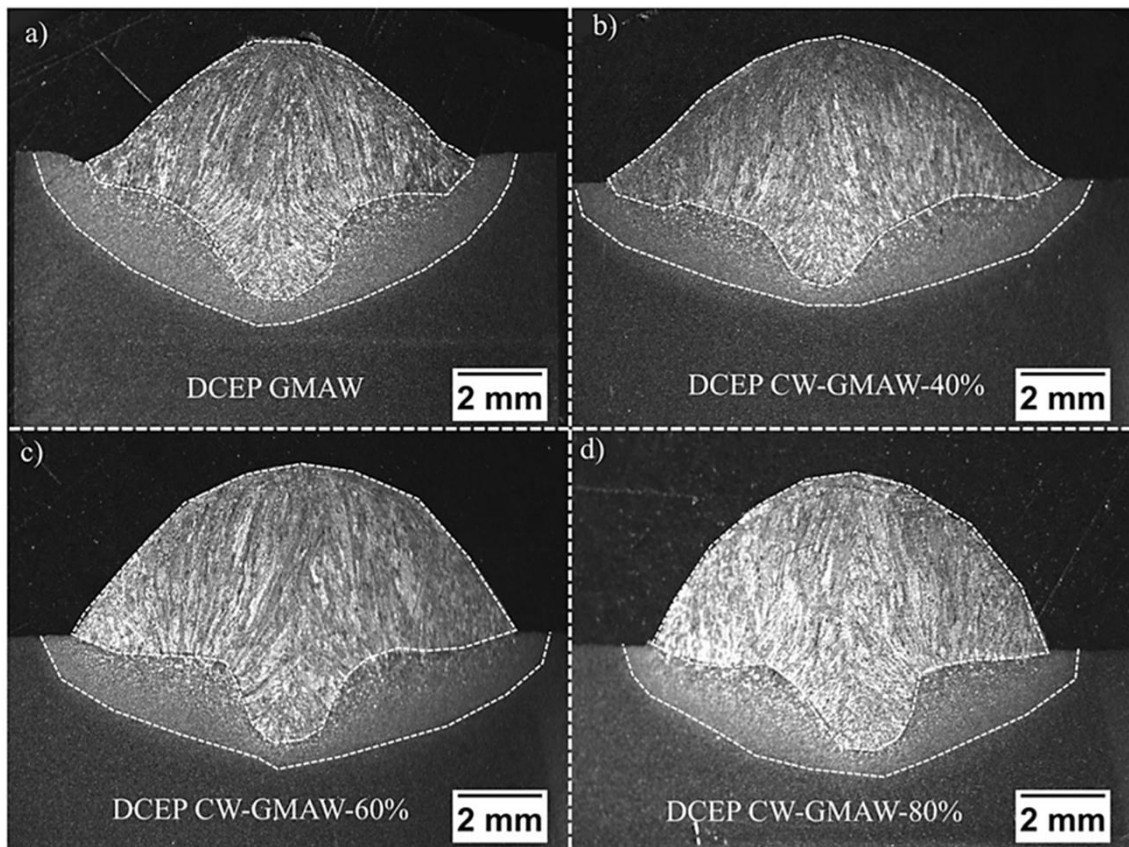


Figura 3.15 - Seção transversal para polaridade negativa. (a) GMAW Convencional. (b) CW-GMAW40%. (c) CWGMAW-60%. d) CW-GMAW80%

3.2.3 Geometria e diluição do cordão

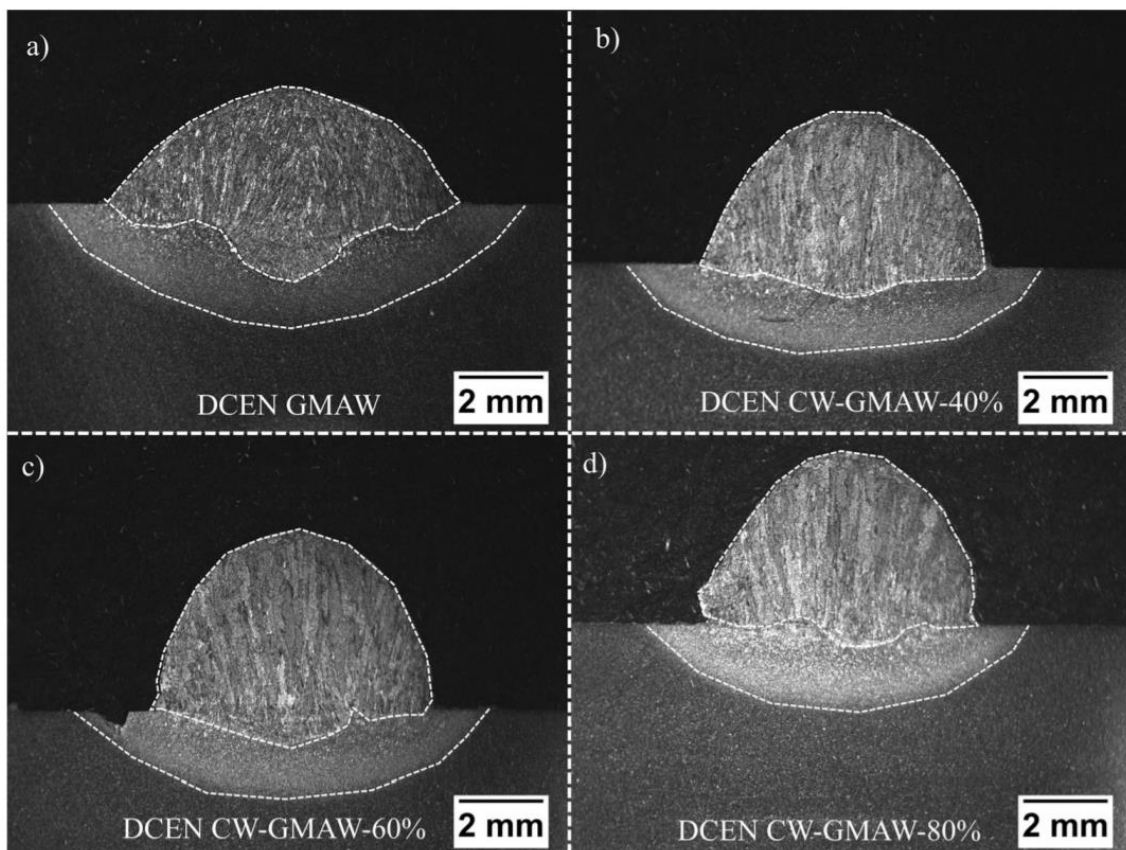


Figura 3.16 - Seção transversal para polaridade negativa. (a) GMAW Convencional. (b) CW-GMAW-40%. (c) CWGMAW-60%. d) CW-GMAW80%

Figura 3.16

A Penetração em um modelo simples proposto por Murray e Scotti [19] é uma função da energia térmica que aciona a convecção na poça de fusão e da escavação mecânica realizada pelo momento da gota. Ambos os efeitos podem ser resumidos em dois fatores adimensionais. No trabalho original de Murray e Scotti [19], esses efeitos foram chamados A, o número de transferência de massa sem dimensão que é responsável pelo efeito mecânico das gotículas, e B, o número adimensional de transferência de calor responsável pelo efeito térmico de penetração. É importante mencionar que uma descrição completa dos mecanismos que envolvem penetração e interação desses parâmetros adimensionais está fora do escopo deste trabalho.

A transferência de calor sem dimensão foi definida anteriormente por Fuerschbach [20] como o número de Rykalin (Ry), para homenagear N. N. Rykalin. De acordo com Mendez, Lu e Wang [21], essa quantidade de energia define dois tipos de comportamento da fonte de calor na soldagem, a saber, fonte de calor lenta e fonte rápida. No entanto, a

aplicação dessa quantidade depende de uma estimativa da eficiência térmica para soldagem usando arame frio, ainda não é disponível na literatura.

Pode-se ver na Figura 3.17a que a diminuição da penetração foi mais íngreme na polaridade CC+ do que na polaridade CC-. Provavelmente isso se deve a dissipação de calor reduzida na poça de fusão na polaridade CC-. Outra característica é a diminuição da penetração que pode ser devido à ação mecânica do arame frio atuando como barreira ao momento da gota, como pode ser visto na Figura 3.11d. De fato, o efeito mecânico das gotículas na penetração é quantificado pelo momento da gota, conforme descrito no trabalho de Scotti e Rodrigues [22].

A medida das larguras na polaridade CC+ é maior que a polaridade CC- como esperado, uma vez que na polaridade CC- a convexidade é maior devido ao baixo calor disponível (consulte a Figura 3.17b). O ângulo de molhamento mediu o umedecimento do cordão ao substrato sobre o qual foi depositado. Pode-se ver na Figura.3.17c que é mais alto na polaridade CC- do que na polaridade CC+; isto é devido à diminuição da penetração da condição anterior. Ângulos de molhamento excessivos em soldas são frequentemente considerados com falha na inspeção visual. Assim, os parâmetros com polaridade CC- CW-GMAW-40% representam um limite para a taxa de alimentação do arame frio.

A área média total do cordão (Figura 3.17d) é uma indicação do volume de material depositado, e pode-se ver que é menor na polaridade CC+ do que na polaridade CC- para todas as taxas de alimentação do arame frio. Isso ocorre devido à quantidade de respingos na polaridade CC-. Embora uma maior fração de arame fio é fundida, apenas uma parte dele é realmente depositado no cordão. Como observado anteriormente, o respingo é proveniente da transferência repelida e pode ser um fator limitante na polaridade CC-.

A área da zona afetada pelo calor (HAZ) é proporcional ao calor real que difundiu através do metal base, mas não foi suficiente para fundi-lo, apesar de promover transformações metalúrgicas indicada pelos resultados de Li et al. [3] cujo estudos alcançaram a mesma observação sobre a diminuição da HAZ em Soldas realizadas em polaridade CC-. Assim, medindo a área da HAZ na Figura 3.17e, isso pode fornecer uma indicação do calor realmente difundido no substrato. Uma observação interessante é que

na solda CW-GMAW-40% na polaridade CC-, a área é quase igual a área medida na solda com polaridade CC+.

Outro fato que vale a pena mencionar é que, com a introdução do arame frio, a variação na área HAZ para polaridade CC- diminuiu em comparação ao GMAW convencional, indicando que o arame frio promoveu menos movimento errante do arco, fazendo a transferência de calor dele para o substrato mais consistente.

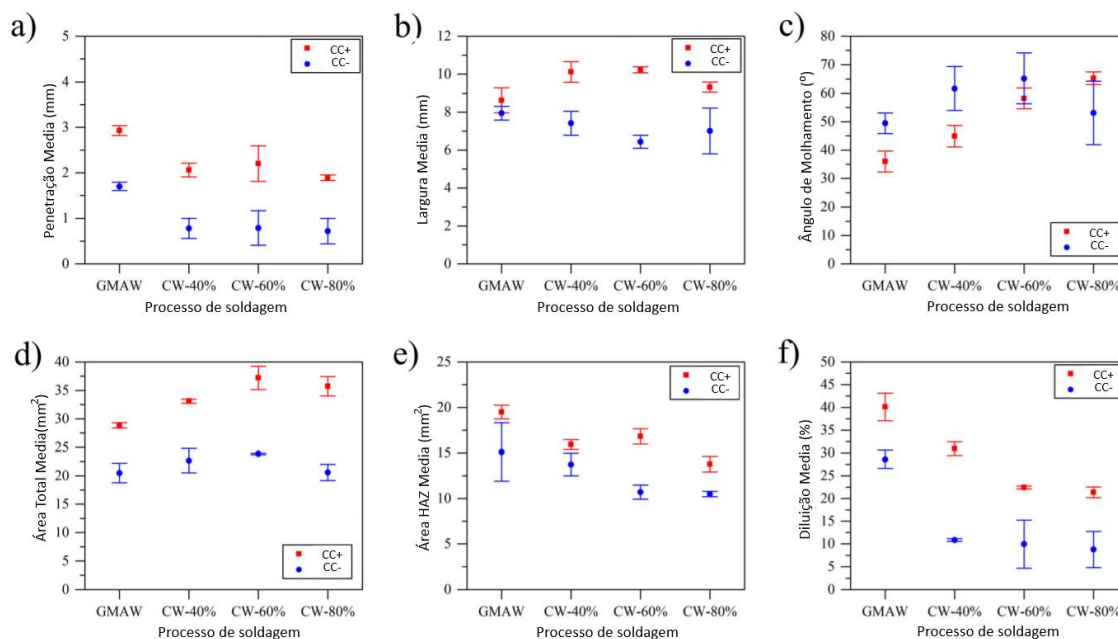


Figura 3.17 - Parâmetros geométricos dos cordões de solda e diluição. (a) Profundidade de penetração. (b) Largura do cordão. (c) Ângulo de molhamento do cordão. (d) Área total do cordão. (e) Área HAZ. (f) diluição. Média de três seções transversais

A diluição está ligada à eficiência térmica com base no trabalho de DuPont e Marder [23]; assim, um aumento na diluição representa um aumento na potência transferida para o substrato em ambas as condições, CC+ e CC-; pode-se ver que a diluição diminuiu em comparação com as condições de GMAW convencional, indicando uma diminuição no calor transferido para a peça de trabalho. Esta diminuição é mais acentuada na polaridade CC-; novamente, isso se deve a baixo quantidade de calor disponível na poça de fusão para fundir o substrato. Observa-se que a diluição mínima alcançada na polaridade CC- é de cerca de 10% e que após a adição CW-GMAW-40% a diluição está quase com diminuição total, indicando que a influência da alimentação do arame frio absorveu o calor da poça fusão. Este valor é diferente do obtido na polaridade CC+. Nesta condição, a diluição reduz em torno de 60% na taxa de alimentação de arame frio, atingindo um mínimo de 25% (consulte a Figura 3.17f).

3.4 CONCLUSÕES

As soldas realizadas em simples deposição em chapa de aço carbono foram realizadas para estudar a dinâmica do CW-GMAW nas polaridades CC+ e CC-. As conclusões a seguir podem ser tiradas do relatório apresentado nos resultados.

1. A soldagem a GMAW com arame frio é viável tanto em polaridades direta (CC-) quanto em polaridades reversa (CC+);

2. A acomodação do arame frio na poça de fusão e função da distribuição de calor na mesma quando a mudança de polaridade é observado que a polaridade CC- tem menor quantidade de calor na poça de fusão quando comparado com a polaridade CC+.

3. A alimentação do arame frio é capaz de estabilizar o arco para ambas as polaridades, embora esse efeito tenha mais eficiência na polaridade CC-;

4. Os respingos gerados pela soldagem realizada com polaridade CC- pode afetar a deposição, e altas taxas de arame frio podem intensificar ainda mais os respingos.

3.5 NOMENCLATURA

Ar	Argônio
CP	Corpo de prova
CC+	Corrente Contínua Positiva
CC-	Corrente Contínua Negativa
CV	Tensão constante
CGHAZ	Zona Afetada Pelo Calor de Granulação Grosseira
I	Corrente (A)
GMAW	Gas Metal Arc Welding
CW-GMAW	Gas Metal Arc Welding - Cold Wire

MB	Metal de base
NGW	Narrow Gap Welding
Vs	Velocidade de soldagem (cm/min)
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZF	Zona fundida
M.O	Microscopia Ótica

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Norrish J (1974) High deposition MIG-welding with electrode negative polarity. In: 3rd Intl. Conf. on Advances in Welding Processes. *The welding Institute*, Cambridge, UK., pp 121–128

[2] Souza D, de Resende AA, Scotti A (2010) A qualitative model to explain the polarity influence on the fusion rate in the MIG/MAG process. *Weld Int* 24:934–941. <https://doi.org/10.1080/09507110903569032> 145

[3] Li P, Hurtig K, Högström M, Svensson LE, Scotti A (2018) A contribution to the study of negative polarity in GMA welding. *Int J Adv Manuf Technol* 95:2543–2553. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1349-z>

[4] Cho J, Lee J-J, Bae S-H (2015) Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum. *Int J Adv Manuf Technol* 81: 1273–1280. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7292-y>

[5] Kim K, Chung H (2017) Wire melting rate of alternating current gas metal arc welding. *Int J Adv Manuf Technol* 90:1253–1263. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9384-8>

[6] Cabral TS, Braga EM, Mendonça EAM, et al. Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. *Weld Int*. 2015;29:928–936.

- [7] E.S. Costa, P.D.C. Assunção, E.B.F. Dos Santos, L.G. Feio, M.S.Q. Bittencourt, E.M. Braga, Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. *Sci. Technol. Weld. Join.* 22 (2017) 706–713. doi:10.1080/13621718.2017.1306014. 140
- [8] Marques LFN, Santos EBF, Gerlich AP, et al. Fatigue life assessment of weld joints manufactured by GMAW and CW-GMAW processes. *Sci Technol Weld Joining.* 2017;22:87–96.
- [9] ASTM (2009) Standard specification for general requirements for steel bars, carbon and alloy, hot-wrought. Changes i:1–16. [https:// doi.org/10.1520/A0029](https://doi.org/10.1520/A0029)
- [10] AWS (2005) AWS A5.28/A5.28M:2005 - Specification for lowalloy steel electrodes and rods for gas shielded arc welding, p 43
- [11] LEM (1997) Current transducer LF 505-S / SP15, pp 1–2
- [12] LEM (2017) Voltage transducer LV 100-100 Data Sheet. In: 3
- [13] NAS, Batista M de A, do NVC, Scotti A (2007) Assessment of electrical power calculation methods in arc welding and the consequences on the joint geometric, thermal and metallurgical predictions. *Soldag Inspeção* 12:97–106
- [14] Kodama S, Ikuno Y, Ichiyama Y, Baba N (2007) Process modeling of shortcircuiting GMA welding and its application to arc sensor control. *Nippon Steel Tech Rep* 95:71–75
- [15] Hajossy R, Morva I (1994) Cathode and anode falls of arcs with fusible electrodes. *J Phys D Appl Phys* 27:2095–2101. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/10/016>
- [16] Ribeiro RA, dos Santos EBF, Assunção PDC, Braga EM, Gerlich AP (2018) Cold wire gas metal arc welding: droplet transfer and geometry. *Weld J Res Suppl*:21 146
- [17] Cary HB (1989) Modern welding technology, 2nd edn. PrenticeHall, *Englewood Cliffs*, New Jersey.
- [18] Jenney CL, O'Brien A (2004) Welding handbook, *9th edn.* AWS, Miami, FL
- [19] Murray PE, Scotti A (1999) Depth of penetration in gas metal arc welding. *Sci Technol Weld Join* 4:112–117. <https://doi.org/10.1179/136217199101537644>

- [20] Fuerschbach PW (1994) A Dimensionless parameter model for arc welding processes. *In: International Conference on Trends in Welding Research*, Gatlinburg, TN, USA
- [21] Mendez PF, Lu Y, Wang Y (2018) Scaling analysis of a moving point heat source in steady-state on a semi-infinite solid. *J Heat Transfer* 140:081301. <https://doi.org/10.1115/1.4039353>
- [22]. Scotti A, Rodrigues CEAL (2009) Determination of momentum as a mean of quantifying the mechanical energy delivered by droplets during MIG/MAG welding. *Eur Phys J Appl Phys* [45]:11201. <https://doi.org/10.1051/epjap:2008196>
- [23]. DuPont JN, Marder AR (1996) Dilution in single pass arc welds. *Metall Mater Trans B* 27:481–489. <https://doi.org/10.1007/BF02914913>

CAPÍTULO 4**ARTIGO III- UM ESBOÇO NA SOLDAGEM DE GÁS METAL ARC
WELDING DOUBLE COLD WIRE DCW-GMAW³**

UM ESBOÇO NA SOLDAGEM DE GÁS METAL ARC WELDING DOUBLE COLD WIRE DCW-GMAW

Resumo

As crescentes demandas de produtividade e confiabilidade na soldagem levaram ao desenvolvimento de novos processos de soldagem. Estes processos frequentemente têm taxas de deposição superiores; no entanto, eles podem levar a uma maior zona afetada pelo calor (HAZ), que pode prejudicar suas propriedades mecânicas. Aqui, é avaliado um processo promissor denominado soldagem a arco de metal a gás com fio frio duplo (DCW-GMAW), oferecendo taxas de deposição mais altas por meio da alimentação de dois arames frio na poça de fusão para melhorar a produtividade. Em contraste com processos semelhantes, a ZTA de soldas DCW-GMAW são menores do que as soldas a arco de metal a gás (GMAW) Convencional. Este trabalho relata uma avaliação preliminar da viabilidade do processo em termos de características e estabilidade do arco elétrico. Vídeo de alta velocidade de aquisição foi usado para analisar a transferência de metal através do arco. Finalmente, técnicas metalográficas padrão e dureza Vickers foram usados para avaliar as microestruturas e dureza nas seções transversais da solda. Os resultados demonstram a viabilidade do DCW GMAW com base na estabilidade de arco no processo em diferentes taxas de alimentação de arame frio, ao mesmo tempo que oferece alta deposição do metal de solda (alta produtividade) com dureza desejável devido ao aumento do teor de ferrita acicular.

Palavras-chave: GMAW Convencional. DCW-GMAW. Transferência de metal. Secção transversal. Macro e micrografias.

4.1 INTRODUÇÃO

A taxa de fusão e deposição de consumíveis em soldagem medido em (kg / h) determina a produtividade na soldagem. Esse é um problema para muitas aplicações, por exemplo, na construção naval, onde são utilizados processos de alta energia, como a soldagem a arco submerso (SAW) McPherson [1]. No entanto, para aplicações de soldagem em serviços pesados, a alta produtividade geralmente ocorre às custas da deterioração das peças afetadas pelo calor, a zona afetada pelo calor (HAZ) é um exemplo, onde as propriedades mecânica e metalúrgica desta zona devido ao calor excessivo transferido para a peça, o que pode prejudicar a sanidade da das juntas soldada. Idealmente, um bom processo considerado na soldagem pesada deve ser produtivo e evitar a deterioração do HAZ.

A soldagem a arco de metal com gás em tandem (T-GMAW) foi estudada para substituir o SAW. Larkin et al. [2] relataram que o T-GMAW possui versatilidade superior em conjunto com maior velocidade de deslocamento, diminuindo área HAZ enquanto diminui a distorção pós-soldagem. Uma desvantagem do T-GMAW é que mesmo ao usar duas tochas, a deposição normalmente ainda está abaixo da media convencional. Outras técnicas, Por exemplo como o laser híbrido, foram usadas em aplicações específicas de construção naval. Para, Turichin et al. [3] relataram a soldagem de painéis de aço de até 45 mm de espessura utilizados em aplicações de construção naval. A soldagem a laser híbrida também tem dificuldade em aumentar a deposição no entanto, a entrada de calor e a deterioração do HAZ são muito menores.

Uma modificação recente do GMAW convencional desenvolvido especificamente para construção naval. Essa modificação é chamada de soldagem gas metal *Arc Welding Cold Wire* (CW-GMAW). Esse processo envolve alimentar um arame fio não energizado na poça de fusão, para ser fundido pelo excesso de calor que, de outra forma, seria perdido. Ribeiro et al. [4] estudaram esse processo e relataram uma diminuição na diluição enquanto um aumento na taxa de fusão. Mais longe, Costa Assunção et al. [5] relataram a viabilidade de utilizar o CW-GMAW para soldagem por folgas estreitas, considerando as vantagens em evitar a erosão da parede lateral.

Além disso, Cabral et al. [6] empregando esse processo para soldar painéis navais, relataram melhores resultados em distorção angular quando comparados com o GMAW

convencional. Marques et al. [7] relataram que as juntas fabricadas com CW-GMAW apresentam vida útil superior à fadiga em comparação com as juntas GMAW convencional devido a microestrutura favorável.

Para aumentar ainda mais a produtividade da CW-GMAW, Braga e Costa Assunção [8] propôs o processo de soldagem Gas Metal Arc Welding Double Cold Wire (DCW-GMAW) em 2013. Este trabalho relata um estudo de viabilidade do DCW-GMAW com possível uso em aplicações pesadas, como construção naval e infraestrutura. Essa variante do GMAW consiste em dois fios não energizados alimentados poça de fusão para aumentar a deposição sem aumentar o calor transferido. A viabilidade é avaliada com base na estabilidade do arco, dinâmica de transferência de metal, aspecto do cordão e microestrutura. Para o melhor conhecimento dos autores, esta é a primeira vez que esses problemas são relatados à comunidade de soldagem.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

As soldas realizadas em simples deposição realizadas usando uma fonte de energia de soldagem robótica R500 Lincoln operando no modo de tensão constante (CV). A configuração para o posicionamento dos arames frios em relação ao arame eletrodo é mostrada na Figura 4.1. Os parâmetros de soldagem utilizados foram encontrados experimentalmente por tentativa e erro em estudo anterior. Os parâmetros utilizados para a fabricação da solda, em GMAW e DCW-GMAW, podem ser vistos na Tabela 4.1. Pode-se observar que a taxa de alimentação do arame frio foi variada para avaliar sua influência no processo e na microestrutura. Os valores de alimentação de arame frio referem-se à quantidade em porcentagem de massa alimentada em cada arame frio. A distância do bico de contato à peça de trabalho (DBCP) foi igual a 17mm.

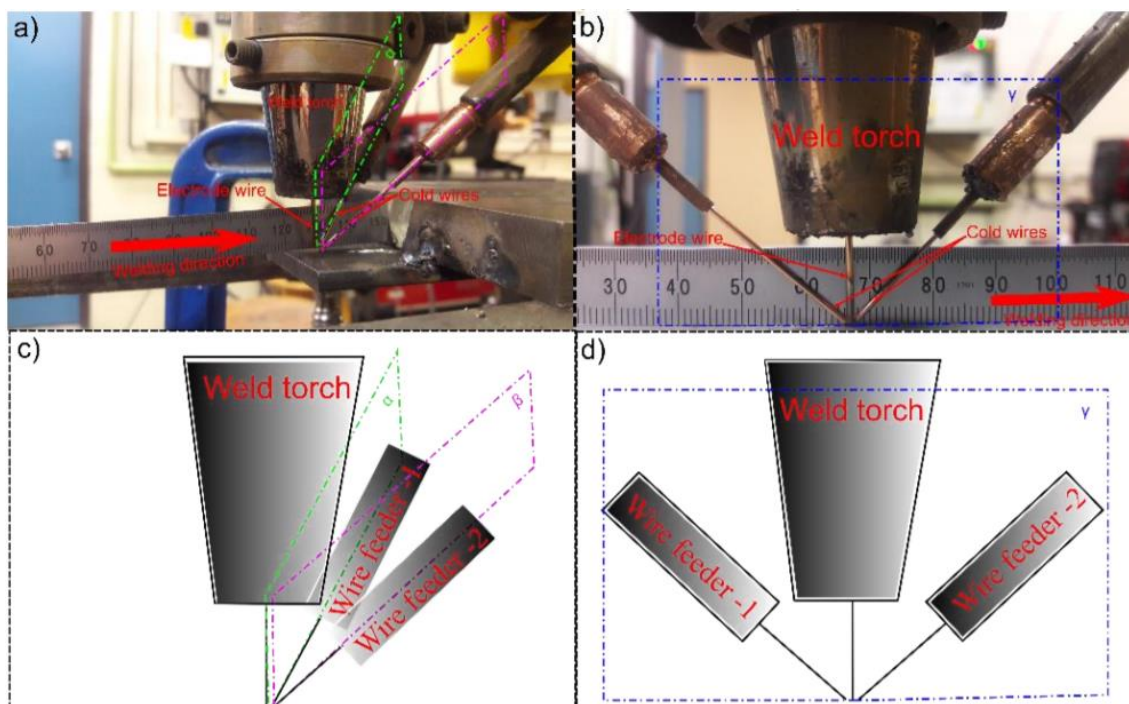


Figura 4.1 - Configuração da posição dos arames frios: a, c) Conduzindo o arco. b,d) Liderando e seguindo o arco.

Tabela 4.1 - Matriz experimental, com os parâmetros definidos na fonte de soldagem e variação na alimentação do arame frio.

Processo	Cold wire massa fração pct. (%)*	Velocidade de arame (in/min)	Voltagem (V)	Velocidade de soldagem (in/min)
GMAWConven.	0	310	28	25
	20	310	28	25
DCW-GMAW	40	310	28	25
	60	310	28	25

* Isso representa a fração de massa alimentada através de cada injetor.

O cordão de solda foi depositado sobre barras planas laminadas a quente de aço carbono AISI 1020. O gás de proteção usado foi Ar-15% CO_2 a uma taxa de fluxo de 15L/min. As composições químicas nominais dos arames de soldagem ER70S-6 utilizados para realizar as soldas são fornecidos na Tabela 4.2 de acordo com as referências [9] e [10], respectivamente

Tabela 4.2 - Composição química nominal dos arames de soldagem e do metal base.

Material	C	Mn	P	S	Ti	Mo	Ni	Cr	Fe
ER70S-6	0,15	1,85	-	0,035	-	-	-	-	Bal.
AISI 1020	0,18	0,30	-	Max. 0,005	-	-	-	-	Bal.

Paralelamente, corrente e tensão foram adquiridas com imagens sincronizadas de alta velocidade, usando um sistema DAQ (que consistia em um sistema de aquisição de dados da *National Instruments* (DAQ), um sensor Hall para medir a corrente do arame eletrodo e um divisor de tensão resistivo para a tensão medida de soldagem), para investigar a dinâmica do arco. Os vídeos foram realizados com o FastCam mini UX50 a 5000 qps com uma abertura de $f/22$, velocidade do obturador de 25 ms e um filtro passa-banda de 910 nm para limitar a quantidade de luz de arco que chega ao sensor da câmera. Os sinais elétricos foram adquiridos a 10 kHz por dois segundos. Após a soldagem, os espécimes foram seccionados e submetidos a procedimentos metalográficos padrão. As seções transversais foram atacadas com Nital 5%. As características geométricas do cordão foram medidas usando um software de processamento de imagem. As microestruturas foram observadas por microscopia óptica

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Resumo dos Dados Elétricos

A Tabela 4.3 mostra os valores médios de corrente, tensão e potência, juntamente com a densidade de energia de cada processo. Verificou-se que a corrente média aumenta, levando ao aumento da densidade de energia, o que é consistente com trabalhos anteriores [11].

Tabela 4.3 - Valores médios de corrente, tensão e potência, amostrados durante a soldagem.

Processo	Média Corrente(A)	Média. Voltagem (V)	Média. Potência (W)	Energia (kJ/mm)
GMAW	265	27,79	7363	0,69
DCW-20%	260	27,84	7501	0,71
DCW-40%	278	27,84	7755	0,73
DCW-60%	277	27,82	7705	0,73
DCW-60% Coplanar	281	27,86	7830	0,74

Os dados elétricos também indicam que o arco é mais estável à medida que as taxas de alimentação do arame frio aumentam. Dado que o valor médio instantâneo da tensão está mais próximo do ponto de ajuste da tensão, em que a fonte de energia da

soldagem foi regulada para 28 V, indicando que a tensão instantânea diminuiu apenas ligeiramente com a adição de arame frio.

4.3.2 Oscilogramas e Estabilidade do Arco

As medições coletadas para corrente e tensão foram representadas como oscilogramas para todo o tempo de amostragem de 2000ms, a fim de avaliar a estabilidade do arco das condições de soldagem apresentado neste trabalho. Basicamente, a estabilidade do arco foi avaliada com base no coeficiente de variação (COV) para tensão, uma vez que este parâmetro de soldagem é controlado no modo de tensão constante. Um menor COV indica um regime de soldagem mais estável, pois isso será correlacionado com uma maior consistência do comprimento do arco que facilita uma melhor transferência, responsável pela maior estabilidade observada.

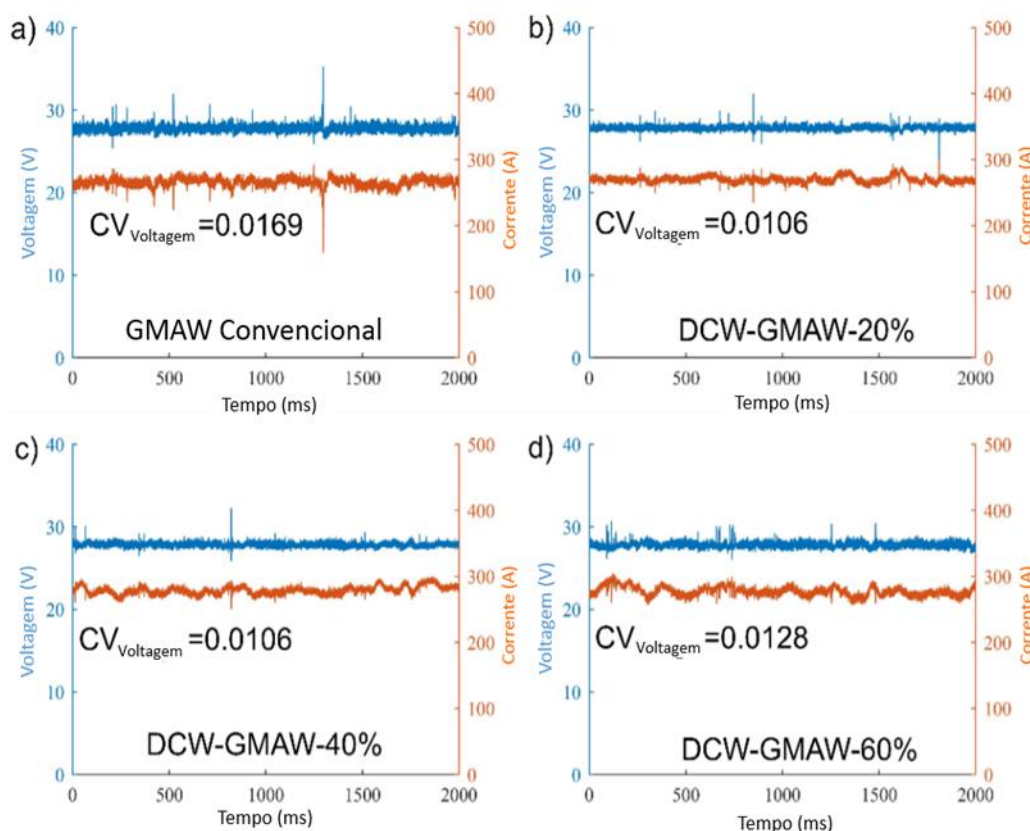


Figura 4.2 - Oscilogramas e coeficiente de tensão das variações: a) GMAW Convencional. b) DCW-GMAW-20%. c) DCW-GMAW113 40%. d) DCW-GMAW-60%. e) DCW-GMAW-60%. Coplanar

Pode-se ver que a introdução dos arames frio leva à estabilização do ponto de ajuste da tensão. Em particular, em tensão constante, a tensão está intimamente

correlacionada com o comprimento do arco. Xiang et al. [12] relataram que a introdução de arame frio leva à estabilização da emissão de pontos catódicos. Este parece ser consistente com a fixação do arco ao fio frio observado por Costa Assunção et al. [5]

4.3.3 Ciclogramas

Para ter um entendimento completo do comportamento dinâmico do arco elétrico, a Figura 4.3 apresenta os ciclogramas para todas as condições de soldagem. Os ciclogramas fornecem uma comparação do histórico de corrente versus tensão para indicar a estabilidade geral do arco e revelar tendências no comportamento do arco, como curtos-circuitos. A área do ciclograma pode ser correlacionada à estabilidade do arco e, portanto, uma área maior implica menor estabilidade e, pelo contrário, uma área menor implica maior estabilidade. Mais detalhes sobre os ciclogramas podem ser encontrados no trabalho de Jorge, Gohrs e Scotti [13].

Pode-se observar que o ciclograma obtido no GMAW Convencional (Figura 4.3a) apresenta alguns pontos em direção à maior tensão e menor região de corrente (canto superior esquerdo). Esse comportamento indica algumas instabilidades do arco relacionadas a um comprimento maior do arco. Além disso, pode-se ver que, à medida que o arame frio é alimentado no conjunto de arco poça de fusão, a estabilidade do processo melhora em geral (Figura 4.3b-e). Isso parece consistente com os resultados relatados por Xiang et al. [12] que relataram que a adição de um arame frio no GMAW twin melhora a estabilidade, devido à estabilização da variação dos pontos catódicos emissores de elétrons. Além disso, a estabilidade é levemente melhorada quando os dois arames frios são alimentados no modo coplanar (Figura 4.3e) em comparação com quando são alimentados na borda principal do arco, consulte a Figura 4.3b.

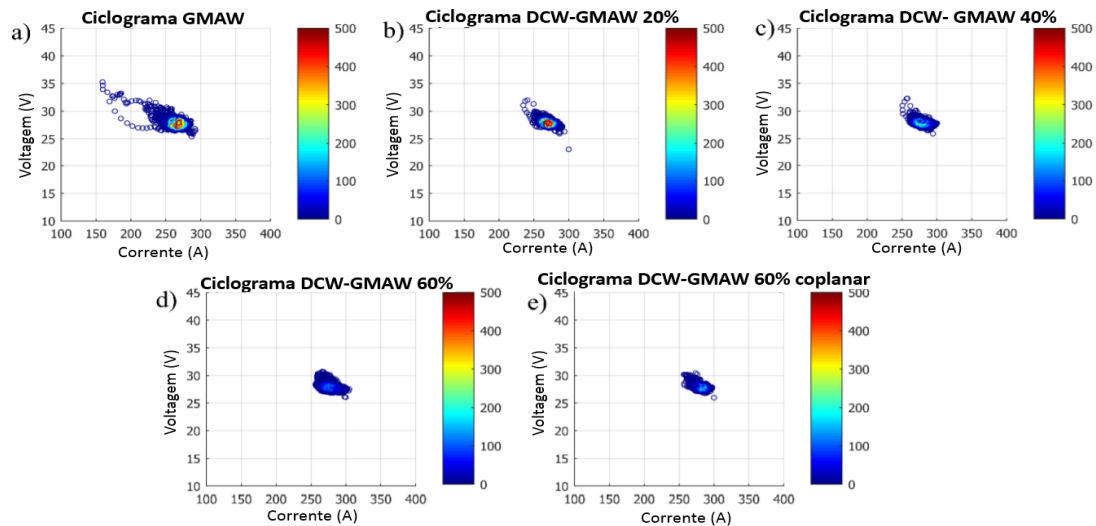


Figura 4.3 Ciclogramas para condições de soldagem: (a) GMAW padrão. (b) DCW-GMAW-20%. (c) DCW-GMAW-40%. (d) 138 DCW-GMAW-60%. (e) DCW-GMAW-60% - coplanar.

4.3.4 Vídeos de Alta Velocidade e Mecanismo de Transferência de Metal

A Figura 4.4 mostra as imagens de alta velocidade sincronizadas com os sinais elétricos para a condição do GMAW convencional. O modo de transferência alcançado apresenta comportamento globular, pois o diâmetro da gota não é menor que o diâmetro do eletrodo. A tensão e a corrente apresentam alguma dispersão em torno de 28 V (ponto de ajuste de tensão) e 265 A, respectivamente.

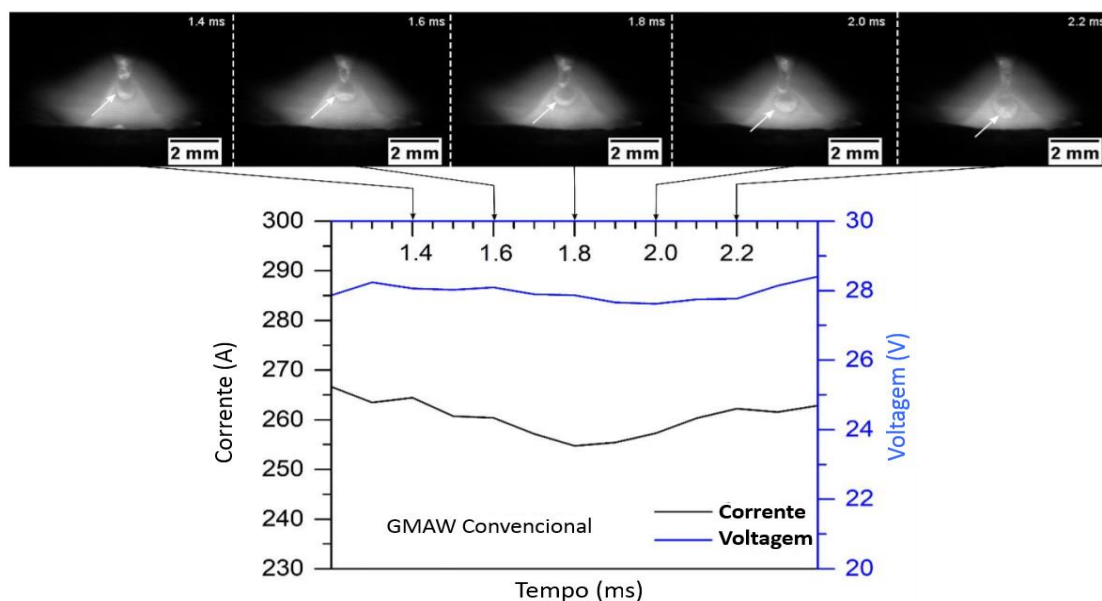


Figura 4.4- Imagens de alta velocidade do arco sincronizadas com sinais elétricos: GMAW Convencional
A flecha branca indica o descolamento de gotículas

Pode-se verificar na Figura 4.5a que a variação atual em DCW-GMAW-40% ainda é semelhante a GMAW convencional, consistente com o que é mostrado na Tabela 4.3. O período de descolamento de gotículas é de cerca de 0,4 ms, o que é consistente com um ligeiro aumento no descolamento eletromagnético, que é proporcional ao aumento de corrente para fundir a fração de arame extra. Da mesma forma, o período de descolamento das gotículas em DCW-GMAW-40% (Figura 4.5b) é menor que em DCW-GMAW-20%, cerca de 0,2 ms, devido ao fato de que a corrente aumentou novamente para variar em torno de 285 A. Além disso, pode-se ver que o arco fica levemente preso aos dois arames frios nessa taxa de alimentação. Basicamente, a conexão é causada pelo menor fluxo do caminho atual do arco para os arames. Além disso, como o arco é fixado nos dois arames frios, a penetração na poça de fusão deve diminuir. O efeito dos parâmetros do processo na geometria dos cordões será discutido mais adiante na Seção 4.5.

A Figura 4.6a mostra o DCW-GMAW-60% quando os arames frios são alimentados na borda principal do arco (planos tangentes) e comparados a quando os arames frios são alimentados em uma posição coplanar na Figura 4.6b. Para a taxa de alimentação de DCW-GMAW-60%, o arco é completamente preso aos arames frios. Ao contrário do esperado, ao aplicar uma taxa de alimentação de DCW-GMAW-60%, a corrente não aumenta e é mantida no limite de variação esperado. Pode-se descobrir que, quando DCW-GMAW-60%, parece ter atingido um limite de estabilidade, conforme sugerido pelo respectivo ciclograma (Figura 4.3d). Contudo, alimentar os dois arames frios na orientação coplanar parece superar esse problema de estabilidade, como pode ser visto na Figura 4.3d.

Pode ser indicado na Figura 4b que o arco está preso aos arames frios alimentados no mesmo plano (coplanar). A poça de fusão é protegida do arco pelos dois arames, o que limitará a penetração no substrato. A corrente varia em torno de 280 A, em média, como mostrado na Tabela 4.3 e pode ser visto na Figura 4.6 que o nível de corrente local para esse intervalo de tempo é semelhante ao GMAW Convencional.

A alimentação coplanar dos dois arames frios diminui a corrente e a HAZ, o que é benéfico para muitas aplicações, como as de revestimento. Outra aplicação pode ser a soldagem por folgas estreitas, pois esse pinçamento duplo do arco pode evitar a erosão da parede lateral do chanfro.

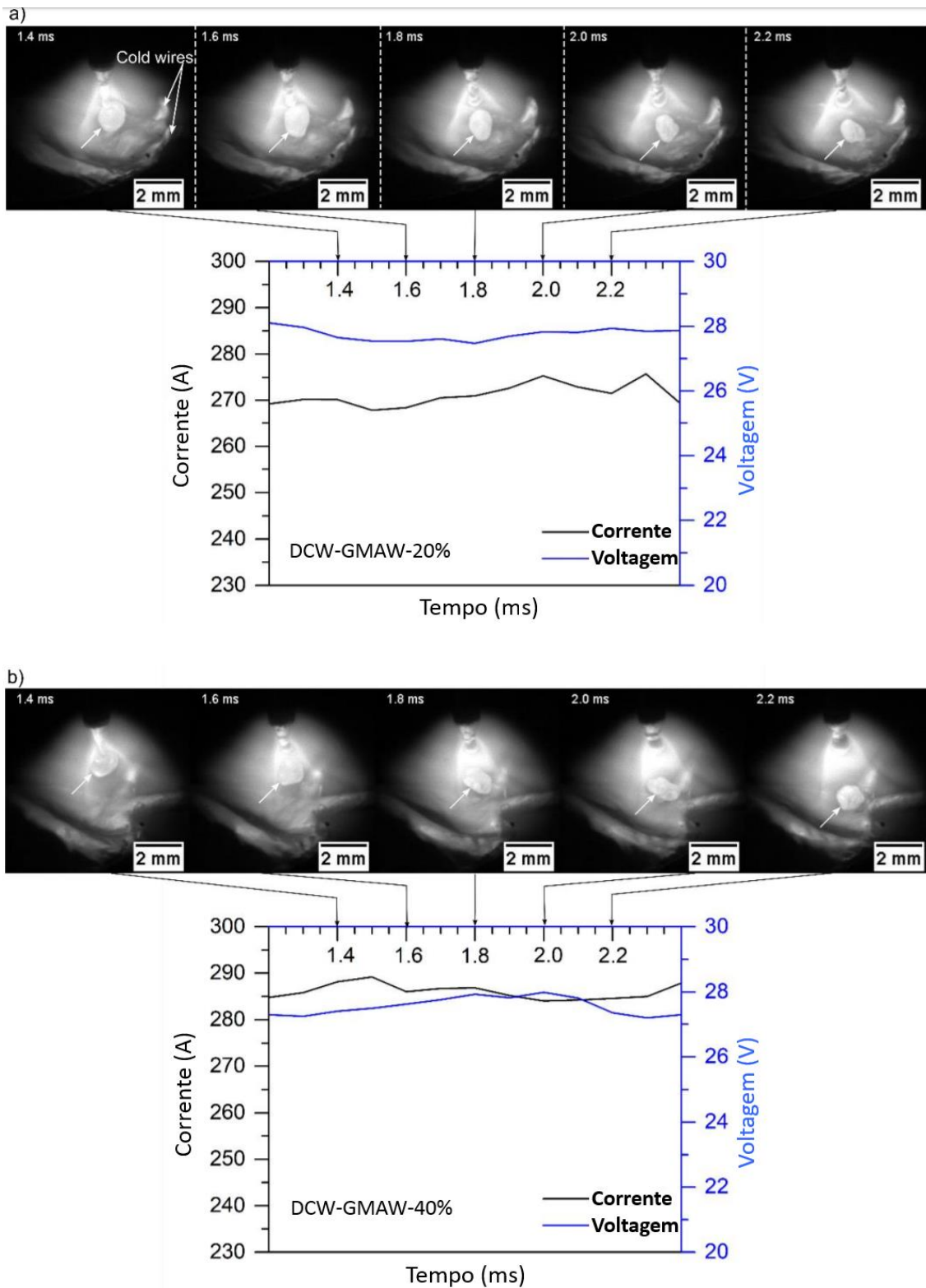


Figura 4.5 - Imagens de alta velocidade do arco sincronizadas com sinais elétricos: (a) CW-GMAW-20%, (b) CW-GMAW-40%. A seta branca indica o destacamento de gotículas.

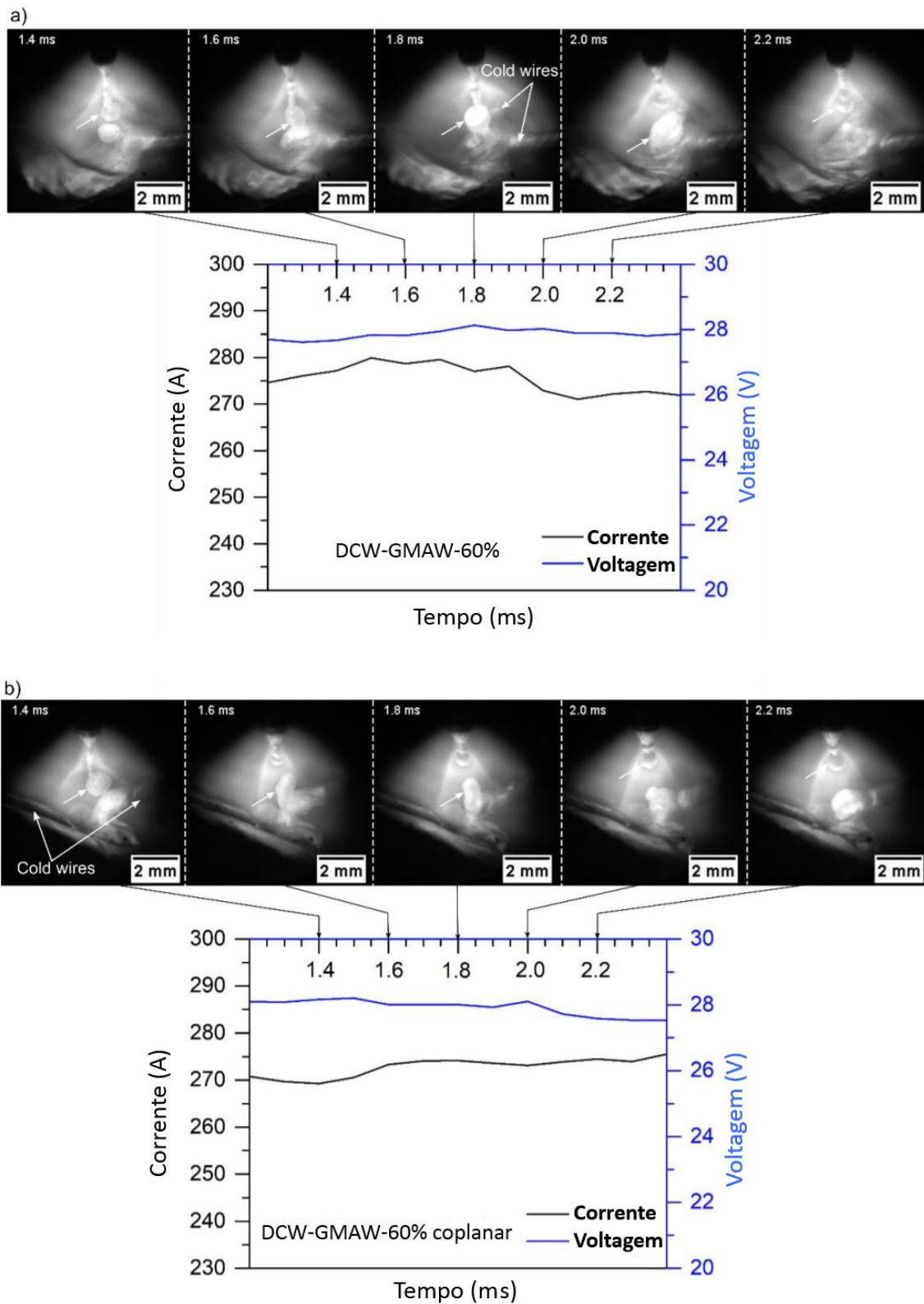


Figura 4.6- Imagens de alta velocidade do arco sincronizadas com sinais elétricos: (a) CW-GMAW-60%, (b) CW-GMAW-60% (coplanar). A seta branca indica o desprendimento de gotículas

4.3.5 Características do Cordão

A Figura 4.7 mostra as características dos cordões em todas as soldas. Pode-se observar que nenhum defeitos de superfície podem ser encontrados em todas as condições. Além disso, o nível de respingos, conforme suportado pelos respingos adjacentes aos cordões de solda, era baixo para todas as condições, mesmo em DCW-GMAW-60%. Isso indica a estabilidade e a robustez do processo. A largura da poça de fusão parece diminuir à medida que o arame frio é alimentado, o que pode afetar o número de Peclet (Pe); que será avaliado posteriormente na Seção 4.4.

Além disso, o processo DCW-GMAW-60% (Figura 4.7d) apresenta uma poça de fusão assimétrico. Esse fenômeno parece estar ligado à introdução de uma taxa de arame frio mais alta em uma parte da poça de fusão. Quando a mesma taxa de alimentação de arame frio é introduzida em duas regiões do conjunto de solda, como no modo coplanar, para DCW-GMAW-60% (Figura 4.7e), a simetria do conjunto de solda é semelhante à obtida no GMAW Convencional (Figura 4.7a).

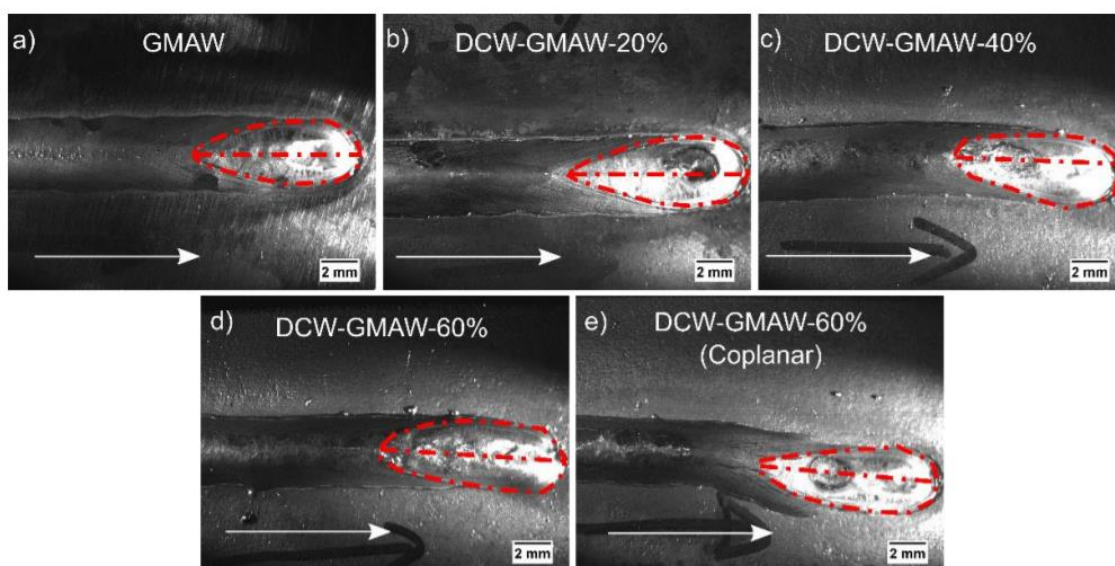


Figura 4.7 - Características do cordão de solda: (a) GMAW padrão, (b) CW-GMAW-20%, (c) CW-GMAW-40%, (d) CW-GMAW 60%, (e) CW-GMAW-60 % (coplanar). A seta branca indica a direção da soldagem.

4.3.6 Macrografias, Penetração e Diluição

A Figura 4.8 mostra as macrografias para as condições estudadas neste trabalho. Pode-se ver que, à medida que a alimentação do arame frio aumenta, a penetração diminui, com um conseqüente aumento na altura do cordão. Todas as esferas com taxas de alimentação de DCW-GMAW até 40% têm uma penetração deforme, típica da transferência por spray. Esse tipo de penetração é suprimido pela alimentação de arame frio, uma vez que os arames frios protegem a poça de fusão e evitam a escavação axial pela gota. No entanto, quando os dois arames frios são alimentados em um alinhamento coplanar, esse tipo de penetração reaparece, o que pode ser explicado por que nem todas as gotículas são blindadas pelo arame frio e algumas ainda escavam a poça de fusão.

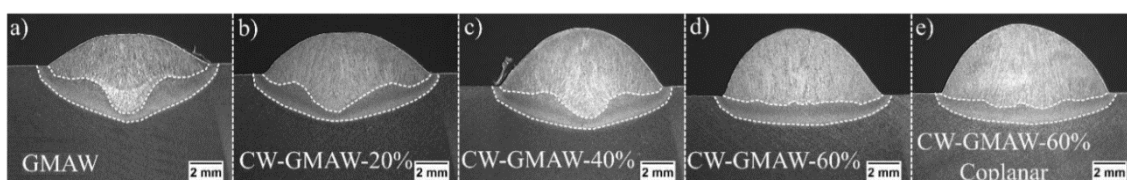


Figura 4.8 - Macrografias para as condições de soldagem: (a) GMAW padrão, (b) DCW-GMAW-20%, (c) DCW-GMAW-40%, (d) DCW-GMAW-60%, (e) DCW-GMAW-60% (coplanar).

A penetração e diluição para diferentes taxas de alimentação de arame frio é mostrada na Figura 4.9. A penetração, como mencionado, diminui substancialmente com o aumento da alimentação de arame frio (Figura 4.9a). Isso implica em uma característica desejável para aplicações como revestimento duro de ligas resistentes ao desgaste. No entanto, as aplicações de união não podem ser desconsideradas, pois a redução na diluição pode ser interessante para algumas aplicações em que a diluição do chanfro é um problema.

Além disso, a eficiência de fusão das soldas DCW-GMAW é provavelmente mais alta, pois um aumento na área devido ao metal adicionado ao cordão aumenta a eficiência geral de fusão. Como observado por Ribeiro et al. [14] para um arame frio, o DCW-GMAW também possui uma relação inversa entre eficiência de fusão e diluição (Figura 4.9b).

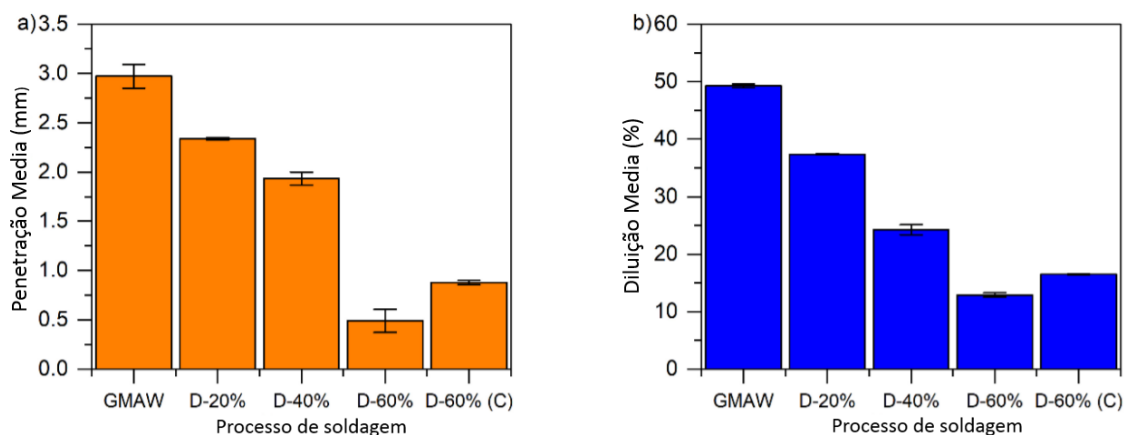


Figura 4.9 - Características geométricas: (a) Penetração, (b) Diluição. O (C) significa coplanar

A tendência na Figura 4.9a e na Figura 4.9b mostra que, quando os fios arames são alimentados de maneira coplanar, há um ligeiro aumento na penetração e diluição, o que é consistente com o fato de que nem todas as gotículas são protegidas pelo arame frio e, portanto, podem escavar axialmente a poça de fusão (no modo de transferência por spray), aumentando a penetração e a diluição, respectivamente.

4.3.7 Micrografias

A Figura 4.10 mostra as micrografias das soldas mostradas na Figura 4.8. As imagens foram tiradas no centro dos cordões. O processo DCW-GMAW apresentou mais microconstituente de ferrita acicular em relação ao processo GMAW Convencional. Foi observado que o aumento da alimentação de arame frio no processo DCW exerceu uma pequena influência no conteúdo de ferrita acicular (AF) no centro do cordão. Isso significa que provavelmente a taxa de resfriamento no centro do cordão não tem variação no DCW-GMAW. Mas provavelmente a taxa de resfriamento do metal no DCW difere do GMAW convencional, o que explica a diferença no conteúdo AF.

Outro fator que pode influenciar a fração de microconstituintes da (AF) é a quantidade de inclusões formadas no metal de solda que são ativas na nucleação de (AF). Novamente, pode-se supor que, à medida que dois arames frio são alimentados, o número de óxidos (inclusões) dentro da poça de fusão seria maior, o que aumentaria a possibilidade de nucleação de (AF), dada uma taxa de resfriamento favorável. No entanto, isso não foi observado durante a etapa de caracterização das soldas. Além disso, a

presença de FA é benéfica para a resistência e tenacidade do metal de solda, dada a morfologia de bloqueio dessa microestrutura de acordo com Abson e Byun et al. [15, 16]

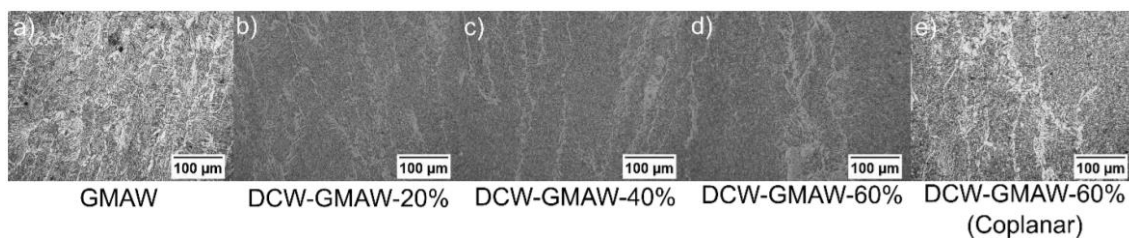


Figura 4.10- Micrografias tiradas no centro das contas: (a) GMAW padrão, (b) CW-GMAW-20%, (c) CW-GMAW-40%, (d) CW-GMAW-60%, (e) CW-GMAW-60% (coplanar)

4.3.8 Dureza Vickers

A Figura 4.11 mostra os resultados da dureza Vickers para as soldas do processo DCW-GMAW. Os resultados da dureza são consistentes com as microestruturas observadas. Pode-se observar que a dureza das amostras DCW-GMAW-20%, DCW-GMAW-40% e DCW-GMAW-60% é maior que a amostra GMAW Convencional. A exceção sendo DCW-GMAW-60% na configuração coplanar, na qual a dureza dessa amostra é menor que as outras amostras DCW-GMAW e tem uma ligeira semelhança a dureza do GMAW Convencional. Os resultados da dureza indicam que há alterações nas taxas de resfriamento das amostras DCW-GMAW quando comparadas à amostra GMAW Convencional. As amostras DCW-GMAW (DCW-20%, DCW-40% e DCW-60%) apresentam taxas de resfriamento mais altas do que o GMAW convencional, responsável pela maior dureza medida. Novamente, a exceção é DCW-GMAW-60% - Coplanar, que apresenta dureza semelhante, e esse comportamento será discutido na Seção 4.4.

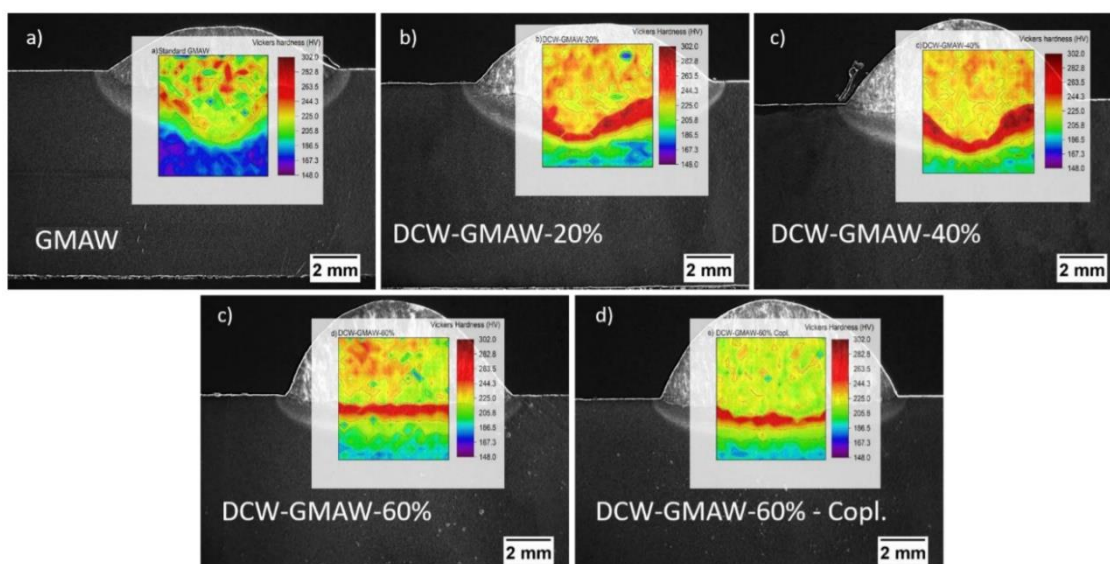


Figura 4.11 – Mapas de dureza soldas DCW . a) GMAW cnvencional, b) DCW-GMAW-20%, DCW-GMAW-40%, d) DCW250 GMAW-60%, e (e)DCW-GMAW-60% - Coplanar

4.4 DISCUSSÕES

4.4.1 Características da Dinâmica do Arco

Como esperado, o aumento na alimentação do arame frio causa um aumento na corrente quando a fonte de energia de soldagem opera no modo tensão constante CV. Nesse modo, a corrente é vinculada à velocidade de alimentação do arame e varia para que o ponto de ajuste da tensão permaneça constante. No entanto, esse aumento de corrente não está diretamente relacionado a um aumento na penetração ou diluição. Em relação à estabilidade do processo em DCW-GMAW, a introdução de dois arames frios leva a uma transferência de metal mais estável, na qual a tensão média instantânea está próxima do ponto de ajuste, mesmo quando são introduzidas altas frações de arame frio, o que pode estar relacionado à estabilização das manchas catódicas, como já relatado por Xiang et al. [12]. Tanto as medidas da transferência metálica quanto do aumento da fração do arame frio são governadas pela força eletromagnética (força de Lorentz) proporcional ao quadrado da corrente Equação 4.1:

$$F_L = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 f(\theta) \quad (4.1)$$

Onde FL é a força de Lorentz, μ_0 é a permeabilidade magnética, I é a corrente e f (θ) é a Coeficiente de força de Lorentz. Mais detalhes sobre essa relação e a própria força de Lorentz podem ser encontrados em Amson JC [17] Os resultados sugerem que o aumento da corrente leva a uma diminuição das gotículas fundidas, uma vez que a força de Lorentz aumenta com a corrente. Por fim, isso pode acelerar a transição para pulverização no DCW-GMAW em correntes mais baixas em comparação ao processo GMAW Convencional, e isso será objeto de pesquisas futuras.

4.4.2 Mecanismo de Peclet (Pe) E da Convecção da Poça de Fusão

A introdução de alimentação do arame frio causa um alargamento na poça de fusão. Esse alargamento é refletido no balanço energético da poça de fusão que afeta seu número de Peclet (Pe). O número de Peclet representa a razão entre o transporte de energia de convecção e o transporte de energia de condução, de acordo com Weckman e Moulton [18]. O número pode ser escrito como a Equação 4.2

$$Pe = \frac{vL}{\alpha} \quad (4.2)$$

Onde v é a velocidade de soldagem, L e comprimento característico da poça de fusão e α é a difusividade térmica. Um aumento na largura aumentará o número medido, significando que o transporte de calor deslocado é mais importante que o condutor. Essa mudança na importância do modo de transferência de calor pode induzir mudanças na taxa de resfriamento da poça de fusão. No caso do aço carbono comum, que a densidade (ρ) é igual a $7.8 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$, o calor específico a pressão constante (cp) igual a $8 \times 10^2 \text{ J} / \text{kgK}$, e a condutividade térmica (k) igual a $46 \text{ J} / \text{smK}$. Pode-se escrever o número como em função da velocidade de deslocamento (v) e do comprimento característico (L), pois, $\alpha = \frac{k}{\rho cp}$ como pode ser visto na Equação 4.3

$$Pe = 1.36 \times 10^5 \times v \times L \quad (4.3)$$

Onde v está em unidades de m / s e L em unidades de m . Lancaster [19] apontou que Pe maior ou igual a 10 indica que a transferência convectiva domina o mecanismo de transferência de calor. A Figura 4.12 apresenta os números para todas as condições neste trabalho.

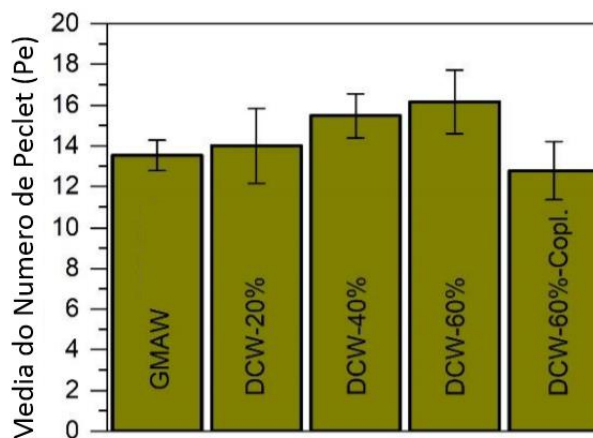


Figura 4.12 - Variação dos números ara todas as condições. Média de quatro seções transversais

Pode-se observar que a introdução de arame frio aumenta os valores nas condições DCW-GMAW em relação ao GMAW convencional, representando um aumento na convecção como modo dominante de transferência de calor. Isso pode ser atribuído à alimentação local de arame frio em uma zona da poça de fusão, possivelmente aumentando o gradiente térmico e, finalmente, aumentando as correntes de convecção. Além disso, parece que esse efeito é pronunciado apenas para avanços de arame frio acima de 40%, o que faz sentido, uma vez que em 20% o metal frio se funde apenas na borda da poça de fusão, possivelmente com influência reduzida na corrente convectiva.

Além disso, pode-se ver que, quando os arames frio são alimentados coplanarmente, o valor está dentro da variação do GMAW Convencional. Possivelmente quando os arames frio são injetados nos dois lados da poça de fusão, existe uma redução de temperatura em ambos os lados, causando uma mudança geral no gradiente de temperatura que pode alterar as correntes convectivas de maneira mais estável, promovendo a estabilização dos pontos de catodo errantes, que é responsável pela melhor estabilidade mostrada nos oscilogramas. O leitor deve consultar a Figura 4.2e, que indica coeficiente de variação no processo DCW-GMAW menor quando comparado ao GMAW convencional.

4.4.3 Modelo Físico Proposto - Convecção de Marangoni

Para entender o efeito da dupla alimentação de arame frio na convecção da poça de fusão, é conveniente escrever a intensidade das correntes convectivas como um

número adimensional, chamado de número Marangoni (Ma), que pode ser escrito de acordo com Mills et al. [20] Como:

$$Ma = \frac{dy}{dT} \frac{dT}{dx} \frac{L^2}{\eta\alpha} \quad (4.4)$$

Onde $\frac{dy}{dT}$ é a variação da tensão superficial da poça de fusão com a temperatura, $\frac{dT}{dx}$ é a variação da temperatura da poça de fusão na direção x , L é o comprimento característico, η é a viscosidade do metal fundido da poça de fusão e α é a difusividade térmica do metal fundido da poça de fusão.

Tomando a direção X como a direção paralela à direção da velocidade de soldagem e admitindo que nenhuma variação em γ ocorre, pois, nenhum elemento tenso ativo é introduzido na poça de fusão; a variação do número Ma dependerá principalmente da variação de temperatura.

Conforme relatado em trabalhos anteriores de Xiang et al. [12], a introdução de arame frio perpendicular a x A direção diminuiu as correntes convectivas, levando em consideração a diminuição do desvio do ponto do cátodo, o que causa uma melhoria na estabilidade do arco elétrico no processo. No caso do DCW-GMAW, quando os arames frio são introduzidos em planos diferentes, a área da poça de fusão na qual os arames são introduzidos provavelmente tem sua temperatura reduzida pela ação da massa fria que atua como um dissipador de calor. É provável que esta situação aumente o gradiente de temperatura, consequentemente aumentando o número de Ma e a intensidade das correntes convectivas dentro da poça de fusão. Até o limite, como a fração de arame frio aumenta, o gradiente de temperatura aumenta causando um aumento nas correntes convectivas, até que as correntes convectivas dentro da poça de fusão sejam altas o suficiente para perturbar a emissão dos pontos catódicos. No entanto, foi demonstrado neste trabalho que não apenas a quantidade de arame frio introduzida no conjunto de solda é importante, mas também a forma como os arames frios são introduzidos. De fato, quando 60% de alimentação de arame frio foi introduzida de forma coplanar, pode-se notar que a estabilidade aumentou, como pode ser visto na área do ciclo correspondente (Figura 4.3e). Provavelmente, a razão por trás disso se deve ao equilíbrio no gradiente de temperatura quando o arame frio é introduzido na frente e na parte traseira do arco, o

qual reduz o número Ma e as correntes convectivas, e contribui para a redução dos pontos catódicos que oscilam na superfície da poça de fusão.

4.4.4 Diluição, Penetração e Microestruturas

A relação entre diluição e penetração no processo GMAW Convencional é direta. Isso significa que maior penetração leva a uma maior diluição. Como a penetração pode ser modelada pelo calor e pelo efeito mecânico das gotículas [14]. Uma gota altamente acelerada ou mais quente aumentará a penetração. No entanto, no processo DCW-GMAW, o arco é preso aos arames frios que protegem a poça de fusão do momento de colisão das gotas. Considere que os arames frios também atuam como barreira térmica quando a gota colide com ele, absorvendo calor para que possa ser fundido e, ao mesmo tempo, reduzir a penetração. Isso explica por que, embora haja um aumento na corrente, a penetração e a diluição diminuam.

Conforme apontado, a introdução do arame frio leva a mudanças na forma da poça de fusão, o que não leva a alterações na taxa geral de resfriamento nas soldas do processo DCW-GMA, o que pode ser confirmado pelas microestruturas encontradas no centro dos cordões de solda. As microestruturas encontradas no cordão do processo GMAW convencional são ferrita primária mista (PF) e ferrita acicular (AF), consulte a Figura 4.10a. Com a introdução dos arames frios, a quantidade observada de ferrita acicular (Figura 4.10b, c,d, e) mudou em relação ao GMAW convencional. Essa microestrutura é altamente dependente da quantidade de inclusões a serem nucleadas heterogeneamente [21], no entanto, a introdução de dois arames frios não parece aumentar significativamente a quantidade de inclusões no metal fundido, esse fator associado à taxa de resfriamento pode explicar a quantidade constante de ferrita acicular observada.

4.4.5 Microdureza Vickers

Conforme indicado na Figura 4.11, as amostras do processo DCW-GMAW apresentam dureza maior que a amostra GMAW convencional, conforme observado na seção anterior, e está relacionada ao aumento da taxa de resfriamento em amostras do

processo DCW. À medida que o gradiente de temperatura no interior da poça de fusão aumenta, e a taxa de resfriamento aumenta conseqüentemente. A exceção observada é no processo DCW-GMAW-60% -Coplanar, esta amostra apresenta dureza semelhante à amostra GMAW convencional. A razão por trás desse fenômeno provavelmente se deve ao equilíbrio do gradiente térmico dentro da poça de fusão.

No caso da configuração DCW-GMAW-60% -Coplanar, os arames frio são introduzidos pela direita e pela esquerda do arco elétrico que provavelmente equilibra o gradiente térmico em comparação com DCW-GMAW-60% em (planos tangente), esse fato pode ser responsável pela maior dureza observada em DCW-GMAW-60% (planos tangente). Esse resultado parece consistente com o modelo físico qualitativo proposto na Seção 4.3.1, uma vez que o gradiente térmico no DCW-GMAW-60% -Coplanar provavelmente será menos acentuado do que no DCW-GMAW-60% na outra configuração e, portanto, a força das correntes de convecção na poça de fusão é menor no DCW-GMAW-Coplanar de 60% do que na configuração padrão do DCW-GMAW-60%. Isso explica a melhor estabilidade em DCW-GMAW-60% -Coplanar, como indicado na Figura 4.3e.

4.5 CONCLUSÃO

Os cordões de soldas depositados em barras foram realizados usando o processo GMAW convencional e o processo DCW-GMAW para estudar as características do processo, estabilidade e morfologia e microestruturas dos cordões de solda. A análise dos resultados induz as seguintes conclusões:

1. A viabilidade do processo DCW-GMAW é demonstrada pela morfologia do cordão de solda. Não ocorreram trincas, humps ou porosidade externa;
2. A introdução de dois arames frios parece estabilizar o arco com base na dispersão mais estreita de dados nos oscilogramas;
3. A introdução de arames frios aumenta as correntes convectivas na poça de fusão. A introdução de arames frios coplanares parece melhorar a estabilidade do arco, provavelmente devido à estabilização dos pontos catódicos que vagam pela redução das correntes de convecção de Marangoni.

4. A dureza no processo DCW-GMAW é maior quando comparado ao GMAW convencional o que está relacionada as maiores quantidades de ferrita acicular nas soldadas do processo DCW.

4.6 NOMENCLATURA

Ar	Argônio
CP	Corpo de prova
CV	Tensão constante
I	Corrente (A)
FA	Ferrita acicular
PF(G)	Ferrita de contorno de grão
T-GMAW	Tander Gas Metal Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
CW-GMAW	Gas Metal Arc Welding - Cold Wire
DCW-GMAW	Gas Metal Arc Welding - Double Cold Wire
MB	Metal de base
Ma	Marangoni
Pe	Peclet
Vs	Velocidade de soldagem (cm/min)
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZF	Zona fundida
M.O	Microscopia Ótica

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. McPherson NA (2010) Welding issues for ship structures. *J Mar Eng Technol* 9:31–41 . doi: 10.1080/20464177.2010.11020238.
- [2]. Larkin N, Pan ZX, van Duin S, et al (2011) Tandem Gas Metal Arc Welding for Low Distortion Butt Welds. *Adv Mater Res* 337:511–516 . doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.337.511.
- [3]. Turichin G, Kuznetsov M, Tsibulskiy I, Firsova A (2017) Hybrid Laser-Arc Welding of the High-Strength Shipbuilding Steels: Equipment and Technology. *Phys Procedia* 89:156–163. doi: 10.1016/j.phpro.2017.08.005.
- [4]. R.A. Ribeiro, E.B.F. Dos Santos, P.D.C. Assunção, R.R. Maciel, E.M. Braga, Predicting Weld Bead Geometry in the Novel CW-GMAW Process, *Weld. J.* 94 (2015) 301s–311s. https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2015_09_s301.pdf.
- [5]. P.D.C. Assunção, R.A. Ribeiro, E.B.F. Dos Santos, A.P. Gerlich, E.M. Braga, Feasibility of narrow gap welding using the cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process, *Weld. World.* 61 (2017) 659–666. doi:10.1007/s40194-017-0466-5.
- [6] Cabral TS, Braga EM, Mendonça EAM, et al. Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. *Weld Int.* 2015;29:928–936.
- [7] Marques LFN, Santos EBF, Gerlich AP, et al. Fatigue life assessment of weld joints manufactured by GMAW and CW-GMAW processes. *Sci Technol Weld Joining.* 2017;22:87–96.
- [8] Braga, E. M. and Assunção PDC (2013) Welding process gas metal arc welding - double cold wire (GMAW-DCW). 4 147.
- [9] AWS (2005) Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding. *American Welding Society* (AWS), Miami.

- [10] AISI 1020 Steel hot rolled (2018).
- [11] CRUZ, JR. ; CABRAL, T. S. Specification of Welding Procedures MIG for the Fill of Cavities by the Technique of Successive Layers. 2008.
- [12] Xiang T, Li H, Wei HL, Gao Y (2016) Effects of filling status of cold wire on the welding process stability in twin-arc integrated cold wire hybrid welding. *Int J Adv Manuf Technol* 83(9–12):1583–1593.
- [13] Jorge VL, Gohrs R, Scotti A (2017) Active power measurement in arc welding and its role in heat transfer to the plate. *Weld World* 61:847–856 . doi: 10.1007/s40194-017-0470-9.
- [14] Ribeiro RA, dos Santos EBF, Assunção PDC, Braga EM, Gerlich AP (2018) Cold wire gas metal arc welding: droplet transfer and geometry. *Weld J Res Suppl*:21.
- [15] Abson DJ (2018) Acicular ferrite and bainite in C–Mn and low-alloy steel arc weld metals. *Sci Technol Weld Join* 23:635–648 . doi: 10.1080/13621718.2018.1461992.
- [16] Byun JS, Shim JH, Suh JY, et al (2001) Inoculated acicular ferrite microstructure and mechanical properties. *Mater Sci Eng A* 319–321:326–331 . doi: 10.1016/S0921-5093(00)02014-1.
- [17] Amson JC (1965) Lorentz force in the molten tip of an arc electrode. *Br J Appl Phys* 16:1169–1179 . doi: 10.1088/0508-3443/16/8/316.
- [18] Weckman, D.C. and Moulton JA (2017) Improved Formability of Fusion Welded AA5182- O Aluminum Tailor Welded Blanks. *Welding J* 96:319s-333s.
- [19] Lancaster JF (1986) *The Physics of Welding*, 2nd ed. Pergamon Press, Oxford, UK.
- [20] Mills KC, Keene BJ, Brooks RF, Shirali A (1998) Marangoni effects in welding. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci* 356:911–925 . doi: 10.1098/rsta.1998.0196.
- [21] Assunção, P. D. C. 2013. Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem GMAW-DCW (duplo arame frio). *Dissertação de mestrado. Belém, Pará, Brasil. Universidade Federal do Pará.*

PARTE II – AVALIAÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL

CAPÍTULO 5

ARTIGO IV- CONSTRUÇÃO E TESTE DO PROGRAMA PARA FAZER MEDIÇÕES DE TENSÃO RESIDUAL POR ONDA ULTRASSÓNICA

ARTIGO IV- CONSTRUÇÃO E TESTE DO PROGRAMA PARA FAZER MEDIÇÕES DE TENSÃO RESIDUAL POR ONDA ULTRASSÔNICA

Resumo

Para melhorar os resultados das medidas do tempo da onda ultrassônica e ter um melhor desempenho em medir tensões residuais em estruturas metálicas, é necessário fazer um tratamento no sinal gerado por um transdutor piezoelétrico capturado por um osciloscópio. Para tratar esse sinal foi construído um software em LabVIEW que tratou os sinais com funções de interpolação e correlação cruzada. O software foi testado fazendo várias medidas em barras de aço carbono AISI 1020 tratada termicamente por revenimento para eliminar qualquer resíduo de tensão residual existente nas peças. Os resultados mostram que o programa fez medidas com bastante exatidão após o tratamento de sinal da onda ultrassônica e algumas medidas que estão fora do padrão necessitam de investigação, pois podem estar relacionados a outros fatores não previsto nessa investigação.

Palavras-chave: Interpolação, correlação cruzada, software, onda ultrassônica.

5.1 INTRODUÇÃO

Para realizar medições de tensão residual usando ondas ultrassônicas, é necessário um gerador de pulsos, filtro de amplitude, transdutor e osciloscópio para medir o tempo de onda, neste sistema surgiram problemas que tiveram que ser resolvidos durante os estudos. Como as variações de tempo que ocorrem no curso da onda ultrassônica, devido às tensões serem extremamente baixas, geralmente na ordem de nanossegundos, é necessário trabalhar com a base de tempo do osciloscópio em uma magnitude que permita a leitura do tempo dentro dessa resolução. Ao ajustar dessa maneira e dependendo da espessura do corpo de prova, muitas vezes não é possível mostrar sinais de interesse na tela do osciloscópio (apenas o pulso de excitação aparece). Um gerador de atraso foi usado para permitir localizar na tela do osciloscópio qualquer ponto do sinal ultrassônico independente da espessura da amostra ou da configuração da base de tempo. Além disso, permite eliminar o pulso de excitação e deixar na tela do osciloscópio apenas o eco ultrassônico BITTENCOURT, et al [1].

A primeira tentativa de medir o tempo decorrido usando o sistema descrito acima foi feita diretamente usando como referência, entre dois ecos consecutivos, o ponto máximo de cada eco. Embora essa técnica, com esse sistema, tenha sido utilizada em algumas outras aplicações para caracterização de materiais, como na estimativa da porosidade dos materiais cerâmicos SANTOS, J., G., et al [2], a verificação da velocidade do fluxo de fluido PIO, RR, et al [3] e determinação da direção de laminação de chapa.

BITTENCOURT, et al [1], verificou que os resultados de tensão residual não foram satisfatórias, porque as medidas necessárias não foram alcançadas por dois fatores; o primeiro pela quantidade de medidas que precisam ser feitos em um único ponto, a segunda limitação são os erros que existem no sinal e necessitam ser corrigidos por cálculos complexo ou em sistema de computação. Assim sendo um microcomputador foi conectado ao sistema eletrônico montado para receber o sinal ultrassônico do osciloscópio e permitir seu processamento. Dessa maneira, as medições de tempo podem ser realizadas com grande precisão, diferentemente do que ocorre quando são feitas visualmente diretamente a partir da tela do osciloscópio.

Durante o processamento do sinal ultrassônico, os sinais adquiridos não representam todos os níveis de amplitude do sinal real, por causa da limitação das

capacidades de armazenamento limitado de energia do sinal, ou a influencia a quantidade total de níveis que podem ser armazenados. Isso significa que, se o sinal real for como o mostrado no gráfico da Figura 5.1a, um sinal representado no painel de osciloscópio de sete níveis seria idêntico ao mostrado no gráfico da Figura 5.1b. Marquese [4].

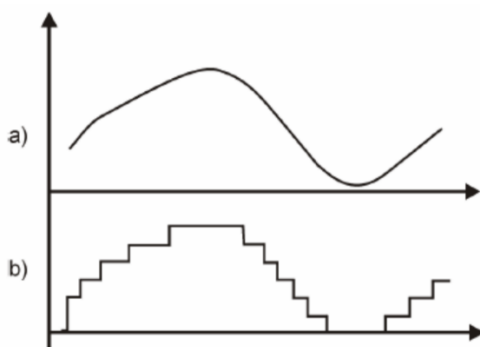


Figura 5.1 - a) Exemplo de sinal real. b) Sinal discreto para sete níveis. Fonte: Marquese [4]

A tensão residual surge em componentes de várias fontes e, se não for tratado, pode levar à distorção do componente, à concentração do estresse e à falha. Uma forma mais comum de tensão residual é um resfriamento não uniforme a partir de temperaturas elevadas. No resfriamento, a superfície esfria rapidamente e se contrai, enquanto o núcleo interno permanece mais quente por mais tempo e esfria mais lentamente, configurando tensões residuais. Existem muitos métodos para diminuir o estresse residual, entre os quais os processos de tratamento térmico, alguns dos quais são aplicados apenas em aços e outros que são aplicados apenas em outras ligas. Os processos de tratamento térmico utilizados para aliviar a tensão residual é o recozimento L.Knauss [5]. Recozimento nos aços, geralmente significam um tratamento térmico com o resfriamento do forno na faixa da temperatura de austenitização. Figura. 5.2.

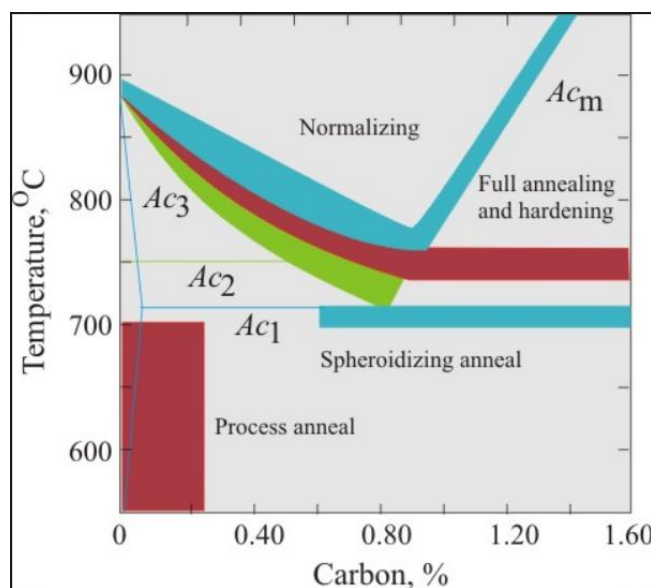


Figura 5.2 - Faixas de tratamento térmico de aço. Fonte: F.C. Campbell [6].

O recozimento é usado para reduzir a dureza, obter uma microestrutura relativamente quase estável, refinar o tamanho dos grãos, melhorar a usinabilidade e facilitar o trabalho a frio. Para aços hipoeutectoides (aços com teor de carbono inferior a 0,80%), o recozimento total consiste em aquecimento de 90 a 180 ° C (50 a 100 ° F) acima da temperatura A3 e para aços hipereutectoides (aços com teor de carbono de 0,80%), aquecimento acima da temperatura A1, seguido por um arrefecimento muito lento do FC Campbell [6].

5.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

5.2.1 Tratamento do Sinal do Tempo da Onda Ultrassônica

A onda de cisalhamento ultrassônico ao se propagar em uma birrefringência em material anisotrópico, é dividida em duas ondas de polarizações ortogonais e fora do tempo, o que causa uma deformação nos ecos. A Figura 5.3 representa essa distorção neste tipo de onda. À medida que o tempo de viagem aumenta, também aumenta o atraso entre as duas ondas e a deformação do local de mudança do eco. Isso significa que dois ecos consecutivos distorcem regiões diferentes, ou seja, em diferentes regiões dos ecos. Esse comportamento também pode ser outra fonte de erro de medição de tempo ao usar

dois pontos como referência. Por outro lado, a correlação cruzada elimina problemas dessa natureza, uma vez que compara ponto a ponto todo o sinal.

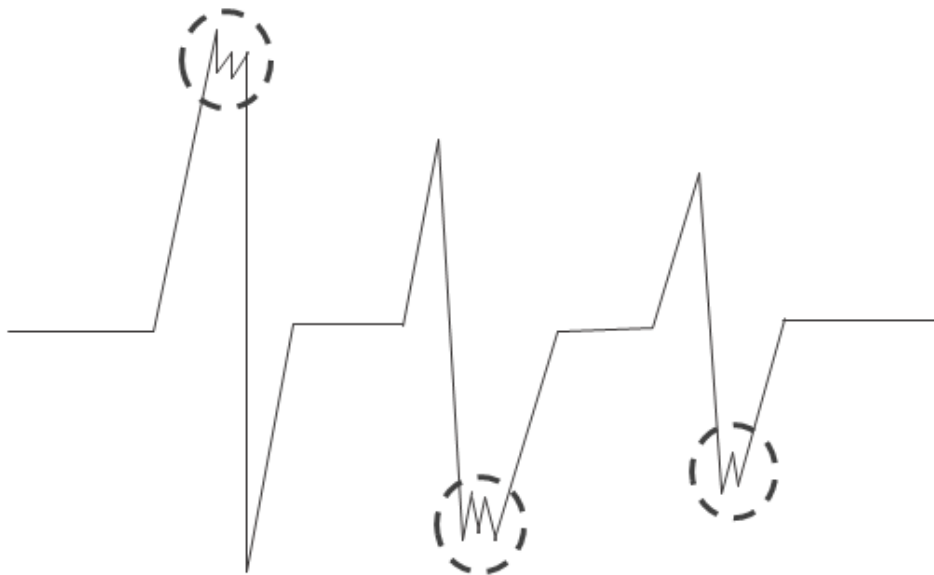


Figura 5.3 - Esquema mostrando a deformação (degrau) utilizada nas ondas por birrefringência, e a mudança de lugar dessa deformação nos ecos subsequentes.

Como o nome indica, a função de correlação cruzada é uma medida da existência de alguma correlação entre duas funções. O conceito é usado especialmente para funções periódicas ou para certos tipos de funções aleatórias. Duas funções diferentes e não relacionadas terão a correlação zero para todos os tempos, enquanto duas funções associadas às quantidades físicas entre as quais existe uma conexão, muitas vezes haverá uma correlação cruzada finita para alguns ou todos os valores de tempo. No uso comum do sinal ultrassônico, a soma das duas funções muda uma função sobre a outra, comparando as duas, no caso dois sinais ultrassônicos, conseqüentemente gera uma função, também no domínio do tempo, cujo máximo indica o atraso do tempo entre essas funções ou sinais ultrassônicos Bittencourt [7].

A correlação entre duas funções contínuas $A(t)$ e $B(t)$, denominadas $C_{AB}(\tau)$, é definida pelo relacionamento (Champeney, 1973, Lu, [8], Bittencourt, [7]):

$$C_{AB}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(t)B(t - \tau)dt \quad (5.1)$$

$$C_{AB(\tau)} = p \cdot C_{AA}(\tau_c + \tau) = P \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} A(t) \cdot A(t - \tau_c - \tau) dt \quad (5.2)$$

Onde p é uma constante e τ_c é o tempo de atraso.

A descrição acima é a forma geral, considerando funções contínuas. No caso de discretizados com um intervalo de tempo fixo Δt , que são os casos práticos comuns, é feita

$A_i = A(t_i)$ e $B_i = B(t_i)$, onde $t_i = i\Delta t$. Dentro da faixa de interesse, $t_r \leq t_i \leq t_r$, a integração no formulário é realizada conforme mostrado abaixo:

$$C_i = \sum_{j=-r}^r A_j \cdot B_{j-1} \quad (5.3)$$

Onde $C_i = C(\tau_i)$. Então o tempo de atraso seria dado por $\tau = \alpha \Delta t$, onde $C_a \geq C_i$, para todos os i .

Após o entendimento matemático do tratamento de sinais, essa teoria foi colocada em prática para escrever os blocos do programa em LabVIEW, afim de fazer da melhor forma possível a medida de tempo do sinal da onda ultrassônica. A Figura 5.4 mostra circulado em vermelho as funções filtro e correção de pico, que são responsáveis pela correção do sinal.

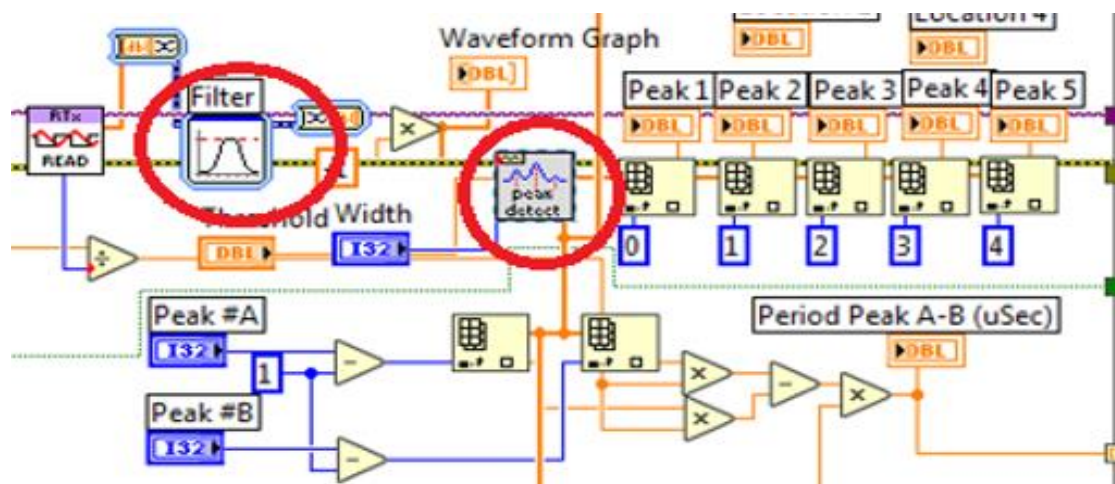


Figura 5.4 - funções do programa LabVIEW

5.2.2 Configuração Experimental e Materiais

As medidas de birrefringência acústica foram realizadas na posição indicada na Figura 5.5. A configuração experimental para a medição de tensões residuais pelo método de birrefringência acústica foi composta por: (A) um gerador de pulso ultrassônico (Modelo MFD 350B, do Flaw Detector), (B) um transdutor de onda de cisalhamento ultrassônico de incidência normal, com frequência de 5MHz e diâmetro de 12,7mm (1/2 pol), (C) um osciloscópio Rohde & schwarz (Modelo RBT 2002, de largura de banda de 500 MHz e 2,5 GS), (D) um divisor de sinal (divisor T) foi usado para enviar um sinal de tensão de apenas 8 V ao osciloscópio, esse sinal é fornecido com 300 V do gerador de pulso ultrassônico. O último equipamento foi (E) um desktop com software e como acoplante foi utilizado Shear gel.

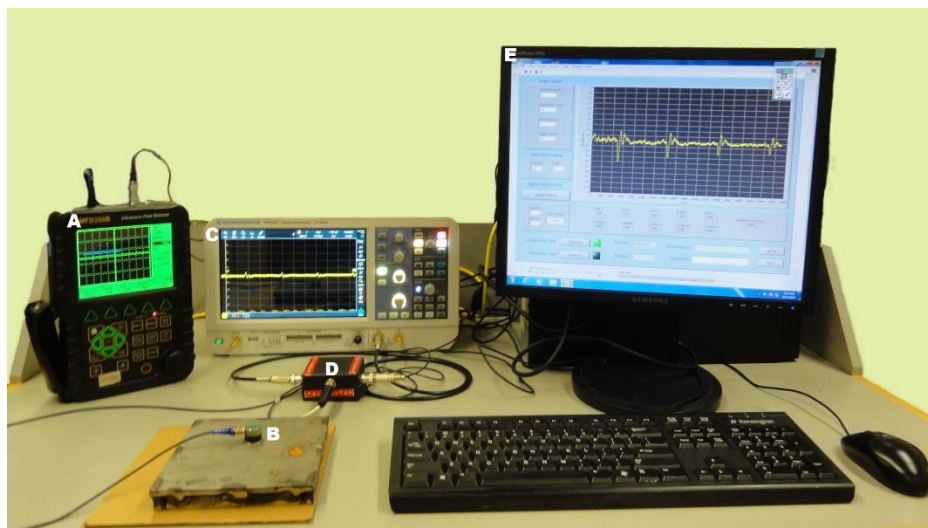


Figura 5.5 - Configuração para medição de tensões residuais

Para realizar medições de tensões residuais usando a teoria acústicoelástica, especificamente a birrefringência acústica, temos que obter os tempos das ondas de cisalhamento nas direções longitudinal e transversal, observados entre dois picos adquiridos pelo osciloscópio. Para atender esta necessidade foi desenvolvido um software que captura o sinal do osciloscópio com 5000 amostras. Este software possui funções como: verificação de sinal, captura de tempo longitudinal e captura de tempo transversal. Para iniciar o procedimento de medição de birrefringência o transdutor foi acoplado na posição longitudinal, então foi pressionado o botão “*Signal Check*” para executar a função verificação de sinal que iniciou a medição dos tempos, após este sinal ser verificado, foi pressionado o botão “*Longitudinal Time*” que executa a função captura de tempo

longitudinal para obter o tempo da onda ultrassônica transferida no sentido de laminação da peça; após essa etapa, o transdutor foi acoplado na direção transversal e, em seguida, o botão “*Transversal Time*” foi pressionado para executar a função captura de tempo transversal obtendo-se assim o tempo da onda ultrassônica transferida no sentido perpendicular de laminação da peça. Desta forma, o programa pôde calcular a birrefringência automaticamente.

Para este trabalho é utilizado osciloscópio de 500 MHz, o que resulta em um sinal com 4096 níveis de representação. Além do nível, a frequência de amostragem é outra limitação do sinal discretizado. É necessário reconstruir o sinal para reduzir a incerteza das medições dos tempos de deslocamento das ondas ultrassônicas. Para esse fim, foi utilizado um método de aumentar a amostragem ou inserção de amostras artificiais entre as existentes, conhecido como interpolação. A programação foi feita na plataforma LabVIEW para que a interpolação seja feita a partir de uma frequência de amostragem escolhida. A Figura 5.6 mostra esquematicamente o sinal original e um sinal discretizado usando interpolação.

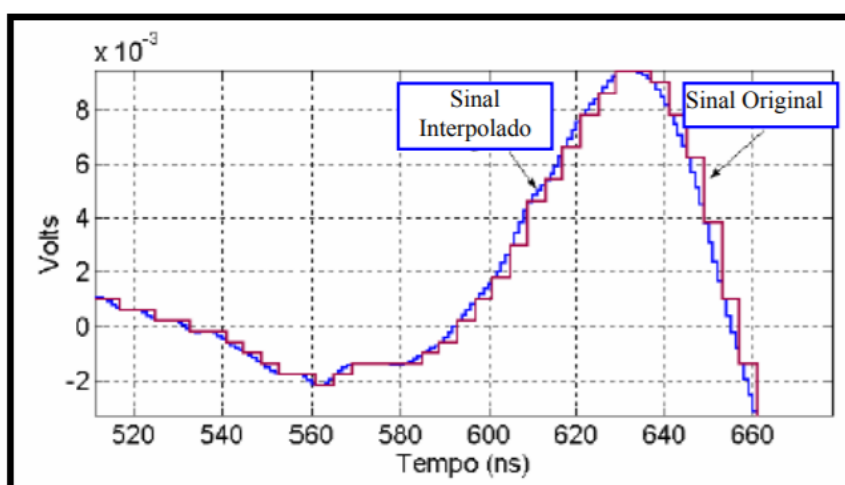


Figura 5.6 - Sinal original e interpolado mostrando a melhoria na frequência de amostragem: Andrino [9].

Então foi implementado neste software a interpolação do sinal, que reconstrói o sinal para diminuir a incerteza das medições dos tempos de deslocamento das ondas ultrassônicas, como visto em A.A SANTOS [10]. A programação da interpolação foi realizada na plataforma LabVIEW, para que o sinal permaneça semelhante à Figura 5.6.

A aplicação da correlação cruzada foi implementada no software, seguindo o que já havia sido feito por Bittencourt [7] e A.A SANTOS [10]. O sinal original obtido foi

interpolado para uma frequência de 400 MHz, com a possibilidade de ajustar este sinal pressionando botão "*Wich*" com o objetivo de melhorar significativamente a resolução dos tempos para a comparação a ser feita.

Para avaliar o software, foram cortadas três amostras da AISI 1020, Figura 5.7, com 200 mm de comprimento, 50 mm de largura e 9,8mm de espessura. E o mesmo material foi usado para fabricar a amostra para teste de tração, mostrado na figura 5.7.

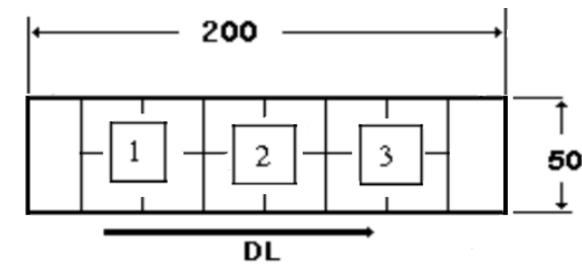


Figura 5.7 - Amostras do AISI 1020.

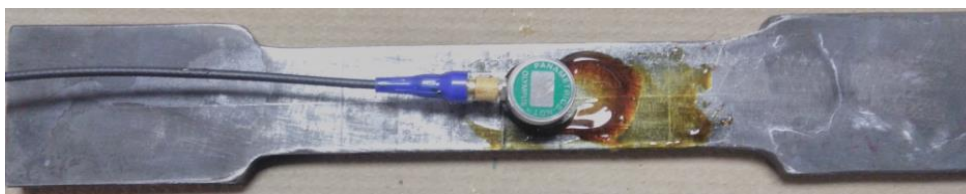
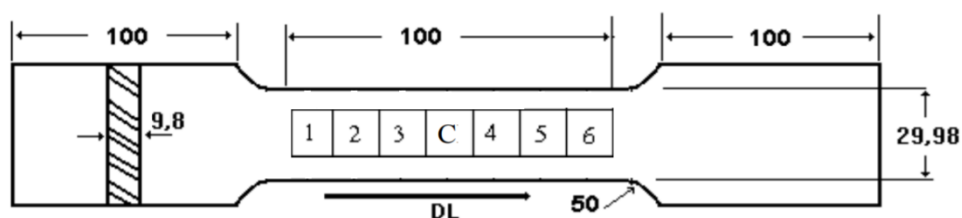


Figura 5.8 - Corpo de prova para medir birrefringência em função do aumento de tensão

A geometria amostral da figura 5.8 foi utilizada para verificar a birrefringência e sua possível variação ao longo do tempo submetido ao stress. Em cada amostra de 200 mm x 50 mm, figura 5.6, foram medidos três pontos, nesta geometria amostral utilizada no teste de tração, em especial, foram medidos sete pontos antes do teste de tração. Para

encontrar a constante acústico-elástica o corpo de prova da figura 5.7 foi tracionado em 15 níveis de tensão e a birrefringência foi medida em cada nível do ponto “C” do corpo de prova.

Para verificar a eficiência do software, as amostras devem ter o mínimo de tensão residual possível, porque se houver variação no valor de birrefringência, não saberemos se a variação é da amostra ou do software. Portanto, as amostras foram submetidas ao tratamento térmico de revenimento, que consiste em aquecer o aço por um curto período de tempo a uma temperatura logo abaixo da temperatura eutetóide da faixa A1 do diagrama ferro-carbono e resfriado lentamente em uma estufa térmica. Isso proporciona alívio da tensão, facilita a conformação do aço e é aplicado em aços laminados a frio com baixo teor de carbono para restaurar a ductilidade. As temperaturas utilizadas variam de 550 a 650°C (1020 a 1200°F). O resfriamento lento não é essencial para o revenimento, porque qualquer taxa de resfriamento a temperaturas abaixo de A1 não afetará a microestrutura ou a dureza. Este tratamento térmico é mais utilizado no aço carbono AISI 1020.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5.9 mostra a tela do software com todas as funções discutida no item 5.1, os dois picos do sinal da onda ultrassônica são os que foram usados para fazer as medidas de birrefringência. Foi observado nesse processo de medição que se faz necessário cultivar o maior eco possível na tela do aparelho para que se possa ter certeza de um maior nível de energia transmitida e recebida, essa operação tem que ser feita com muito cuidado, pois se pressionar muito o transdutor contra a peça o acoplante pode “escapar” da interface do transdutor/peça perdendo assim acoplamento e impossibilitando uma medida correta. Esse fato nos faz repensar a respeito da operacionalidade do ensaio, se é necessário criar blocos padrões e normas seguindo o princípio do ensaio de ultrassom para detecção de falha.

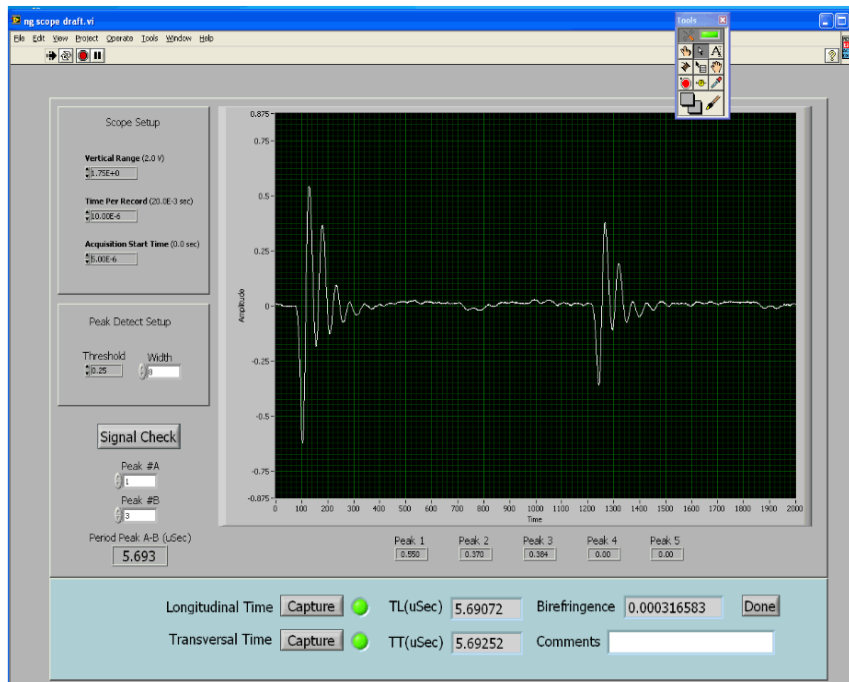


Figura 5.9 - Tela do programa Tensão residual do CAMJ 2017.

Após adicionar o bloco da função filtro no software, o mesmo começou a fazer a função de interpolar os sinais, para melhorar sua resolução, desta forma novos pontos entre o sinal original foram criados, fazendo com que a onda se aproximasse ao máximo de sua forma sinusoidal original. Este software carrega automaticamente o sinal original e reconhece sua taxa de amostragem e, através de uma taxa de amostragem arbitrariamente escolhida, cria automaticamente novos pontos para o sinal, a Figura 5.10A mostra o sinal sem o tratamento de interpolação e na figura 5.10B o sinal interpolado pelo sistema do programa.

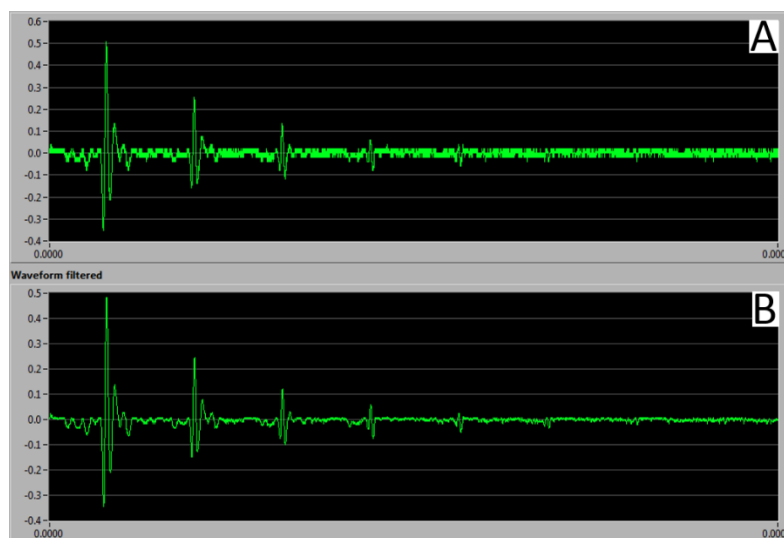


Figura 5.10 - Sinal antes (a) e depois (b) da interpolação.

Após o sinal ser interpolado com sucesso foi também adicionado ao software a função que corrige o sinal para que ele possa ter uma uniformidade em seu pico, essa correção é a correlação cruzada. Uma vantagem desse software é que além de fazer a correlação cruzada automaticamente é possível também fazer uma correção manualmente acionando o botão (Width), isso se for necessário. A figura 5.11A mostra o pico aumentado do sinal antes da função da correlação cruzada ser implementada, e a Figura 5.11B mostra o mesmo sinal após adicionado ao software a função da correlação cruzada.

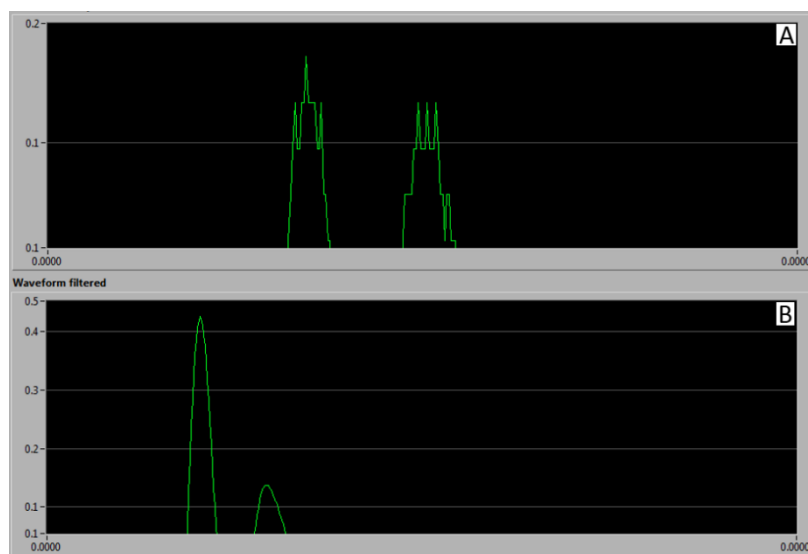


Figura 5.11 - Sinal antes e depois da correlação cruzada.

Com a introdução da interpolação e da correlação cruzada o software foi considerado finalizado e operante. O próximo passo foi o teste para fazer medidas de birrefringência. O gráfico representado pela Figura 5.12 exibe a birrefringência gráfica em cada amostra, na amostra 01 houve uma variação entre os pontos de 35%, esse valor apesar de grande, está dentro de valores publicados em artigos e pode estar relacionado ao acoplamento do transdutor que teve dificuldade em manter o maior sinal adquirido na tela do osciloscópio, ou com a textura do material. No entanto, a amostra 02 teve 14,3%. A variação entre os pontos e a amostra 03 possui 7,14% da variação. Os dados típicos de toda a birrefringência da amostra estão listados na Tabela 5.1. Esse resultado mostra que o programa está realizando medidas com precisão e que o tratamento térmico do recozimento do processo teve um grande sucesso para aliviar o stress nesses materiais.

Tabela 5.1 - Medidas de birrefringência.

CP1	P1	0,000182217
	P2	0,000304322
	P3	0,000261669
CP2	P1	0,00021856
	P2	0,000240604
	P3	0,000182995
CP3	P1	0,000268331
	P2	0,000260754
	P3	0,00028517
CP	P1	0,000204788
	P2	0,000264597
	P3	0,000214251
	Pc	0,000188429
	P4	0,000180187
	P5	0,000266523
	P6	0,000316583

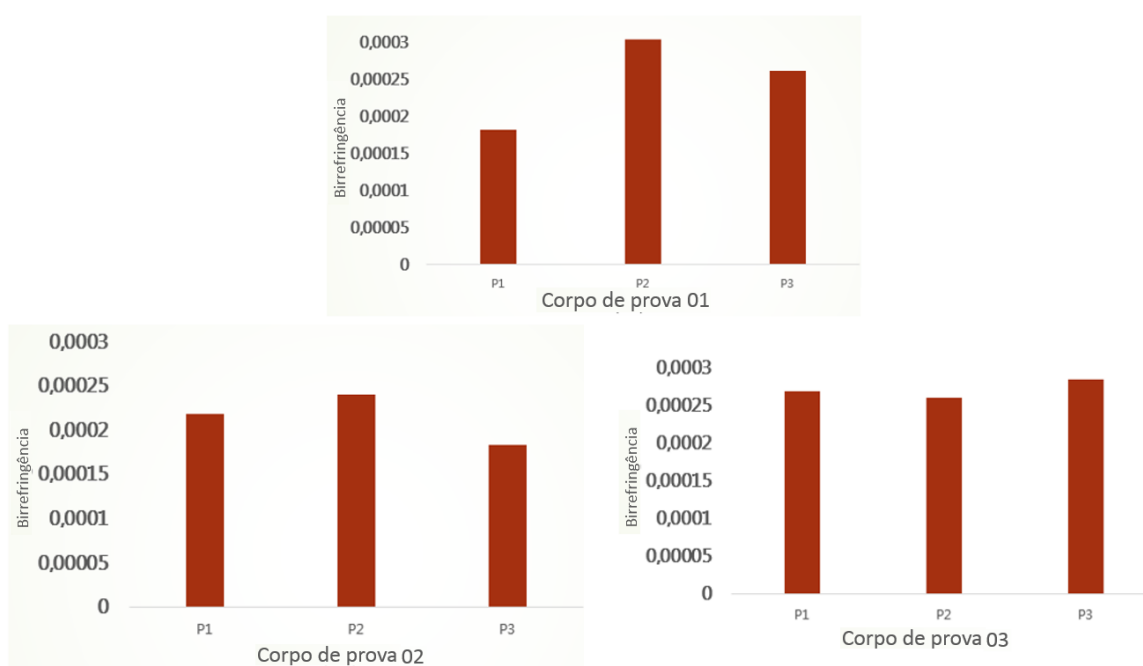


Figura 5.12 - Gráficos com os valores de birrefringência das amostras 01, 02 e 03.

As medidas da amostra para teste de tração realizadas sem stress também estão entre os valores de trabalhos publicados, os valores com variação de 35% entre os pontos estão representados graficamente na Figura 5.13.

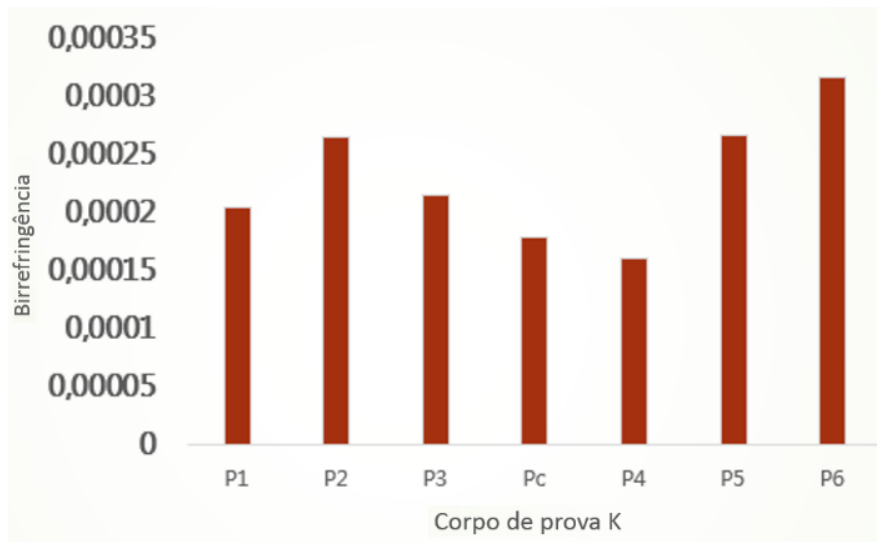


Figura 5.13 - Gráficos com os valores de birrefringência da amostra para teste de tração.

Quando a birrefringência foi verificada com a amostra sob stress, o resultado não foi muito bom, pois dentre os 19 pontos verificados, 8 estavam com muitos valores variando, Figura 5.14, esse fato mostra que pode haver algum problema no processo ou procedimento de medição. Esse erro poderá estar no acoplamento, ou técnica do acoplamento, outra possibilidade pode estar no bom funcionamento da máquina de teste de tração.

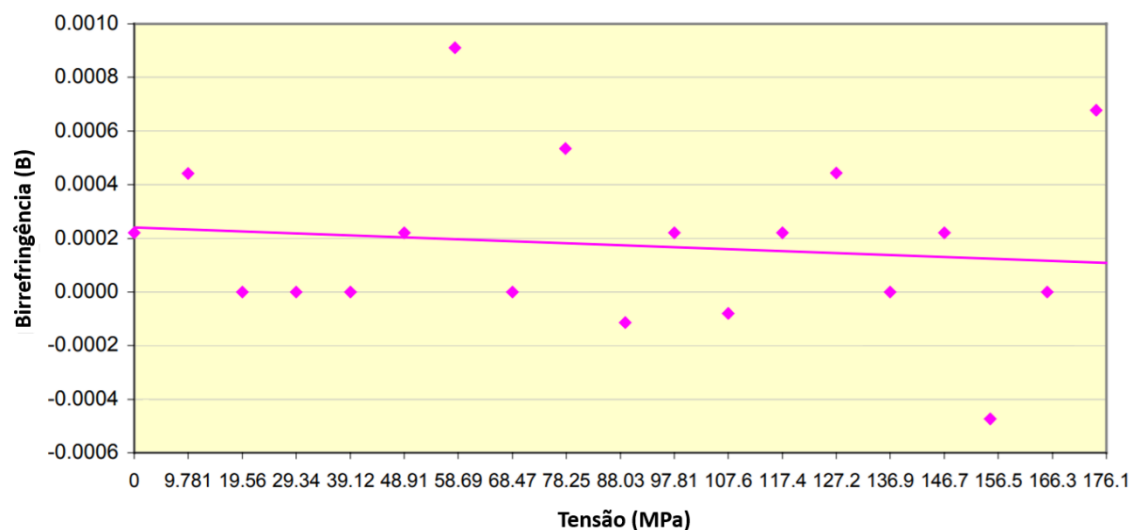


Figura 5.14 - Gráfico da constante acústico-elástica

5.4 CONCLUSÃO

1. Neste trabalho observou-se que, assim como na técnica de ultrassom para detecção de falha, na birrefringência acústica a habilidade do operador também é fundamental, por exemplo, quando o operador fizer as medições o mesmo deve ter o cuidado de obter um sinal de alta intensidade, porque isso garante uma medição mais precisa dos tempos longitudinal e transversal. Outro fator importante é ter a sensibilidade de impor a mesma força no transdutor para que haja boa transmissão da onda ultrassônica através do meio sem atenuação do sinal.

2. O tratamento do sinal feito seguindo a literatura melhorou bastante os aspectos do sinal e, conseqüentemente, a precisão de sua medição. Foi observado no resultado que a interpolação alterou o sinal deixando-o limpo e com baixo ruído. A correlação cruzada também melhorou o sinal, deixando um único pico, dando alta resolução ao sinal.

3. O calor térmico do processo de revenimento foi muito eficiente para aliviar o estresse na amostra, esse processo ajudou as medições a se aproximarem, permitindo a verificação da precisão do software.

4. As medidas realizadas com o programa de tensão residual CAMJ foram precisas, ou seja, apresentaram menor variação e aproximaram-se dos valores encontrados na literatura. Além disso, as maiores variações nas medidas feitas podem ser atribuídas a outros fatores, como o tipo de acoplamento ou falha na fixação do corpo de prova na garra da máquina de tração.

5.5 NOMENCLATURA

BA0	Birrefringência acústica do material como recebido
BA	Birrefringência acústica
CP	Corpo de prova
I	Corrente (A)
K	Constante acustoelástica

GMAW	Gas Metal Arc Welding
MB	Metal de base
T0	Tempo inicial
T	Tempo final
Tl	Tempo longitudinal
Tt	Tempo Transversal
σ	Tensão (MPa)
σ_r	Tensões residual

5.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BITTENCOURT, MSQ, LAMY, CA, PAYAN, JC, "Determinação da Direção de Laminação de Ligas de Alumínio por Ultrassom", *Anais do Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, pp 41-47, 29 de setembro a 1 de outubro de 1997.

[2] SANTOS, J., G., OLIVEIRA, EEM, BITTENCOURT, MSQ, LAMY, CA, "Preliminary Study of Alumina Characterization through Ultrasonic Waves", *In: Annals 148 of the 42nd Brazilian Congress of the Brazilian Ceramic Association, Poços de Caldas*, June 1998.

[3] PIO, RR, FACCINI, JLH, LAMY, C. A, BITTENCOURT, MS Q, "System for Measuring Flow Rates through UltraSonic Waves", *In: Proceedings of Joint Nuclear Conferences, XI ENFIRKV ENAN, Wells of Caldas*, August 1997.

[4] Marquese, Cleide M. Análise ultra-sônica da textura dos materiais e tensões residuais em juntas soldadas. *Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, 113 p. Dissertação (Mestrado).*

- [5] L.Knauss- book ISBN 0-8717-823 SAN 204-7586 ASM *International Materials Park*, OH 44073-0002. 2005.
- [6] F.C. Campbell, Ed., Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, *ASM International*, 2008.
- [7] Bittencourt, M. S. Q. Development of a Time Measurement System Ultrasonic Wave and Analysis of the State of Voltage in Metallic Materials by Acoustic birefringence. *Thesis of D.Sc., COPPE / UFRJ*, Rio de Janeiro / 2000.
- [8]] CHAMPENEY, D.C., "Convolution and Correlation", In: Conn, G. K. T., Coleman, K. R., Fourier Transforms And their Physical Applications, chapter 5, London, Academic Press Inc., 1973.
- [9] ANDRINO, Marcilio Haddad et al. Aplicação de ondas longitudinais criticamente refratadas para a medição de tensões em dutos. 2007.
- [10] A.A SANTOS Evaluation of Stresses Generated by welding in API 5L X65 Steel Using Acoustoelasticity- Materials , 2008 - *American Society for Nondestructive*.

CAPÍTULO 6**ARTIGO V- EFICIÊNCIA DO TIPO DE ACOPLANTE E DA
DECOMPOSIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS DE ALUMÍNIO
5052, VERIFICADO POR MÉTODO ULTRASSÓNICO**

EFICIÊNCIA DO TIPO DE ACOPLANTE E DA DECOMPOSIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS DE ALUMÍNIO 5052, VERIFICADO POR MÉTODO ULTRASSÔNICO

Resumo

Regularmente as medidas de tensão residual obtidas pelo método não destrutivo ultrassônico conhecido como técnica de birrefringência acústica, é a diferença entre os valores longitudinal e transversal ao sentido de laminação, o que não proporciona uma verdadeira noção do real distribuição das TR. Diversos tipos de acoplantes tem sido usado para a determinação do nível de TR, mas até agora não existe um estudo comparativo de cada um deles nas mesmas condições. Nesse capítulo será investigado a eficiência do Shear Geal, mel e Canada Balsam em chapas de alumínio 5052. Adicionalmente, valores de tensão residual em junta soldada em alumínio 5052, foram calculados pela diferença das tensões e as tensões decompostas. O Canada Balsam mostrou melhores resultados e uma maior economia para o cálculo de TR usando o método ultrassônico. Apesar da necessidade de um pouco mais de trabalho experimental o cálculo da tensão residual decomposta propicia uma visão mais precisa com maior confiabilidade quando comparado ao cálculo realizado pelas diferenças de tensão.

Palavras-chave: Acoplantes, ultrassônico, birrefringência acústica, tensão residual, junta soldada em alumínio 5052, diferença das tensões, tensões decompostas.

6.1 INTRODUÇÃO

Estruturas soldadas têm elevado nível de tensões residuais (TR) comprometendo seu desempenho mecânico, fatores de segurança devem ser usados para minimizar suas possíveis falhas catastróficas. Conseqüentemente, seu custo de fabricação deve ser reduzido para aumentar a produtividade [1]–[3][4]. Existem vários métodos para mensurar essas tensões, como ensaios destrutivos da técnica do furo cego [5], e não destrutivos como DRX [6], difração de nêutrons[7] e birrefringência acústica (BA) [8]. Os dois primeiros são poucos práticos, custosos e até, no segundo caso, limitado ao laboratório. Por outro lado, a BA aplica a bi repartição de uma onda cisalhante polarizada sendo proposta como acústico-elasticidade por vários pesquisadores, destacando Raelson [9]. Este fenômeno mostrou-se portátil, econômico e com poucos custos para a determinação das tensões residuais em diversos materiais.

Porém ainda existem algumas limitações, como a necessidade de determinar constante a acústico elástica e a Birrefringência Inicial (B0) para cada material, para determinar as tensões residuais geradas. Este método tem elevado potencial para monitorar *in situ* o estado das tensões residuais em componentes submetidos a fadiga. Nesta técnica é necessário usar acoplantes para excluir a camada de ar existente entre as superfícies do transdutor e do material em ensaio [10]. Os mais usuais são a água, óleos, glicerina, graxas e outros produtos líquidos ou pastosos [11]. Para Martin et al. [10] um bom acoplante tem uma boa inércia química, boa molhabilidade, viscosidade adequada, facilidade de remoção, compatibilidade de impedância acústica com o transdutor e a peça, baixa atenuação e baixo custo. Diversos acoplantes foram usados em pesquisas, mas até agora não existe uma comparação entre as eficiências dos diversos tipos encontrados no mercado. Este trabalho propõe uma comparação entre três diferentes tipos de acoplantes encontrados no mercado onde somente um deles é comercial.

No caso da inspeção realizada pela técnica da birrefringência, há a necessidade do uso de um acoplante com propriedades mais específicas, sendo ele mais viscoso, o que possibilita a transmissão da onda ultrassônica do transdutor para a peça, por se tratar de ondas cisalhantes Bittencourt, [12], ou seja, acoplantes menos viscosos não suportariam a tensão de cisalhamento da onda. Levando em consideração essa característica, este trabalho se fundamentou a partir de experimentos com 3 tipos de acoplantes: Canadá

Balsam, Mel (Honey) e Shear Gel que foram usados nos trabalhos de Okada [13], Bittencourt [12] e Costa, [14] respectivamente, mas ainda não foi discutido sobre a eficiência de cada um.

Para realizar a medição da tensão residual com onda ultrassônica, é necessária a técnica de birrefringência acústica baseada no fenômeno acústico-elástico. Esta técnica utiliza um transmissor e receptor de ondas de cisalhamento transmitidos por um transdutor de efeito piezoelétrico. Sendo capaz de medir a tensão através da espessura da amostra, isso é possível devido à polarização da onda de cisalhamento, de modo que o movimento das partículas seja perpendicular à direção de propagação da onda. A técnica também assume a hipótese bidimensional estado de tensão [15,16].

O método que usa onda ultrassônica para medir tensão residual é baseado no efeito tensão-acústica que tem relação direta com efeito ótico de tensão [17]. Ondas de cisalhamento viajam efetivamente como duas ondas polarizadas linearmente aos planos perpendiculares ao movimento das partículas do meio perfeitamente homogêneo e isotrópico, esse fenômeno acontece naturalmente pela refração de uma onda ultrassônica compressiva quando incide de forma angular em um material sólido Wennerberg, 2010 [18]. A diferença de velocidade de propagação dessa onda cisalhante é simplesmente proporcional à diferença nas tensões principais σ_1 e σ_2 onde pode ser observado na representação gráfica da figura 6.1, e essas tensões principais coincide com a direção de propagação da onda uma vez que estamos tratando de propagação de onda em materiais isotrópicos [5] -[6]. A relação de proporcionalidade entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e as tensões principais nos dá a possibilidade de calcular as tensões residuais em material isotrópico a partir da obtenção da birrefringência acústica do material tensionado e da constante acústico elástica desse material é dada pela equação 6.1, por se tratar de um material isotrópico ϕ e θ sempre serão iguais, equação 6.2.

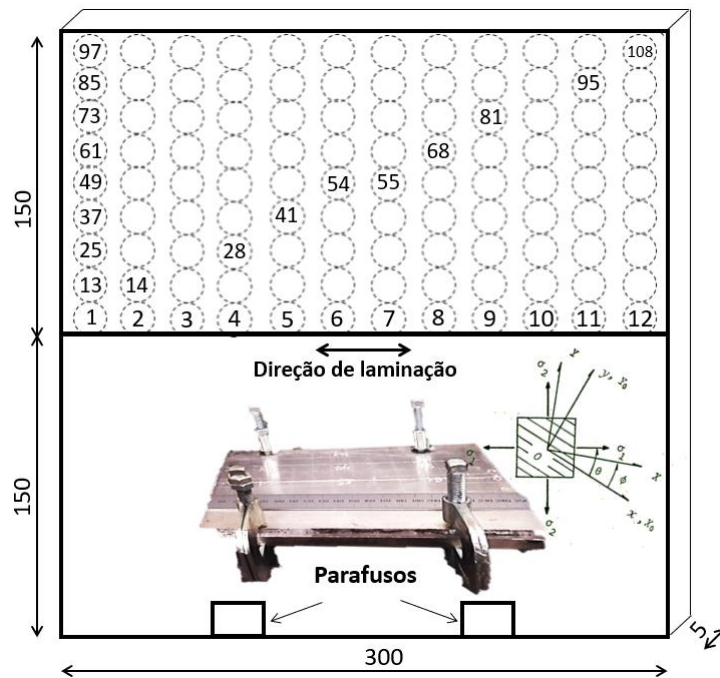


Figura 6.1 - Metal de base fixado por grampos e coordenadas usada na análise onde: x,y Coordenadas axiais, Desenho esquemático da chapa de alumínio 5052 com a divisão dos pontos para fazer as medidas de birrefringência acústica.

X , Y: principal estado axial de tenção. σ_1, σ_2 Tensões principais

$$B = m_2(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (6.1)$$

Quando

$$\phi = \theta \quad (6.2)$$

Nesse caso em tensão uniaxial, $\sigma_1 = \sigma$ e $\sigma_2 = 0$ Okada [5]

Onde B é a birrefringência acústica calculada pela equação (6.3),

m_2 Constante acústico-elástica

$\sigma_1 - \sigma_2$ São as tensões principais

Após vários estudos aplicando a equação 6.1 foi concluído que a técnica de birrefringência ultrassônica tinha perdido sua importância prática como método de medição de tensão residual nos materiais metálicos industriais, uma vez que a maioria dos materiais aplicado na indústria, existe anisotropia, induzida principalmente pelo processo de fabricação por laminação, o que provoca uma direção preferencial de grãos nesse caso o material deixa de ser isotrópico e passa a ser conceituado de anisotrópicos e

ou ortotrópicos. Um material ortotrópico é aquele que tem propriedades que difere em relação a três planos cristalinos ou três eixos duplos e ortogonais de simetria rotacional em um ponto específico como exemplo (ou ligeiramente ortotrópico) pode ser citado o caso de chapas metálicas. As chapas têm uma textura onde muitos grãos são arranjados com certos eixos cristalográficos paralelos à direção de laminação, mais ainda, esta direção e a ortogonal a ela no plano da chapa são duas direções de simetria ortotrópica Bittencourt 2000 [12].

Okada [13] propôs novas relações entre tensão e anisotropia acústica em material ortotrópico. Quando o material é submetido a tensão plana, foi mostrado que são necessárias três constantes acústico-elástica m_1 , m_2 e m_3 . Foram realizados experimentos para determinar as três constantes na placa de alumínio 5052 descrito pelas relações tensão-acústicas propostas em seu trabalho. Esses resultados mostram a validade e a utilidade das novas equações para medidas de tensão com os três coeficientes na placa de liga de alumínio com uma leve ortotropia decorrente da laminação. A birrefringência B e sua principal direção \emptyset obtido da técnica ultrassônica em função da tensão uniaxial σ .

Neste capítulo, propomos verificar a influência do tipo de acoplante na birrefringência do alumínio 5052, calcular a tensão residual na junta soldada em alumínio realizada pela soldagem GMAW, onde cada componente de tensão residual será calculado separadamente e calculado também pela diferença da tensão, mostrando qual é o método mais eficiente para analisar as TR.

6.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

6.2.1 Procedimento de Soldagem

O material utilizado foi uma liga de alumínio AA5052 H-32 de 5 mm de espessura, medindo 300mm x 150 mm cada placa e o arame eletrodo usado como metal de adição foi ER5356, a composição química do metal de adição e base estão descritos na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Composição química nominal do arame eletrodo e do metal base.

Material	Composição química nominal (wt. %)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zi	Ti	Al
AA5052- H32	0,25	0,40	0,10	0,10	2,2-2,8	0,15-0,35	0,10	-	Bal.
ER5356	0,25	0,40	0,10	0,05-0,20	4,5-5,5	0,05-0,20	0,10	0,06- 0,20	Bal.

Cada placa foi fixada por parafusos com aperto de 10 Nm, a uma moldura rígida fabricada em aço carbono. Isto tem a finalidade de limitar a expansão da junta e deter o maior nível de tensão residual. Posição plana com chanfro “I” a topo, com proteção gasosa de argônio puro, se usou para a soldagem. Uma fonte de energia de soldagem Lincoln R500 ligada a um braço robótico Fanuc ArcMate 120i, foi utilizada para soldar as juntas. Os parâmetros de soldagem estão descritos na tabela 6.2.

Tabela 6.2 Parâmetros de soldagem

Processo de soldagem	Velocidade de arame (in/min) [m/min]	Voltagem (V)	Velocidade de soldagem (in/min) [cm/min]	Vazão de gas	Deposição por pass (kg/h)
GMAW	300 [7,62]	25	16 [40,64]	18 l/min-	4,11

6.2.2 Avaliação de Acoplante

Foi verificado o comportamento da birrefringência acústica calculada através do tempo da onda ultrassônica sobre três placas de alumínio 5052, onde foram medidos 108 pontos figura 6.1 apesar de o programa fazer 5000 medidas em 3 segundos e a birrefringência ser a média dessas medidas, cada ponto foi medido três vezes renovando o acoplante em cada medida, uma vez que agora se quer verificar a eficiência do acoplante e não do sistema de aquisição de dados.

A configuração do setup para a medição de birrefringência acústica foi composta por: um gerador de pulso ultrassônico Modelo MFD 350B, do Flaw Detector, um transdutor de onda de cisalhamento ultrassônico de incidência normal, com frequência de 5MHz e diâmetro de 12,7mm (1/2 pol), Modelo V155-RM, da Olympus Parametrics Ultrasonic Transducers, um osciloscópio um osciloscópio Rohde & schwarz Modelo RBT 2002, de largura de banda de 500 MHz e 2,5 GS), Um divisor de sinal divisor T e um desktop com software que pega os dados e trata o sinal da onda ultrassônica.

6.2.3 Equações para Calcular Tensão Residual

A birrefringência (B- Equação 6.3) é obtida fazendo a medição do tempo de onda de cisalhamento na direção de laminação e na direção perpendicular a ela, B_0 é a birrefringência acústica no estado não estressado do material, e representa a anisotropia do material [10].

$$B = 2 \frac{t_{RD} - t_{LD}}{t_{RD} + t_{LD}} \quad (6.3)$$

Onde B é a birrefringência e t_{RD} e o tempo com a polarização na direção de laminação e t_{LD} é a direção onde a polarização da onda se propaga perpendicularmente a direção de laminação.

No entanto, o cálculo da tensão residual será feito com a equação da diferença de tensão. A diferença entre a tensão, no RD e σ_{RD} , que corresponde a direção de laminação, e σ_{LD} , onde LD indica a direção perpendicular a direção de laminação, B_0 é a birrefringência acústica no estado não estressado do material, k é a constante acústico-elástica do material e B é a birrefringência após a aplicação de tensões pode ser calculada pela equação (6.4) [12 14].

$$\sigma_{LD} - \sigma_{RD} = \frac{B - B_0}{K} \quad (6.4)$$

A equação (6.5) mostra como o calcular a tensão residual perpendicular a direção de laminação σ_{LD} , ou seja, quando $\theta = 0^\circ$ e $\tan 2\phi = 0$ e B é a birrefringência mediante a presença de tensões, B_0 é a birrefringência acústica no estado não tensionado e m_1 é a constante acústico-elástica tensionado na direção perpendicular a direção de laminação Figura 6.2 (c), e m_2 é a constante acústico elástica na direção de laminação Figura 6.2 (d). A equação (6.6) para calcular a tensão residual na direção de laminação quando $\theta = 90^\circ$ e $\tan 2\phi = 0$, difere da equação (6.5) somente na operação matemática entre m_1 m_2 onde na equação 6.5, é soma e na 6.6 é subtração.

Quando $\theta = 0^\circ$,

$$B = B_0 + (m_1 + m_2)\sigma, \quad \tan 2\phi = 0 \quad (6.5)$$

Quando $\theta = 90^\circ$,

$$B = B_0 + (m_1 - m_2)\sigma, \quad \tan 2\phi = 0 \quad (6.6)$$

6.2.4 Método de Obtenção da Constante Acústico Elástica

Para obter a constante acústico-elástica, utilizou-se uma amostra de alumínio 5052 com 60X60 mm e 5mm de espessura, Figura 6.2. Essa amostra foi submetida a tensão de compressão no sentido de laminação, onde foram feitas três medidas de birrefringência para cada tensão aplicada, em seguida o mesmo corpo de prova foi racionado 90° para o corpo de prova sofrer tensão de compressão perpendicular ao sentido de laminação. Foram aplicadas sete tensões de compressão, onde começaram com 1000 Kgf até 7000 Kgf e em cada tensão foram realizadas medição de birrefringência três vezes.

Geralmente, o teste de tração é usado para obter a constante acústico-elástica, mas nos testes anteriores discutidos no capítulo 05, observamos muita variação na medição de birrefringência acústica, assim foi observado que a amostra pode deslizar do dispositivo de fixação da garra da máquina de tração, outro problema é o posicionamento do transdutor no mesmo lugar para que a variação na estrutura do material não interfira na medição, ou seja, é quase impossível fazer a segunda medição com a segunda carga aplicada no mesmo local que foi feito a primeira medição com a primeira carga e assim sucessivamente. Para resolver esses problemas foi desenvolvido um dispositivo Figura 6.2 (a) onde foi confeccionada uma caixa metálica que possui um furo do diâmetro do transdutor e nesse caso o corpo de prova não será mais submetido a uma tensão de tração e sim a uma tensão de compressão evitando assim o escorregamento do corpo de prova, e o furo possibilita que o transdutor faça a medida sempre na mesma posição.

A madeira é usada como escora do corpo de prova de compressão, que ocupa toda a caixa metálica evitando a deflexão do corpo de prova. Após a montagem de todo o sistema, a caixa metálica é colocada na máquina de compressão Figura 6.2 (b) e assim foi executado o levantamento da constante acústico-elástica.

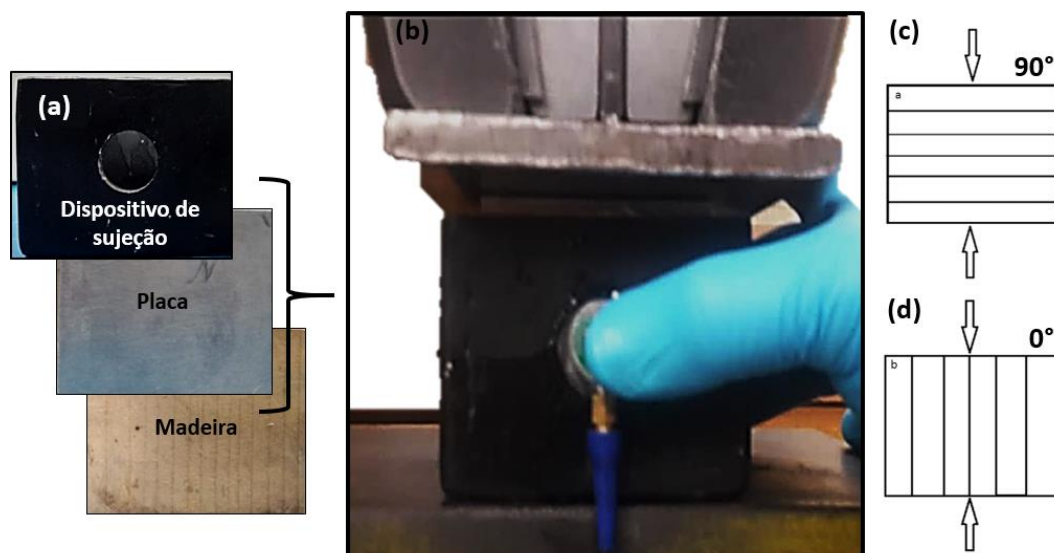


Figura 6.2 a) Dispositivo de sujeição do transdutor, junto com a placa e a madeira para evitar deflexão. (b) Montagem do sistema na servopulser para ensaio de compressão para obtenção da constante acústico elástica. Esquema da compressão feita a 90° c) e 0° d) do sentido de laminação da placa.

6.3 RESULTADO E DISCUSSÃO

6.3.1 Avaliação dos Acoplantes

A tabela 6.3 mostra valores de birrefringência para cada corpo de prova e acoplante, e também isoladamente o valor médio de birrefringência de Okada [13] que fez medições no mesmo tipo de material utilizado nesse trabalho, o alumínio 5052. O acoplante Canada Balsam apresentou uma variação menor entre os corpos de prova, o que pode demonstrar uma boa estabilidade na medição, apesar dos valores estarem um pouco abaixo do valor referenciado por Okada.

O mel (honey) tem uma variação muito grande na medida do primeiro corpo de prova, já no segundo e no terceiro tem medidas próximas. O acoplante comercial Shear gel foi o que apresentou mais variação entre todos os corpos de prova, sendo que a medida do segundo corpo de prova foi a que coincidentemente se aproximou mais do valor mencionado por Okada.

Tabela 6.3 - Valores médios de birrefringência para cada acoplante e corpo de prova

Acoplante	Birrefringência (10^{-3})	Okada [103]
Canada Balsam	$3,27 \pm 4 \times 10^{-5}$	3,45
Mel	$3,32 \pm 2,7 \times 10^{-4}$	-
Shear Gel	$3,22 \pm 1,7 \times 10^{-4}$	-

Nas imagens dos Gráficos abaixo será discutida as relações entre os valores médios e desvio padrão para cada acoplante e corpo de prova, os gráficos são descritos da seguinte forma; a linha vermelha no gráfico representa a média de birrefringência do trabalho do Okada que fez experimentos com o mesmo tipo de alumínio e de mesma espessura usado nesse trabalho, a linha verde representa a média da medida de birrefringência de cada acoplante no corpo de prova e a linha azul representa o intervalo do desvio padrão, onde a linha azul inferior é a média menos o desvio padrão e a linha azul superior é a média mais o desvio padrão, e as barras de desvio padrão são das três medidas feitas em cada ponto.

Na figura 6.3 os gráficos apresentam os valores de birrefringência para os três acoplantes e no corpo de prova 01, foi observado que os valores para o acoplante comercial shear gel teve valores médios próximos ao valor de referência e uma mediana relação de desvio padrão com a média entre os pontos. Podemos atestar um pouco de instabilidade nessas medições devido a alguns pontos e barras de desvio padrão fora da linha azul. As medidas feitas com mel (Honey) mostram um campo de instabilidade ainda maior, pois possui largura da linha azul maior assim como pontos e barras de desvio padrão mais fora da área azul quando comparado ao gráfico das medidas do acoplante shear gel.

O gráfico com as medidas feita com Canada Balsam foi o que apresentou melhor estabilidade, uma vez que a relação entre a média e o desvio padrão representado pelo espaço entre as linhas azul é menor se comparado com os outros acoplantes, assim como tem menos pontos e barras fora da linha azul. É também observado nesse gráfico que as médias das medidas ficaram mais longe dos valores de referência.

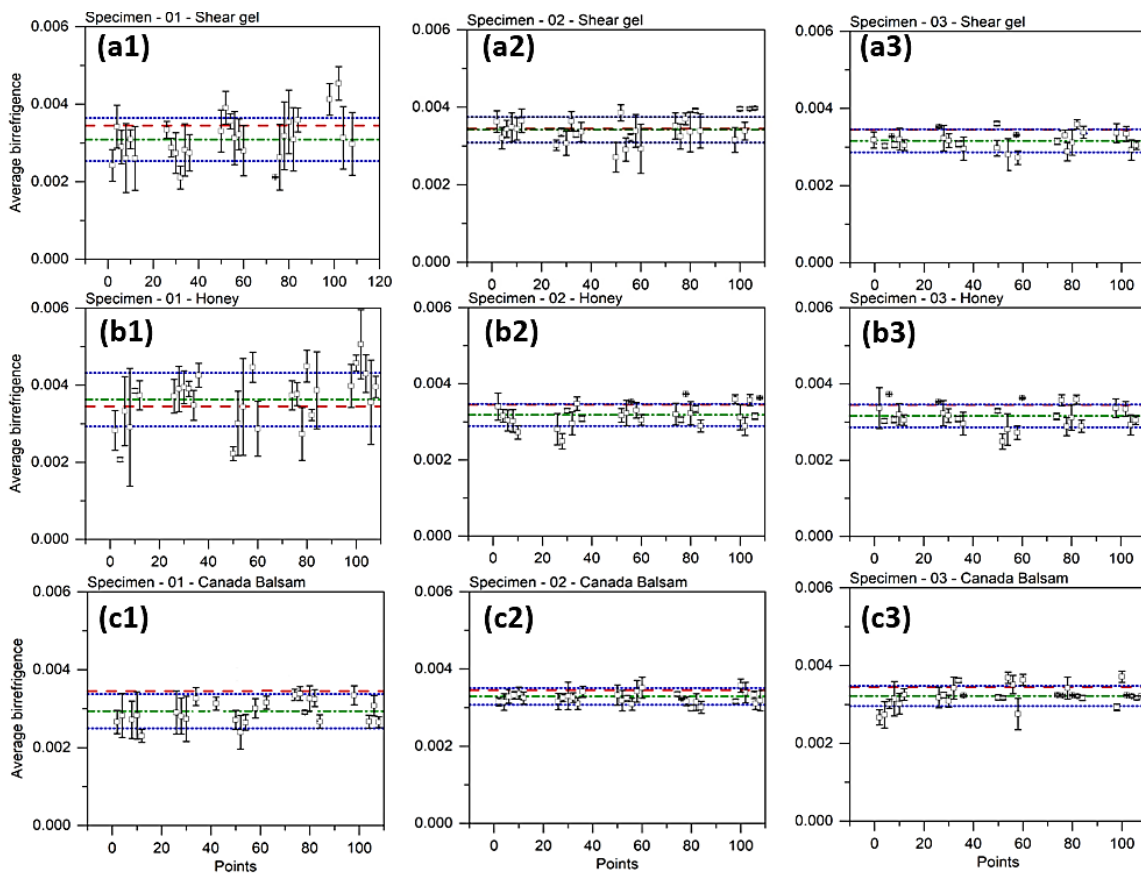


Figura 6.3 - Gráficos da média do desvio padrão dos corpos de prova 1, 2 e 3, para SG, Mel e CB.

A Figura 6.3 a1, a2 e a3 expõe as medidas de birrefringência para o corpo de prova cujo as medidas foram feitas com o acoplante *Shear* essas medidas apresentaram muita variação uma vez que existem várias barras de desvio padrão e pontos de medias fora da área demarcada pela linha tracejada azul, como ponto positivo é observado no gráfico a2 que os valores médios de birrefringência são semelhante aos valores de apresentado por Okada 1980 [13], esse fato pode estar relacionado a variação das médias que tiveram valores maiores nesse corpo de prova.

As medidas feita com mel (Honey) gráficos 6.3 b1 b2 e b3 apresentaram tamanho de área da relação entre desvio padrão e média dos valores de birrefringência são muito próximos aos medidos com acoplante *Shear Gel*, os valores médios de birrefringência ficaram um pouco abaixo do valor de referência publicado por Okada indicando que os valores médios não foram altos, é também observado nesse gráfico muitos pontos e barras de desvio padrão fora da linha azul indicado grande variação nas medidas de birrefringências, em uma ótica qualitativa as medidas feitas usando mel (Honey) como acoplante não tem muita diferença de estabilidade quando comprado ao acoplante comercial *Shear Gel*.

As medidas feitas com canada Balsam Figura 6.3 c1, c2 e c3 esses corpos de prova apresentaram um resultado muito bom de estabilidade, pois o tamanho da área de relação da média com desvio padrão foi menor em relação aos outros acoplantes. Outro detalhe que indica pouca variação entre as medidas são poucos pontos e barras de desvio padrão fora da linha tracejada azul, esse fato aponta que o Canada Balsam pode ser considerado mais estável pra a transmissão da onda ultrassônica no alumínio. A medida da média de birrefringência não ficou com valores idênticos ao valor de referência publicado por Okada, esse fato pode estar relacionado com o nosso sistema de aquisição de sinal que evoluiu de 1980 até os dias atuais.

Para os três tipos de acoplantes, foi verificado os valores de impedância acústica para cada acoplante, essa propriedade física determina a dificuldade no qual a onda ultrassônica encontra para se transferir do transdutor para peça ou vice e versa. Quanto maior for a impedância acústica maior a dificuldade e transmissão e recepção da onda ultrassônica pelo transdutor. As medidas de impedância acústica foram calculadas pelo produto entre a densidade do acoplante e a velocidade de propagação do som no Alumínio, e seus valores estão na tabela 6.4, onde o CB apresentou valores menores, seguido pelo mel, e por último o SG com o maior valor. O Canada Balsam, Shear Gel e mel custam cada 10g o valor de 24, 12 e 3 reais, respectivamente. O CB é o acoplante mais viável para verificação de tensão residual no material em questão, seguido do mel que apesar de apresentar variações nas medidas de Birrefringência tem o menor custo.

Tabela 6.4 - Valores de impedância acústica para os acoplantes.

Amostra/acoplante	Densidade g/cm^3	Velocidade da onda (m/s)	Impedância acústica ($g/cm^3 \cdot s$)
Canada Balsam	0.99	3100	$3,069 \cdot 10^5$
Mel	1.4	3100	$3,100 \cdot 10^5$
Shear Gel	1.0	3100	$4,340 \cdot 10^5$

6.3.2 Procedimento de Soldagem

As soldas apresentaram um bom aspecto apesar de aparentar um pequeno lombada (*hump*) aproximadamente 35mm, após o começo da soldagem Figura 6.4 CP 01 e 02, esse pequeno defeito está relacionado a alta fluidez que a poça de fusão se encontra, fazendo com que ela avance para cima do metal de solda já solidificado, causando uma

instabilidade no arco elétrico. Na soldagem do CP 03 essa instabilidade foi tão intensa que provocou o escalonamento do arco elétrico de modo que o bico de contato fundiu e o arame ficou travado, interrompendo a soldagem, após o bico de contato fundido ter sido trocado por um novo e o arame eletro ter sido reposicionado, o CP 03 foi ressoldado com sucesso. Mas infelizmente nucleou uma trinca longitudinal ao cordão de solda medindo 30mm de comprimento, essa trinca pode ter sido causada por acúmulo de tensão residual presente nesse local, uma vez que já tinha se iniciado uma solda no mesmo local, ou por segregação de óxido de magnésio formado pelo início da solda anterior.

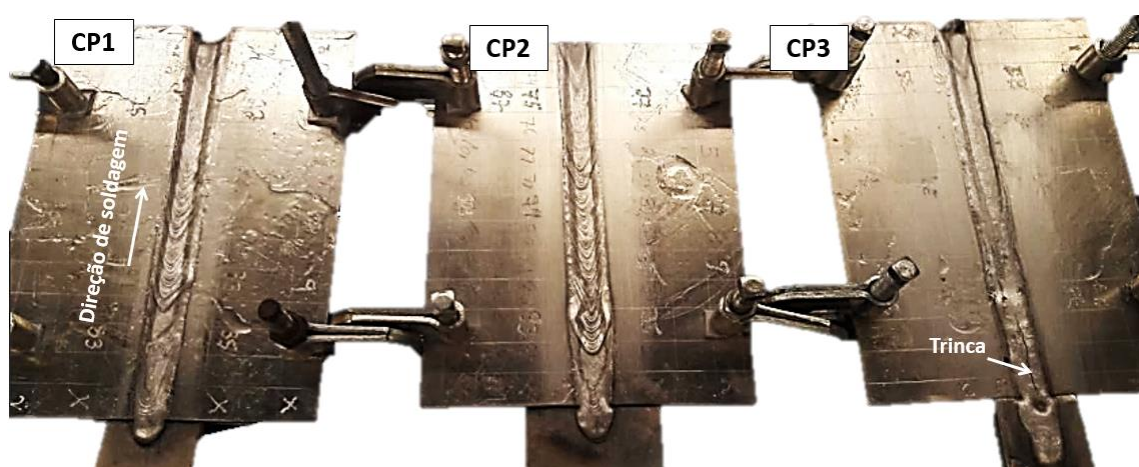


Figura 6.4 - Corpo de prova 01, 02 e 03 soldados com processo GMAW.

6.3.3 Tensão Residual e Constante Acústico Elástica

Para calcular a constante acústico-elástica pela equação da diferença de tensão, foi usado somente o valor do slope da birrefringência em função da tensão [8]. Não obstante o cálculo da constante acústico elástica para equação de tensão residual onde a tensão é calculada de forma separada foi obtido como recomendado por Okada [13], onde recomenda fazer o cálculo usando a equação 6.5 e 6.6, então como essas equações possuem duas variáveis m_1 e m_2 caracterizando assim um sistema linear, a primeira equação 6.5 onde recebeu tensão perpendicular ao sentido de laminação de $\theta = 0^\circ$ teve os valores de substituídos por valores encontrado experimentalmente como o B_0 e o B que foi escolhido aleatoriamente em função de um valor de tensão do gráfico de tensão x birrefringência e a tensão σ corresponde ao valor escolhido que é função do B . Na

segunda equação foi executado o mesmo procedimento sendo que o valor de B e σ foi retirado do corpo de prova tensionado na direção de laminação $\theta = 90^\circ$.

Na Figura 6.5 é possível observar o slope para direção de laminação 90° e perpendicular a direção laminação 0° , o slope de 0° apresentou uma tendência crescente de birrefringência o que teoricamente é esperado, pois quando o corpo de prova é comprimido no sentido longitudinal a laminação Figura 6.2(d) os grãos laminados se afastam aumentando o tempo transversal da onda ultrassônica e que conseqüentemente aumenta o valor de birrefringência. Já o slope da direção de laminação 90° apresentou um resultado inesperado, pois o que se esperava desse slope e que tivesse uma inclinação decrescente, pois quando o corpo de prova é comprimido na direção perpendicular de laminação Figura 6.2(c) os grãos laminados se aproximam uns dos outros diminuindo a velocidade transversal da onda ultrassônica e conseqüentemente a birrefringência, mas nesse caso o slope decresce e cresce novamente, esse comportamento vai de encontro todos os slope já publicados em periódicos, mas esse mesmo comportamento foi observado em Okada [13].

A constante acústico-elástica para calcular a tensão residual pela equação da diferença das tensões foi -6×10^{-7} , e os valores da constante acústico elástica para calcular as tensões separadamente foram bem próximo aos valores encontrados por Okada [13], para o cálculo na direção perpendicular a direção de laminação a constante foi $m_1 = 1 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{kgf}$, e para o cálculo na direção de laminação a constante foi $m_2 = -4,2 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{kgf}$.

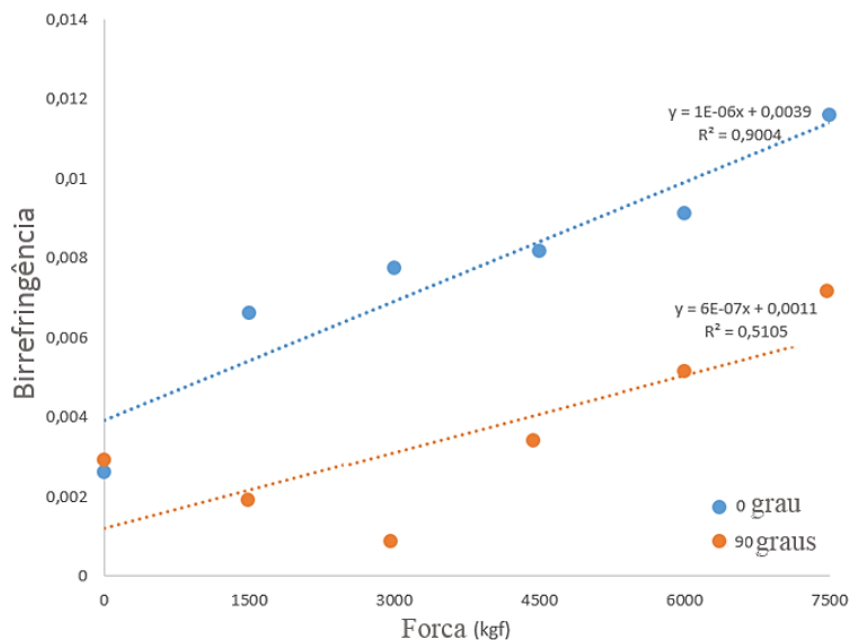


Figura 6.5 - Gráfico da constante acústico elástica na direção de laminação 90° e perpendicular a direção de laminação 0°.

E observado na figura 6.6 os valores calculados pela diferença da tensão $\sigma_1 - \sigma_2$, não é possível ter uma boa definição entre tensão trativa e compressiva como a as tensões da figura 6.7 impossibilitando qualquer comparação entre o resultado dos diferentes métodos de cálculos da tensão residual. Calcular tensão residual pelas diferenças da tensão equação 6.4 tem sido muito praticado em trabalhos atualmente, apesar de esse cálculo ser menos complexo, pois só envolve uma equação e a constante acústico elástica é verificada somente na direção de laminação da chapa, o que torna a parametrização desse método um pouco mais fácil. Apesar desses pontos positivos os resultados nesse trabalho não são considerados muito eficientes uma vez que observamos a Figura 6.6 é notório que não temos uma definição dos valores de tensão residual no sentido de laminação que é o mesmo sentido longitudinal a solda, assim como não se define os valores de tensão residual na direção contrária ao sentido de laminação que é o mesmo sentido perpendicular ao cordão de solda, esse fato se deve pelo resultado do cálculo ser baseado na teoria que o a diferença tempo da onda ultrassônica em um material isotrópico é proporcional a diferença das tensões $\sigma_1 - \sigma_2$. Outro fato relevante a ser observado é que as soldas apesar de serem terem sido realizada com o mesmo parâmetro e nas mesmas condições, não apresentaram similaridade nos valores de tensão residual sendo antagônico com o esperado, o que sugere uma investigação experimental aprofundada nesse método.

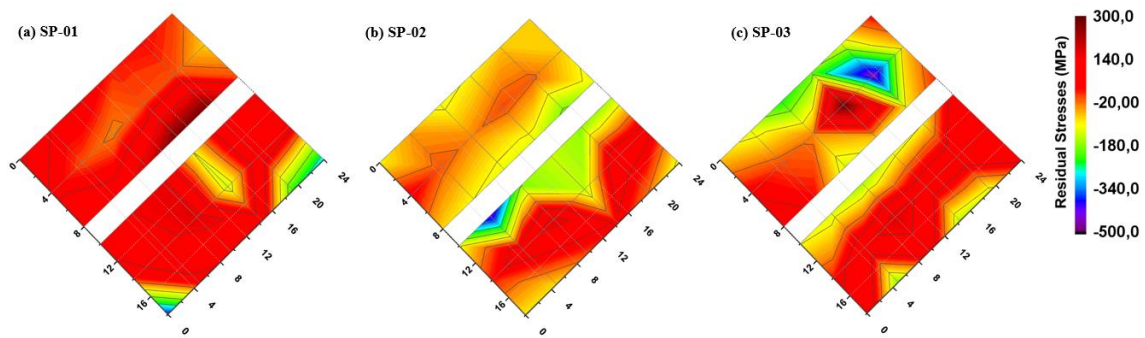


Figura 6.6 - Gráficos da tensão residual calculada pela diferença entre as tensões.

As soldagens foram executadas longitudinalmente ao sentido de laminação, e podemos observar na figura 6.7 as tensões atuantes no metal de base ao redor a solda, a Figura 6.7 (a)1, (c)2 e (e)3 mostra os valores de tensão na direção perpendicular ao cordão de solda onde esses valores caracterizam tensão trativas o que já e discutidos em vários trabalhos como o de WITHERS, Philip J.; BHADSHIA, H. K. D. H.[19]. O CP(e) teve uma tensão residual diferente do CP(a) e CP(c) o que pode estar relacionado com a trinca formada no início do cordão de solda.

Os gráficos (b)1, (d)2 e (f)3 representam as tensões residuais no sentido longitudinal a solda e podemos observar tensões compressivas ou tensões com valores baixos.

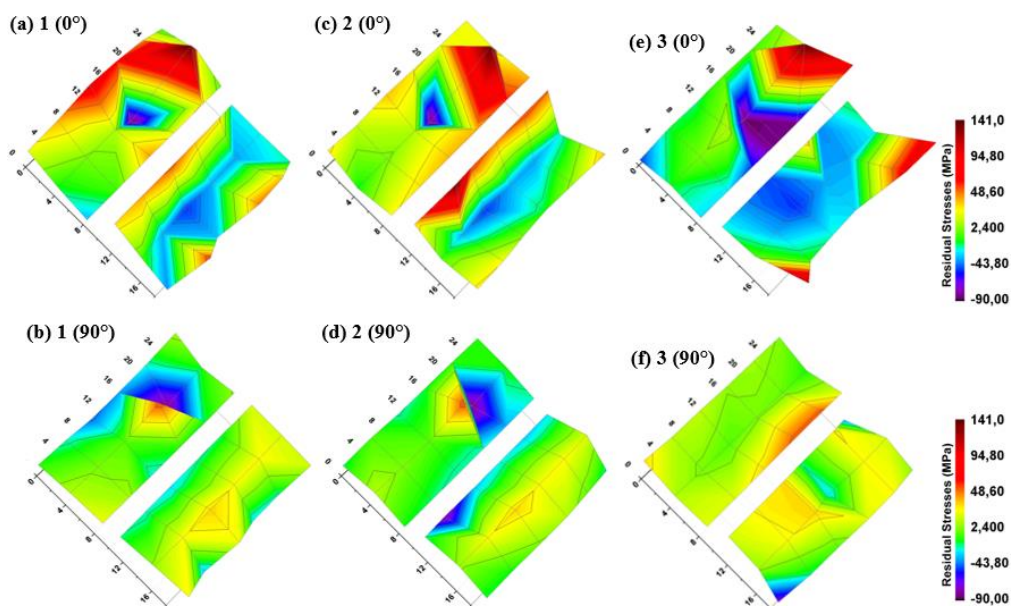


Figura 6.7 - Gráficos da tensão residual calculada separadamente.

6.4 CONCLUSÕES

As medidas de tempo da onda ultra sônica foram realizadas em três chapas de alumínio 5052 com três tipos de acoplante, com a intenção de verificar se os mesmos têm influência no valor de birrefringências. E, após as soldagens realizadas nas mesmas chapas de alumínio, foi medida novamente a birrefringência para calcular a tensão residual por dois métodos, o primeiro que calcula as tensões separadamente e o segundo que calcula pela diferença das tensões. Após a análise dos resultados, temos as seguintes conclusões:

1. O método de obtenção da constante acústico elástica por compressão de um corpo de prova do mesmo metal de base colocado em uma caixa metálica foi considerado melhor, uma vez que não houve variação significativa nas medidas de birrefringência.

2. O acoplante canada balsam foi o que apresentou melhores resultados para o material em questão, isso pode estar relacionado a menor impedância acústica que esse material tem em relação ao shear gel e ao mel (honey).

3. A solda apesar de algumas porosidades e rugosidades não apresentou defeitos internos o que foi constatado por ensaio de ultrassom.

4. Calcular a tensão residual separadamente nos dá uma visão melhor da atuação das tensões no metal de base para que se possa tomar os devidos cuidados após a verificação de tensão residual em um projeto executado, uma vez que esse método de verificação é não destrutivo, calcular as tensões pela diferença não possibilita uma visão detalhada das direções que as tensões residuais estão atuando dificultando a aplicação em um projeto executado.

6.5 NOMENCLATURA

BA0	Birrefringência acústica do material como recebido
BA	Birrefringência acústica
CP	Corpo de prova

I	Corrente (A)
K	Constante acustoelástica
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MB	Metal de base
T0	Tempo inicial
T	Tempo final
Tl	Tempo longitudinal
tt	Tempo Transversal
σ	Tensão (MPa)
σ_r	Tensões residual
$(\sigma_L - \sigma_T) / (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$	Diferença de tensões residuais nas direções paralela e transversal ao cordão de solda

6.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Nitschke-Pagel and K. Dilger, “Sources and Consequences of Residual Stresses due to Welding,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 783–786, pp. 2777–2785, 2014.
- [2] T. Field and R. Stress, No Title. .
- [3] G. Arthur, No Title. .
- [4] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, “Residual stress. Part 2 – Nature and origins,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 366–375, 2001.
- [5] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi, “Methods of measuring residual stresses in components,” *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 572–588, 2012.

- [6] L. Rodrigues, C. R. Loayza, D. Borges, P. Baia, E. Freitas, and E. Braga, "Welding procedures influence analysis on the residual stress distribution and distortion of stiffened panels welded via robotized FCAW," *Duke Law J.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–13, 2019.
- [7] G. A. Webster and R. C. Wimpory, "Residual stress in weldments," *J. Neutron Res.*, vol. 9, no. 2–4, pp. 281–287, 2001.
- [8] E.S. Costa, P.D.C. Assunção, E.B.F. Dos Santos, L.G. Feio, M.S.Q. Bittencourt, E.M. Braga, Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding, *Sci. Technol. Weld. Join.* 22 (2017) 706–713. doi:10.1080/13621718.2017.1306014.
- [9] R. W. BENSON and V. J. RAELSON, *Product Engng* 30, 56 (1956).
- [10] MARTIN, C. C. Ultrassom. 1. ed. São Paulo: *Abendi*, 2012.
- [11] SANTIN, J. L. Ultra-som: técnica e aplicação. 2. ed. Curitiba (PR): Optagraf, 2003.
- [12] Bittencourt, M. S. Q. Development of a Time Measurement System Ultrasonic Wave and Analysis of the State of Voltage in Metallic Materials by Acoustic birefringence. Thesis of D.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro / 2000.
- [13] OKADA, Kenichi. Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique. *Journal of the Acoustical Society of Japan* (E), v. 1, n. 3, p. 193- 200, 1980.
- [14] Costa, Ednelson da Silva. Avaliação de Tensões Residuais em Soldas Gmaw e Gmaw-Cw por Birrefringência Acústica e Difração de Raio X. 2017.
- [15] Hsu NN. Acoustical birefringence and the use of ultrasonic waves for experimental stress analysis. *Exp Mech.* 1974;14:169–176.
- [16] Clark AV. On the use of acoustic birefringence to determine components of plane stress. *Ultrasonics.* 1985;23:21–30.
- [17] R. W. Benson and V. J. Raelson, "Acoustoelasticity," *Prod. Eng.* 20, 56-59 (1959).. 15.
- [18] Wennerberg, L., 2010. Snell's law for viscoelastic materials. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 81, 13–18.

[19] D. S. Hughes and J. L. Kelly, "Second-order elastic deformation of solids," *Phys. Rev.* 92, 1145-1149 (1953). WITHERS, Philip J.; BHADESHIA, H. K. D. H.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 - CONCLUSÕES GERAIS

Após todas as análises realizadas da soldagem em *Narrow Gap*, conclui-se que o processo CW-GMAW permite um aumento na taxa de fusão do eletrodo, sem a necessidade de maior entrada de calor para obter sucesso no preenchimento do chanfro de 5 mm de largura e as soldas não apresentaram descontinuidades, como as observadas nas juntas soldadas pelo processo convencional.

As soldas realizadas em simples deposição com processo CW-GMAW nas polaridades CC+ e CC-, se mostraram viáveis, tanto em polaridades direta (CC-), quanto em polaridades reversa (CC+). O arame frio é capaz de estabilizar o arco para ambas as polaridades, embora esse efeito tenha melhor eficiência na polaridade CC-, no entanto, altas taxas de arame frio podem intensificar ainda mais os respingos em CC-.

A viabilidade do processo DCW-GMAW é demonstrada pela morfologia do cordão de solda. Não ocorreram trincas, *humps* ou porosidade externa. A introdução de dois arames frios parece estabilizar o arco com base na dispersão mais estreita de dados nos oscilogramas. Os arames frios na configuração coplanares parecem melhorar a estabilidade do arco, provavelmente devido à estabilização dos pontos catódicos que vagam pela redução das correntes de convecção de Marangoni.

Para a avaliação da tensão residual foi verificado que a obtenção da constante acústico elástica por compressão teve um excelente resultado, uma vez que não houve variação significativa nas medidas de birrefringência. O *Canada Balsam* foi o acoplante que apresentou melhores resultados para o material em questão. O cálculo da tensão separadamente dará uma visão melhor para prever possíveis falhas em projetos estruturais.

7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para realização de trabalhos futuros sugere-se:

- Soldar *Narrow Gap* em 4 mm para avaliar o comportamento do arco elétrico e a viabilidade por ensaios não destrutivos.
- Fazer revestimentos com os parâmetros desse trabalho em CC-, afim de verificar a viabilidade de uma aplicação industrial.
-
- Para continuidade da pesquisa do processo de soldagem DCW reivindica-se realizar soldas em chanfros abertos em “V” para averiguação de produtividade e das propriedades mecânica.
- Verificar birrefringência e a constante acústico elástica em algum material isotrópico para compara com os resultados desse trabalho.

7.3 APÊNDICE A :PUBLICAÇÕES EM REVISTAS

Parte de esta Teses foi publicada nos seguintes artigos:

- **COSTA ASSUNÇÃO, PAULO D'ANGELO**; RIBEIRO, R. A.; F. DOS SANTOS, EMANUEL B.; GERLICH, ADRIAN P.; DE MAGALHÃES BRAGA, EDUARDO. Feasibility of narrow gap welding using the cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process. *Welding in the World* **JCR**, v. 61, p. 659-666, 2017. **Citações:** **WEB OF SCIENCE** = 8
- **ASSUNÇÃO, P. D. C.**; RIBEIRO, R. A.; DOS SANTOS, E. B. F.; BRAGA, E. M.; GERLICH, A. P.. Comparing CW-GMAW in direct current electrode positive (DCEP) and direct current electrode negative (DCEN). *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY (INTERNET)* **JCR**, v. 104, p. 2899, 2019. **Citações:** **WEB OF SCIENCE** = 1
- **ASSUNÇÃO, P. D. C.**, Ribeiro, R. A., Moreira, P. M. G. P., Braga, E. M., & Gerlich, A. P. (2020). A preliminary study on the double cold wire gas metal arc welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11), 5393-5405.

Publicações complementarias a pesquisa de doutorado:

- RIBEIRO, R. A.; **ASSUNÇÃO, P. D. C.**; SANTOS, E. B. F. DOS; BRAGA, E. M.; GERLICH, A. P. An overview on the cold wire pulsed gas metal arc welding. *Welding in the World* **JCR**, v. 64, p. 123-140, 2020. **Citações:** **WEB OF SCIENCE** = 1
- VASCONCELOS, CHARLES H. M.; LOAYZA, C. R. L.; **ASSUNÇÃO, PAULO D. C.**; JUNIOR, FRANCISCO F. B.; BAIA, PAOLA E. C.; BORGES, DIEGO J. A.; BRAGA, EDUARDO M. High-hardness armor welded by CW-GMAW: economic, geometric and CGHAZ analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **JCR**, v. 41, p. 268, 2019.
- RIBEIRO, RAFAEL; **ASSUNÇÃO, PAULO**; DOS SANTOS, EMANUEL; FILHO, ADEMIR; BRAGA, EDUARDO; GERLICH, ADRIAN. Application of Cold Wire Gas Metal Arc Welding for Narrow Gap Welding (NGW) of High Strength Low Alloy Steel. *Materials* **JCR**, v. 12, p. 335, 2019. **Citações:** **WEB OF SCIENCE** = 3.

- Ribeiro, R. A., Dos Santos, E. B. F., **Assunção, P. D. C.**, Braga, E. M., & Gerlich, A. P. (2019). Cold wire gas metal arc welding: droplet transfer and geometry. WELDING JOURNAL, 98(5), 135S-149S.
- LOAYZA L., CRISTHIAN R.; BORGES, DIEGO J.A.; CARDOSO, DANYELLA C.S.; **ASSUNÇÃO, PAULO D.C.**; FERREIRA, VICTOR O.; BAIA, PAOLA E.C.; CASTRO F., ADEMIR A.; REIS, MARCOS A.L.; BRAGA, EDUARDO M. A new approach for the reinforcement of SS 304L via arc welding: Using nanostructured flux cored electrode. DIAMOND AND RELATED MATERIALS **JCR**, v. 92, p. 138-145, 2019. **Citações: WEB OF SCIENCE™ 1**
- DOS REIS, MARCOS ALLAN LEITE ; BARBOSA NETO, NEWTON MARTINS ; DE SOUSA, MÁRIO EDSON SANTOS ; ARAUJO, PAULO T. ; SIMÕES, SÓNIA ; VIEIRA, MANUEL F. ; VIANA, FILOMENA ; LOAYZA, CRISTHIAN R. L. ; BORGES, DIEGO J. A. ; CARDOSO, DANYELLA C. S. ; **ASSUNÇÃO, PAULO D. C.** ; BRAGA, EDUARDO M. . Raman spectroscopy fingerprint of stainless steel-MWCNTs nanocomposite processed by ball-milling. AIP Advances **JCR**, v. 8, p. 015323, 2018.
- COSTA, E. S.; **ASSUNÇÃO, P. D. C.**; DOS SANTOS, EMANUEL B. F.; FEIO, L. G.; BITTENCOURT, M. S. Q.; BRAGA, E. M. Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. Science and Technology of Welding and Joining **JCR**, v. 22, p. 1-8, 2017. **Citações: WEB OF SCIENCE™ 10 | SCOPUS 1.**
- LOAYZA, CRISTHIAN RL; **ASSUNÇÃO, PAULO DC**; CARDOSO, DANYELLA CS; BORGES, DIEGO JA; FILHO, ADEMIR AC; REIS, MARCOS AL; BRAGA, EDUARDO M. Incorporation of AWS 316L wire nanostructured with nickel-carbon nanotube by arc welding. JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS **JCR**, v. 52, p. 002199831773588, 2017.
- RIBEIRO, R. A. ; SANTOS, E. B. F. ; **ASSUNÇÃO, P. D. C.** ; **ASSUNÇÃO, P. D. C.** ; MACIEL, R. R. ; BRAGA, E. M. . Predicting Weld Bead Geometry in the Novel CW GMAW Process.. Welding Journal **JCR**, v. 09, p. 301-311, 2015.
- **Citações: WEB OF SCIENCE™ 8**
- **ASSUNÇÃO, P. D. C.**; RIBEIRO, R. A.; DOS SANTOS, E. B. F.; BRAGA, E. M.; GERLICH, A. P.. Comparing CW-GMAW in direct current electrode positive (DCEP) and direct current electrode negative (DCEN). INTERNATIONAL

JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY (INTERNET) **JCR**, v. 104, p. 2899, 2019. **Citações:** WEB OF SCIENCE = 1

- **ASSUNÇÃO, P. D. C.**, Ribeiro, R. A., Moreira, P. M. G. P., Braga, E. M., & Gerlich, A. P. (2020). A preliminary study on the double cold wire gas metal arc welding process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106(11), 5393-5405.

Publicações complementarias a pesquisa de doutorado:

- RIBEIRO, R. A.; **ASSUNÇÃO, P. D. C.**; SANTOS, E. B. F. DOS; BRAGA, E. M.; GERLICH, A. P. An overview on the cold wire pulsed gas metal arc welding. Welding in the World **JCR**, v. 64, p. 123-140, 2020. **Citações:** WEB OF SCIENCE = 1
- VASCONCELOS, CHARLES H. M.; LOAYZA, C. R. L.; **ASSUNÇÃO, PAULO D. C.**; JUNIOR, FRANCISCO F. B.; BAIA, PAOLA E. C.; BORGES, DIEGO J. A.; BRAGA, EDUARDO M. High-hardness armor welded by CW-GMAW: economic, geometric and CGHAZ analysis. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering **JCR**, v. 41, p. 268, 2019.
- RIBEIRO, RAFAEL; **ASSUNÇÃO, PAULO**; DOS SANTOS, EMANUEL; FILHO, ADEMIR; BRAGA, EDUARDO; GERLICH, ADRIAN. Application of Cold Wire Gas Metal Arc Welding for Narrow Gap Welding (NGW) of High Strength Low Alloy Steel. Materials **JCR**, v. 12, p. 335, 2019. **Citações:** WEB OF SCIENCE = 3.
- Ribeiro, R. A., Dos Santos, E. B. F., **Assunção, P. D. C.**, Braga, E. M., & Gerlich, A. P. (2019). Cold wire gas metal arc welding: droplet transfer and geometry. WELDING JOURNAL, 98(5), 135S-149S.
- LOAYZA L., CRISTHIAN R.; BORGES, DIEGO J.A.; CARDOSO, DANYELLA C.S.; **ASSUNÇÃO, PAULO D.C.**; FERREIRA, VICTOR O.; BAIA, PAOLA E.C.; CASTRO F., ADEMIR A.; REIS, MARCOS A.L.; BRAGA, EDUARDO M. A new approach for the reinforcement of SS 304L via arc welding: Using nanostructured flux cored electrode. DIAMOND AND RELATED MATERIALS **JCR**, v. 92, p. 138-145, 2019. **Citações:** WEB OF SCIENCE = 1
- DOS REIS, MARCOS ALLAN LEITE ; BARBOSA NETO, NEWTON MARTINS ; DE SOUSA, MÁRIO EDSON SANTOS ; ARAUJO, PAULO T. ; SIMÕES, SÓNIA ; VIEIRA, MANUEL F. ; VIANA, FILOMENA ; LOAYZA,

- CRISTHIAN R. L. ; BORGES, DIEGO J. A. ; CARDOSO, DANYELLA C. S. ; **ASSUNÇÃO, PAULO D. C.** ; BRAGA, EDUARDO M. . Raman spectroscopy fingerprint of stainless steel-MWCNTs nanocomposite processed by ball-milling. *AIP Advances JCR*, v. 8, p. 015323, 2018.
- COSTA, E. S.; **ASSUNÇÃO, P. D. C.**; DOS SANTOS, EMANUEL B. F.; FEIO, L. G.; BITTENCOURT, M. S. Q.; BRAGA, E. M. Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining JCR*, v. 22, p. 1-8, 2017. **Citações:** [WEB OF SCIENCE™](#) 10|[SCOPUS](#)1.
 - LOAYZA, CRISTHIAN RL; **ASSUNÇÃO, PAULO DC**; CARDOSO, DANYELLA CS; BORGES, DIEGO JA; FILHO, ADEMIR AC; REIS, MARCOS AL; BRAGA, EDUARDO M. Incorporation of AWS 316L wire nanostructured with nickel-carbon nanotube by arc welding. *JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS JCR*, v. 52, p. 002199831773588, 2017.
 - RIBEIRO, R. A. ; SANTOS, E. B. F. ; **ASSUNÇÃO, P. D. C.** ; **ASSUNÇÃO, P. D. C.** ; MACIEL, R. R. ; BRAGA, E. M. . Predicting Weld Bead Geometry in the Novel CW GMAW Process.. *Welding Journal JCR*, v. 09, p. 301-311, 2015.

Apresentações em conferências: Internacionais e Nacionais.

VITAL, M. M. M. ; ARAUJO, J. S. ; FERREIRA, V. O. ; ASSUNÇÃO, P. D. C. ; ASSUNÇÃO, P. D. C. . VALIAÇÃO DA SANIDADE NA JUNTA SOLDADA ENTRE OS AÇOS 1020 E 1045 POR ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS. In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2016, Fortaleza. Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2016.

ASSUNÇÃO, P. D. C.; RIBEIRO, R. A. ; BRAGA, E. M. . Process Stability Assessment of Cold Wire Gas Metal Arc Welding Process in Aluminum Alloy Butt Welding. In: 10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium, 2016, Tokio. Anais do 10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium, 2016.

RIBEIRO, R. A. ; ASSUNÇÃO, P. D. C. ; ASSUNÇÃO, P. D. C. ; INFANTE, V. ; VILACA, P. ; CIPRIANO, G.P. ; MOREIRA, P.M.G.P. ; BRAGA, E. M. . Comparison of fatigue behaviours of AA5052 H32 butt joints fabricated by the CW-

GMAW and FSW processes. In: International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials XI, 2016, Hyannis. Anais do International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials XI, 2016.

LOAYZA, CRISTHIAN R. L. ; FAVACHO, R. ; SIQUEIRA, M. C. M. ; P. Dangelo C. Assunção ; BRAGA, EDUARDO M . Influence of the pre-heating temperature in the welding of white cast iron. 2018. (Apresentação de Trabalho/Conferência ou palestra).

VASCONCELOS, CHARLES H. M. ; B. JUNIOR, F. F. ; CASTRO F., ADEMIR A. ; P. Dangelo C. Assunção ; BRAGA, EDUARDO M . Welding parameters effect in the thermal cycles of high hardness. 2018. (Apresentação de Trabalho/Conferência ou palestra).

LOAYZA, CRISTHIAN R. L. ; B. JUNIOR, F. F. ; FILHO, ADEMIR AC ; CARDOSO, DANYELLA C. S. ; P. Dangelo C. Assunção ; BRAGA, EDUARDO . Low-density steel coating manufactured via CW-GMAW. 2018. (Apresentação de Trabalho/Conferência ou palestra).

S., J. C. ; LOAYZA, CRISTHIAN R. L. ; P. Dangelo C. Assunção ; BRAGA, EDUARDO M. . Caracterização da Junta Soldada pelo Processo FSW na Liga de Alumínio 5052 Aplicado à Construção Naval.. 2017. (Apresentação de Trabalho/Seminário).

BAIA, PAOLA E. C. ; BORGES, DIEGO J. A. ; CARDOSO, DANYELLA C.S. ; FERREIRA, V. O. ; P. Dangelo C. Assunção ; REIS, MARCOS A.L. ; LOAYZA, CRISTHIAN R. L. ; BRAGA, EDUARDO . Incorporation of carbon nanotubes in stainless steel 304L via mechanical alloying. 2017. (Apresentação de Trabalho/Congresso).

REIS, J. R. ; FONSECA, MATHEUS ; LOAYZA, CRISTHIAN R. L. ; FILHO, ADEMIR ; P. Dangelo C. Assunção ; BRAGA, EDUARDO ; RIBEIRO, P. P. G. . INFLUENCE OF LORENTZ FORCE ON PENETRATION OF WELDED JOINTS BY THE GMAW PROCESS WITH ELETRIC WIRE. 2017. (Apresentação de Trabalho/Congresso).

Patentes depositadas:

- BRAGA, E. M.; ASSUNCAO, P. D. C.; RIBEIRO, R. A. Processo de Soldagem Cold Wire Gas Metal Arc Welding, CW-GMAW. 2015, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020150250592, título: "Processo de Soldagem Cold Wire Gas Metal Arc Welding, CW-GMAW", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito PCT: 18/09/2015; Depósito: 18/09/2015; Concessão: 30/09/2015.

- **ASSUNCAO, P. D. C.;** LOAYZA, CRISTHIAN; FERREIRA, VICTOR; Castro Filho; BRAGA, E. M. TÉCNICA DE SOLDAGEM NARROW GAP COLD WIRE GAS METAL ARC WELDING - (NG CW - GMAW). 2017, Brasil. Patente: Modelo de Utilidade. Número do registro: BR10201702601, título: "TÉCNICA DE SOLDAGEM NARROW GAP COLD WIRE GAS METAL ARC WELDING - (NG CW - GMAW)", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 07/12/2017.
- LOAYZA, CRISTHIAN; **ASSUNÇÃO, P. D. C.;** Ferreira, V.O; Castro Filho; BARBOSA JUNIOR, F. F.; BRAGA, E. M. LIGAS DE ELEVADA ENTROPIA DE AÇOS DE BAIXA DENSIDADE FABRICADOS POR CW/DCW-GMAW. 2017, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR10201702639, título: "LIGAS DE ELEVADA ENTROPIA DE AÇOS DE BAIXA DENSIDADE FABRICADOS POR CW/DCW-GMAW", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 07/12/2017.
- LOAYZA, CRISTHIAN; **ASSUNÇÃO, P. D. C.;** CARDOSO, DANYELLA CS; BORGES, DIEGO JA; REIS, MARCOS AL; BRAGA, E.M. PRODUTO DE ADIÇÃO NANOESTRUTURADO E SUA TÉCNICA DE INCORPORAÇÃO POR SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO. 2017, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR10201701449, título: "PRODUTO DE ADIÇÃO NANOESTRUTURADO E SUA TÉCNICA DE INCORPORAÇÃO POR SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 04/07/2017.
- FAVACHO, R. G.; CAMPOS JUNIOR, M. V. S.; **ASSUNÇÃO, PAULO D.C.;** LOAYZA, C. R. L.; BRAGA, E. M. TÉCNICA DE SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO BRANCO. 2019, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR10201901440, título: "TÉCNICA DE SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO BRANCO", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 11/07/2019.
- BRAGA, E. M. ; RIBEIRO, R. A.; **ASSUNÇÃO, P. D. C.** Técnica de Manipulação Química, Geométrica e Econômica em Soldagem GMAW, SAW e GTAW de Ligas de Alumínio, Através da Adição de Oxigênio no Gás de Proteção e Metais de Adição na Poça de Fusão. 2016, Brasil. 2016, Brasil.

Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020160007844, título: "Técnica de Manipulação Química, Geométrica e Econômica em Soldagem GMAW, SAW e GTAW de Ligas de Alumínio, Através da Adição de Oxigênio no Gás de Proteção e Metais de Adição na Poça de Fusão. 2016, Brasil., Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 08/01/2016