

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MATERIAIS - PROPEMM

OTÁVIO FAVORETTI DO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS OPERACIONAIS E METALÚRGICOS DO
DEPÓSITO DE ARAMES SÓLIDO E TUBULAR *METAL CORED***

Vitória

2018

OTÁVIO FAVORETTI DO NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS OPERACIONAIS E METALÚRGICOS DO
DEPÓSITO DE ARAMES SÓLIDO E TUBULAR *METAL CORED***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Federal do Espírito Santo como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. André Gustavo de Sousa Galdino

Coorientador: Prof. Dr. Temístocles de Sousa Luz

Vitória

2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MATERIAIS - PROPEMM

OTÁVIO FAVORETTI DO NASCIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Federal do Espírito Santo como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Aprovado em 17 de agosto de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. André Gustavo de Sousa Galdino
Instituto Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Temístocles de Sousa Luz
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Evandro Armini de Pauli
Instituto Federal do Espírito Santo

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que a presente Dissertação de Mestrado pode ser parcialmente utilizada desde que se faça referência à fonte e ao autor.

Vitória, 17 de agosto de 2018.

Otávio Favoretti do Nascimento

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, a meus amados pais, a meu irmão, a minha amada noiva e a todos meus amigos que me ajudaram nesta conquista.

A todos vocês o meu muito obrigado!

Tudo posso Naquele que me fortalece.

Filipenses 4:13

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Ao professor Dr. André Gustavo de Sousa Galdino, pela orientação e auxílio com valiosos conhecimentos para o desenvolvimento deste trabalho, e principalmente por sua amizade.

Ao professor Dr. Temístocles de Sousa Luz, por sua coorientação e auxílio em meu desenvolvimento profissional com valiosos conhecimentos proporcionados durante o desenvolvimento deste trabalho e sobretudo, por sua amizade.

Aos professores e grandes amigos Armando Marques e José Flávio Poças pelo importantíssimo auxílio na realização da usinagem dos corpos de provas.

Aos amigos Marcos Lessa Kugizaki e Lucas Dias Schuller, peças importantes no desenvolvimento prático/teórico deste trabalho, por meio de valiosas sugestões.

Aos amigos Lucas Coelho, Francisco Borges, Matheus Machado pelos momentos de descontração no LabSolda da Ufes.

Aos professores do PROPEMM pelos conhecimentos proporcionados durante a aquisição dos créditos.

Ao grande amigo Bruno Poubel Pimentel, por auxiliar em várias etapas durante o desenvolvimento da parte prática metalúrgica.

A empresa ArcelorMittal pelo auxílio na execução dos ensaios Charpy-V, em especial Maximiliano Aguiar Iwamura e Sirlene Trugilho Perin Passigatti.

Ao amigo Edimar Natali Monteiro, pelos 8 anos de amizade desde a graduação, e pelo auxílio para realização dos ensaios de tração.

Ao Centro Universitário do Espírito Santo por permitir utilizar o equipamento de tração.

E a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

A automação é uma solução para **redução de custos** e aumento de produtividade, enquanto que o desenvolvimento de novos consumíveis auxilia em melhorias nas propriedades mecânicas dos depósitos através de ajustes na composição química e microestrutural. Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo estabelecer um comparativo entre o arame tubular “*metal cored*” Tubrod 70 MC Ultra, com o arame sólido ER 70S6 mediante ~~de~~ avaliações relacionadas com a estabilidade do arco voltaico, aos aspectos econômicos e ~~nas~~ propriedades mecânicas via soldagem automatizada. ~~Utilizou-se os parâmetros~~ do modo sinérgico incorporado a fonte de soldagem, mantendo fixos os valores de tensão e corrente, variando apenas a velocidade de soldagem, resultando assim em três energias de soldagem diferentes, sendo elas 0,8, 1,0 e 1,2 kJ/mm. Na primeira etapa, foram realizadas soldagens do tipo “*bead on plate*” sobre chapas de aço SAE 1020 pelos processos de soldagem convencional e pulsado para **avaliar a estabilidade do arco e as características econômicas**. Posteriormente, por meio das condições de maior estabilidade identificada para a três energias de soldagem investigadas para cada arame/processo de soldagem, realizou-se a soldagem de quatro juntas de topo de aço SAE 1010 para estudar as propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal depositado. Constatou-se por meio de avaliações estatísticas, que a menor energia de soldagem se demonstrou a de maior estabilidade para os dois processos em ambos arames avaliados. Em termos de propriedades mecânicas e metalúrgicas, ambos os arames apresentaram comportamento **similar**, além de atenderem as determinações exigidas pelas normas tomadas como base.

Palavras-chave: Arame tubular. Arame sólido. Estabilidade. Automação.

ABSTRACT

Automation is a solution to reduce costs and increase productivity, while the development of new consumables helps in improvements in the mechanical properties of the deposits through adjustments in the chemical and microstructural composition. In this context, the objective of this work was to establish a comparison between the Tubrod 70 MC Ultra metal-cored wire and the solid wire ER 70 S6 by evaluating the stability of the arc, the economic aspects, and the mechanical properties via automated welding. The parameters of the synergic mode incorporated in the welding source were used, keeping the voltage and current values fixed, varying only the welding speed, resulting in three different welding energies, being 0.8, 1.0 and 1, 2 kJ / mm. In the first step, "bead on plate" type welding was performed on SAE 1020 steel sheets by conventional and pulsed welding processes to evaluate arc stability and economic characteristics. Later, through the condition of greater stability identified for the three welding energies investigated for each wire / welding process, four SAE 1010 steel top joints were welded to evaluate the mechanical and metallurgical properties of the deposited metal. It was verified through statistical evaluations that the lowest welding energy was shown to be of greater stability for the two processes and both wires evaluated. In terms of mechanical and metallurgical properties, both wires showed similar behavior, in addition to the requirements required by the standards taken as the basis.

Key words: Tubular wire. Solid wire. Stability. Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Princípio operacional do processo de soldagem: (a) processo de soldagem GMAW; (b) processo de soldagem FCAW.....	24
Figura 2 – Fluxograma para determinar classificação dos diferentes tipos de arames tubulares.....	25
Figura 3 – Diferença entre os arames sólidos e tubulares na qualidade do metal de solda.....	26
Figura 4 – Classificação da transferência metálica na soldagem GMAW.	27
Figura 5 – Características da transferência metálica do tipo curto-circuito.	29
Figura 6 – Representação da transferência pulsada em um diagrama corrente em função do tempo.....	32
Figura 7 – Influência sobre a corrente e tensão segundo a variação da altura da tocha de soldagem.	35
Figura 8 – Informações gerais obtidas em um histograma gerado pelo software da IMC soldagens por meio da varredura nos sinais de tensão e corrente na soldagem com arame sólido 1.2 ER 70 S6, mistura de argônio com dióxido de carbono (Ar + 15%CO ₂) com transferência por curto-circuito.	37
Figura 9 – Mapa de transferência das regiões de pulsação obtidos por meio de corrente de pico (I_p) versus tempo de pico (t_p).	39
Figura 10 – Esquema de propagação da trinca: (a) ferrita de segunda fase; (b) ferrita acicular.	43
Figura 11 – Microconstituintes no metal de solda: (a) e (b) ferrita acicular (AF), ferrita com segunda fase (FSP) e ferrita primária (PF) para dois arames diferentes; (c) Ferrita acicular nucleando a partir de uma inclusão.	44
Figura 12 – Fluxograma com a metodologia adotada nesse trabalho.....	46
Figura 13 – Dimensões (mm) dos corpos de provas utilizados para os ensaios preliminares e avaliação dos aspectos econômicos.....	48
Figura 14 – Sistema de aquisição de dados portátil (SAP), utilizado para coleta de sinais de tensão e corrente.	49
Figura 15 – Variáveis determinadas por meio do programa em VBA nos sinais dinâmicos de tensão (V) para estabelecer os índices F_{cc} , F_{tm} , R_{cc} e R_{tm}	55
Figura 16 – Variáveis determinadas por meio do programa em VBA nos sinais dinâmicos de corrente (A) e tensão (V) para estabelecer o índice E_1	55
Figura 17 – Critério para retirada de corpos de provas conforme critério QW-463-1.	58
Figura 18 – Etapas para confecção do chanfro: (a) corte com inclinação de 30° por meio de oxicorte portátil; (b) Acabamento superficial por esmerilhamento e limagem manual; (c) Soldagem manual do revestimento do chanfro; (d) Fresagem final com inclinação de 30°.	59
Figura 19 – Máquinas utilizadas nos testes mecânicos: (a) Máquina universal de ensaios Emic E23-10 de 100 kN utilizada no ensaio de dobramento; (b) Máquina universal de ensaios mecânicos Emic E23-300 kN utilizada no ensaio de resistência à tração.	61
Figura 20 – Equipamento de ultrassom utilizado para avaliar a integridade dos cordões de solda.	61

Figura 21 – Representação do corte transversal para retirada das micrografias para realização da quantificação de microconstituintes.....	62
Figura 22 – Equipamento utilizado para a soldagem dos experimentos.	64
Figura 23 – Bancada utilizada para fixação dos corpos de prova.(a) suportes para fixação das chapas para avaliação da estabilidade e aspectos econômicos; (b) suporte para fixação das juntas de topo com 500 mm x 300 mm x 12,3mm.....	64
Figura 24 – Oscilograma para a soldagem de 1200 kJ/m com arame sólido.	66
Figura 25 - Oscilograma para a soldagem de 1000 kJ/m com arame sólido.....	67
Figura 26 – Oscilograma para a soldagem de 800 kJ/m com arame sólido.	67
Figura 27 - Oscilograma para a soldagem de 1200 kJ/m com arame tubular.	68
Figura 28 – Oscilograma para a soldagem de 1000 kJ/m com arame tubular.	69
Figura 29 – Oscilograma para a soldagem de 800 kJ/m com arame tubular.	69
Figura 30 – Relação entre o índice de facilidade de curto-circuito e os fatores arame e energia.	72
Figura 31 – Relação entre o índice de facilidade de transferência metálica e os fatores arame e energia.	73
Figura 32 – Relação entre o índice de facilidade de transferência de carga e os fatores arame e energia.	74
Figura 33 – Relação entre o índice de regularidade de transferência de carga e os fatores arame e energia.	75
Figura 34 – Relação entre o índice de regularidade de curto-circuito e os fatores arame e energia.	76
Figura 35 – Relação entre o índice de regularidade de transferência metálica e os fatores arame e energia.	77
Figura 36 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1200 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame sólido.	79
Figura 37 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1200 kJ/m - Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame sólido.	79
Figura 38 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1000 kJ/m - Oscilogramas de corrente e tensão para o arame sólido.	80
Figura 39 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1000 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame sólido.	80
Figura 40 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 800 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame sólido.	81
Figura 41 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 800 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame sólido.	81
Figura 42 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1200 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame tubular.....	82
Figura 43 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1200 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame tubular.	83
Figura 44 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1000 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame tubular.....	84
Figura 45 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1000 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame tubular.	84
Figura 46 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 800 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame tubular.....	85

Figura 47 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 800 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame tubular.	85
Figura 48 – Relação entre o desvio padrão relativo da energia do ciclo com os fatores arame e energia.	87
Figura 49 – Relação entre a quantidade de pulsos com os fatores arame e energia.	88
Figura 50 – Relação entre o rendimento com os fatores arame e energia para a soldagem por curto-circuito.	89
Figura 51 – Relação entre o rendimento e os fatores arame e energia para a soldagem em modo pulsado.	90
Figura 52 – Respingos ocasionados durante a soldagem em modo pulsado: (a) Arame sólido com energia de 1200 kJ/m; (b) Arame tubular com energia de 1200 kJ/m; (c) Arame sólido com energia de 1000 kJ/m; (d) Arame tubular com energia de 1000 kJ/m; (e) Arame sólido com energia de 800 kJ/m; (f) Arame tubular com energia de 800 kJ/m.	92
Figura 53 – Resultados ensaios de ultrassom em juntas soldadas: (a) junta soldada por curto-circuito com arame tubular; (b) junta soldada em modo pulsado com arame tubular; (c) junta soldada por curto-circuito com arame sólido; (d) junta soldada em modo pulsado com arame sólido.	96
Figura 54 – Macrografias das seções transversais das juntas soldadas com arames sólido e tubular para processos por curto-circuito e modo pulsado.	97
Figura 55 – Micrografias para o metal de solda utilizando arame sólido pelo processo convencional por curto-circuito; (a) região colunar referente ao último passe de solda; (b) zona retransformada. Aumento de 500 X.	99
Figura 56 – Micrografias para o metal de solda utilizando arame sólido pelo processo em modo pulsado; (a) Região colunar referente ao último passe de solda; (b) zona retransformada. Aumento de 500X.	99
Figura 57 – Micrografias para o metal de solda utilizando arame tubular pelo processo convencional por curto-circuito; (a) região colunar referente ao último passe de solda; (b) zona retransformada. Aumento de 500 X.	101
Figura 58 – Micrografias para o metal de solda utilizando arame sólido pelo processo pulsado; (a) região colunar referente ao último passe de solda; (b) zona retransformada. Aumento de 500 X.	101
Figura 59 – Frações volumétricas dos microconstituintes (%) para os arames sólidos e tubular obtidos pelos processos de soldagem convencional por curto- circuito e modo pulsado.	104
Figura 60 – Distribuição das zonas colunar e retransformada no metal de solda referente a soldagens com arames sólido e tubular pelos processos por curto-circuito e pulsado.	105
Figura 61 – Resultados dos ensaios de resistência à tração. (a) e (b) arame tubular – pulsado; (c) e (d) arame sólido – pulsado; (e) e (f) arame sólido – curto- circuito; (g) e (h) arame tubular – curto-circuito.	107
Figura 62 – Ensaio de líquido penetrante para os corpos de provas soldados com arames tubular em modo pulsado. (a) corpo de provas 1-A; (b) corpo de provas 1-B.	108
Figura 63 – Relação entre a energia absorvida ao impacto com os fatores arame e processo de soldagem.	111

Figura 64 – Comportamento dos arames sólido e tubular no ensaio de dobramento lateral. (a) arame tubular-pulsado; (b) arame sólido-pulsado; (c) arame sólido – curto-circuito; (d) arame tubular – curto-circuito..... 112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constituintes presentes no metal de solda depositado na zona fundida de acordo com a classificação sugerida pelo IIV.....	42
Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados para a soldagem dos ensaios preliminares no modo convencional por curto-circuito e pulsado.	47
Tabela 3 – Composição química e propriedades mecânicas dos arames utilizados conforme especificação do fabricante.	65
Tabela 4 – Dados da estabilidade arames sólido e tubular em relação as energias de 1200, 1000 e 800 kJ/m.	70
Tabela 5 – Resultados obtidos na avaliação da estabilidade do arco para a soldagem por curto-circuito para os arames sólido e tubular.....	71
Tabela 6 – Análises estatísticas para as soldagens em corrente pulsada.	86
Tabela 7 – Dados das características econômicas.	89
Tabela 8 – Composição química metal de solda para os arames sólido e tubular....	98
Tabela 9 – Percentagens de microconstituintes referentes à análise quantitativa no último passe de solda.....	103
Tabela 10 – Dados dos ensaios de resistência à tração para as soldagens com arames sólido e tubular pelos processos convencional por curto-circuito e pulsado.....	106
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência ao impacto para os arames sólido e tubular.	109

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Abnt	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	-	Ferrita acicular
Aisi	-	American Iron and Steel Institute
Ar	-	Argônio
ASM	-	Centímetro American Society for Metals
Asme	-	American Society of Mechanical Engineers
CA	-	Corrente Alternada
CC	-	Corrente Contínua
CO ₂	-	Dióxido de carbono
CP's	-	Corpos de provas
d _a	-	Diâmetro do arame
Dbcp	-	Distância do bico de contato à peça
E	-	Energia dissipada para reabertura do arco elétrico (W)
F	-	Frequência
F _{caw}	-	Flux Cored Arc Welding
F _{cc}	-	Índice de facilidade de curto-circuito
FE	-	Índice de facilidade de transferência de carga
FP	-	Ferrita primária
FS	-	Ferrita de segunda fase
F _{tm}	-	Índice de facilidade de transferência metálica
GE	-	General Electric
G _{maw}	-	Gas Metal Arc Welding
HV	-	Hardness Vickers
I	-	Corrente
I _b	-	Corrente de base
Ifes	-	Instituto Federal do Espírito Santo
IIW	-	International Institute of Welding
I _p	-	Corrente de pulso
MAG	-	Metal Active Gas
M _f	-	Massa final da chapa (com cordão de solda)
M _i	-	Massa inicial da chapa (sem cordão de solda)

MIG	- Metal Inert Gas
MO	- Microscopia óptica
ms	- Massa de arame consumida
P_1	- Potência instantânea de reabertura do arco
P_r	- Potência de referência
R_{cc}	- Índice de regularidade de curto-circuito
RE	- Índice de regularidade de transferência de carga
R_{tm}	- Índice de regularidade de transferência metálica
SAP	- Sistema de Aquisição de dados Portátil
T	- Período médio de transferência da gota (s)
t	- Tempo de arco aberto
t_{ab}	- Tempo médio de arco aberto (s)
T_b	- Tempo de base
t_{cc}	- Tempo médio de curto-circuito (s)
TP	- Teach Pendant
T_p	- Tempo de pico
U	- Tensão
U_1	- Tensão de reabertura do arco
U_a	- Tensão Média
Ufsc	- Universidade Federal de Santa Catarina
Ugpp	- Uma Gota Por Pulso
-Ugpp	- Menos que uma gota por pulso
+Ugpp	- Mais que uma gota por pulso
U_r	- Tensão de referência
VBA	- Visual Basic Editor – programa do Microsoft Excel®
v_s	- Velocidade de soldagem
ZAC	- Zona Afetada pelo Calor
ZF	- Zona Fundida
ZL	- Zona de ligação
ρ_a	- Densidade linear do arame (g/m)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	-	Amperes
kJ	-	Quilo-joule
∅	-	Diâmetro
V	-	Volt
σ	-	Desvio padrão
g	-	Grama (medida de massa)
cm	-	Centímetro
kJ/cm	-	Quilo-joule por centímetro
Kg/h	-	Quilograma por hora
ms	-	Milissegundo
J	-	Joules
W	-	Watts
μm	-	Micrômetro
°C	-	Graus Celsius
L/min	-	Litros por minuto
MPa	-	Megapascal
%	-	Porcentagem
kN	-	Quilo-newton
s	-	Segundo
mm		Milímetro
m	-	Metro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	20
2 OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3 REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1 SOLDAGEM GMAW E SOLDAGEM FCAW	23
3.2 SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR <i>METAL CORED</i>	25
3.3 TRANSFERÊNCIA METÁLICA	27
3.3.1 Transferência por curto-circuito	28
3.3.2 Transferência globular	30
3.3.3 Transferência goticular (aerossol)	31
3.3.4 Transferência Metálica em Modo Pulsado	32
3.4 PARÂMETROS QUE AFETAM A SOLDAGEM	33
3.4.1 Gás de Proteção	33
3.4.2 Tensão no Arco	34
3.4.3 Distância do bico de contato à peça (DBCP)	34
3.4.4 Velocidade de Soldagem	35
3.5 ESTABILIDADE DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	36
3.5.1 Estabilidade da transferência por curto-circuito	36
3.5.2 Estabilidade na soldagem em Modo Pulsado	38
3.6 ASPECTOS ECONÔMICOS	39
3.7 METALURGIA DA SOLDAGEM.....	39
3.7.1 Energia de Soldagem	39
3.7.2 Microestruturas em juntas Soldadas	41
3.7.2.1 Microestrutura na zona fundida	41
3.7.2.2 Microestrutura da zona afetada pelo calor	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1 ENSAIOS PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	47
4.1.1 Corpos de prova utilizados nos ensaios preliminares	48
4.1.2 Sinais de corrente e tensão	49
4.1.3 Avaliação dos aspectos econômicos	50
4.1.4 Avaliação da estabilidade na soldagem em transferência por curto-circuito	51
4.1.4.1 Índices de transferência de metal.....	51
4.1.4.2 Índices de transferência de carga	52
4.1.5 Avaliação da estabilidade na soldagem em modo pulsado	56
4.2 ASPECTOS METALÚRGICOS	58
4.2.1 Modelo de junta soldada para retirada de corpos de provas	58
4.2.1.1 Ensaio de Resistência Tração	59
4.2.1.2 Ensaio de Impacto.....	60
4.2.1.3 Ensaio de dobramento	60
4.2.2 Ensaio de Ultrassom	61
4.2.3 Análise Metalográfica	62

4.4 EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA SOLDAGEM	63
4.4.1 Bancada para fixação das amostras.....	64
4.5 CONSUMÍVEIS	65
4.5.1 Gás de proteção	65
4.5.2 Metais de adição.....	65
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1 ESTABILIDADE DO ARCO	66
5.1.1 Estabilidade em Curto-Circuito.....	66
5.1.2 Avaliação da Estabilidade do Arco em Corrente Pulsada	78
5.2 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS.....	88
5.3 QUALIDADE DAS JUNTAS SOLDADAS	95
5.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA DO METAL DE SOLDA	97
5.4.1 Análise Macrográfica	97
5.4.2 Análises Micrográficas	98
5.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	106
5.5.1 Ensaio de tração.....	106
5.5.2 Ensaio de Impacto.....	109
5.5.3 Ensaio de dobramento guiado	112
6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114
REFERÊNCIAS.....	118
APÊNDICE A	124
APÊNDICE B	126
APÊNDICE C	127

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Dentre os diversos processos de fabricação, a soldagem é um dos métodos mais importantes e utilizados para união dos materiais, tendo ampla aplicação em vários setores, tais como automobilístico, aeronáutico, naval, metalmeccânico, construção civil, etc. Entre todos os processos de soldagem utilizando arco elétrico, o processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), também conhecido como MIG/MAG, é um dos processos mais utilizados por apresentar alta produtividade quando comparado a outros processos.

Todavia esse processo de soldagem apresenta limitações quanto aos aspectos metalúrgicos do depósito. Essas limitações são atribuídas ao fato dos metais de adição, conhecidos como “arames sólidos”, apresentarem certa restrição na composição química. Outra limitação do processo é a complexidade das variáveis presentes no processo, pois exige maior conhecimento do operador para poder haver boa estabilidade operacional.

Na busca pelo aprimoramento de algumas propriedades específicas, principalmente aquelas relacionadas às características metalúrgicas do depósito, relacionadas à tenacidade e à resistência mecânica, surgiu o processo de soldagem com eletrodos tubulares. A soldagem com eletrodos tubulares se assemelha ao processo GMAW no que se refere às características operacionais, porém seu diferencial está na questão do arame ser constituído por uma fita metálica na forma de tubo, tendo seu núcleo preenchido por materiais chamados de fluxos. Os fluxos presentes no interior dos arames tubulares podem ser classificados em: *flux cored*, compostos por materiais minerais; e *metal cored*, compostos por materiais metálicos. Dessa maneira, a soldagem com arames tubulares possui características dos processos a arco que utilizam fluxos ou revestimentos, que auxiliam no ajuste da composição química do depósito desejado, com produtividade do processo de soldagem GMAW.

A utilização de arame tubulares ainda é pouco difundida nas indústrias, embora já existam estudos que comprovem que os arames tubulares têm alta produtividade e até mesmo melhor estabilidade operacional quando comparado ao uso dos arames sólidos. Um dos principais motivos que implica no menor emprego desses

consumíveis é atribuído ao maior custo em relação aos arames sólidos. Além do mais, há poucas informações na literatura que façam estudo comparativo da produtividade desses dois tipos de consumíveis.

Logo, o trabalho em questão se justifica através de uma abordagem comparativa entre dois arames comerciais inseridos em uma mesma classe metalúrgica, sendo estes o arame sólido ER 70S6 e o arame tubular *metal cored* Tubrod 70MC Ultra, por meio de avaliações com relação ao comportamento operacional em relação à estabilidade do arco voltaico, aos aspectos econômicos dos depósitos, além de avaliações metalúrgicas através de correlações entre microestruturas e propriedades mecânicas após soldagem com os dois tipos de arame.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os aspectos operacionais e metalúrgicos de dois arames comerciais (arame sólido – ER 70S6 e tubular tipo *metal cored* – Tubrod 70MC Ultra) utilizando a soldagem automatizada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para se alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram perseguidos:

- i. Avaliar a estabilidade do arco elétrico durante o processo, buscando uma correlação do comportamento de cada consumível;
- ii. Analisar o comportamento em relação ao depósito obtido por meio de ensaios de tração, dobramento, impacto e ultrassom, tomando como base normas e procedimentos de uso em fabricação e união de peças;
- iii. Verificar o desenvolvimento microestrutural em termos de zona fundida para os dois arames utilizados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

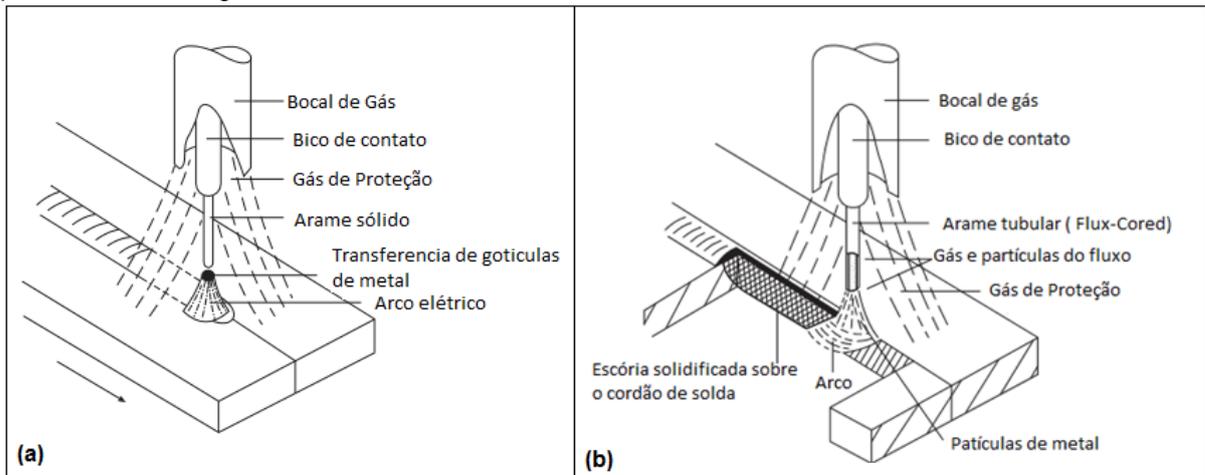
3.1 SOLDAGEM GMAW E SOLDAGEM FCAW

A união dos materiais no processo de soldagem GMAW ocorre por meio de um arco elétrico estabelecido entre um arame metálico juntamente com uma atmosfera de gás para efetuar a proteção da área da poça de fusão contra a contaminação atmosférica. Os gases podem ser inertes (normalmente argônio, hélio ou misturas de ambos) ou ativos (normalmente CO₂, ou misturas de argônio com CO₂). No Brasil, este processo muitas vezes é denominado MIG ou MAG, onde o diferencial entre os dois processos é feito por meio do gás de proteção empregado, ou seja, no caso do emprego de gases inertes, o processo é considerado soldagem MIG e para gases ativos é denominada soldagem MAG (NORRISH, 2006; SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Por sua vez, o processo de soldagem *Flux Cored Arc Welding* (FCAW) consiste em um processo no qual a união dos materiais ocorre por meio de um arco elétrico estabelecido entre uma peça a ser soldada e um eletrodo alimentado continuamente. A utilização da soldagem com arames tubulares (FCAW) vem aumentando, pois este processo possui vantagens sobre o processo de soldagem *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) e GMAW.

Por meio dos processos de soldagem GMAW e FCAW, é possível soldar grande variedade de materiais, tais como aços carbono, aços inoxidáveis entre outras ligas metálicas, o que faz com que esses processos sejam amplamente utilizados em indústrias do seguimento petrolífero. Outro aspecto importante é a alta produtividade que estes processos apresentam, principalmente devido à possibilidade de automação dos equipamentos (BARBEDO, 2011). A soldagem FCAW é bem similar ao do processo GMAW em relação à parte operacional (equipamentos e princípio de funcionamento). A Figura 1 ilustra o princípio dos dois processos mencionados anteriormente.

Figura 1 – Princípio operacional do processo de soldagem: (a) processo de soldagem GMAW; (b) processo de soldagem FCAW.



Fonte: Adaptado de Norrish, 2006.

Soeiro Junior, Luz e Brandi (2015) citam que o processo de soldagem por arames tubulares é um processo que reúne ao mesmo tempo características do processo de soldagem GMAW e SMAW, pois os fluxos contidos no interior do arame permitem grande versatilidade para auxiliar no ajuste da composição química do cordão de solda.

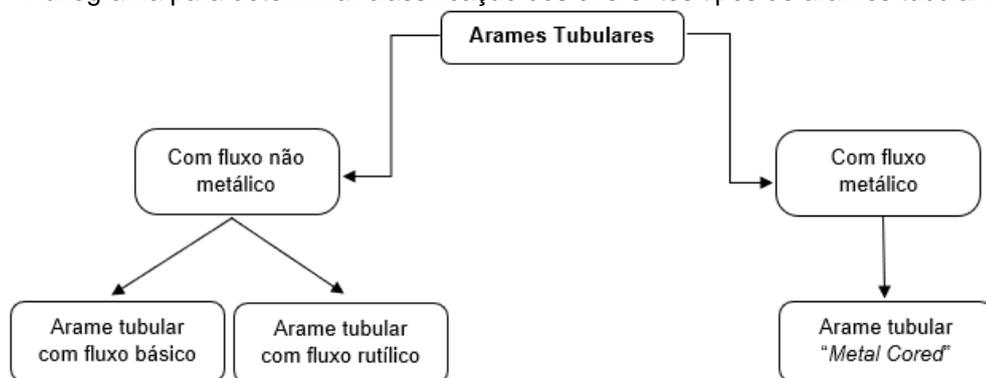
Norrish (2006) descreve que os arames tubulares consistem em uma chapa dobrada com seu núcleo preenchido com a combinação de fluxos minerais e/ou pós metálicos. Não obstante, Kurtulmus, Bilici e Catalgol (2015) afirmam que o núcleo do arame tubular é composto por elementos formadores de escória, **desoxidantes**, estabilizadores para o arco elétrico e por elementos de liga. Ainda de acordo com os autores, o processo de soldagem FCAW apresenta diversas vantagens em sua utilização em relação ao processo GMAW e SMAW, a saber: excepcional produtividade, boa qualidade de solda, grande ~~profundidade de~~ penetração, redução na quantidade de respingos, altas taxas de deposição e **redução de custos**.

O processo de soldagem FCAW pode ser realizado de maneira automática ou semiautomática e apresentar duas maneiras para fornecer proteção na área da poça de fusão: com ou sem proteção externa de gases.

Costa (2014) cita que os fluxos presentes no interior dos arames tubulares podem ser classificados em dois tipos: *metal cored* (quando o fluxo interno é composto por pós

metálicos) e em *flux cored* (quando o fluxo interno é composto por pós não metálicos). Ainda de acordo com o autor, os arames do tipo *metal cored* apresentam elevadas taxas de deposição de material, baixa formação de respingos, pequenas produções de fumos e baixo índice difusível de hidrogênio; enquanto a soldagem com *flux cored* ocasiona a formação de escória, que auxilia na proteção da poça de fusão contra a contaminação atmosférica e na soldagem fora de posição. O fluxograma apresentado na Figura 2 ajuda na interpretação de como podem ser classificados os arames tubulares.

Figura 2 – Fluxograma para determinar classificação dos diferentes tipos de arames tubulares.



Fonte: Adaptado de Norrish, 2006.

3.2 SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR *METAL CORED*

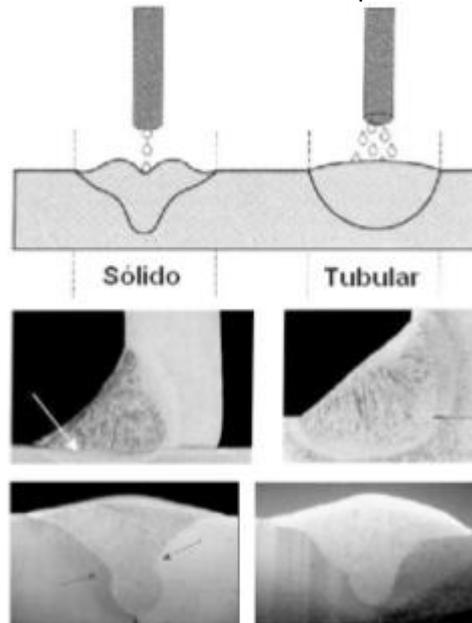
Segundo os autores Margarita *et al* (2013), os arames tubulares *metal cored* apresentam vantagens quando comparados aos arames sólidos, pois apresentam altas taxas de deposição, (eficiência na deposição de 95%), pouca formação de escória sobre a superfície do cordão e baixa geração de respingos.

Na soldagem com arames sólidos, o metal é transferido para a poça de fusão de forma muito localizada, com as gotas atravessando o arco ao longo de uma linha de centro em alta frequência, uma atrás da outra. Isso permite que as gotas penetrem uma área de projeção muito pequena na poça de fusão, o que resulta em um cordão com penetração estreita e profunda (FORTES, 2003).

Para a soldagem empregando arames tubulares, o arco elétrico se comporta de maneira totalmente diferente da dos arames sólidos, sendo bem mais largo, ou seja,

a área de projeção das gotas é maior, produzindo um cordão mais largo e com penetração rasa, pois a distribuição da energia de soldagem é mais uniforme. A Figura 3 ilustra a transferência metálica na qualidade da solda utilizando os dois tipos de arame mencionados anteriormente (FORTES, 2003).

Figura 3 – Diferença entre os arames sólidos e tubulares na qualidade do metal de solda.



Fonte: Adaptado de Fortes, 2003.

Uma diferença marcante entre a soldagem utilizando arames sólidos para a soldagem utilizando arames tubulares são as densidades de corrente aplicadas, pois os arames do tipo sólido utilizam menores densidades em relação aos arames tubulares. O fato de se utilizarem maiores densidades de corrente na soldagem com arames tubulares é atribuído ao fluxo interno contido nos arames, pois os mesmos restringem a passagem de corrente apenas na parte metálica que comporta o fluxo, pois esses possuem pouca ou nenhuma condutividade elétrica. Essa restrição à passagem da corrente faz com que ocorra aumento da densidade de corrente e, conseqüentemente, eleva a taxa de deposição para os arames tubulares (MOREIRA, 2008).

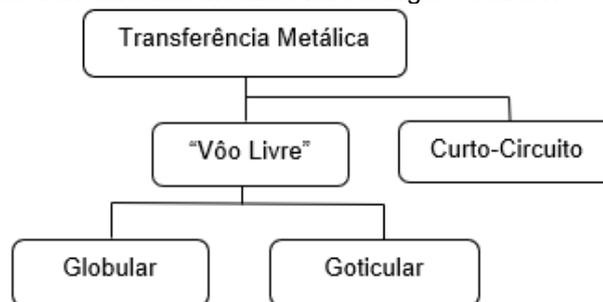
De acordo com Araújo (2004), quando os arames tubulares do tipo *metal cored* são empregados na soldagem, é possível trabalhar com maiores velocidades e correntes de soldagem em relação aos arames sólidos. Os autores French e Bosworth (1995) explicam que são utilizadas altas densidades de correntes e tensão para os arames

tubulares, pois normalmente são utilizadas misturas ricas em argônio para efetuar a proteção do cordão, característica esta que auxilia realizar a transferência metálica do tipo goticular. Ainda de acordo com os autores, esse tipo de arame é utilizado apenas para altos valores de corrente, uma vez que quando são empregados valores menores, a soldagem fora de posição fica comprometida devido às gotas serem lançadas em tamanhos maiores.

3.3 TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Os autores Subramaniam *et al* (1998) explicam que fatores, tais como: posição de soldagem; dimensões da penetração da solda; estabilidade da poça de fusão; e perda de partículas metálicas, são afetados de acordo com a natureza da transferência metálica do eletrodo consumível para o metal de base. As transferências metálicas nas soldagens GMAW ou FCAW podem ser divididas em três tipos de acordo com os parâmetros de soldagem empregados e o tipo de gás utilizado. Esses três tipos de transferência são classificados em curto-circuito, globular e goticular (*spray*) de acordo com o tamanho e características da gota fundida. A Figura 4 apresenta um organograma resumindo os principais tipos de transferência metálica.

Figura 4 – Classificação da transferência metálica na soldagem GMAW.



Fonte: Adaptado de Norrish, 2006.

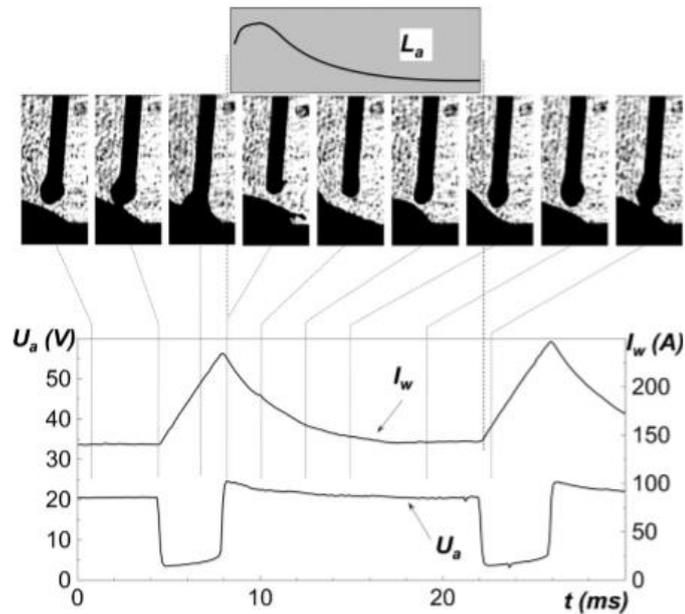
Os trabalhos desenvolvidos por Norrish (2006) e Nascimento (2005) destacaram que algumas técnicas têm sido utilizadas para determinar o tipo de transferência metálica, tais como utilização de vídeo, de filmagens em alta velocidade, por meio de sinais sonoros e por oscilogramas gerados por meio de sinais de tensão e corrente.

3.3.1 Transferência por curto-circuito

Meneses, Gomes e Scotti (2014) relatam que a transferência por curto-circuito é um dos modos operacionais mais utilizados na indústria (algumas vezes sendo identificada como soldagem GMAW convencional). Ainda segundo esses autores, o principal problema encontrado quando se emprega este tipo de transferência metálica na soldagem é a perda de material por meio de respingos, atribuída à regulagem não otimizada dos parâmetros de soldagem a saber: tensão aplicada no arco, indutância e o tipo de gás de proteção utilizado.

Para ocorrer transferência do tipo curto-circuito, deverá haver contato elétrico entre a gota em formação e a poça de fusão ~~antes do descolamento~~ da mesma. Neste momento o arco elétrico se extingue devido ao curto-circuito. A transferência da gota para a poça de fusão acontece à medida que surge uma “ponte de metal líquido” na qual a gota é absorvida para a poça de fusão por meio de tensões superficiais. O desprendimento ocorre por meio da redução na resistência elétrica na ponte, ocasionando o aquecimento do arame por meio do efeito Joule e também devido à insuficiência de forças eletromagnéticas para contrair a ponte de metal. Dessa forma a ponte é estrangulada por meio da combinação dos efeitos da tensão superficial e do aumento gradativo das forças eletromagnéticas (por meio da estrição do arame), fato que corresponde ao aumento da corrente na fase final (SCOTTI, PONOMAREV e LUCAS, 2012). A Figura 5 ilustra como ocorre a transferência do tipo curto-circuito.

Figura 5 – Características da transferência metálica do tipo curto-circuito.



Fonte: Adaptado de Scotti, Ponomarev e Lucas, 2012.

Utilizando a Figura 5 e os resultados dos estudos realizados por Bálamo *et al.* (2000), é possível compreender como ocorre a transição de tensão na transferência por curto-circuito em que os autores explicam que, durante a formação da gota, a tensão oscila em um valor médio (U_a) durante o seu desenvolvimento, porém tende a zero quando toca a poça de fusão, devido à extinção do arco. No entanto, logo em seguida retorna para uma tensão de pico por meio da “reignição” do arco.

Rodrigues (2005) cita que este de tipo de transferência é utilizado normalmente para valores de corrente abaixo de 200 A, a qual poderá variar com o tipo e diâmetro do arame aplicado. Em virtude das correntes utilizadas, a poça de fusão apresenta um “arco frio” possibilitando assim a soldagem de chapas mais finas e fora de posição, além da soldagem de passes de raiz.

A utilização de gases que apresentem reatividade química controlada com o metal de solda torna-se importante para a soldagem dos aços de uma forma geral, por proporcionar mais estabilidade no arco voltaico. Nesse sentido, para a transferência por curto-circuito, os principais tipos de gases utilizados para a soldagem de aços são as misturas em diversas proporções de argônio com dióxido de carbono (Ar - CO₂) e/ou a utilização do dióxido de carbono puro (NORRISH, 2006; SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Ainda em relação aos gases de proteção usados durante a soldagem por curto-circuito, os autores Scotti e Ponomarev (2008) comentam que a utilização atmosferas ricas em dióxido de carbono favorecem a soldagem por curto-circuito (aumento da tensão superficial), enquanto que Norrish e Cuiuri (2013) enfatizam que embora uma proteção gasosa rica em dióxido de carbono apresente um bom desempenho na soldagem por curto-circuito, a mesma também apresenta uma certa faixa de operação, onde qualquer oscilação fora desta região poderá levar a produção de um elevado nível de respingos por causa da formação inadequada dos curtos-circuitos. Ainda de acordo com os autores, uma solução é a utilização de misturas com maiores teores de argônio e menores proporções de dióxido de carbono.

3.3.2 Transferência globular

Os autores Scotti, Ponomarev e Lucas (2012) explicam que na transferência globular são aplicados valores baixos a moderados de corrente; no entanto, valores de tensão são de altos para moderados, evitando a ocorrência de curtos-circuitos. Em estudos realizados por Rezende *et al* (2011) para determinar a regulagem ideal para valores de tensão na soldagem por meio de transferência por curto-circuito, os autores utilizaram em seus experimentos valores de tensões entre 16 V a 25 V com corrente de 130 A e verificaram que, para menores valores de tensão, a transferência aconteceu por curto-circuito; no entanto, quando os valores de tensão foram iguais ou maiores do que 22 V, a deposição do material apresentou característica de transferência globular devido à baixa frequência de curtos-circuitos.

Neste tipo de transferência são produzidas gotas com grandes larguras, normalmente de 1,5 a 3 vezes o diâmetro do arame utilizado e apresenta baixa transferência metálica para a poça de fusão, em torno de 1 a 10 gotas por segundo. A transferência da gota ocorre por meio de forças gravitacionais, pois à medida que a gota vai aumentando de tamanho há um aumento de massa, fazendo com que ocorra o seu desprendimento uma vez que esse acréscimo de massa supera as forças de tensões superficiais que atuam para impedir o destacamento das mesmas (SCOTTI, PONOMAREV e LUCAS, 2012; NORRISH, 2006).

3.3.3 Transferência goticular (aerossol)

Segundo ASM (1991), a transferência metálica do tipo goticular é caracterizada pela utilização de altos níveis de correntes, normalmente acima de um valor crítico chamado de “corrente de transição” a qual dependerá do tipo e diâmetro dos arames. Valores de corrente aplicados abaixo deste valor crítico caracterizam transferência do tipo globular, em virtude de terem algumas gotas por segundo. Outro fator limitante para esta transferência é o tipo de gás de proteção, pois para se caracterizar uma transferência goticular, devem ser utilizadas misturas ricas em argônio. Neste sentido, os autores Scotti e Ponomarev (2008) mencionam que misturas de argônio com baixos teores de oxigênio e dióxido de carbono facilitam a transferência goticular, enquanto que valores acima de 18-20% de dióxido de carbono tendem a dificultar a transferência goticular e favorecer a transferência por curto-circuito em virtude do aumento da tensão superficial.

O fato desse modo de transferência metálica trabalhar com corrente acima do valor da corrente de transição do arame proporciona altas taxas de transferência metálica e um arco elétrico altamente estável, ocasionando por exemplo, menor perda de material por não haver produção de respingos durante a execução da solda. Outra característica dessa transferência comparada com as do tipo globular e curto-circuito é o tamanho da gota, que normalmente é lançada para a poça de fusão com tamanho menor que o diâmetro do arame (KIM e EAGAR, 1993; ANZEHAEE e HAERI, 2011).

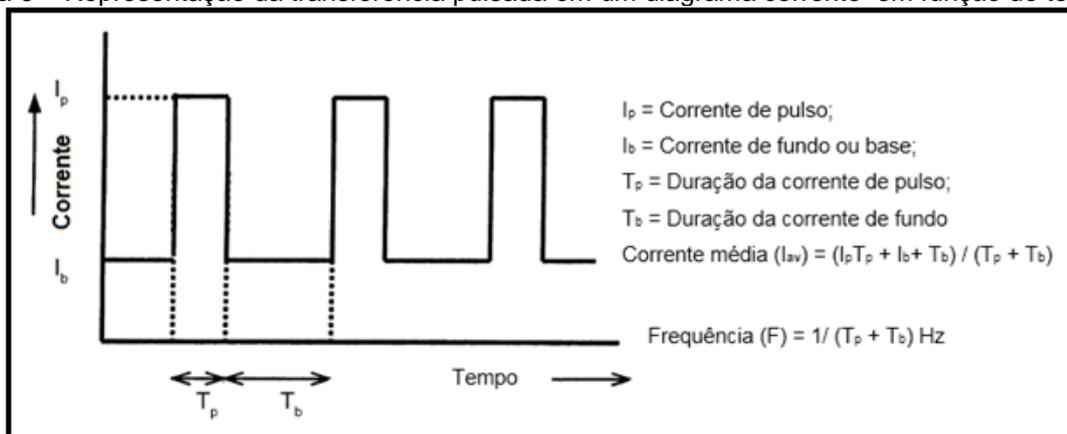
Segundo ASM (1991), quando é utilizado o modo de transferência goticular, um fator a ser levado em consideração é a espessura a ser soldada, pois normalmente esse tipo de técnica é aplicada em materiais mais espessos por trabalhar normalmente em valores relativamente altos de corrente. Outro ponto limitante em aplicar esta técnica são as posições de soldagem que podem ser realizadas, pois essa técnica apresenta altas taxas de deposição de material, produzindo grande volume de material na poça de fusão. Esse volume de material não é suportado por meio de tensões superficiais nas posições de soldagem vertical e sobre cabeça. Os autores Scotti, Ponomarev e Lucas (2012) afirmam que este modo de transferência é limitado à posição de soldagem plana.

As limitações em soldar materiais com pequena espessura com transferência goticular vêm sendo supridas com o avanço de novos equipamentos de soldagem, com os quais é possível obter “transferência controlada” através da regulagem de parâmetros de programação (SCOTTI, PONOMAREV e LUCAS, 2012; PALANI e MURUGAN, 2006).

3.3.4 Transferência Metálica em Modo Pulsado

De acordo com Norrish (2006), ASM (1991), na soldagem utilizando corrente pulsada, da formação da gota até sua transferência para a poça de fusão, tem-se dois momentos: primeiro ocorre uma corrente de fundo com baixos valores (como, por exemplo, o intervalo de corrente entre 50 A e 80 A) para a manutenção do arco elétrico; num segundo momento, uma corrente de pulso com maior intensidade, gerando forças eletromagnéticas que proporcionam o desprendimento da gota, fazendo com que a mesma seja projetada para a poça de fusão. A Figura 6 representa a natureza do sinal de corrente no modo pulsado.

Figura 6 – Representação da transferência pulsada em um diagrama corrente em função do tempo.



Fonte: Adaptado de Palani e Murugan, 2006.

Analisando a Figura anterior é possível notar que na soldagem em modo pulsado estão envolvidos diversos parâmetros para a promoção de um arco estável e com cordões de solda com boa qualidade, dentre os quais podem ser destacados: a corrente de pulso (I_p); corrente de fundo, também chamada de corrente de base (I_b); duração do pulso (T_p); duração da corrente de fundo (T_b); e a frequência do pulso.

Os autores Palani e Murugan (2006) salientam que fatores, tais como: o tipo de material de base; o tipo de mistura gasosa utilizada na proteção do cordão de solda; diâmetro e material de que são constituídos os arames, muitas vezes dificultam a seleção dos parâmetros de soldagem para realizar o modo pulsado, em razão de cada um dos elementos citados anteriormente apresentar efeitos diferentes nas características do arco elétrico.

3.4 PARÂMETROS QUE AFETAM A SOLDAGEM

Rodrigues (2005) cita que variáveis como a tensão; velocidade de alimentação do arame; o gás empregado para proteção contra contaminação atmosférica; distância do bico de contato à peça (DBCP) e velocidade de soldagem afetam as características do cordão de solda.

3.4.1 Gás de Proteção

Processos de soldagem como o GMAW ou com arames tubulares que não são do tipo auto protegidos, necessitam de um fluxo de gás em torno dos metais de base/metals de adição para garantir boa qualidade no metal de solda depositado graças a proteção fornecida à poça de fusão e as gotas transferidas (SCOTTI e PONOMAREV, 2008). Não obstante, Norrish (2006) salienta que os gases utilizados nas operações de soldagem desenvolvem duas funções, a qual destaca como funções primárias, a proteção do cordão de solda e o auxílio na produção de um do arco voltaico estável, e como funções secundárias mas de grande importância para as operações de soldagem, destaca a influência dos gases sobre a geometria dos cordões e nas propriedades mecânicas.

Os gases de proteção influenciam às propriedades mecânicas dos processos de soldagem GMAW e com arames tubulares por exemplo, devido a utilização de atmosferas ativas promover a formação de óxidos por meio da combinação com outros elementos, atuando assim no desenvolvimento microestrutural do metal de solda (NORRISH, 2006; SCOTTI e PONOMAREV, 2008). Ainda nesse contexto, os autores Olsoien, Liu e Olson (1996) enfatizam que baixas concentrações de oxigênio na atmosfera protetora em soldagens de aços baixo carbono, favorecem a

predominância de ferrita de segunda fase (alinhada e não alinhada) na zona fundida. Em relação à estabilidade do arco voltaico, os gases exercem funções sobre a mesma em virtudes das propriedades físico-químicas, em especial o potencial de ionização, à condutividade térmica e o potencial de oxidação (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Em um estudo realizado por Modenesi *et al* (2011), os autores realizaram a soldagem em chapas de aço carbono e verificaram que o aumento na proporção de dióxido de carbono na atmosfera protetora, ou seja, 100% de CO₂ em relação à utilização de uma mistura com 75% de argônio-25% de CO₂ afetou as variáveis corrente e tensão médias, ou seja, proporcionava redução na corrente média e aumento na tensão média.

Liao e Chen (1999) ressaltam ainda que dependendo do tipo de gás de proteção empregado, podem ocorrer modificações na microestrutura do material soldado, como por exemplo, redução na formação de ferrita na soldagem devido o aumento no teor de carbono, em virtude da utilização de gases com maiores teores de dióxido de carbono.

3.4.2 Tensão no Arco

Segundo Rodrigues (2005), a tensão é um importante parâmetro a ser levado em consideração durante a execução de uma solda, pois influencia diretamente nas características do comprimento do arco, que por sua vez influencia na taxa de penetração e na produção de respingos. Os autores Mohd, Parvez e Kumari (2013) explicam que maiores valores de tensão produzem cordões de solda mais largos devido ao aumento no comprimento do arco que faz com que ocorra grande expansão em sua base.

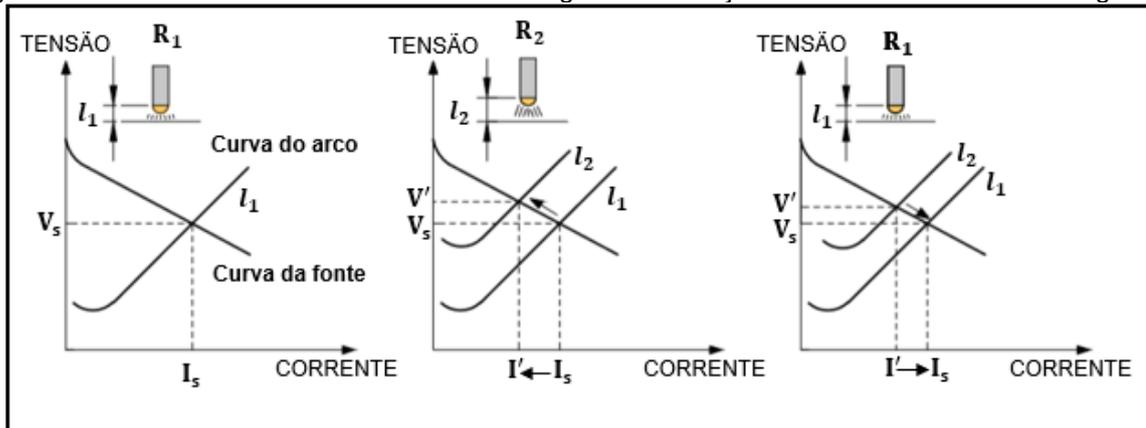
2.4.3 Distância do bico de contato à peça (DBCP)

A distância entre o bico de contato e a peça a ser soldada, também denominado de *stick-out*, é uma variável que também tem forte influência sobre as propriedades do arco elétrico durante a execução da solda. Segundo alguns autores Kim e Na (1995),

o aumento da distância do bico de contato em relação à peça de trabalho provoca aumento no comprimento do arco e redução na corrente de soldagem.

Os fenômenos que ocorrem no comportamento do arco de acordo com a variação na distância do bico de contato à peça considerando uma fonte de tensão constante (neste caso a corrente de soldagem não é regulável, mas sim os valores de tensão) é ilustrado na Figura 7. Na Figura 7 (a) é estipulado valores de tensão e corrente de soldagem para uma distância ideal l_1 , resultando, assim, em uma quantidade de energia disponível para fundir o arame igual a $V_s I_s + (R_1 I')^2$. No entanto, quando há aumento da distância para um comprimento l_2 , Figura 7 (b), há mudança na energia de fusão do arame para $V' I' + (R_2 I')^2$, acarretando um decréscimo no valor da corrente (I').

Figura 7 – Influência sobre a corrente e tensão segundo a variação da altura da tocha de soldagem.



Fonte: Adaptado de Wainer et al,2013.

3.4.4 Velocidade de Soldagem

De acordo com de Marques *et al*, (2007), velocidades de soldagem baixas podem ocasionar efeitos metalúrgicos indesejados na junta soldada em razão da quantidade de calor cedido à peça, ou seja, a aplicação de menores velocidades de soldagem proporciona maiores valores de energia de soldagem, além de aumentar os custos do processo.

3.5 ESTABILIDADE DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

A estabilidade no processo de soldagem está pautada em uma correlação entre as forças que interagem no arco voltaico e geralmente é conduzida pela análise dos sinais adquiridos durante o processo de soldagem (LANCASTER, 1987; LUKSA, 1996). A utilização dos valores médios tanto da corrente quanto da tensão, são comumente empregados para esse fim (QUINN *et al.*, 1999; ADOLFSSON *et al.*, 1999). Scotti e Ponomarev (2008), consideram que uma condição de soldagem é estável quando é garantida a estabilidade entre o arco elétrico e a transferência metálica simultaneamente. Mota (1998) afirma que a estabilidade do arco interfere diretamente no produto final, pois pode influenciar em fatores como respingos, consumo, produção, rendimento de deposição, na entrada de gás atmosférico na poça de fusão e nas propriedades mecânicas da zona fundida.

Scotti e Ponomarev (2008) salientam que para haver uma operação de soldagem com um bom desempenho operacional, parâmetros como velocidade de soldagem, DBCP, velocidade de alimentação do arame, tipo de gás, corrente e tensão devem ser convenientemente ajustados. Todavia, os autores frisam que os parâmetros descritos anteriormente não possuem a mesma proporcionalidade e destacam que por meio da análise das curvas de tensão e de corrente é possível avaliar os fenômenos que ocorrem durante a transferência metálica.

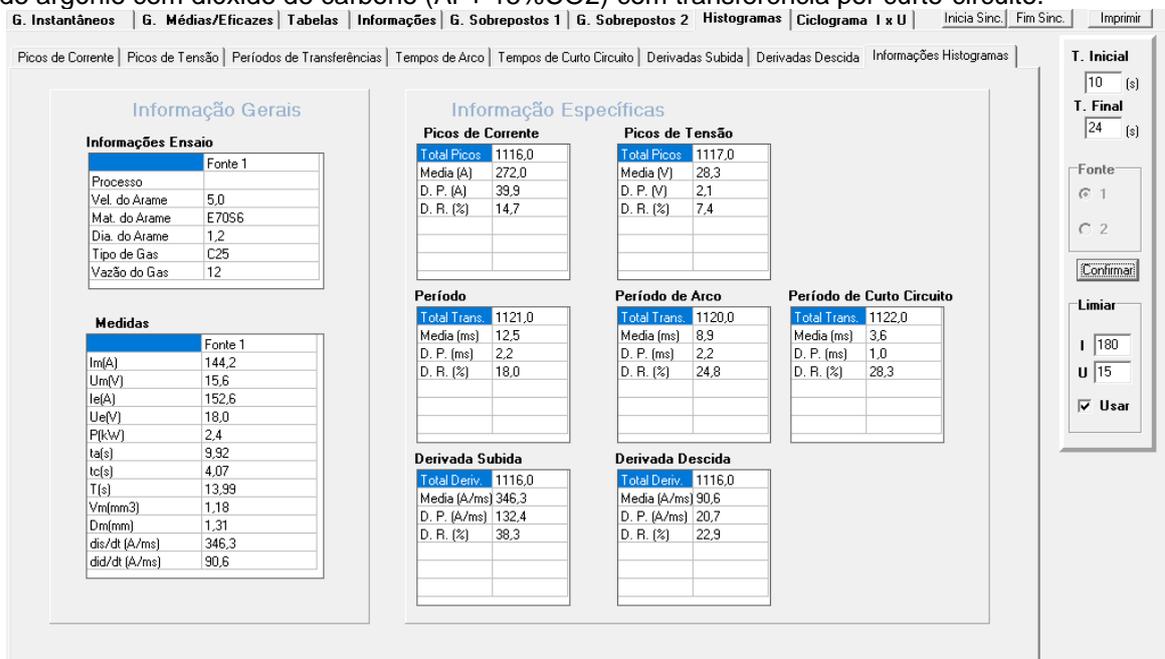
3.5.1 Estabilidade da transferência por curto-circuito

A estabilidade de um processo de soldagem pode ser afetada pela maneira que ocorre a transferência metálica do material fundido da ponta do eletrodo à poça de fusão. Desta forma, muitos estudos vêm sendo realizados para poder determinar a estabilidade durante dada condição de soldagem por meio da avaliação em seus sinais dinâmicos. Nesse sentido, alguns pesquisadores avaliam as características estatísticas dos sinais durante o tempo de arco aberto para medir a estabilidade do arco, avaliando os desvios padrões, por exemplo, da frequência de curto-circuito (HERMANS e OUDEN, 1999; SCOTTI e PONOMAREV, 2008; MOTA, 1998; REZENDE *et al.*, 2011). Outros pesquisadores apontam para a variação de tempo entre a transferência da gota da ponta do eletrodo à poça de fusão, ou seja, o período

de transferência metálica (LIU e SIEWENT, 1989) ou ainda o desvio padrão dos valores máximos de corrente (LUCAS, 1985). Os autores Rezende *et al* (2011) realizaram estudos para encontrar valores ideais de tensão para soldagem GMAW utilizando a transferência por curto-circuito e avaliaram a estabilidade do processo por meio de um critério chamado de índice Vilarinho de regularidade de transferência por curto-circuito, determinado por intermédio dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito e de arco aberto.

Outra ferramenta de auxílio na avaliação da transferência por curto-circuito é por meio dos histogramas dos quais podem ser obtidas informações como picos de corrente e tensão, tempos de arco, tempos de curto-circuito e de transferência metálica. A Figura 8 ilustra quais são as principais informações que podem ser extraídas de um histograma por meio de um sistema de aquisição de dados utilizados para os diferentes processos de soldagem.

Figura 8 – Informações gerais obtidas em um histograma gerado pelo software da IMC soldagens por meio da varredura nos sinais de tensão e corrente na soldagem com arame sólido 1.2 ER 70 S6, mistura de argônio com dióxido de carbono (Ar + 15%CO₂) com transferência por curto-circuito.



Fonte: Autor, 2018.

Souza e Ferraresi (2013) realizaram um estudo para avaliar a regularidade da transferência em curto-circuito nos processos GMAW/FCAW e verificaram que a aplicação de maiores valores de tensão na soldagem GMAW proporcionou

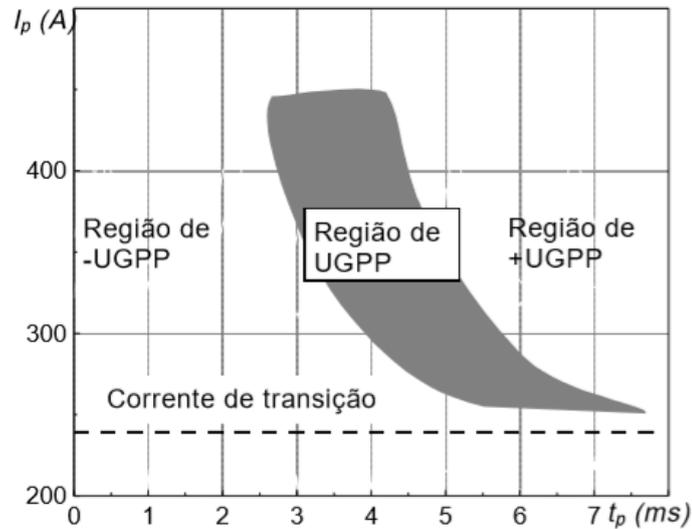
decréscimo na regularidade da transferência metálica por curto-circuito, e atribuem que esta redução ocorre devido ao aumento no período de curto-circuito, o que leva ao acréscimo do desvio padrão do mesmo.

3.5.2 Estabilidade na soldagem em Modo Pulsado

Scotti e Ponomarev (2008) relatam que a soldagem empregando o modo pulsado é considerada universalmente estável quando a transferência metálica se enquadra dentro de uma característica chamada de região “uma gota por pulso” (UGPP), na qual a gota transferida deve possuir diâmetro próximo ao do eletrodo. Ainda de acordo com os autores, é importante levar em consideração, para uma soldagem estável, os tempos de pulso utilizados, pois maiores valores para este parâmetro ocasionam perda na estabilidade para o modo pulsado.

Outro aspecto importante para fornecer uma condição estável quando é empregada a soldagem em modo pulsado é a energia de pulso, pois quando são utilizados valores muito acima da corrente de transição, pode ocasionar instabilidade devido ao destacamento de mais do que uma gota por pulso (+UGPP), assim como a aplicação de valores muito baixos de energia também podem não fornecer uma soldagem com boa estabilidade, por implicar na necessidade de mais do que um pulso (-UGPP) para ocasionar o destacamento da gota (MIRANDA, 2002). A Figura 9 apresenta um mapa de transferência com as possíveis regiões que podem ser encontradas na soldagem com corrente pulsada utilizando arame de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro, gás de proteção constituído mistura de argônio com dióxido de carbono (Ar + 5%CO₂) e DBCP de 20 mm.

Figura 9 – Mapa de transferência das regiões de pulsação obtidos por meio de corrente de pico (I_p) versus tempo de pico (t_p).



Fonte: Miranda, 2002.

3.6 ASPECTOS ECONÔMICOS

Para Mota (1998), o desempenho econômico para proporcionar um enchimento em uma junta soldada está relacionado à seleção do consumível de soldagem. Todavia, devem ser levadas em consideração outras razões tais como as variáveis do processo de soldagem, o modo de transferência metálica e a composição química do arame utilizado. Ainda de acordo com o autor, a característica econômica a partir da verificação de um consumível na soldagem a arco voltaico é estabelecida por meio de consumo (C), de produção (P) e do rendimento de deposição (R).

3.7 METALURGIA DA SOLDAGEM

3.7.1 Energia de Soldagem

A energia de soldagem ou aporte térmico (*heat input*) é outro aspecto importante a ser levado em consideração nos processos de soldagem, pois as microestruturas da junta soldada podem ser afetadas por meio de transformações de fases que ocorrem devido ao alto aporte térmico ocasionado pelos diversos processos de soldagem (KOU, 2003). A energia de soldagem é definida de acordo com a Equação 1, apresentada a seguir.

$$H = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

H = energia de soldagem (J/cm);

η = Rendimento térmico do processo (%);

V = Tensão do arco (V);

I = Corrente de soldagem (A);

v = Velocidade de soldagem (cm/min).

Os autores kumar e Shahi (2011), realizaram estudos por meio da soldagem do aço inoxidável AISI 304 variando a energia de soldagem em três níveis, classificadas em baixa, média e alta. Por meio de análises metalográficas, relataram que para maiores aportes térmicos o tamanho e o espaçamento das dendritas aumentaram na zona fundida. Ainda de acordo com os autores, essa variação no tamanho dos grãos pode ser atribuída ao fato de que quando são utilizadas baixas energias de soldagem, a taxa de resfriamento é extremamente abrupta devido ao gradiente térmico que se tem no metal de solda e a zona fundida, e desta forma, os grãos não tem tempo para crescerem.

Nowacki, Sajek e Matkowski (2016) realizaram a soldagem por meio do processo GMAW em juntas de aço S1100L com um único passe de soldagem, variando os valores de energia em dois níveis, no qual consideraram um nível mais baixo (6 kJ/cm) e um mais alto (7 kJ/cm); em seguida realizaram análises de micrografia, ensaios de dureza e resistência ao impacto. No resultado de dureza, verificaram heterogeneidade entre os valores medidos, obtendo maiores valores para a zona afetada pelo calor (430 HV) e valores similares no metal de base e na zona fundida (310-350 HV). Esses valores são atribuídos à formação de grãos de martensita na zona afetada pelo calor (ZAC) e de ferrita supersaturada de carbono na zona fundida, verificados por análise metalográfica, independentemente da quantidade de energia de soldagem utilizada.

3.7.2 Microestruturas em juntas Soldadas

Nascimento (2005) descreveu diversos estudos que correlacionam o desempenho das propriedades mecânicas do metal de solda, principalmente a tenacidade, com a microestrutura obtida. O autor apresentou os resultados obtidos nesses estudos e concluiu que os mesmos são convincentes e que auxiliam a concluir que as propriedades de resistência ao impacto são afetadas devido às microestruturas obtidas nos aços baixo carbono e baixa liga quando uma alta taxa de resfriamento foi imposta na junta soldada.

Uma junta soldada realizada em um único passe é constituída de por três regiões: a zona fundida (ZF), que é composta pelo material fundido, pela zona de ligação (ZL) que é formada por uma pequena região onde ocorre a fusão parcial do metal de base junto da zona fundida e por fim a última região, na qual ocorrem todas as transformações microestruturais devido ao alto aporte térmico ocasionado pela solda, denominada zona afetada pelo calor (ZAC) (KOU, 2003).

As microestruturas da ZAC são determinadas de acordo com as temperaturas máximas e pela taxa de resfriamento as quais o material está exposto, por sua vez, a estrutura de solidificação da ZF é determinada por meio dos gradientes térmicos e pelas taxas de solidificação e resfriamento no limite líquido-sólido da poça de fusão (ASM, 1991).

3.7.2.1 Microestrutura na zona fundida

A orientação cristalina existente no metal de base atua na solidificação da poça de fusão, pois os novos grãos da zona de fusão crescem de acordo com a orientação cristalina e alinhamento dos cristais presentes na linha de fusão no metal de base. Esse processo de iniciação do crescimento dos grãos da zona fundida é chamado de crescimento epitaxial. Os tamanhos dos grãos da zona afetada pelo calor influenciam diretamente nos grãos da zona fundida, uma vez que o crescimento epitaxial (que ocorre especificamente na região da ZAC para a ZF) gera uma estrutura colunar grosseira de grãos de ferrita na zona fundida (NASCIMENTO, 2010; KOU,2003).

De acordo do Kou (2003), a partir da linha de fusão o crescimento dos grãos na zona fundida ocorre por meio de um crescimento competitivo, ou seja, os grãos tendem a crescer segundo a direção imposta pelo gradiente máximo de temperatura da poça de fusão. Além do crescimento competitivo, os novos grãos também se formam conforme direção preferencial de crescimento.

Sarma, Karasev e Jönsson (2009) ressaltam que os produtos da transformação da austenita em ferrita nos metais de solda, durante o resfriamento são influenciados tanto pela taxa de resfriamento, quanto a composição química. Ainda de acordo com esses autores, cada grão da transformação da austenita – ferrita contém dois ou mais microconstituintes microestruturais.

Segundo Colpaert (2008), o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) desenvolveu por meio de análises por microscopia óptica uma forma para identificar os principais microconstituintes do metal depositado no metal de solda. Baseado nessa classificação, a Tabela 1 apresenta os principais microconstituintes que podem ser encontrados no metal de solda de aços ferríticos.

Tabela 1 – Constituintes presentes no metal de solda depositado na zona fundida de acordo com a classificação sugerida pelo IIW.

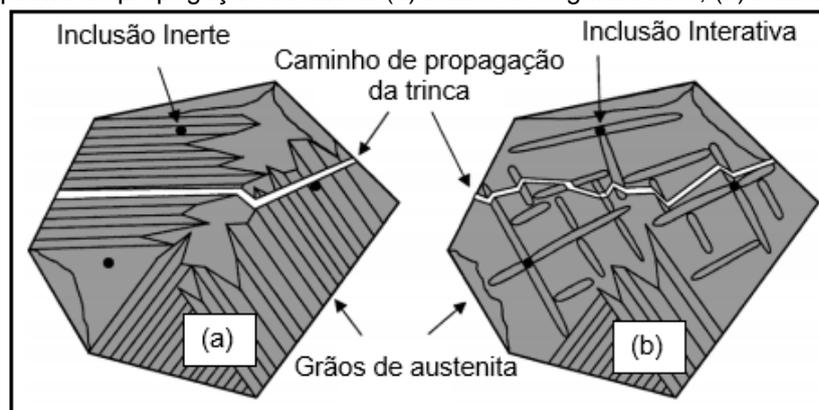
Categoria principal do constituinte	Subcategoria do constituinte	Abreviação
Ferrita primária		PF
	Ferrita de contorno de grão	PF (G)
	Ferrita intragranular	PF (I)
Ferrita com segunda fase		FS
	Ferrita com segunda fase não-alinhada	FS (NA)
	Ferrita com segunda fase alinhada	FS (A)
	Placas laterais de ferrita (<i>side plates</i>)	FS (SP)
	Bainita	FS (B)
	Bainita superior	FS (UB)
	Bainita inferior	FS (LB)
Ferrita acicular		AF
Agregado ferrita carboneto		FC
	Perlita	FC (P)
Martensita	Martensita em ripas	M (L)
	Martensita maclada	M (T)

Fonte: Colpaert, 2008.

Para os microconstituintes apresentados na Tabela 1, a ferrita acicular torna-se um dos mais desejáveis nos depósitos, por proporcionar alta resistência mecânica aliada à boa tenacidade na junta soldada. Outros microconstituintes como a ferrita com

segunda fase e a ferrita de contorno de grão não são muito desejáveis por proporcionar perda da tenacidade (SARMA, KARASEV e JÖNSSON 2009; JURICA *et al.* 2016; MOORE, WALLACH e HOWSE 2003). Segundo Moore, Wallach e Howse (2003), a ferrita com segunda fase se torna indesejável pois possui tamanho da “colônia” com grãos que oferecem pouca resistência à propagação da trinca. A redução da tenacidade em virtude da ferrita com segunda fase se dá porque esse microconstituente se forma a partir nucleação de um contorno de grão em formas de placas paralelas, facilitando o caminho para propagação da trinca (SARMA, KARASEV e JÖNSSON 2009; JURICA *et al.* 2016). A Figura 10 ilustra o comportamento da propagação da trinca em relação a grãos com ferrita com segunda fase e com ferrita acicular.

Figura 10 – Esquema de propagação da trinca: (a) ferrita de segunda fase; (b) ferrita acicular.



Fonte: Adaptado de Sarma, karasev e Jönsson, 2009.

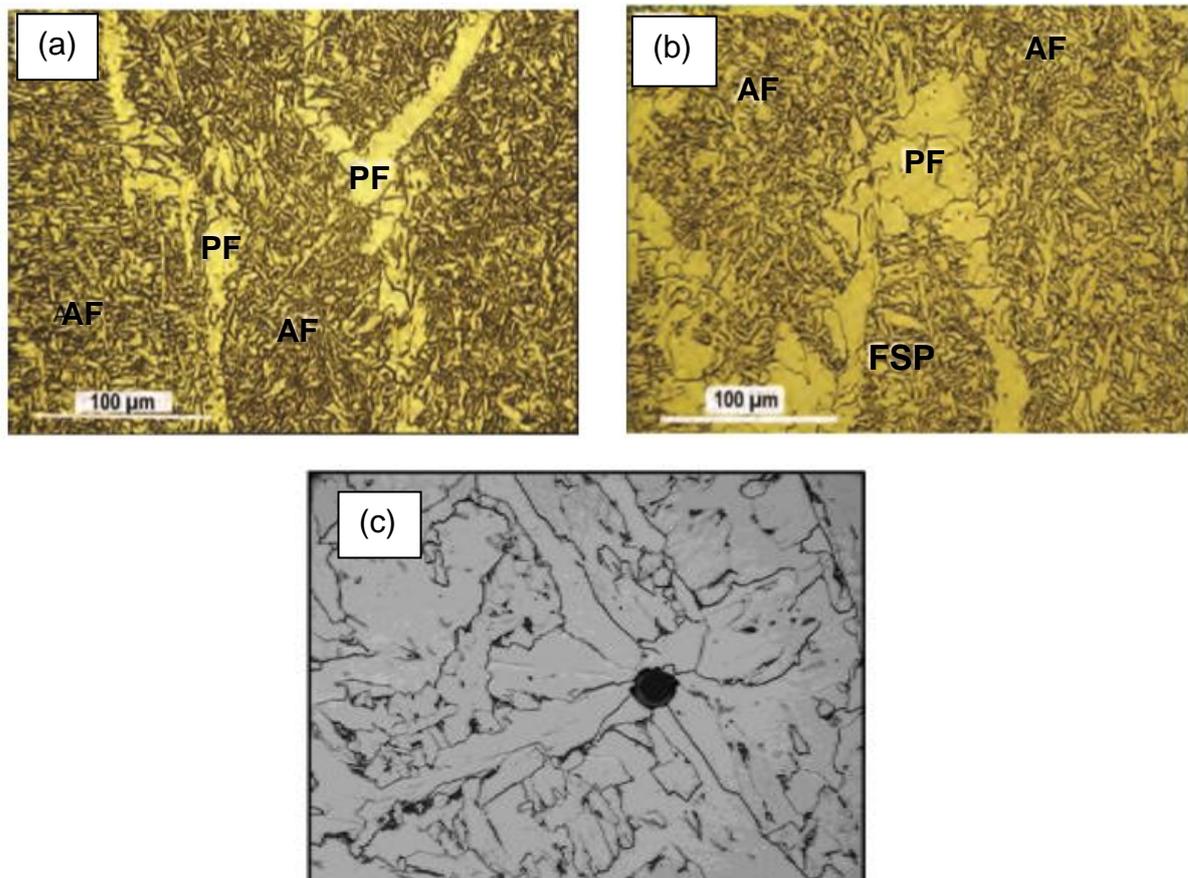
Diferente do que é averiguado na Figura 10 (a), a nucleação da ferrita acicular não se promove a partir do contorno de grão da austenita, mas sim por meio de inclusões intergranulares no grão austenítico (BABU e DAVID, 2002). Não obstante, os autores Onsoien, Liu e Olson (1996) relatam que, na soldagem GMAW, a combinação do oxigênio presente na atmosfera protetora com elementos de liga presentes no arame tais como manganês e silício formam óxidos que fluem sobre o cordão como escória ou ficam retidos no interior do metal de solda formando pontos de inclusão e desempenhando um papel importante na microestrutura final do metal de solda.

Após ocorrida a nucleação, a ferrita acicular apresenta-se com morfologia de grãos “finos” e interlaçados, promovendo alta resistência mecânica e boa tenacidade (MOORE, WALLACH e HOWSE, 2003; JURICA *et al.* 2016). Novamente observando

a Figura 10 (b), é possível observar que a formação da ferrita acicular promove uma melhoria da tenacidade, quando comparado à formação ferrítica com segunda fase, devido à orientação cristalográfica aleatória que esse microconstituente apresenta, dificultando a propagação do caminho de trincas. A ferrita com segunda fase e de contorno de grãos apresentam menores densidades de deslocamento em relação à da ferrita acicular (SARMA; KARASEV; JÖNSSON, 2009).

A Figura 11 apresenta algumas micrografias com os principais microconstituintes presentes em metais de solda para em aços baixo carbono.

Figura 11 – Microconstituintes no metal de solda: (a) e (b) ferrita acicular (AF), ferrita com segunda fase (FSP) e ferrita primária (PF) para dois arames diferentes; (c) Ferrita acicular nucleando a partir de uma inclusão.



Fonte: Adaptado de Sarma, Karasev e Jönsson, 2009; Beidokhti e Pouriamanesh, 2015.

3.7.2.2 Microestrutura da zona afetada pelo calor

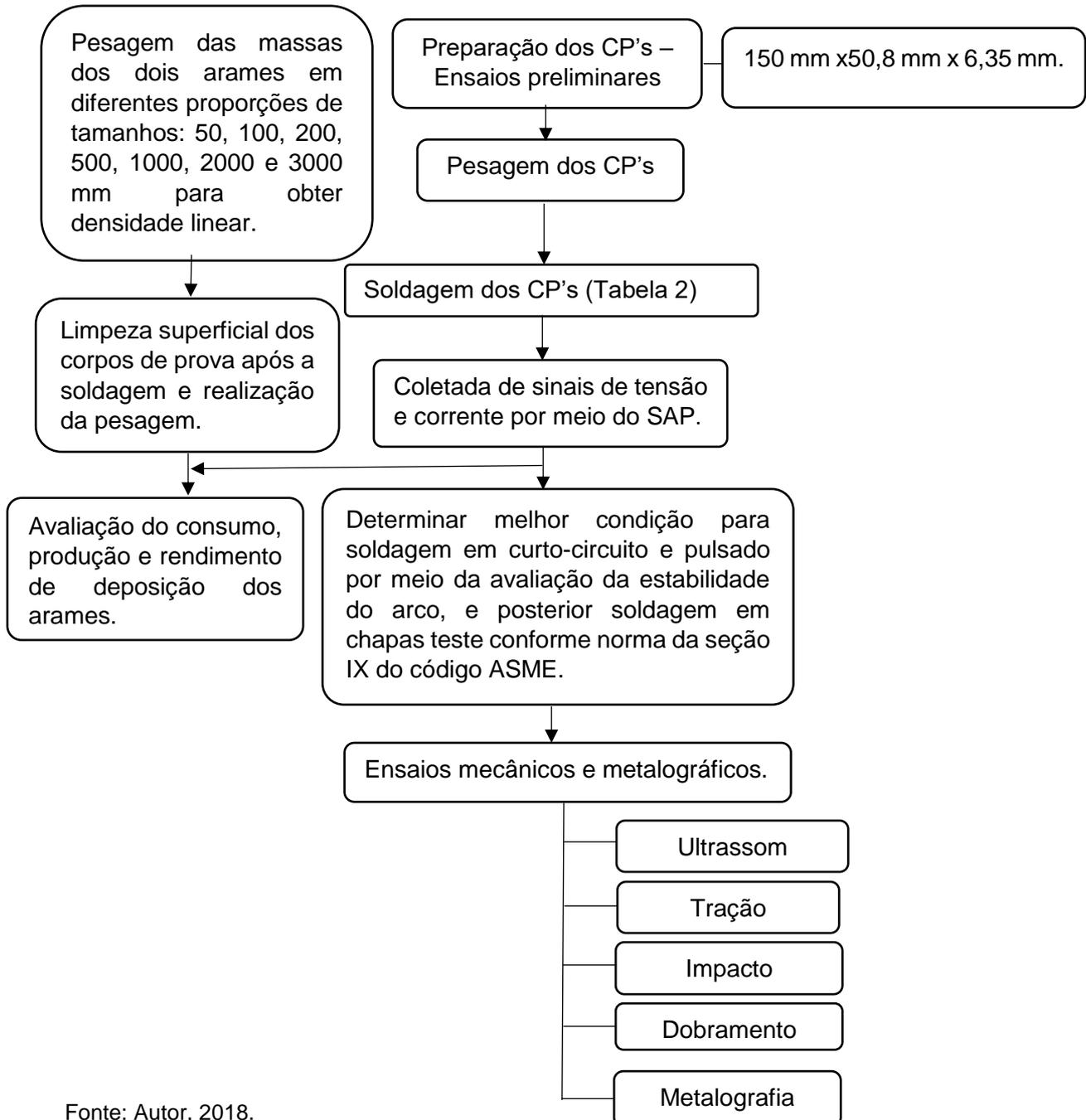
Colpaert (2008) explica que obter materiais soldados com boa resistência mecânica e simultaneamente elevada tenacidade não é uma tarefa fácil. Ainda de acordo com o

autor, o controle de tenacidade na zona afetada pelo calor por ser feito por duas formas: por meio do controle de crescimento dos grãos austeníticos, principalmente nos locais de maior temperatura; e por meio do aumento da energia absorvida na fratura através da formação de ferrita intragranular, obtida por nucleação de ferrita no interior do grão austenítico.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor compreensão da metodologia utilizada, o fluxograma apresentado na Figura 12 representa os artifícios utilizados para o desenvolvimento ao decorrer de toda pesquisa.

Figura 12 – Fluxograma com a metodologia adotada nesse trabalho.



Fonte: Autor, 2018.

4.1 ENSAIOS PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

O trabalho em questão é dividido em duas partes: a primeira parte envolve a operacionalidade; enquanto a segunda parte envolve a avaliação dos aspectos metalúrgicos das soldas efetuadas com os diferentes consumíveis empregados na pesquisa.

Inicialmente buscou-se determinar uma faixa de parâmetros ideais para realizar a soldagem dos corpos de provas, baseado na norma de qualificação de procedimentos da seção IX do código ASME (2017). Como a soldagem utilizada nesse trabalho é automatizada (por meio de robô de soldagem), os parâmetros de soldagem (especificamente corrente e tensão) foram obtidos com o *software* do próprio equipamento, que utiliza controle sinérgico para manter estável o arco elétrico. Foram utilizados os valores padrões existentes no banco de dados do robô da marca Panasonic, modelo TM -1400WGIII, para se desenvolver uma Tabela no Microsoft Excel® (Apêndice A), na qual por meio dos valores de corrente, tensão, DBCP, tipo de material (aço carbono/inoxidável) presentes no bando de dados e variando diferentes velocidades de soldagem, é possível obter diferentes níveis de energia de soldagem. Os parâmetros selecionados para o trabalho estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados para a soldagem dos ensaios preliminares no modo convencional por curto-circuito e pulsado.

Processo	d_a (mm)	DBCP (mm)	Corrente I (A)	Tensão U (V)	v_s (m/min)	H(kJ/m)
Curto-circuito	1,2	15	150	16,8	0,13	1200
					0,15	1000
					0,19	800
Pulsado	1,2	15	150	23,8	0,18	1200
					0,21	1000
					0,27	800

Fonte: Autor, 2018.

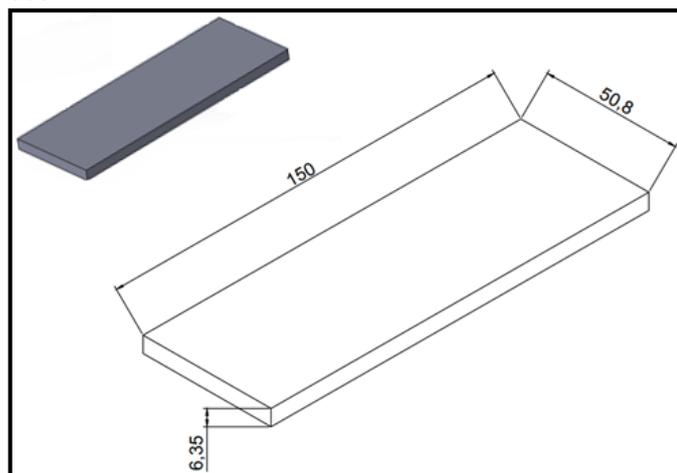
Para cada condição indicada na Tabela 2 foram realizadas três soldagens em corpos de provas distintos em uma ordem aleatória, para aumentar a confiabilidade nos resultados obtidos durante a avaliação da estabilidade do arco elétrico. Os valores de tensão (U) e corrente (I) foram fixados para cada processo (curto-circuito e pulsado)

e variou-se a energia de soldagem em três níveis (1200 kJ/m, 1000 kJ/m e 800 kJ/m) para ambos processos adotados, admitindo-se variação de $\pm 20\%$, tomando-se como referência a energia de 1000 kJ/m.

4.1.1 Corpos de prova utilizados nos ensaios preliminares

Os corpos de prova utilizados nos ensaios para determinar a melhor faixa operacional (maior estabilidade do arco voltaico) e também para realizar a comparação dos aspectos econômicos entre os arames sólido ER 70S6 e “*metal cored*” Tubrod 70MC Ultra (consumo, produção e rendimento de deposição) foram confeccionados a partir de barras chatas de aço ABNT 1020 com dimensões de 150 mm x 50,8 mm x 6,35 mm (Figura 13). Os corpos de prova obtidos foram submetidos à limpeza superficial por meio de escova de aço rotativa para retirar incrustações na superfície, como, por exemplo, carepas da laminação provenientes do processo de fabricação do aço, além de possíveis camadas de óxido presentes. Posteriormente realizou-se pesagem dos corpos de prova em uma balança de precisão com resolução de 0,01 g da marca Shimadzu do Brasil, modelo BL 3200 H, pertencente ao Laboratório de Plasma Aplicado e Engenharia de Superfícies do Instituto Federal do Espírito Santo - campus Vitória.

Figura 13 – Dimensões (mm) dos corpos de provas utilizados para os ensaios preliminares e avaliação dos aspectos econômicos.



Fonte: Autor, 2018.

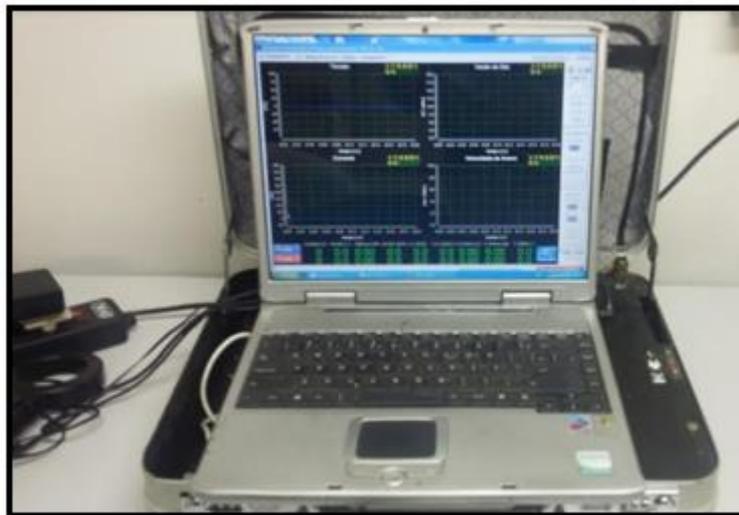
Após a etapa de limpeza e pesagem, foram desenvolvidos cordões de solda sobre as superfícies dos corpos de prova, no sentido longitudinal com comprimento de 100 mm.

O posicionamento do ângulo da tocha permaneceu em 90° com deslocamento sem oscilação da tocha.

4.1.2 Sinais de corrente e tensão

Para coletar os sinais de tensão e corrente empregou-se o sistema de aquisição de dados portátil (SAP), apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Sistema de aquisição de dados portátil (SAP), utilizado para coleta de sinais de tensão e corrente.



Fonte: Autor, 2018.

O SAP foi desenvolvido pelo IMC/Laprosolda – UFSC, e por meio de sua placa de aquisição e processamento é possível obter diferentes tipos de dados durante a operação de soldagem. Para este trabalho, o sistema limitou-se apenas na aquisição dos dados de tensão e corrente, visando avaliar a estabilidade do arco voltaico no modo de soldagem convencional por curto-circuito por meio de informações como correntes e tensões médias, tempo de curto-circuito, tempo médio de curto-circuito, período médio de transferência de gota, desvios padrões do período de transferência e tempo de curto-circuito, além de dados para a avaliação da estabilidade no modo pulsado.

4.1.3 Avaliação dos aspectos econômicos

A avaliação dos aspectos econômicos para este trabalho foi realizada de acordo com metodologia utilizada por Mota (1998), na qual o autor avaliou, além das características metalúrgicas e propriedades mecânicas, os aspectos econômicos de diferentes tipos de arames tubulares de acordo com o consumo (C), a produção (P) e o rendimento de deposição (R).

O consumo (C) consiste na massa de arame fundido por unidade de tempo, sendo calculado de acordo com a Equação (2).

$$C = \rho_a \cdot \frac{L}{t} \quad (\text{kg/h}) \quad (2)$$

onde. ρ_a – densidade linear do arame (g/m); L- comprimento de arame consumido (m); t - tempo de soldagem (s).

A produção(P) consiste na massa do consumível integrada ao metal de base, por unidade de tempo, sendo obtido de acordo com a Equação (3).

$$P = 3,6 \cdot \frac{(M_f - M_i)}{t} \quad (\text{kg/h}) \quad (3)$$

onde M_f – massa final da chapa (g); M_i – massa inicial da chapa (g); t - tempo de soldagem (s).

O rendimento de deposição (R) consiste na razão da massa de arame integrada ao metal de base pela massa de arame consumida durante a operação de soldagem, considerando a mesma unidade de tempo. O rendimento está representado pela Equação (4).

$$R = \frac{(M_f - M_i)}{m_s} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

onde M_f – massa final da chapa (g); M_i – massa inicial da chapa (g); m_s – massa de arame consumida, correspondente a $\rho_a \times L$ (g).

4.1.4 Avaliação da estabilidade na soldagem em transferência por curto-circuito

Para avaliação da estabilidade dos parâmetros para soldagem por curto-circuito apresentados na Tabela 2, utilizou-se a metodologia desenvolvida por Farias (1993) e também replicada por Mota (1998), a qual consiste na avaliação dos sinais dinâmicos capturados durante a soldagem por meio de índices. Ainda nesse sentido, Farias (1993) relata que a estabilidade do arco é dependente de duas condições para que a mesma se suceda durante dada condição de soldagem, as quais destaca a transferência de metal e de carga. Nesse sentido, os índices utilizados por Farias (1993) e Mota (1998) são apresentados a seguir, sendo divididos em índices para avaliação de transferência de metal e em índices de transferência de carga elétrica.

4.1.4.1 Índices de transferência de metal

Os índices de transferência de metal são obtidos por meio da varredura nos sinais dinâmicos de tensão coletados durante a soldagem, sendo divididos em índices de facilidade, que remetem a um aspecto de produtividade do processo através por meio dos valores medidos para os tempos médios de curtos-circuitos (t_{cc}) e períodos médios de transferência das gotas (T). Por si só estes índices não conseguem relacionar a estabilidade do processo em relação a transferência metálica, então por meio dos inversos dos desvios padrões dos valores dos tempos médios de curto-circuito (t_{cc}) e períodos médios de transferência das gotas (T) medidos, é possível expressar a regularidade da transferência metálica. As seguir, são expostos os índices utilizados na determinação de transferência metálica:

- **Índices de facilidade de transferência metálica**

Pode ser avaliada tanto para soldagens em corrente alternada (CA), como para corrente contínua (CC), sendo analisada por meio da facilidade para ocorrência de curto-circuito (F_{cc}) e transferência da gota no curto-circuito (F_{tm}) (FARIAS,1993; (MOTA,1998). A seguir são apresentadas as equações utilizadas para determinar os índices mencionados anteriormente.

$$F_{cc} = \frac{1}{T} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$F_{tm} = \frac{1}{t_{cc}} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. (6)}$$

onde:

T – período médio de transferência da gota, (s);

t_{cc} – tempo médio de curto-circuito (s).

É importante salientar que quanto maiores os valores obtidos nos índices F_{cc} e F_{tm} , maior é a facilidade de ocorrer curto-circuito, e respectivamente a transferência metálica por curto-circuito (FARIAS, 1993; MOTA, 1998).

- **Índices de regularidade de transferência metálica**

Pode ser avaliada tanto para soldagens em corrente alternada (CA) como para corrente contínua (CC), sendo determinada por meio do inverso dos desvios padrões do período médio de transferência da gota e tempo médio de curto-circuito por intermédio dos índices R_{cc} e R_{tm} , descritos a seguir:

$$R_{cc} = \frac{T}{\sigma \cdot T} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$R_{tm} = \frac{t_{cc}}{\sigma \cdot t_{cc}} \quad \text{Eq. (8)}$$

onde:

$\sigma \cdot T$ - desvio padrão do período médio de transferência (ms);

$\sigma \cdot t_{cc}$ – desvio padrão do tempo de curto-circuito (ms);

Da mesma forma que na facilidade de transferência, quando maiores os valores do índices R_{cc} e R_{tm} , maior a regularidade da transferência metálica (FARIAS, 1993).

4.1.4.2 Índices de transferência de carga

Farias (1993) salienta que a avaliação dos índices de transferência de carga para soldagens utilizando corrente contínua é pautada nas incidências logo após a

ocorrência do curto-circuito. A seguir são expostos os índices propostos para determinação de transferência de carga.

- **Facilidade de transferência de carga elétrica**

Por meio da energia dissipada (E) para reabertura do arco elétrico, é possível determinar o índice de transferência de carga elétrica (FE), utilizando corrente contínua (FARIAS, 1993; MOTA, 1998).

$$E = \frac{(P_1 - P_r) \cdot t_1}{2000} \text{ (W.s)} \quad \text{Eq. (9)}$$

Após obter a energia dissipada (E) por meio da equação 9, é possível determinar o índice de transferência de carga elétrica (FE) por meio da equação 10.

$$FE = \frac{1}{E} \text{ (W.s)}^{-1} \quad \text{Eq. (10)}$$

onde:

$P_1 = U_1 \cdot I_1$ – potência instantânea na reabertura do arco (W);

$P_r = U_r \cdot I_r$ - potência de referência (W);

U_1 – tensão de reabertura do arco (V);

I_1 – corrente de reabertura do arco (A);

U_r – tensão de referência (V);

I_r – corrente de referência (A);

t_1 - tempo de reabertura do arco (ms).

- **Regularidade do índice FE**

Por meio do inverso do desvio padrão relativo da energia dissipada (E) para reabertura do arco, é possível obter o índice de regularidade de transferência de carga elétrica (RE) como é apresentado na equação 11.

$$RE = \frac{E}{\sigma \cdot E} \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

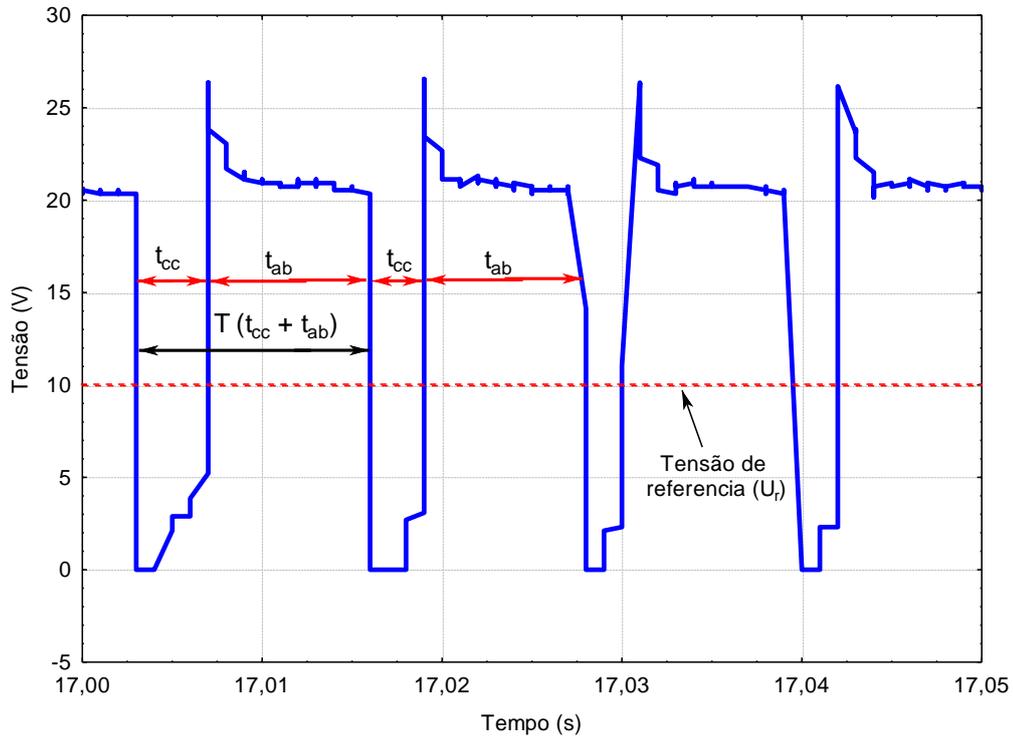
$\sigma \cdot E$ = desvio padrão da energia dissipada (E).

Após a aquisição dos sinais instantâneos da tensão e corrente, utilizou-se um programa em *Visual Basic Editor* (VBA) no Microsoft Excel® para realizar o tratamento dos dados e avaliar a estabilidade por meio dos índices apresentados anteriormente em intervalos referentes a 50% do tempo total da solda, ou seja, eliminou-se 25% dos tempos inicial e final para obter um valor sem possíveis irregularidades. No geral, as principais variáveis obtidas pelo programa são apresentadas a seguir:

- Corrente média (I), seu desvio padrão (σ_I) e o desvio padrão relativo (σ_I/I);
- Corrente eficaz (I_{ef});
- Tensão média (U), seu desvio padrão (σ_U) e o desvio padrão relativo (σ_U/U);
- Tensão eficaz (U_{ef});
- Período médio de transferência (T) com seus desvios padrão (σ_T) e relativo (σ_T/T);
- Tempo médio de curto-circuito (t_{cc}), com seus desvios padrão ($\sigma_{t_{cc}}$) e relativo ($\sigma_{t_{cc}}/t_{cc}$);
- Tensão média de reabertura após curto-circuito (U_1), com seus desvios padrão (σ_{U_1}) e relativo (σ_{U_1}/U_1);
- Corrente média de reabertura (I_1) com seus desvios padrão (σ_{I_1}) e o desvio padrão relativo (σ_{I_1}/I_1);
- Tempo médio para reabertura após o curto-circuito (t_1), com seus desvios padrão (σ_{t_1}) e relativo (σ_{t_1}/t_1);
- O índice E, com seus desvios padrões.

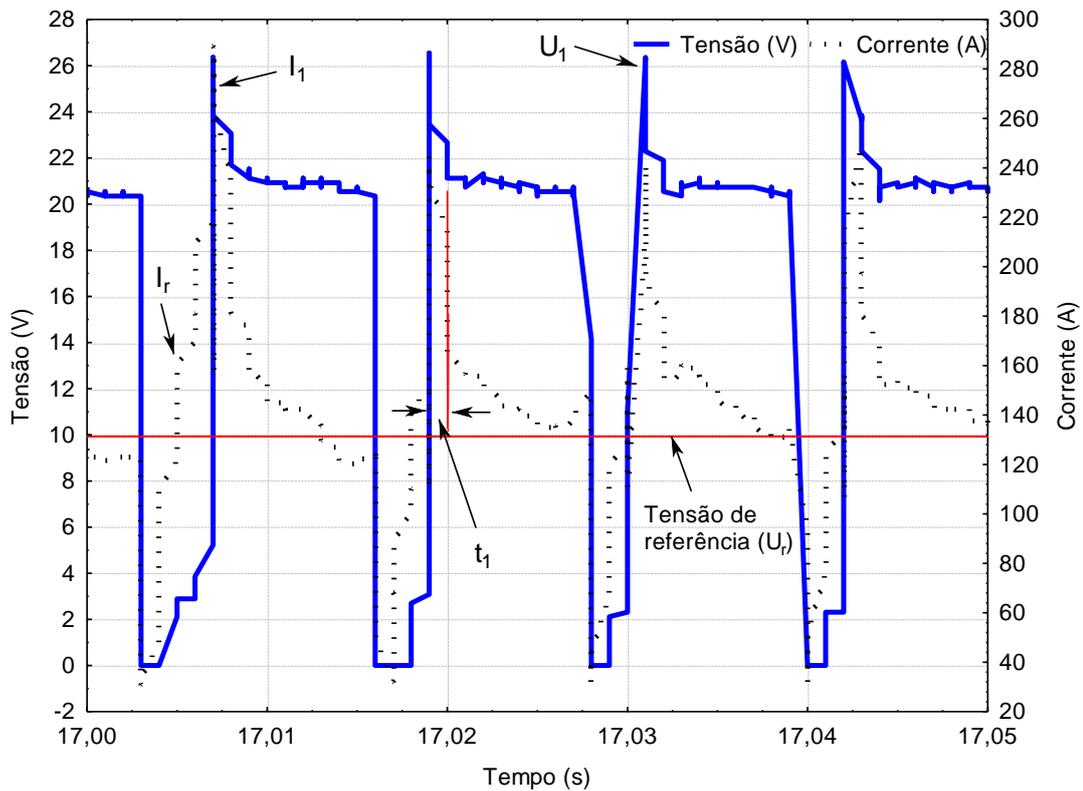
Para ser mais claro em relação aos pontos aos quais são feitas as varreduras nos sinais de tensão e corrente, as Figuras 15 e 16 ilustram as variáveis filtradas pelo programa em VBA.

Figura 15 – Variáveis determinadas por meio do programa em VBA nos sinais dinâmicos de tensão (V) para estabelecer os índices F_{cc} , F_{tm} , R_{cc} e R_{tm} .



Fonte: Autor, 2018.

Figura 16 – Variáveis determinadas por meio do programa em VBA nos sinais dinâmicos de corrente (A) e tensão (V) para estabelecer o índice E_1 .



Fonte: Autor, 2018.

Farias (1993), Mota (1998) utilizaram o programa “CONT93” para realizar as varreduras nos sinais dinâmicos de corrente e tensão e os mesmos mencionam em seus trabalhos que devem ser levados em consideração três critérios para estabelecer uma correta avaliação da estabilidade do arco voltaico. Ainda baseado nos estudos desses autores, os três critérios a serem estabelecidos e que também foram utilizados no programa em VBA são:

- Tensão de referência para o curto-circuito (U_r): estabelece que haverá curto-circuitos apenas se a tensão cair abaixo do valor de tensão referência, pois as demais quedas que não estejam neste valor, são consideradas instabilidades do processo. Adotou-se de acordo com o trabalho de Farias (1993), o valor de $U_r = 10$;
- Tempo mínimo de curto-circuito (t_{cc}): estabelece e separa o tempo limite dos curto-circuitos que transferem material para os que não transferem material. Com base nos histogramas obtidos por meio dos sinais dinâmicos, foi estabelecido um tempo mínimo de 2 ms.
- Tempo máximo de reabertura do arco após o curto-circuito: ainda baseado na metodologia proposta por Farias (1993) e utilizada por Mota (1998), este último critério determina a tensão de reabertura do arco após o curto-circuito por meio da equação (12), apresentada a seguir:

$$U_i - U_{i+1} \geq 0 \quad \text{Eq. (12)}$$

4.1.5 Avaliação da estabilidade na soldagem em modo pulsado

Para avaliar a estabilidade dos parâmetros de soldagem em modo pulsado apresentados na Tabela 2, foram plotados ciclogramas de tensão (V) em função da corrente (A) por meio dos sinais dinâmicos de tensão e corrente coletados com o sistema de aquisição de dados (SAP). Além dos ciclogramas, foi utilizado um programa em *Visual Basic Editor* (VBA) no Microsoft Excel®, que investiga os oscilogramas de corrente e tensão, o qual por meio das características do sinal avaliado determina os seguintes dados:

- Médias dos tempos de pico e base;
- Médias das correntes de pico e base;
- Média da frequência e seu desvio padrão;
- Média da indutância de subida e descida;
- Média da “potência média instantânea no pulso”, e seus desvio padrão e desvio padrão relativo;
- Número de pulsos totais;
- Erros ocasionados durante o ensaio, como por exemplo a ocorrência de possíveis curtos-circuitos.

As melhores condições de soldagem (maior estabilidade do arco voltaico) são estabelecidas de acordo com o menor desvio padrão relativo da potência média instantânea, no entanto é importante ressaltar que todos os outros pontos avaliados no programa apresentam sua relevância para obter o resultado de avaliação final de estabilidade. Outro ponto pertinente em ser mencionado é quanto ao tempo de avaliação que foi utilizado, pois para o ensaio não se utilizou o tempo total de arco aberto coletado, descartando os primeiros 25 % do tempo inicial e 25% do tempo final, para dessa forma, trabalhar com um sinal de melhor qualidade.

A potência média instantânea foi calculada por meio da equação 13, que é sugerida nos estudos de Joseph et al (2003), onde o autor conclui que a potência média instantânea apresenta valores mais próximos do real, enquanto a potência RMS é maior que a real e a potência média apresenta um valor muito abaixo do real.

$$P_{AI} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot V_i}{n} \quad (13)$$

onde:

I_i - sinal instantâneo de corrente (A);

V_i - sinal instantâneo de tensão (V);

n - número de amostras;

P_{AI} – Potência média instantânea.

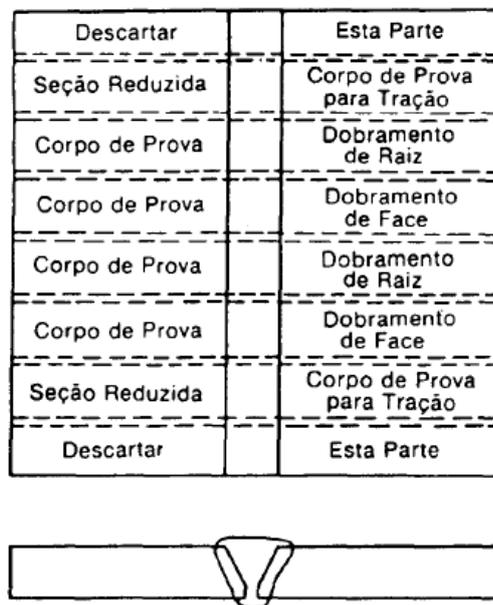
4.2 ASPECTOS METALÚRGICOS

Após determinada as melhores condições de soldagem por meio da avaliação da estabilidade do arco voltaico no modo convencional por curto-circuito e pulsado, foram realizadas a soldagem de corpos de provas baseados seção IX do código ASME (2017) com os dois arames que estão sendo estudados. Posteriormente após a soldagem das juntas, foram avaliadas as propriedades mecânicas por meio de ensaios destrutivos de tração, dobramento, impacto e por ensaio não-destrutivo de ultrassom, além das microestruturas para cada consumível por análise metalográfica.

4.2.1 Modelo de junta soldada para retirada de corpos de provas

De acordo com o requisito QW-463.1 da seção IX do Código ASME (2017), o critério para retirada dos corpos de provas é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Critério para retirada de corpos de provas conforme critério QW-463-1.

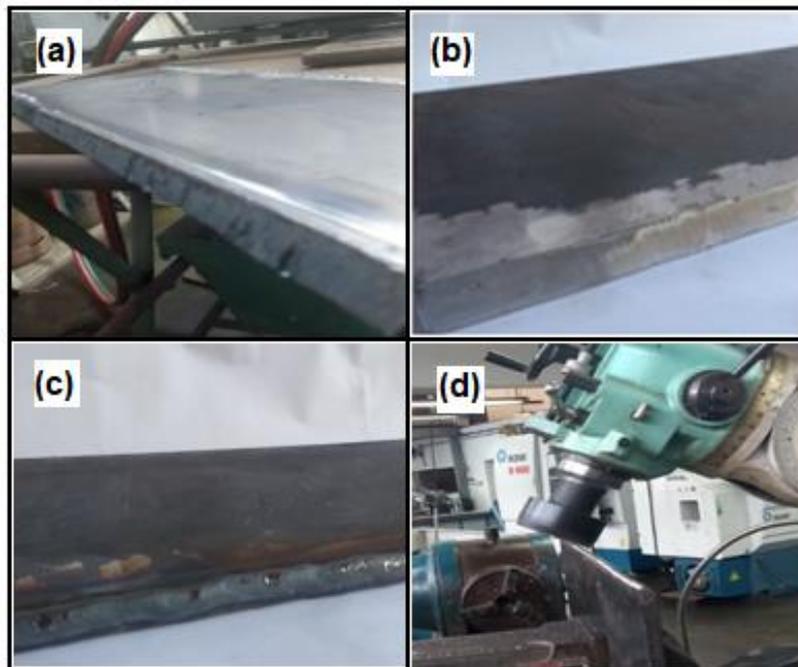


Fonte: Norma ASME seção IX, 2017.

O material utilizado foi o aço ABNT 1010, totalizando duas peças para cada junta soldada com as dimensões de 500 mm x 150 mm x 12,3 mm, obtendo-se uma junta soldada com as dimensões de 500 mm x 300 mm x 12,7 mm. Antes de efetuar a soldagem final, foi preparado um bisel de 30° nas chapas por meio do equipamento de oxicorte portátil, conhecido como "tartaruga" pertencente ao Laboratório de

Tecnologia da Soldagem do Instituto Federal do Espírito Santo – campus Vitória e posteriormente realizado o procedimento de revestimento de chanfro, também conhecido por “amanteigamento” (*buttering*) como está ilustrado na Figura 18. Para realizar a soldagem do “amanteigamento”, utilizou-se uma fonte de soldagem da marca White Martins, modelo Solmig 470 e em seguida realizou-se a fresagem final do chanfro por meio de uma fresadora da marca Diplomatic 3001 modelos FVF 2500, pertencente ao laboratório de Fabricação Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo – campus Vitória. A Figura 18 apresenta as etapas de confecção do chanfro final.

Figura18 – Etapas para confecção do chanfro: (a) corte com inclinação de 30° por meio de oxicorte portátil; (b) Acabamento superficial por esmerilhamento e limagem manual; (c) Soldagem manual do revestimento do chanfro; (d) Fresagem final com inclinação de 30°.



Fonte: Autor, 2018.

4.2.1.1 Ensaio de Resistência Tração

O propósito para efetuar o ensaio de tração foi avaliar o máximo limite de resistência à tração, limite de escoamento, estrição, assim podendo comparar o comportamento mecânico do arame sólido com o do arame “*metal cored*”. Foram confeccionados dois corpos de prova segundo o critério QW-451.1 da seção IX do código ASME (2017) para as condições avaliadas com maior estabilidade para as transferências metálicas por curto-circuito e pulsado, utilizando os arames sólido ER 70S6 e *metal cored*

Tubrod 70MC Ultra. Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de Ensaios dos Materiais do Centro Universitário do Espírito Santo (UNESC) - campus Colatina, em uma máquina universal de ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão da marca Emic modelo E 23-300 de 300 kN.

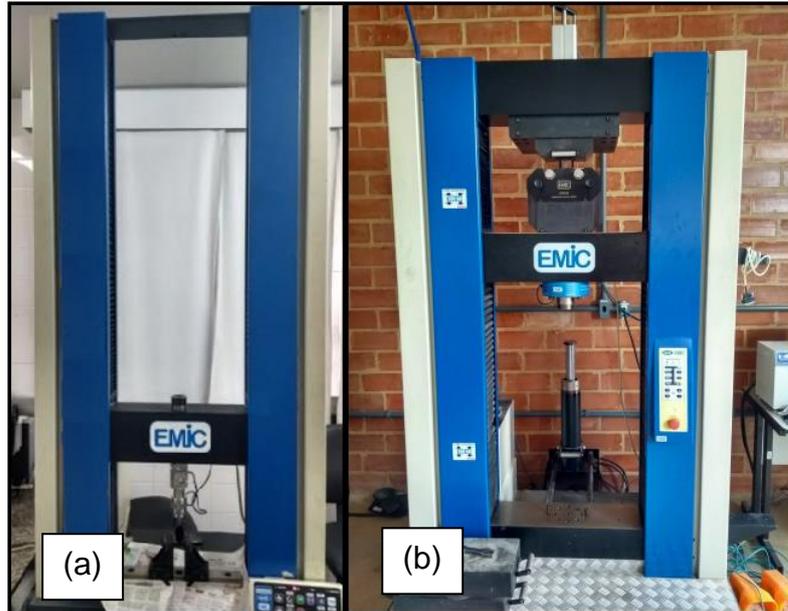
4.2.1.2 Ensaio de Impacto

Corpos de provas foram preparados de acordo com as normas ASME BPVC.II.C de 2017 e ASTM E 370-17a com as dimensões de seção quadrada de 10 mm x 10 mm e comprimento de 55 mm, com entalhe de 45° de abertura e profundidade de 2 mm posicionado no centro exato do corpo de prova (Charpy tipo A). O ensaio foi realizado no Laboratório Químico da Aciaria na Empresa ArcelorMittal, em uma máquina da marca Zwick Amsler modelo RPK 450, possuindo energia máxima de impacto de 450 J.

4.2.1.3 Ensaio de dobramento

Este ensaio teve como objetivo principal avaliar a presença de possíveis descontinuidades presentes entre a interface do metal de base/zona fundida por meio de deformação plástica provocada por flexão no material ensaiado. A norma da seção IX do código ASME de (2017) sugere para a avaliação da integridade do cordão de solda por meio do dobramento guiado a realização de quatro ensaios, podendo ser dividido em dois corpos de prova para a avaliação do cordão na face da solda e dois para o cordão na raiz da solda, e/ou então quatro corpos de provas aplicando uma carga lateral a seção transversal do cordão. Para este trabalho utilizou-se o dobramento lateral. O ensaio de dobramento foi realizado no laboratório de ensaios não-destrutivos do Instituto Federal do Espírito Santo – campus Vitória, em uma máquina de ensaios universal de tração, compressão e flexão da marca Emic modelo E 23-10 de 100 kN. A Figura 19 apresenta os equipamentos que foram utilizados para realizar o ensaio de dobramento assim como o ensaio de tração relatado no tópico 4.2.1.1.

Figura 19 – Máquinas utilizadas nos testes mecânicos: (a) Máquina universal de ensaios Emic E23-10 de 100 kN utilizada no ensaio de dobramento; (b) Máquina universal de ensaios mecânicos Emic E23-300 kN utilizada no ensaio de resistência à tração.

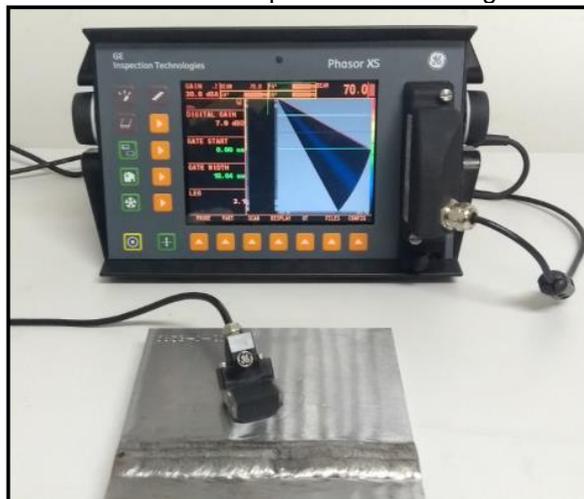


Fonte: Autor, 2018.

4.2.2 Ensaio de Ultrassom

Para avaliar a integridade do cordão em relação a possíveis descontinuidades internas como porosidade, fissuras, inclusão de escória, entre outras, foi realizado o ensaio não destrutivo de ultrassom por meio do equipamento pertencente ao laboratório de soldagem da Universidade Federal do Espírito Santo da marca GE (*General Electric*), modelo *Phasor XS*, apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Equipamento de ultrassom utilizado para avaliar a integridade dos cordões de solda.



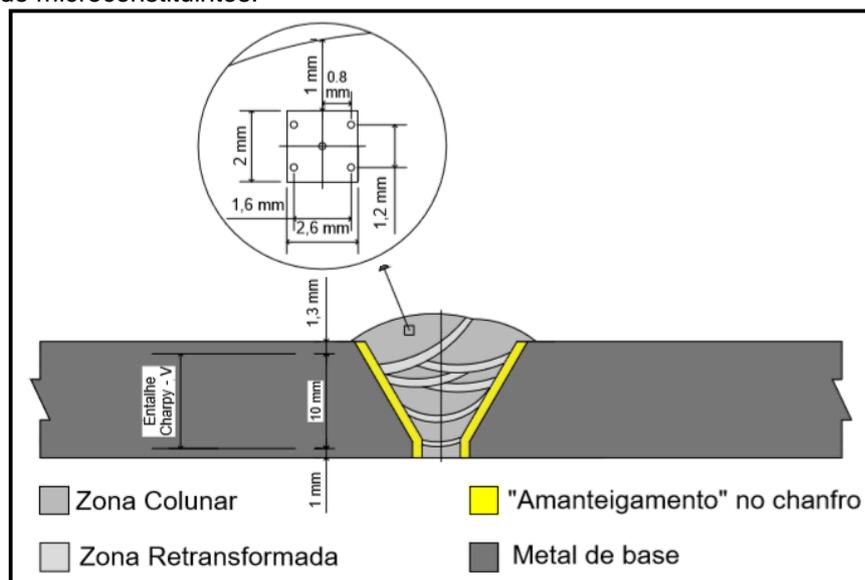
Fonte: Autor, 2018.

4.2.3 Análise Metalográfica

Para avaliar os microconstituintes presentes no metal de solda depositado pelos arames sólido ER 70S6 e “*metal cored*” Tubrod 70MC Ultra, realizou-se corte na seção transversal ao cordão de solda com auxílio de uma cortadora metalográfica da marca Fortel, modelo CF III pertencente ao Laboratório de Tecnologia da Soldagem do Instituto Federal do Espírito Santo - campus Vitória. Após o corte, as amostras foram embutidas a quente e posteriormente passaram pelo processo de lixamento em granulometrias variando de n°.180 a 1200, e por fim polimento em alumina 1,0 μm e 0,3 μm . Efetuou-se o ataque químico por imersão com Nital 3 % por 30 s.

Para quantificar os percentuais das microconstituintes, realizou a microscopia óptica (MO) no último passe, ou seja, na zona mais “crítica” em relação às demais, por não ter passado pelo efeito do ciclo térmico da soldagem devido a passes posteriores, e assim não proporcionando um refinamento de grãos (EVANS, 1982; RISSONE et al., 2005; MOTA, 1998). A Figura 21 representa os passes de soldagem e o local onde as micrografias foram realizadas no último cordão de solda.

Figura 21 – Representação do corte transversal para retirada das micrografias para realização da quantificação de microconstituintes.



Fonte: Autor, 2018.

Para quantificação dos microconstituintes presentes na zona colunar do último cordão de solda, tomou-se como base os trabalhos de Evans (1982); Mota (1998); Rissone

et al (2005), além do procedimento normativo ASTM E562-11. Essa norma sugere que não deve ser obtida apenas uma imagem para realizar a quantificação dos microconstituintes. Então neste sentido, foram retiradas cinco micrografias em locais diferentes como é ilustrado no detalhe da Figura 21.

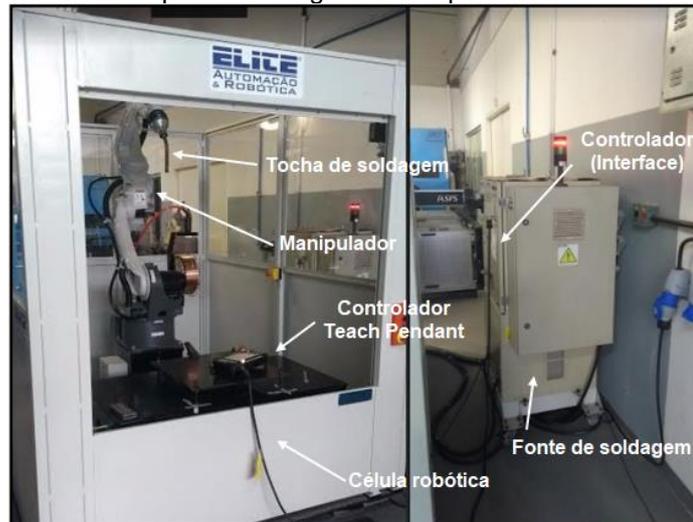
Ao total foram retiradas 25 micrografias com um aumento de 500 X. Para quantificação dos microconstituintes foi utilizado o procedimento convencional de contagem de pontos por meio de uma grade reticulada com 400 pontos montada com o auxílio do *software* AutoCad®, realizando contagem manual ponto a ponto. Os principais microconstituintes que podem ser verificados por esse procedimento segundo Mota (1998) são os de mais fácil resolução, os quais destaca as ferritas primárias, de segunda fase e acicular. Além das fotomicrografias na zona colunar do último passe, também se verificou a morfologia dos cordões de solda nas zonas retransformadas.

A microscopia óptica para avaliar as morfologias da junta soldada foi realizada por um microscópio óptico metalográfico da marca Nikon, modelo MA200, pertencente ao Laboratório de Tribologia da Universidade Federal do Espírito Santo.

4.4 EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA SOLDAGEM

Foi utilizado um robô de soldagem da marca Panasonic, modelo TM-1400WGIII para a soldagem tanto dos corpos de prova para realizar os ensaios preliminares, quanto para a soldagem final dos corpos de provas, pertencente ao Laboratório de Soldagem da Universidade Federal do Espírito Santo. O equipamento é constituído por uma célula robótica modelo 20F1M contendo um manipulador com grau de liberdade de seis eixos, capacidade máxima de 4 kg no flange, acoplado a uma fonte de soldagem inversora de 100 kHz, com faixa de corrente de 350 A, realizando soldagens GMAW/FCAW com ciclo de trabalho de 80% para modo convencional e 60% no modo pulsado. O acionamento do equipamento é realizado por meio de um controlador do tipo *Teach Pendant* (TP). A Figura 22 ilustra a célula robótica utilizada.

Figura 22 – Equipamento utilizado para a soldagem dos experimentos.

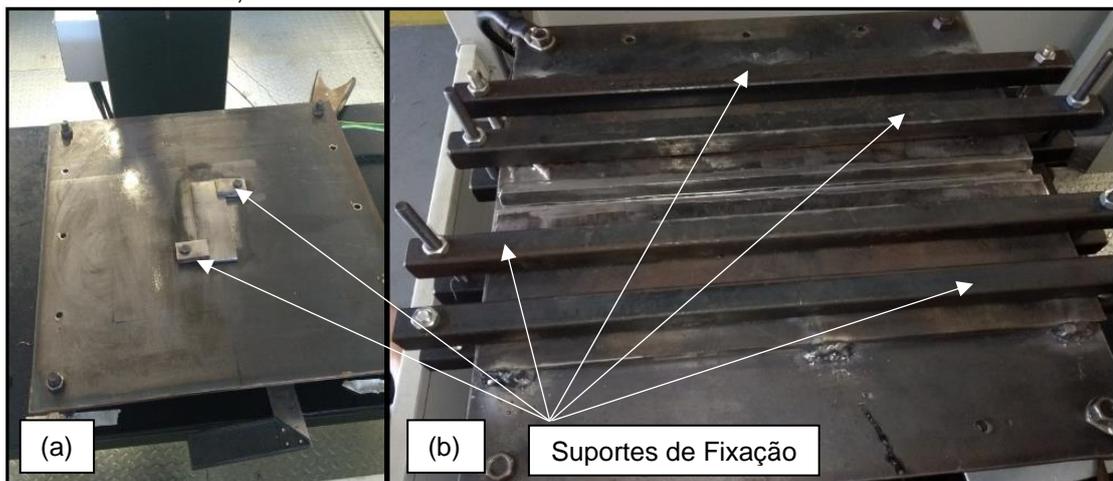


Fonte: Autor, 2018.

4.4.1 Bancada para fixação das amostras

Para fixação das amostras foi utilizada uma bancada com regulagem de nivelamento feita por meio de parafusos para evitar descontinuidades na solda, devido, por exemplo, à variação na DBCP durante a movimentação da tocha. Outro ponto importante na utilização da bancada é evitar deformações nos corpos de provas atribuídas à grande quantidade de calor causada pelo processo de soldagem. Sendo assim, os corpos de prova foram fixados por meio de suportes parafusados. O mecanismo para fixação dos corpos de provas é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Bancada utilizada para fixação dos corpos de prova. (a) suportes para fixação das chapas para avaliação da estabilidade e aspectos econômicos; (b) suporte para fixação das juntas de topo com 500 mm x 300 mm x 12,3mm.



Fonte: Autor, 2018.

4.5 CONSUMÍVEIS

Os principais consumíveis utilizados nos processos de soldagem GMAW e com arames tubulares são os arames e os gases de proteção.

4.5.1 Gás de proteção

O gás de proteção empregado na soldagem foi uma mistura constituída 85% de argônio e 15% de dióxido de carbono (Ar+15%CO₂), o qual está em conformidade com os critérios do fabricante dos metais de adição empregados no trabalho. A vazão adotada foi fixada em 15 L/min.

4.5.2 Metais de adição

Os metais de adição utilizados foram o arame sólido de aço carbono classe AWS/ASME SF 5.18 ER 70S-6 e o arame tubular do tipo *metal cored* classe AWS/ASME SF 5.18 Tubrod 70MC Ultra, ambos fabricados pela Esab e com diâmetro de 1,2 mm. A Tabela 3 apresenta a composição química e principais propriedades mecânicas segundo o fabricante.

Tabela 3 – Composição química e propriedades mecânicas dos arames utilizados conforme especificação do fabricante.

Arame Sólido ER70S-6			
Composição Química %p			
C	Si	Mn	
0,08	0,90	1,50	
Propriedades Mecânicas			
L.R. (MPa)	L.E. (MPa)	Alongamento (%)	Charpy V (J) -29°C
495	370	28	70
Arame <i>Metal Cored</i> Tubrod 70 MC Ultra			
Composição Química %p			
C	Si	Mn	
0,04	0,55	1,30	
Propriedades Mecânicas			
L.R. (MPa)	L.E. (MPa)	Alongamento (%)	Charpy V (J) -29°C
575	500	28	50

Fonte: Catálogo de consumíveis ESAB.

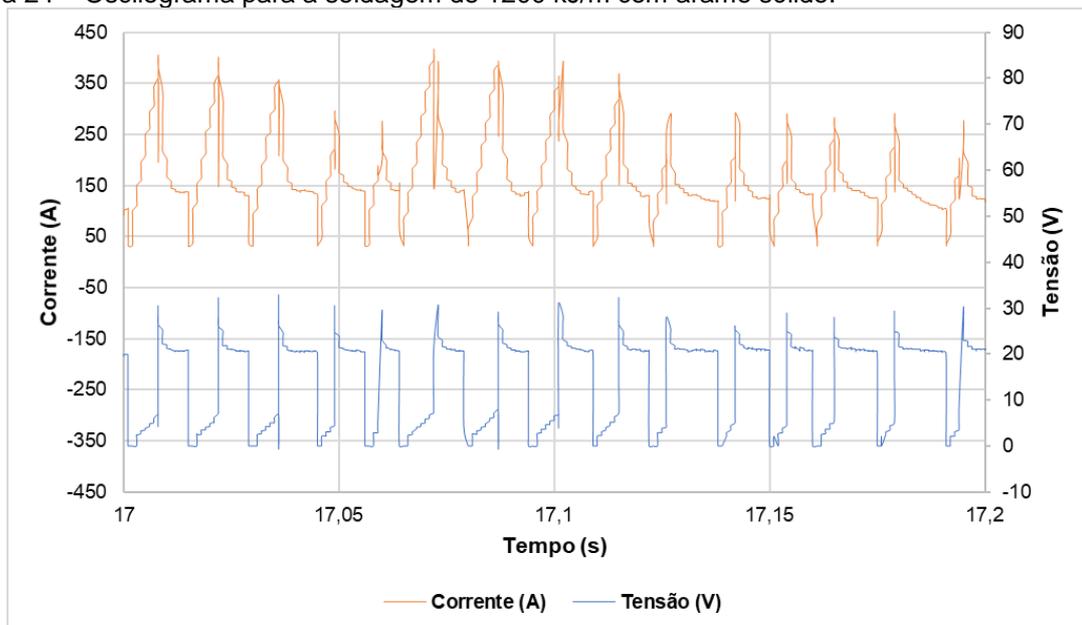
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESTABILIDADE DO ARCO

5.1.1 Estabilidade em Curto-Circuito

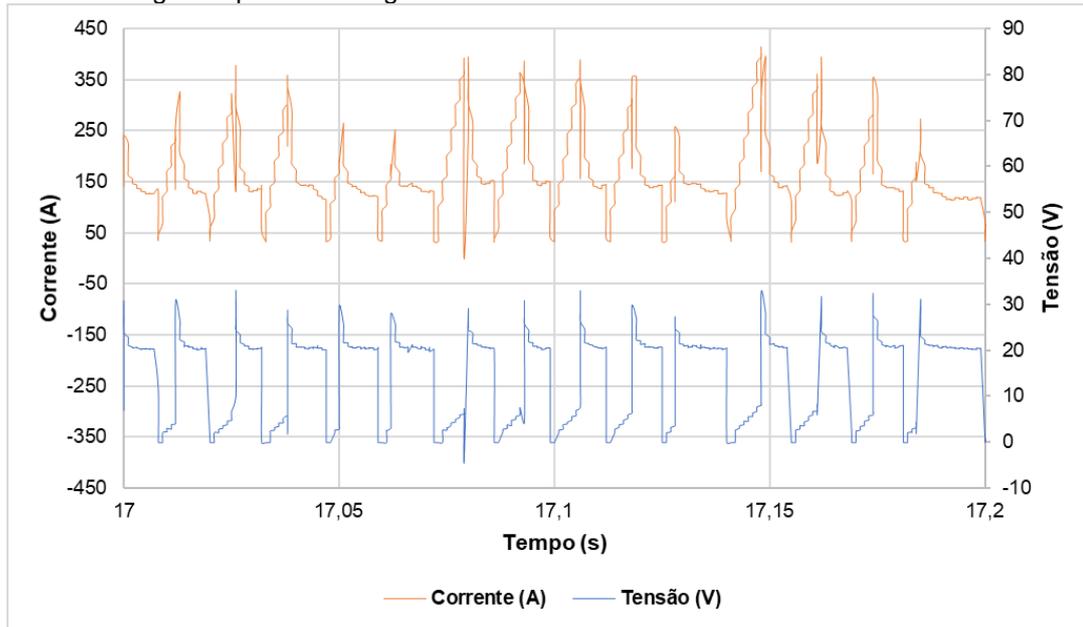
As Figuras 24 a 26 retratam o comportamento das soldagens realizadas para o levantamento das características de estabilidade operacional do arame sólido na soldagem convencional por curto-circuito. Essas Figuras representam o comportamento dinâmico, em que se tem a evolução da corrente e da tensão com o tempo para os níveis de energia 1200 kJ/m, 1000 kJ/m e 800 kJ/m, respectivamente em um intervalo de 200 ms.

Figura 24 – Oscilograma para a soldagem de 1200 kJ/m com arame sólido.



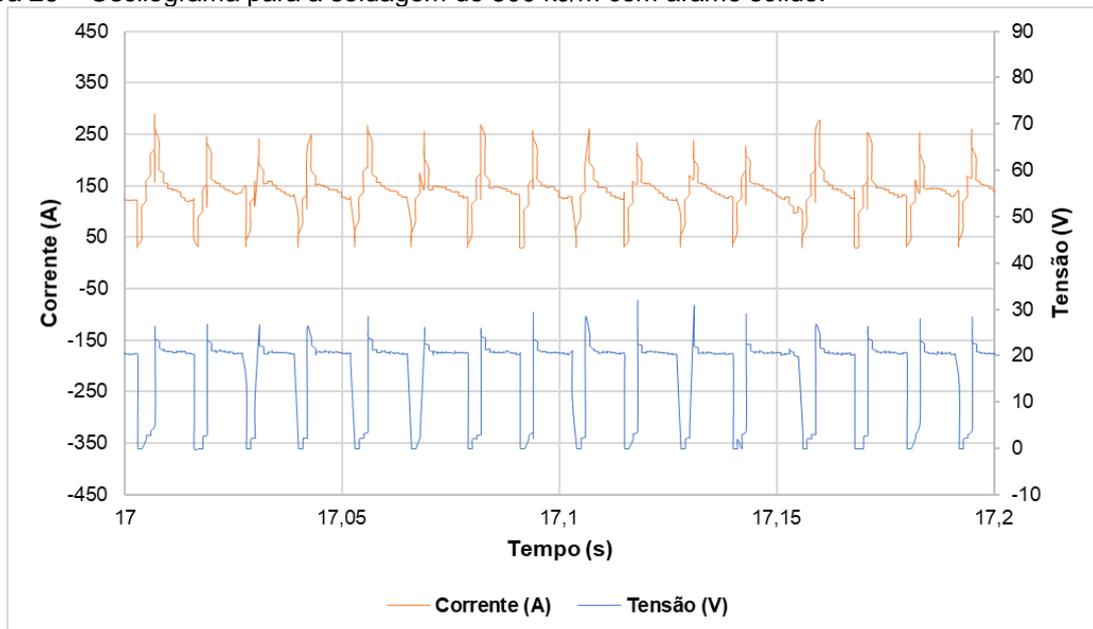
Fonte: Autor, 2018.

Figura 25 - Oscilograma para a soldagem de 1000 kJ/m com arame sólido.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 26 – Oscilograma para a soldagem de 800 kJ/m com arame sólido.



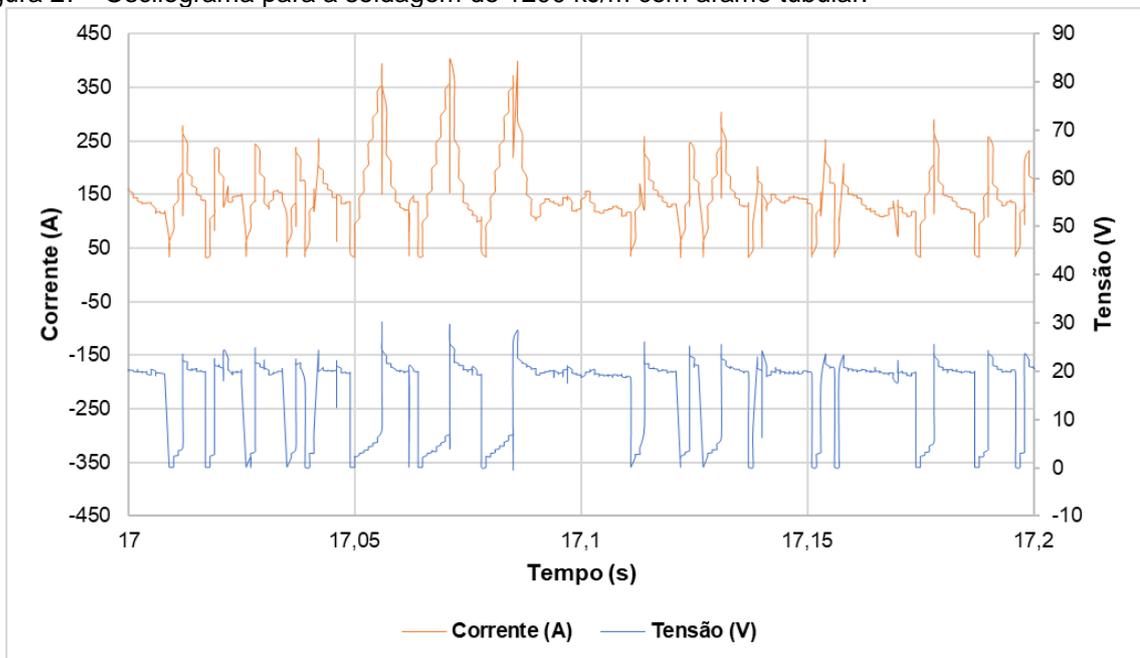
Fonte: Autor, 2018.

Verificando os oscilogramas apresentados para o arame sólido, nota-se a incidência de alguns eventos, como por exemplo, entre os intervalos de 17,05 a 17,10 ms das Figuras 24 e 25 além de intervalos para os tempos de arco aberto (t_{ab}) não tão homogêneos ao longo dos 200 ms avaliados, o que, baseando a estabilidade na repetitividade dos eventos e sua constância, promove maiores desvios, que indicam maior instabilidade. As curvas de corrente apresentadas na Figura 26 (menor energia),

apresentam maior uniformidade em todo seu intervalo, apontando maior regularidade para a soldagem com energia de 800 kJ/m.

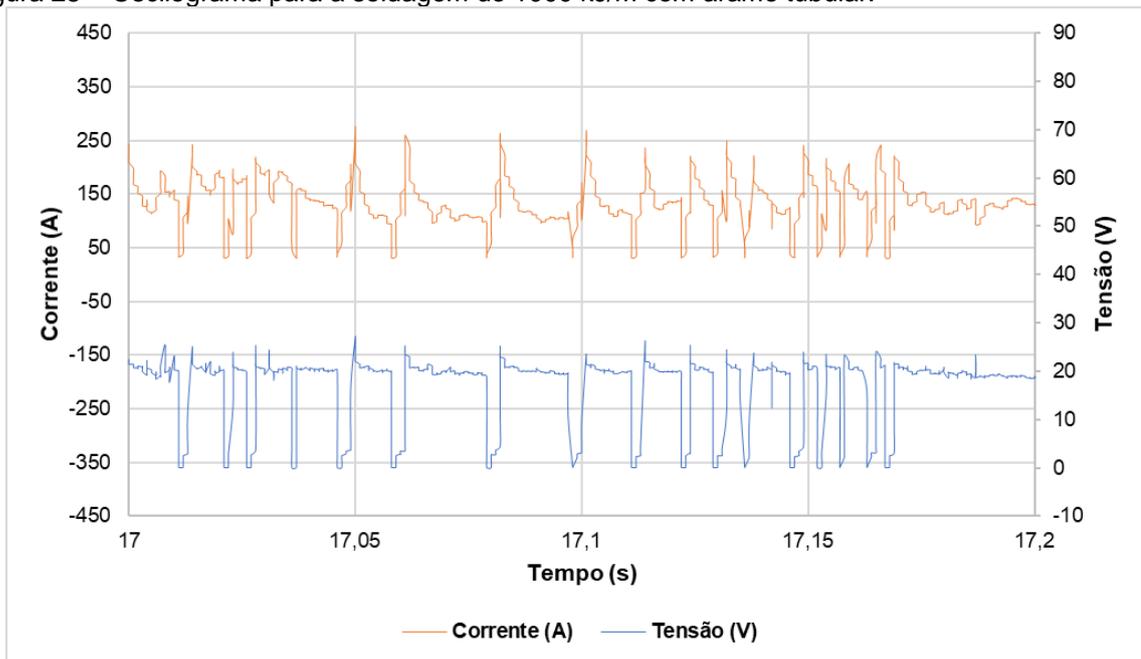
As Figuras 27, 28 e 29 expõem o comportamento dinâmico para a soldagem com o arame tubular *metal cored*, nos mesmos moldes energéticos observados para a soldagem com o arame sólido. O modo de transferência metálica por curto-circuito pode ser verificado pelos oscilogramas de tensão e corrente para um intervalo de 200 ms capturados durante as soldagens realizadas para os três níveis de energia.

Figura 27 - Oscilograma para a soldagem de 1200 kJ/m com arame tubular.



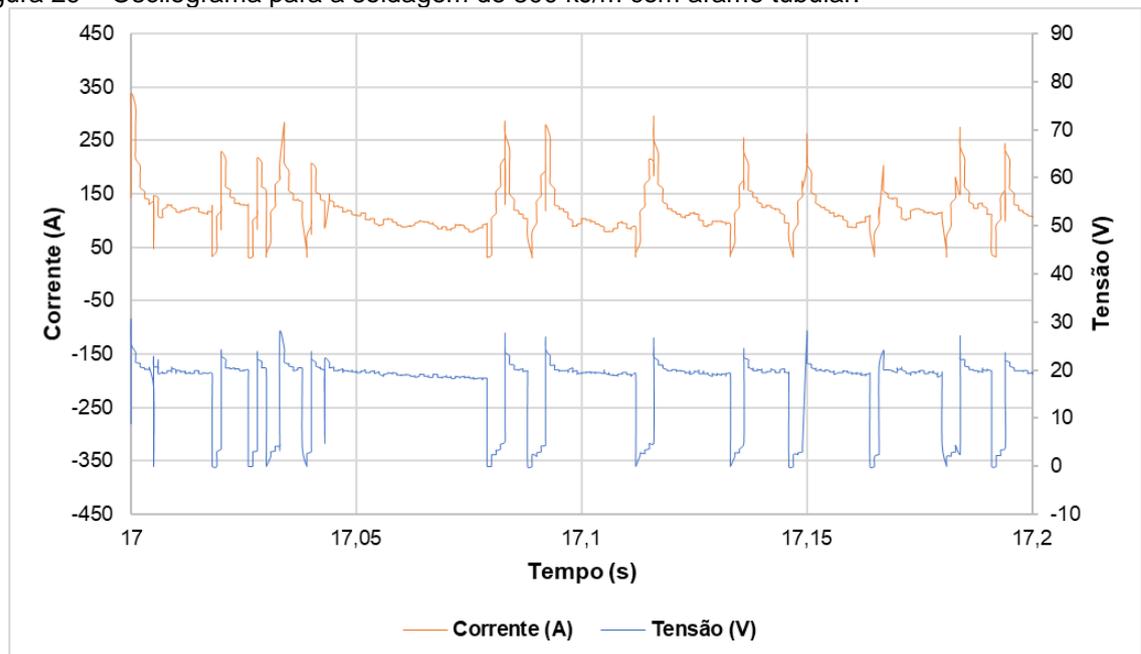
Fonte: Autor, 2018.

Figura 28 – Oscilograma para a soldagem de 1000 kJ/m com arame tubular.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 29 – Oscilograma para a soldagem de 800 kJ/m com arame tubular.



Fonte: Autor, 2018.

Avaliando os oscilogramas do arame tubular, nota-se que as curvas de tensão para ambas energias de soldagem apresentam alguns eventos, além de intervalos não tão constantes em relação aos curtos-circuitos quando comparados com o arame sólido. Em determinados pontos das curvas de tensão, nota-se a incidência de maiores intervalos entre um curto-circuito e outro, o que pode denotar instabilidade temporária

na transferência. Todavia, de acordo com Scotti, Ponomarev e Lucas (2012), dois ou mais modos de transferência metálica podem ocorrer simultaneamente sem a interferência do operador e/ou do equipamento durante o processo.

Essa variância no modo de transferência metálica pode ser ocasionada no arame tubular porque a corrente se concentra principalmente na periferia da capa metálica que comporta o fluxo e, embora o modo de transferência predominante seja o curto-circuito, algumas gotas podem ser transferidas por vôo livre devido à variação de potência instantânea, ocasionando a não constância do comportamento dinâmico do processo, denominado de modo misto (STARLING e MODENESI, 2009; SCOTTI e PONOMAREV, 2008; GARCIA e SCOTTI, 2011).

Com base no levantamento dos dados de soldagem das diversas amostras estabelecidas, a Tabela 4 apresenta os resultados dos dados de estabilidade referentes aos tempos médios de curto-circuito (t_{cc}), tempos médios de arco aberto (t_{ab}) e os tempos médios para os períodos de transferência metálica de gotas (T), com seus respectivos módulos dos desvios padrões médios para os arames sólido e tubular.

Tabela 4 – Dados da estabilidade arames sólido e tubular em relação as energias de 1200, 1000 e 800 kJ/m.

	Energia (kJ/m)	T (ms)	σ_T (ms)	t_{cc} (ms)	$\sigma_{t_{cc}}$ (ms)	t_{ab} (ms)	$\sigma_{t_{ab}}$ (ms)	
Arame Sólido	1200	15,31	3,84	4,61	1,67	10,71	4,12	
		14,77	4,40	4,33	1,65	10,44	4,72	
		14,20	3,33	4,07	1,59	10,13	3,54	
	1000	13,45	2,47	3,82	1,32	9,62	2,70	
		13,72	2,99	3,90	1,46	9,82	3,29	
		13,68	2,40	3,91	1,30	9,77	2,68	
	800	12,47	2,01	3,54	0,99	8,93	2,16	
		12,20	2,03	3,53	0,99	8,67	2,18	
		12,12	2,73	3,68	1,21	8,44	2,90	
	Arame Tubular	1200	10,83	5,25	2,77	1,25	8,06	4,89
			11,31	5,17	2,82	1,11	8,49	4,50
			10,53	4,72	2,60	0,87	7,94	4,52
1000		10,35	5,15	2,60	0,90	7,75	4,92	
		10,76	5,38	2,53	0,77	8,22	5,20	
		11,65	5,16	2,93	1,16	8,72	5,00	
800		10,29	4,71	2,60	0,84	7,68	4,55	
		10,27	5,00	2,52	0,72	7,75	4,82	
		10,69	4,75	2,71	0,92	7,98	4,60	

Fonte: Autor, 2018.

Observando diretamente os desvios padrões mostrados na Tabela 4 para os tempos de arco aberto (t_{ab}), nota-se que a soldagem utilizando arame tubular apresentou maiores valores para esta medida em relação ao arame sólido, corroborando assim com os sinais dinâmicos observados nos oscilogramas do arame tubular apresentados nas Figuras 27 a 29. Supõem-se que o arame tubular apresente uma maior faixa de trabalho operacional, pois verifica-se por meio dos valores medidos que não há uma diferença considerável em relação aos níveis de energias investigados, além de apresentar menores períodos de transferência (T).

A Tabela 5 apresenta os índices de transferência de metal e carga calculados a partir das Equações (5) a (11), com base nos resultados apresentados na Tabela 4. Através de tais índices é possível estimar a estabilidade do processo com base nos parâmetros utilizados (FARIAS, 1993; MOTA, 1998).

Tabela 5 – Resultados obtidos na avaliação da estabilidade do arco para a soldagem por curto-circuito para os arames sólido e tubular.

	Energia (kJ/m)	Transporte de carga		Transporte de metal				
		Facilidade	Regularidade	Facilidade		Regularidade		
		FE (W.s ⁻¹)	RE	F _{cc} (s ⁻¹)	F _{tm} (s ⁻¹)	R _{cc}	R _{tm}	
Arame Sólido	1200	1,27	1,68	65,32	216,92	3,99	2,76	
		1,25	1,70	67,32	230,95	3,36	2,62	
		1,35	2,13	70,42	245,70	4,26	2,56	
	1000	1,37	2,08	74,35	261,78	5,45	2,89	
		1,32	2,17	72,89	256,41	4,59	2,67	
		1,41	1,89	73,10	255,75	5,70	3,01	
	800	1,56	2,08	80,19	282,49	6,20	3,58	
		1,61	2,22	81,27	283,29	6,01	3,57	
		1,54	2,13	82,51	271,14	4,44	3,04	
	Arame Tubular	1200	2,00	1,56	92,34	361,01	2,06	2,22
			1,96	1,59	88,42	354,61	2,19	2,54
			2,13	1,74	94,97	384,62	2,23	2,99
1000		2,08	1,78	96,62	384,62	2,01	2,89	
		2,17	1,84	92,94	393,70	2,00	3,30	
		1,89	1,61	85,54	341,30	2,26	2,53	
800		2,08	1,85	97,18	384,62	2,18	3,10	
		2,22	1,88	97,37	396,83	2,05	3,50	
		2,13	1,74	93,55	396,00	2,25	2,91	

Fonte: Autor, 2018.

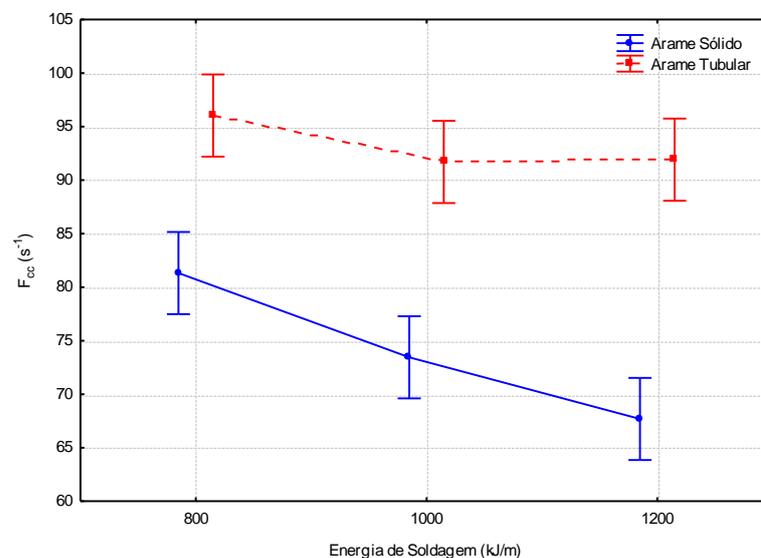
Observando os índices de regularidade de transferência de carga (RE) e as facilidades de transporte de metal F_{cc} e F_{tm} apresentados na Tabela 5, nota-se que os mesmos são influenciados devido as energias de soldagem impostas e pelo tipo de arame utilizado. Analisando os valores médios referentes aos índices de facilidade de transferência metálica F_{cc} e F_{tm} pautados na Tabela 5 para o arame sólido, verifica-se

que à medida que ocorre redução da energia de soldagem (1200 – 800 kJ/m), há um aumento no valor de F_{tm} , o que representa que para a energia de 800 kJ/m, ocorreram menores tempos médios de curto-circuito (t_{cc}). De maneira análoga, o índice de facilidade de curto-circuito (F_{cc}) também apresenta maiores valores para a energia de 800 kJ/m, o que indica que para os três níveis energéticos utilizados, este foi o que apresentou menores valores para os períodos de transferência de gotas (T).

Para o arame tubular, ainda por meio da Tabela 5, verifica-se que este consumível apresenta um comportamento distinto ao arame sólido em relação aos índices de facilidade de transferência de metal F_{cc} e F_{tm} , os quais apresentam valores próximos entre si, no entanto maiores que os apresentados para o arame sólido. Esta característica apresentada pelos índices do arame tubular sugere que o mesmo tenha maior capacidade produtiva, por transferir maior quantidade de material para a poça de fusão quando comparado ao arame sólido.

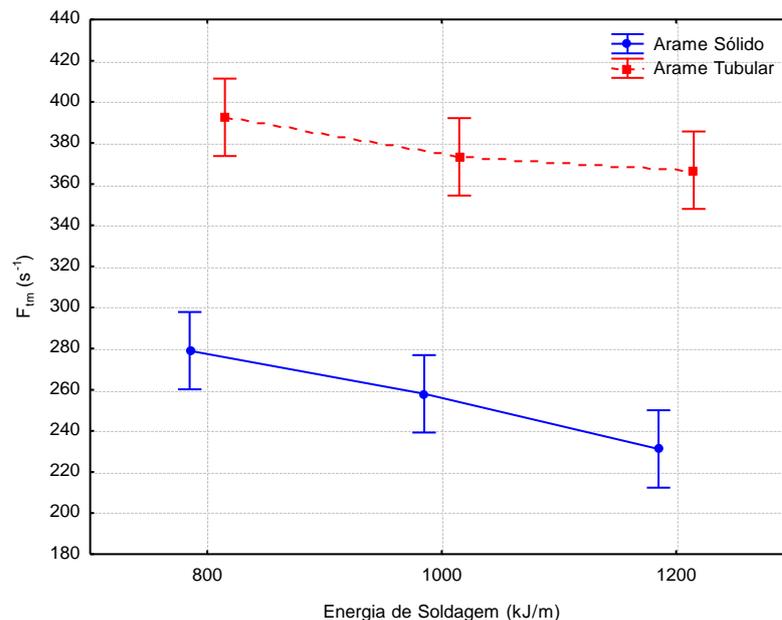
A Figuras 30 e 31 comparam o efeito da energia de soldagem e do tipo de arame sobre os índices de facilidade de transferência metálica. Nitidamente se verifica que ambos afetam significativamente na facilidade de transferência metálica, sendo que o tipo de arame é o fator que mais influência tanto F_{cc} , quanto F_{tm} . De uma maneira geral, quanto maior o valor de F_{cc} , maior quantidade de gotas formadas e, no caso de F_{tm} , menor será o volume das gotas transferidas (MOTA, 1998).

Figura 30 – Relação entre o índice de facilidade de curto-circuito e os fatores arame e energia.



Como os índices de facilidade F_{cc} e F_{tm} avaliam a produtividade de dada condição de soldagem, supõe-se que a energia de 800 kJ/m se encaixa nesta condição para ambos arames, por apresentarem maior facilidade de transferência metálica devido aos maiores valores de F_{tm} , que por sua vez estão correlacionados paralelamente às maiores facilidades de curtos-circuitos (F_{cc}), que também foram obtidas para esta energia (800 kJ/m).

Figura 31 – Relação entre o índice de facilidade de transferência metálica e os fatores arame e energia.



Fonte: Autor, 2018.

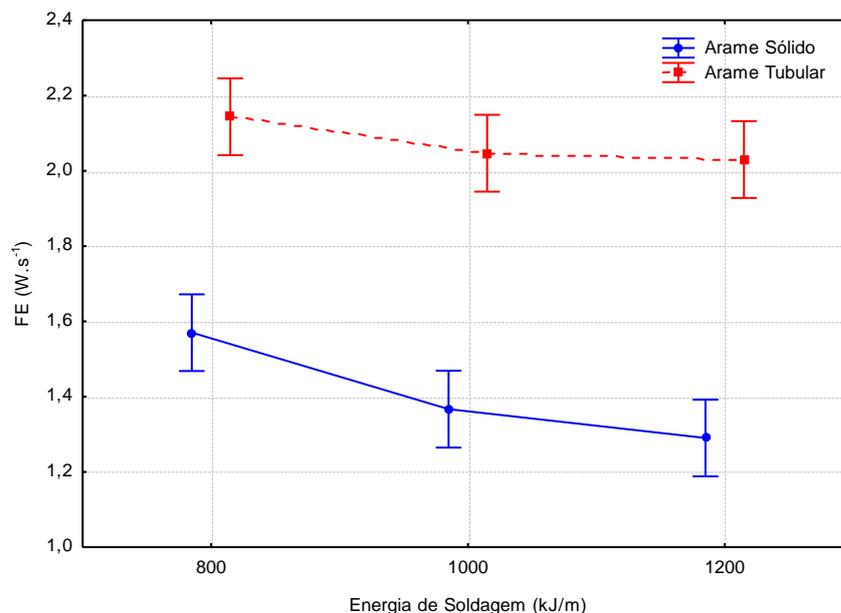
Analisando com mais detalhes as Figuras 30 e 31, nota-se ainda a influência da energia imposta, onde tal efeito é mais proeminente para o arame sólido. Embora a variação da energia seja estabelecida pela variação da velocidade, esse fator em si acaba interferindo o processo, uma vez que, com a diminuição da velocidade, o calor tende a ficar mais concentrado, interferindo, assim, na poça de fusão.

A estabilidade do processo de soldagem é baseada em dois fenômenos: no transporte de carga; e no transporte de massa. O índice de facilidade de carga (FE) é obtido por meio do inverso da energia dissipada para reabertura do arco, e desta forma pode-se concluir que quanto menor for a energia gasta para a reabertura do arco após o tempo de curto-circuito (t_{cc}), maior será o valor do mesmo (FARIAS, 1993).

No que se concerne a estabilidade para os parâmetros utilizados levando em consideração os resultados expostos para os índices de transporte de carga na Tabela 5, o arame tubular apresentou maiores valores para o índice de facilidade de transferência de carga (FE) quando comparado aos resultados obtidos com a soldagem utilizando o arame sólido. Dessa forma, supõe-se que o arame tubular reestabeleça mais facilmente o arco elétrico após o curto-circuito por necessitar de menos energia para reabertura do arco devido apresentar maiores valores de FE, o que também pode ser correlacionado com o índice F_{cc} , uma vez que este arame apresenta maior facilidade de ocorrência de curto-circuito durante a soldagem.

Supõe-se ainda que a diferença apresentada para o índice de facilidade de carga (FE) entre os consumíveis possa estar relacionada à questão da corrente ser conduzida em maior concentração pela capa metálica externa do arame tubular, o que proporciona maiores densidades de transporte de corrente em relação aos arames sólidos (YU e CHO, 2017; MOREIRA, 2008). A análise estatística para o índice FE entre os dois arames apresentada na Figura 32 também expressou uma diferença significativa.

Figura 32 – Relação entre o índice de facilidade de transferência de carga e os fatores arame e energia.



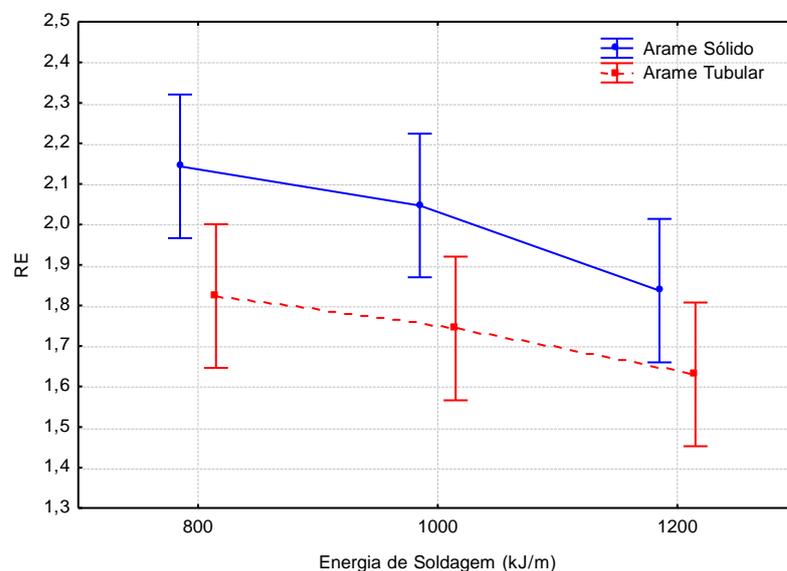
Fonte: Autor, 2018.

Observando o resultado apresentado na Figura 32, nota-se que tanto a energia de soldagem como o tipo de arame influenciam o índice FE, sendo o tipo de arame o fator

de maior efeito. Em relação a influência da energia de soldagem, esta é mais eminente para o arame sólido. Ainda analisando a Figura supracitada, nota-se que o índice FE apresentou um comportamento símil ao que foi verificado em relação a estabilidade por meio dos índices de facilidade de transferência metálica até o momento, ou seja, observa-se que as menores energias (800 kJ/m) indicam a maior estabilidade em virtude aos maiores valores de FE.

A Figura 33 ilustra o efeito da energia da soldagem sobre a regularidade da transferência de carga. É possível perceber que o aumento da energia de soldagem tende a diminuir RE. Além disso, a melhor regularidade de transferência de carga elétrica é atribuída para a energia de 800 kJ/m para ambos os arames, pois a regularidade de carga é determinada pelo desvio padrão relativo da energia dissipada para reabertura do arco, e de maneira análoga aos índices de regularidade de transferência de metal, quanto menor for o desvio padrão da energia, maior será o valor do índice. RE

Figura 33 – Relação entre o índice de regularidade de transferência de carga e os fatores arame e energia.



Fonte: Autor, 2018.

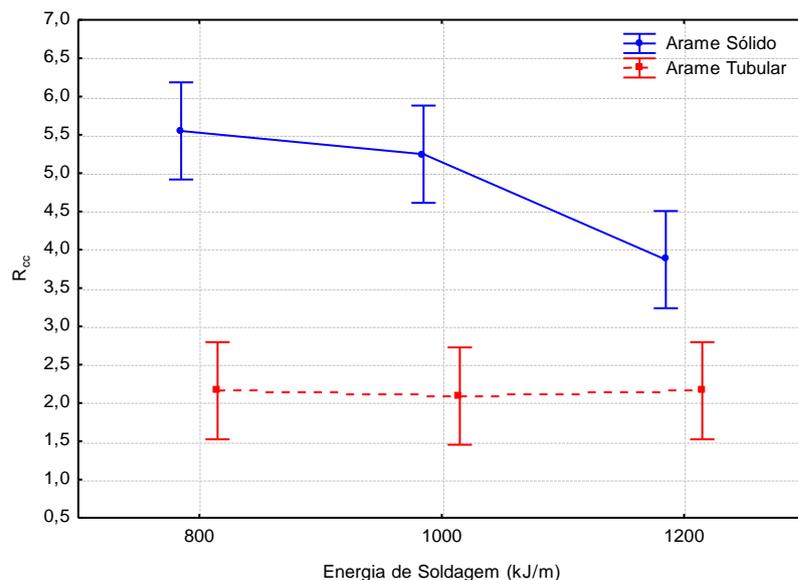
Verifica-se que o arame sólido apresentou maiores valores para o índice de regularidade RE em relação ao arame tubular, indicando assim que o mesmo apresenta maior regularidade na energia dissipada para a reabertura do arco após a ocorrência do curto-circuito. Acredita-se ainda, que a maior regularidade notada para

o arame sólido possa ser atribuída aos menores desvios padrões observados nos dados de estabilidade apresentados na Tabela 4, além da maior homogeneidade constatada nos sinais dinâmicos apresentados nas Figuras 24 a 26.

Percebe-se ainda por meio da Figura 33, que a avaliação estatística apontou para a menor energia de soldagem (800 kJ/m) como sendo a de melhor estabilidade em termos de regularidade de transferência de carga para ambos os arames.

Levando em consideração o índice de regularidade de transferência metálica R_{cc} apresentado na Tabela 5 e as características dinâmicas ilustradas nas Figuras 24 a 29, nota-se que o arame sólido apresenta uma distribuição mais regular dos curtos-circuitos. Observando-se a Figura 34, a avaliação estatística também caminhou para esta direção, onde os maiores índices indicam maior regularidade.

Figura 34 – Relação entre o índice de regularidade de curto-circuito e os fatores arame e energia.



Fonte: Autor, 2018.

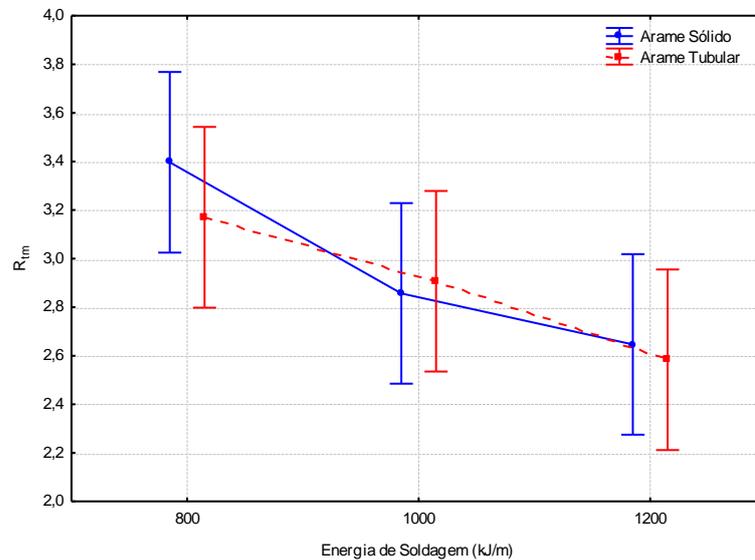
Analisando o resultado apresentado na Figura 34, nota-se que tanto a energia de soldagem como o tipo de arame influenciam o índice R_{cc} , sendo que o tipo de arame é o fator que apresentou maior efeito. Os maiores resultados apresentados para a soldagem com o arame sólido podem ser explicados por meio dos menores desvios padrões apresentados na Tabela 4 para os períodos de transferência metálica (T), da mesma forma que a constância de R_{cc} para o arame tubular também está relacionado

à similaridade dos desvios padrões dos períodos de transferência metálica apresentados na Tabela 4.

De maneira análoga aos outros índices avaliados, os resultados de R_{cc} convergem para o melhor nível de estabilidade para a energia de 800 kJ/m para ambos os arames, embora para o arame tubular não tenha uma disparidade nos resultados apresentados.

Com relação à estabilidade do processo, de forma geral, o processo, a princípio, tenderá a ser mais estável, com transferência mais regular, refletindo-se inclusive no desempenho, ou seja, na produtividade (FARIAS, 1993; MOTA, 1998). Observando os dados da Figura 35, nota-se que não há diferença entre com relação ao índice R_{tm} quando se avalia o tipo de arame, sendo o efeito mais proeminente na variação da energia.

Figura 35 – Relação entre o índice de regularidade de transferência metálica e os fatores arame e energia.



Fonte: Autor, 2018.

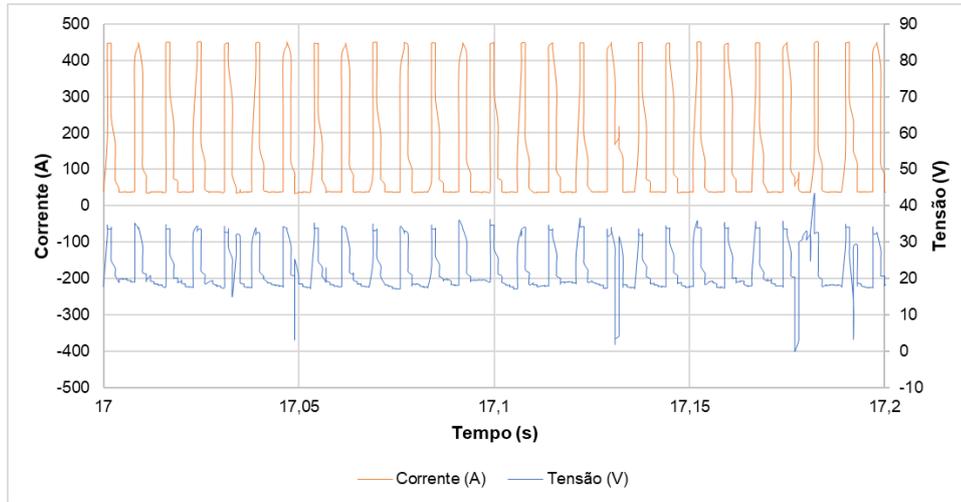
5.1.2 Avaliação da Estabilidade do Arco em Corrente Pulsada

A estabilidade do processo de soldagem em corrente pulsada apresenta maior complexibilidade em se obter uma transferência metálica regular, devido à maior quantidade de variáveis que atuam no controle do arco, como foi abordado na revisão de literatura. Embora as soldagens realizadas no presente trabalho tenham explorado o modo sinérgico da fonte utilizada, é possível verificar por meio das Figuras 36 a 41 alguns pontos tocantes em relação à estabilidade para os três níveis de energia avaliados, mesmo levando em consideração que o controle sinérgico tende a proporcionar ajustes para otimização do processo de soldagem.

Por meio desses oscilogramas é possível observar que para a soldagem com o arame sólido, as energias de 1000 e 800 kJ/m apresentam sinais sem a ocorrência de um grande número de eventos nos 200 ms avaliados quando comparados à energia de 1200 kJ/m, que apresenta maior quantidade de eventos entre os intervalos de 17,1 a 17,2 nas curvas do sinal de tensão e corrente. Esses eventos caracterizam possíveis curtos-circuitos durante a execução das soldas, acarretando, assim, em menor estabilidade do arco durante a soldagem (RAJASEKARAN, 2002).

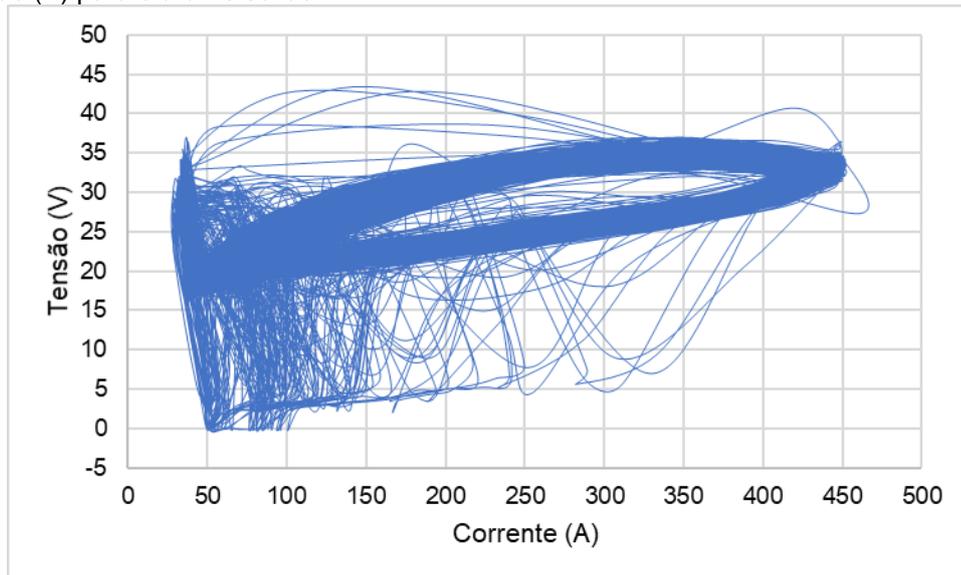
Quando se utiliza a soldagem em modo pulsado, a estabilidade desde processo é universalmente relacionada a uma transferência metálica que garanta uma gota a cada pulso (MIRANDA, 1999; RAJASEKARAN, 2002; SCOTTI e PONOMAREV, 2008; VILARINHO, 2000). No entanto, a avaliação em relação à estabilidade do processo também poder ser realizada por meio de técnicas qualitativas simples e rápidas, tais como os ciclogramas. As Figuras 37, 39 e 41, apresentam os ciclogramas referentes a um tempo de 10 s para cada energia de soldagem.

Figura 36 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1200 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame sólido.



Fonte: Autor, 2018.

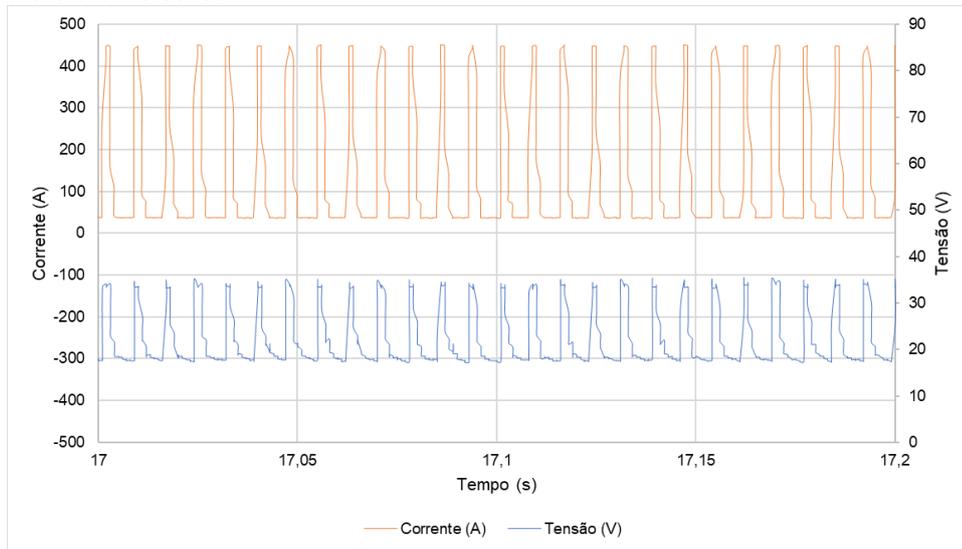
Figura 37 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1200 kJ/m - Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame sólido.



Fonte: Autor, 2018.

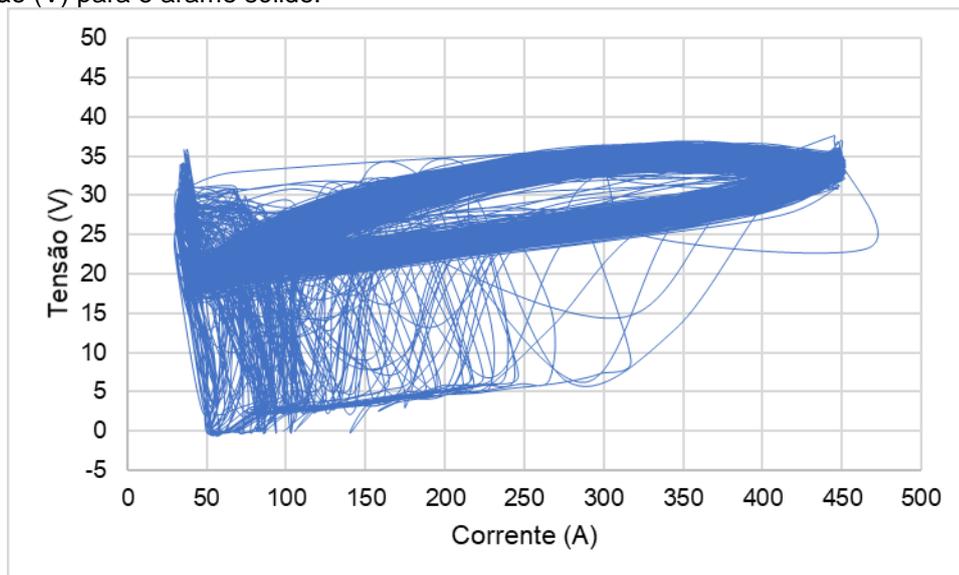
A incidência de eventos observados nos oscilogramas de tensão das Figuras 36, 38 e 40 também pode ser confirmada pelos ciclogramas por meio da dispersão das linhas dos ciclos ($I \times U$). Verificando ainda os ciclogramas referentes ao arame sólido, nota-se que a grande maioria dos eventos ocorre na parte esquerda e mais inferior dos gráficos de potência, ou seja, são ocasionados a menores valores de corrente e tensão, o que também se confirma por meio das curvas de correntes, onde nota-se a ocorrência dos eventos normalmente ocorrendo após a queda de corrente após a pulsação.

Figura 38 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1000 kJ/m - Oscilogramas de corrente e tensão para o arame sólido.



Fonte: Autor, 2018.

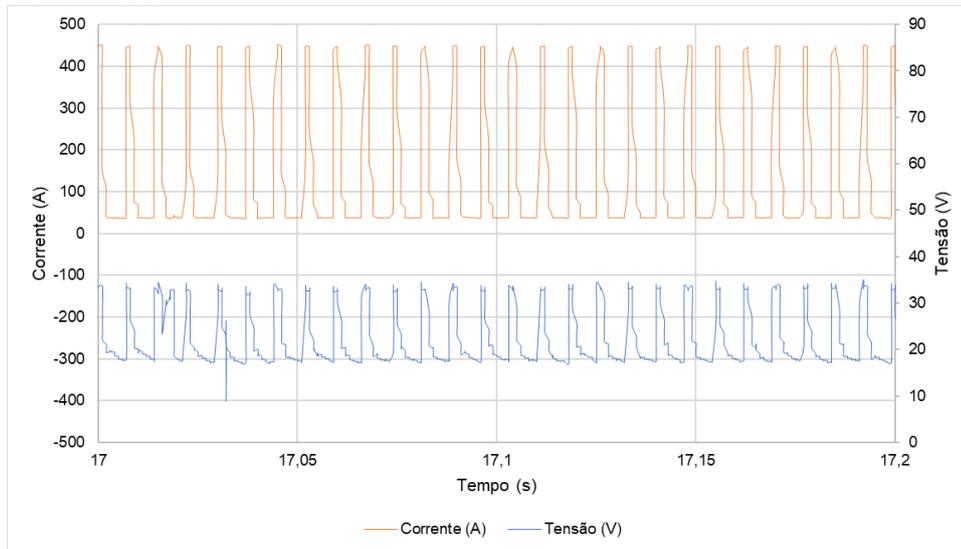
Figura 39 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1000 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame sólido.



Fonte: Autor, 2018.

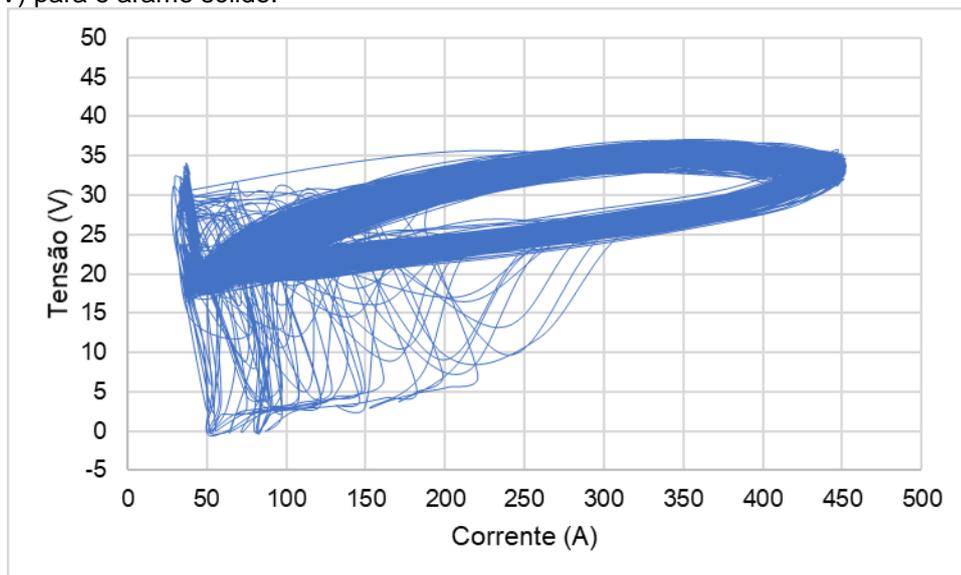
Em relação à avaliação da estabilidade utilizando os ciclogramas, a energia de 800 kJ/m é a de maior estabilidade, pois foi a que apresentou menor dispersão das linhas do ciclo, além de menor área, enquanto que a maior energia tem a pior estabilidade, confirmada por meio do maior espalhamento dos pontos de tensão uma função da intensidade de corrente, caracterizado por uma menor repetitividade para estes sinais, ocasionando em aumento da instabilidade (PESSOA, et al. 2010; SUBAN e TUSEK, 2003).

Figura 40 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 800 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame sólido.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 41 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 800 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame sólido.



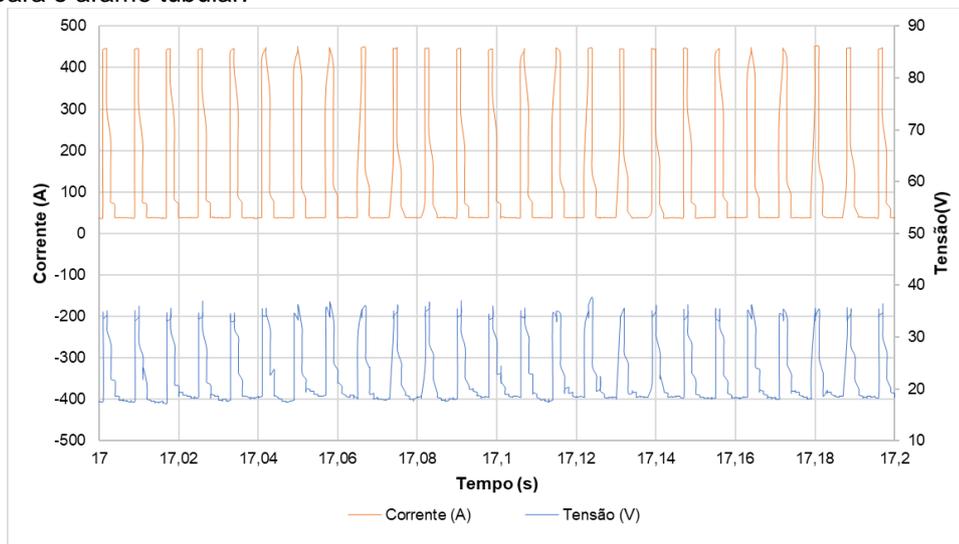
Fonte: Autor, 2018.

O comportamento qualitativo para estabilidade do arame tubular é apresentado por meio dos sinais dinâmicos de seus oscilogramas e gráficos de potência ($I \times U$) por intermédio das Figuras 42 a 47. Por meio dos oscilogramas apresentados para o arame tubular, constata-se para as energias de 1000 e 800 kJ/m a presença de alguns eventos nos sinais de tensão, sugerindo a incidência de possíveis curtos-circuitos, no entanto, em menor número entre os intervalos avaliados quando comparado ao arame sólido. É importante destacar que as avaliações qualitativas que estão sendo feitas

por meio dos ciclogramas não descartam a possibilidade de se utilizar, por exemplo, as energias de 1200 e 1000 kJ/m apresentadas nas Figuras 37 e 39, todavia as maiores dispersões para essas energias indicam a provável ocorrência de um maior número de curtos-circuitos durante a operação de soldagem, o que pode levar assim a maior perda de material devido a maior quantidade de respingos produzidos.

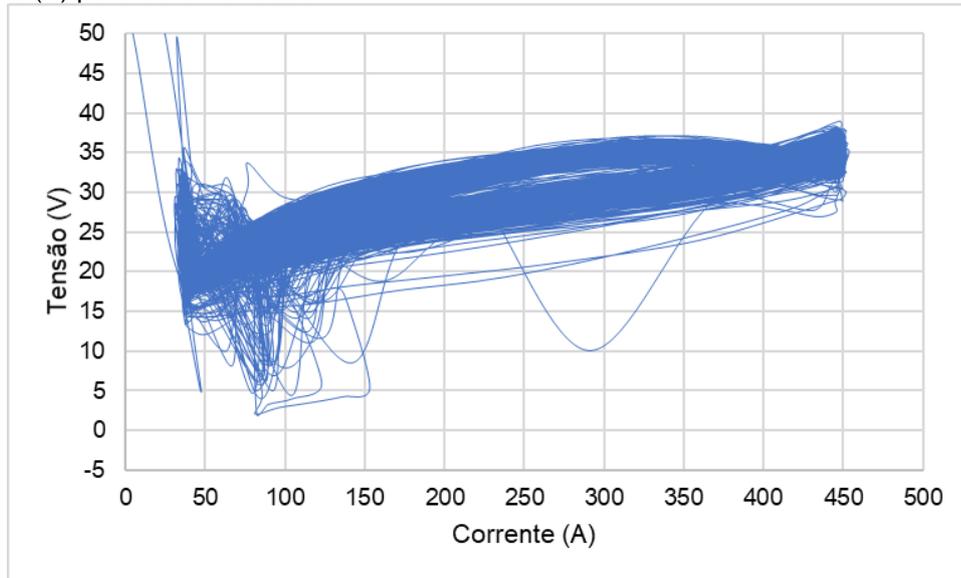
Embora o modo sinérgico busque fornecer parâmetros (correntes e tempos de pico e base) que proporcionem o destacamento de uma única gota por pulso (UGPP) por meio cálculos realizados através de um algoritmo presente no *software* da fonte de soldagem através de correlações entre a corrente média e a taxa de alimentação do arame, muitas vezes torna-se necessário um “ajuste fino” realizado manualmente na velocidade de alimentação do arame para alcançar um comprimento de arco otimizado e que garanta a condição UGPP como relatam os autores Vilarinho *et al* (2000). Então acredita-se que os curtos-circuitos observados para os oscilogramas dos dois arames em discussão possam ter ocorrido devido a um comprimento de arco não otimizado.

Figura 42 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1200 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame tubular.



Fonte: Autor, 2018.

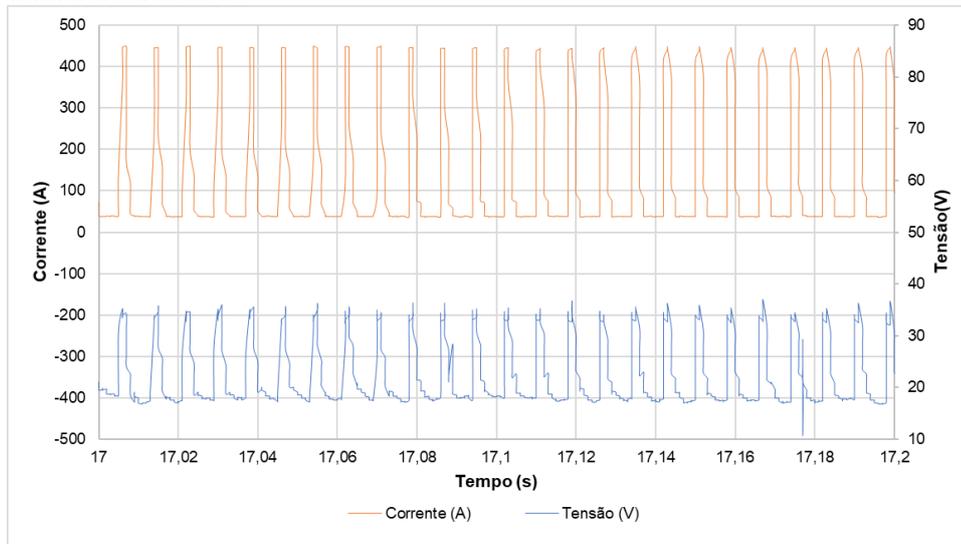
Figura 43 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1200 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame tubular.



Fonte: Autor, 2018.

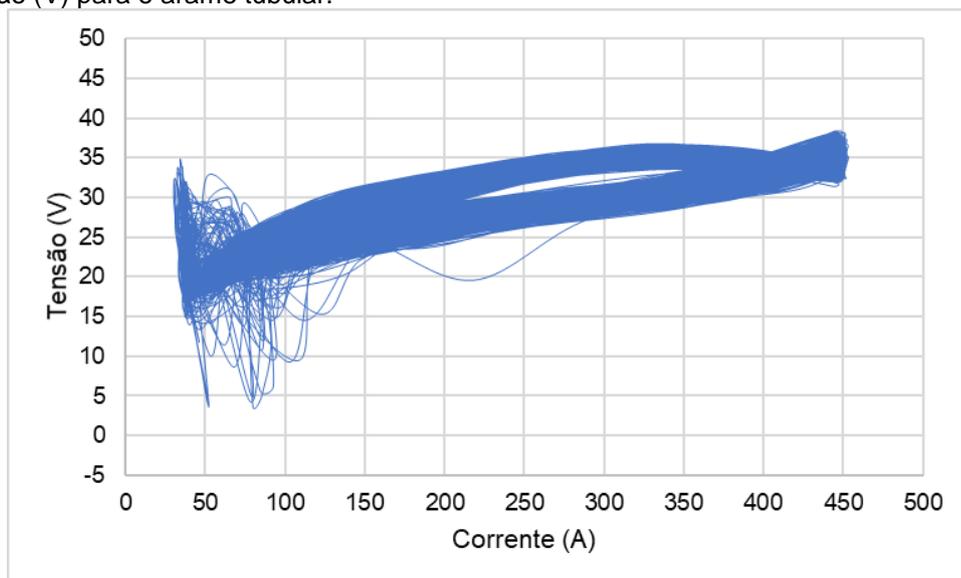
Novamente observando as Figuras 43, 45 e 47, nota-se que não há muita dispersão nos gráficos de potência para o arame tubular quando comparado ao arame sólido. Ainda por meio dos ciclogramas apresentados para o arame tubular, verifica-se que as energias de 1000 e 800 kJ/m apresentam maiores regularidades em seus ciclos em relação à energia de 1200 kJ/m. Todavia, pode-se confirmar que o arame tubular apresenta melhor estabilidade em todos os níveis quando comparado ao arame sólido. Acredita-se que o melhor desempenho apresentado nos gráficos de potência para o arame tubular, uma vez que os parâmetros utilizados foram os mesmos para ambos os arames, seja devido à maior inserção de elementos estabilizadores de arco presentes no fluxo deste consumível.

Figura 44 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1000 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame tubular.



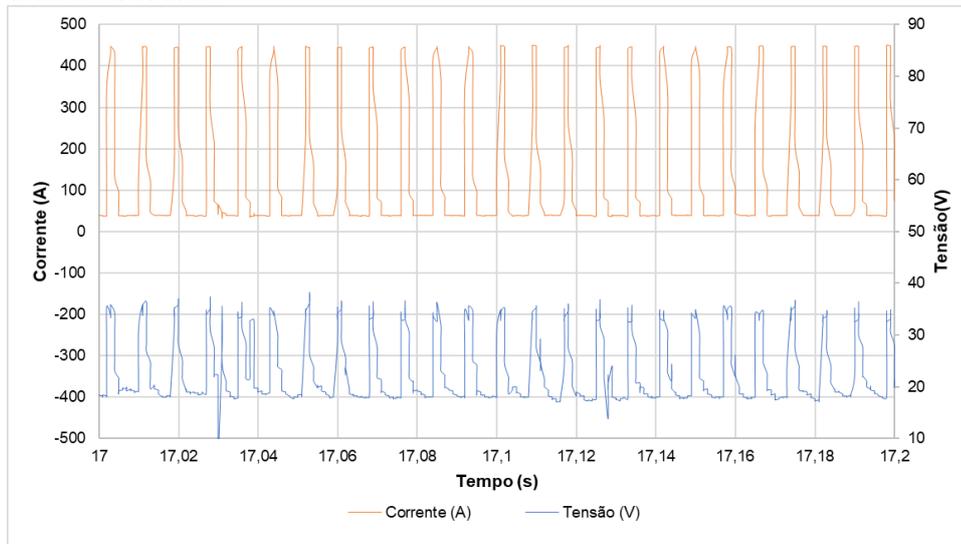
Fonte: Autor, 2018.

Figura 45 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 1000 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame tubular.



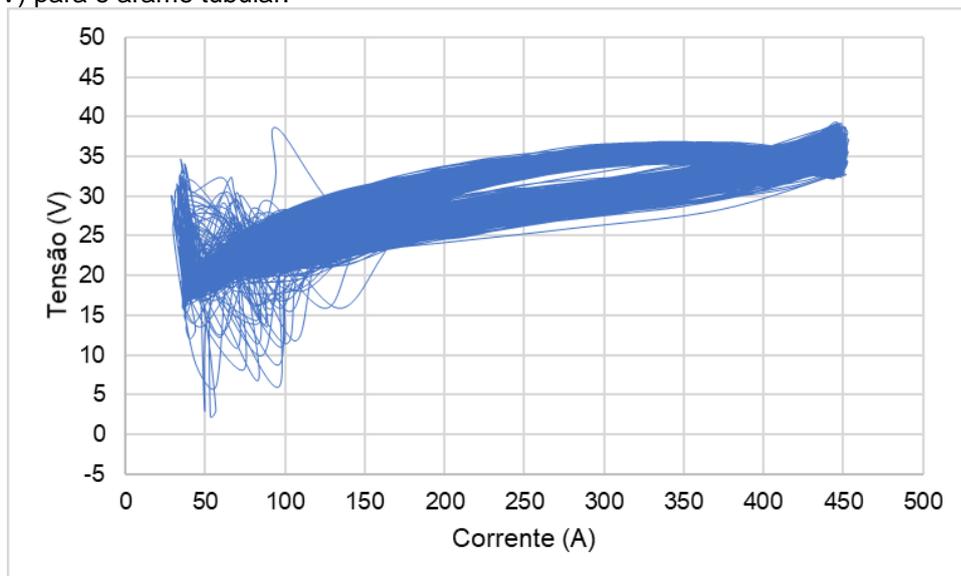
Fonte: Autor, 2018.

Figura 46 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 800 kJ/m – Oscilogramas de corrente e tensão para o arame tubular.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 47 – Sinais dinâmicos para a soldagem com energia de 800 kJ/m – Ciclogramas de corrente (A) x tensão (V) para o arame tubular.



Fonte: Autor, 2018.

Como foi mencionado, a avaliação por meios dos oscilogramas e ciclogramas consiste em uma maneira mais objetiva para avaliação das características correlacionadas à estabilidade do arco. Para isso, utilizou-se uma metodologia baseada no estudo proposto por Rajasekaran (2002) descrito na seção 3 e apresentada a seguir na Tabela 6.

Tabela 6 – Análises estatísticas para as soldagens em corrente pulsada.

	Energia (kJ/m)	I_p (A)	U_p (V)	T_p (ms)	T (ms)	E_{ciclo} (J)	$\sigma-E_{ciclo}$ (J)	$\frac{\sigma E_{ciclo}}{E_{ciclo}} \%$	Número Pulsos
Arame Sólido	1200	446,94	32,68	2,47	7,37	3923,98	440,79	11,23	2295
		446,70	33,11	2,49	7,50	3965,61	525,06	13,24	2253
		441,15	33,57	2,41	7,58	3859,39	794,13	20,58	2227
	1000	440,70	33,03	2,41	7,54	3797,74	739,06	19,46	1929
		439,52	32,98	2,42	7,66	3800,17	794,67	20,91	1900
		439,34	32,83	2,47	7,26	3891,17	820,35	21,08	2009
	800	447,17	33,47	2,40	7,46	3878,26	455,95	11,76	1415
		447,47	33,46	2,44	7,46	3904,36	428,57	10,98	1519
		448,10	33,03	2,44	7,45	3928,72	377,44	9,61	1521
Arame Tubular	1200	447,19	34,55	2,4	8,05	3702,27	360,52	9,74	2109
		448,32	34,49	2,49	8,27	3764,11	344,20	9,14	2043
		449,0	35,57	2,56	8,86	3721,93	283,36	7,61	1935
	1000	447,65	34,58	2,41	8,06	3715,43	308,68	8,31	1807
		447,21	34,68	2,43	8,19	3700,25	323,21	8,73	1769
		447,55	34,11	2,45	7,89	3807,33	299,05	7,85	1846
	800	448,0	34,85	2,44	8,14	3752,78	309,32	8,24	1394
		448,1	34,55	2,46	8,07	3798,18	311,13	8,19	1410
		447,8	35,42	2,43	8,39	3679,95	278,77	7,58	1357

Fonte: Autor, 2018.

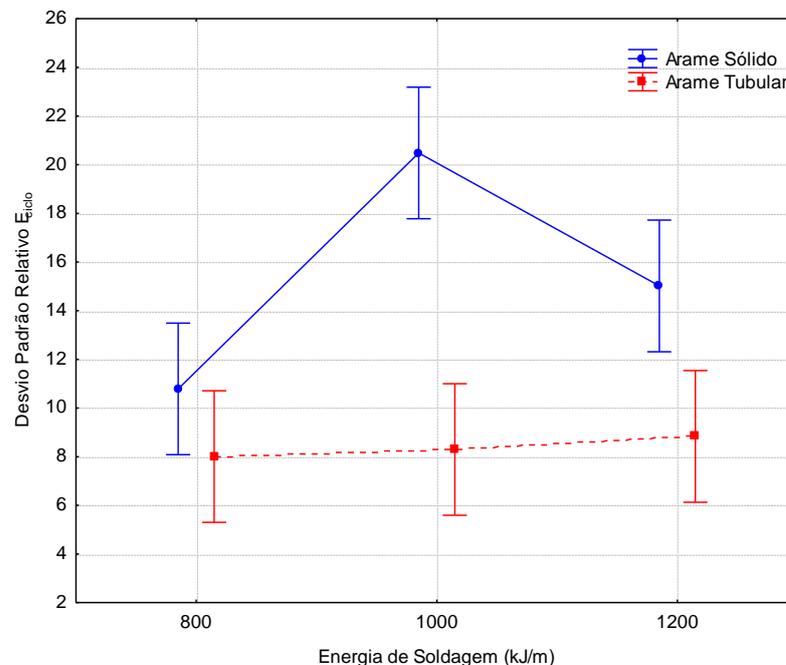
Embora a variação dos três níveis de energia tenha sido obtida por meio da velocidade de soldagem, alguns pontos interessantes podem ser levados em consideração em relação aos resultados apresentados na Tabela 6, onde, por exemplo, nota-se que para os mesmos parâmetros (corrente, tensão e velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, DPCB) entre os níveis de energia utilizados, há um comportamento divergente entre os arames. Isso pode ser confirmado observando os períodos de pulso (T), os quais são maiores para o arame tubular, caracterizando uma menor transferência de gotas, o que também pode ser confirmado pelo número de pulsos. Para os valores de corrente de pico (T_p) e tensão de pico (U_p) ocorre uma equidade para estes valores, muito provavelmente devido ao controle sinérgico da fonte.

Ainda de acordo com os dados da Tabela 6, o ponto mais importante da análise está relacionado à energia do ciclo (E_{ciclo}) e seus respectivos desvios padrões. Os valores apresentados para a energia do ciclo correspondem à parcela de potência média instantânea para intervalos de 50 % do tempo de solda total. As condições que apontam maior regularidade para a soldagem utilizando o arame sólido são as com energia de 800 kJ/m, pois apresentaram menores desvios padrões relativos em relação às demais energias avaliadas (RAJASEKARAN, 2002).

Para o arame tubular, nota-se que para os três níveis de energias não há muita disparidade entre seus desvios padrões relativos, mas valores muito convergentes entre si, o que sugere que a faixa de trabalho operacional é maior que a do arame sólido, pois a variação de velocidade de soldagem pouco impactou nos desvios padrões relativos da potência média instantânea quando comparado ao arame sólido, o que também pode ser averiguado por meio do comportamento apresentado nos ciclogramas. Todavia, verifica-se que a energia de 800 kJ/m apresentou os menores desvios padrões relativos para o arame tubular, indicando a ocorrência de formatos de ondas com maior regularidade e respectivamente, maior estabilidade no arco para este nível energético.

A Figura 48 ilustra o efeito da energia de soldagem sobre o desvio padrão relativo da energia do ciclo para ambos os arames utilizados. Esta Figura permite supor que o aumento da energia, embora aqui seja proporcionado pela variação de velocidade, proporcionou maior irregularidade para o arame sólido nas maiores energias, principalmente na energia intermediária, enquanto que o arame tubular não apresentou variação significativa.

Figura 48 – Relação entre o desvio padrão relativo da energia do ciclo com os fatores arame e energia.

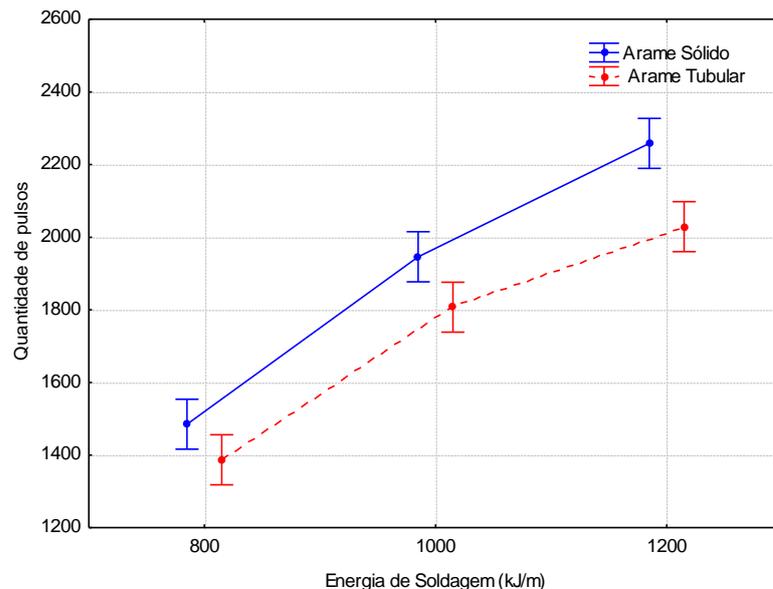


Fonte: Autor, 2018.

Para a soldagem em corrente pulsada, o arame tubular transfere gotas de maior tamanho para a poça de fusão, pois apresenta menor frequência de pulsos em relação ao sólido para os mesmos níveis de energia de soldagem utilizados, como pode ser observado na Tabela 6.

A Figura 49 apresenta o efeito da energia de soldagem em relação à quantidade de pulsos. Como pode ser notado por meio desta Figura, o arame sólido apresenta maior quantidade de gotas transferidas em relação ao tubular, onde supõe-se que seja devido ao mesmo apresentar menores períodos de pulso (T), ocasionando uma maior quantidade de pulsos como é indicado na Tabela 6 e na avaliação estatística da Figura 49.

Figura 49 – Relação entre a quantidade de pulsos com os fatores arame e energia.



Fonte: Autor, 2018.

5.2 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS

A Tabela 7 apresenta os valores médios das características econômicas, consumo (C), produção (P) e rendimento (R) para os arames sólido e tubular, na qual verifica-se que o nível de rendimento atingiu a faixa entre 91% e 99%. Cabe ressaltar, no entanto, que o processo foi realizado por procedimento automático com uma fonte com controle sinérgico, o que tende a melhorar o desempenho do processo. A Tabela completa com as características econômicas está disponível no Apêndice B.

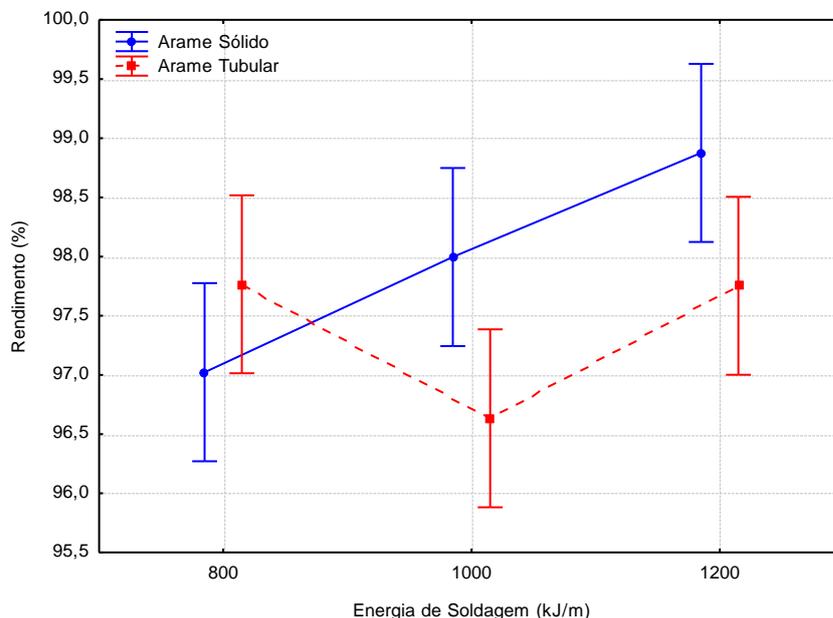
Tabela 7 – Dados das características econômicas.

Arame	Processo	Energia Soldagem (kJ/m)	Consumo (kg/h)	Produção (kg/h)	Rendimento (%)
Sólido	Curto-circuito	1200	1,92 ± 0,0	1,88 ± 0,01	98,52 ± 0,85
		1000	1,92 ± 0,0	1,87 ± 0,0	98,03 ± 0,14
		800	1,92 ± 0,0	1,88 ± 0,0	97,04 ± 0,95
	Pulsado	1200	2,46 ± 0,0	2,35 ± 0,01	97,87 ± 0,86
		1000	2,46 ± 0,0	2,33 ± 0,0	96,00 ± 0,23
		800	2,46 ± 0,0	2,34 ± 0,01	97,31 ± 0,08
Tubular	Curto-circuito	1200	1,83 ± 0,0	1,74 ± 0,0	97,78 ± 0,31
		1000	1,83 ± 0,0	1,73 ± 0,0	96,90 ± 0,55
		800	1,83 ± 0,0	1,73 ± 0,0	97,83 ± 0,29
	Pulsado	1200	2,31 ± 0,0	2,07 ± 0,0	92,90 ± 0,71
		1000	2,31 ± 0,0	2,09 ± 0,0	93,49 ± 0,24
		800	2,31 ± 0,0	2,07 ± 0,01	91,40 ± 0,46

Fonte: Autor, 2018.

A Figura 50 apresenta a avaliação estatística do efeito da energia de soldagem sobre o rendimento para os arames sólido e tubular no modo de transferência metálica por curto-circuito.

Figura 50 – Relação entre o rendimento com os fatores arame e energia para a soldagem por curto-circuito.



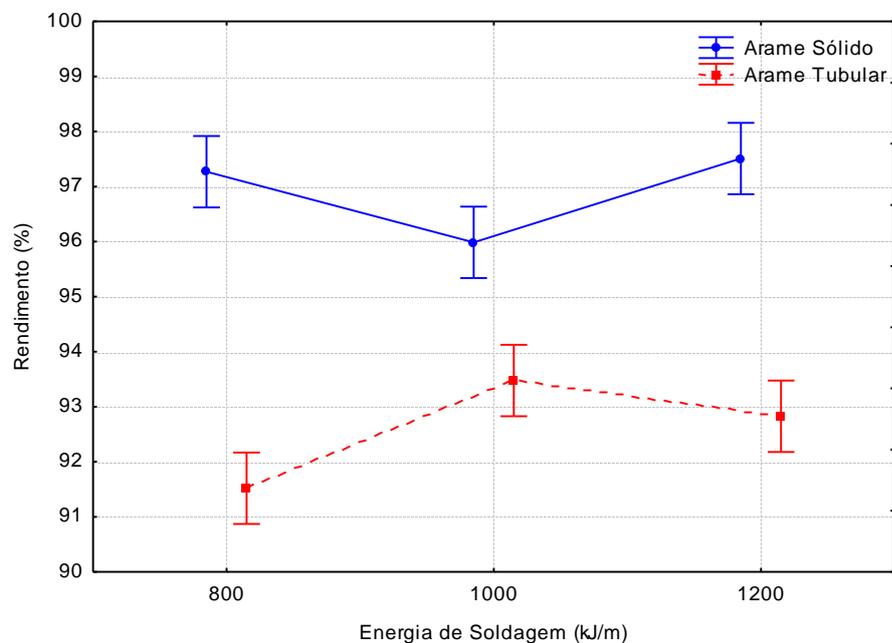
Fonte: Autor, 2018.

Nota-se por meio da avaliação estatística realizada para a soldagem por curto-circuito, que quando se avalia o tipo de arame, parece não ter um efeito significativo sobre o rendimento, sendo mais decorrente da variação da energia de soldagem. Verifica-se ainda por meio da Figura 50, que o arame tubular apresenta uma ligeira redução no

rendimento para as maiores energias quando comparado com o desempenho apresentado pelo arame sólido, em que supõe-se que esse fato possa estar relacionado aos maiores desvios padrões notados por meio da avaliação de estabilidade nos sinais dinâmicos deste consumível e da transferência mais uniforme de gotas constatadas para o arame sólido.

Em relação a soldagem em modo pulsado, o arame tubular apresentou o menor rendimento para a soldagem com a menor energia (800 kJ/m), destoando do que foi apresentado anteriormente em relação à estabilidade, enquanto que o arame sólido apresentou o menor rendimento para a energia intermediária (1000 kJ/m), corroborando com os resultados vistos outrora em relação a estabilidade, os quais apresentaram maior dispersão em seu ciclograma (Figura 39) além dos maiores desvios padrões relativos apresentados na Tabela 6. A Figura 51 ilustra o efeito da energia de soldagem e do tipo de arame sobre o rendimento para a soldagem em modo pulsado.

Figura 51 – Relação entre o rendimento e os fatores arame e energia para a soldagem em modo pulsado.



Fonte: Autor, 2018.

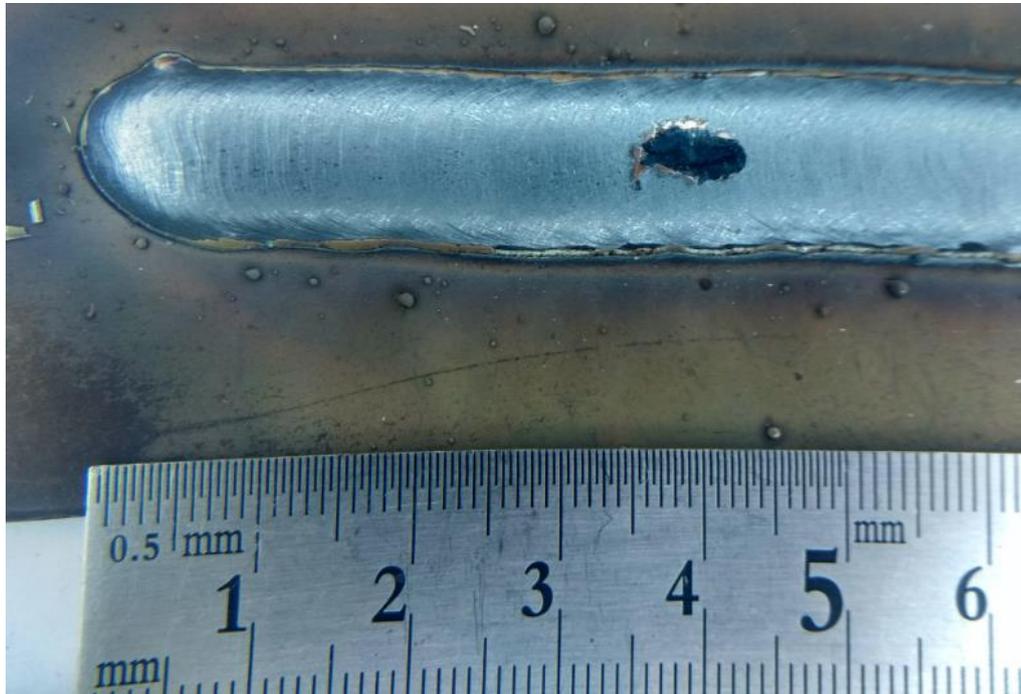
Acredita-se que o menor rendimento apurado para a soldagem em modo pulsado utilizando o arame tubular possa estar correlacionado à maior inserção de elementos de liga para a compensação metalúrgica, interferindo no arco e na característica do

material fundido. Possivelmente a mudança na característica do fundido poderá mudar a viscosidade da gota, interferindo nas forças que controlam o tamanho da gota e conseqüentemente, a transferência.

Segundo os estudos de Rodrigues e Scotti (2008, 2009), a energia influencia a dinâmica da transferência através da cinemática da gota. No caso aqui em especial, embora a energia seja resultado da variação da velocidade de soldagem, mesmo que diretamente não se tenha um efeito na cinemática da gota e por conseguinte na sua quantidade de movimento, o mesmo já não pode ser dito quanto à poça de fusão. Assim, é possível que a maior energia promova uma maior fluidez da poça de fusão. Para uma mesma cinemática da gota, com uma poça mais volumosa e mais fluida, seria possível maior perturbação nesta e em alguns casos, tais perturbações podem inclusive gerar perdas de volume através do impacto desta gota. O contrário também seria possível, uma vez que com a gota mais fluida ao chocar-se com uma poça menos fluida, dependendo da dinâmica dessa gota, poderia vir a se esfacelar, gerando outras gotículas as quais não necessariamente seriam direcionadas à poça de fusão. Isso poderia interferir diretamente no rendimento do processo.

Pressupõe-se que de fato, a velocidade de transferência das gotas possa ter alguma relação ao menor rendimento obtido para o arame tubular utilizando o modo pulsado, pois durante as soldagens, independente da energia de soldagem imposta, observou-se a produção respingos com dimensões inferiores ao diâmetro do arame nas margens dos cordões de solda. Em relação ao arame sólido, não foi observado a presença de respingos nas menores proporções notadas para o arame tubular; verificou-se apenas respingos com maiores tamanhos, que sugerem ser provenientes de possíveis curtos-circuitos como foi discutido em relação a estabilidade anteriormente. A Figura 52 apresenta os respingos observados para as três energias de soldagem utilizadas para ambos os arames, na qual nota-se claramente que a menor energia de soldagem para o arame tubular (Figura 52 – f) foi a que apresentou a maior quantidade de pequenos respingos as margens do cordão, corroborando assim ao que foi teorizado anteriormente em relação ao menor rendimento em virtude do esfacelamento das gotas para essa faixa de energia de soldagem.

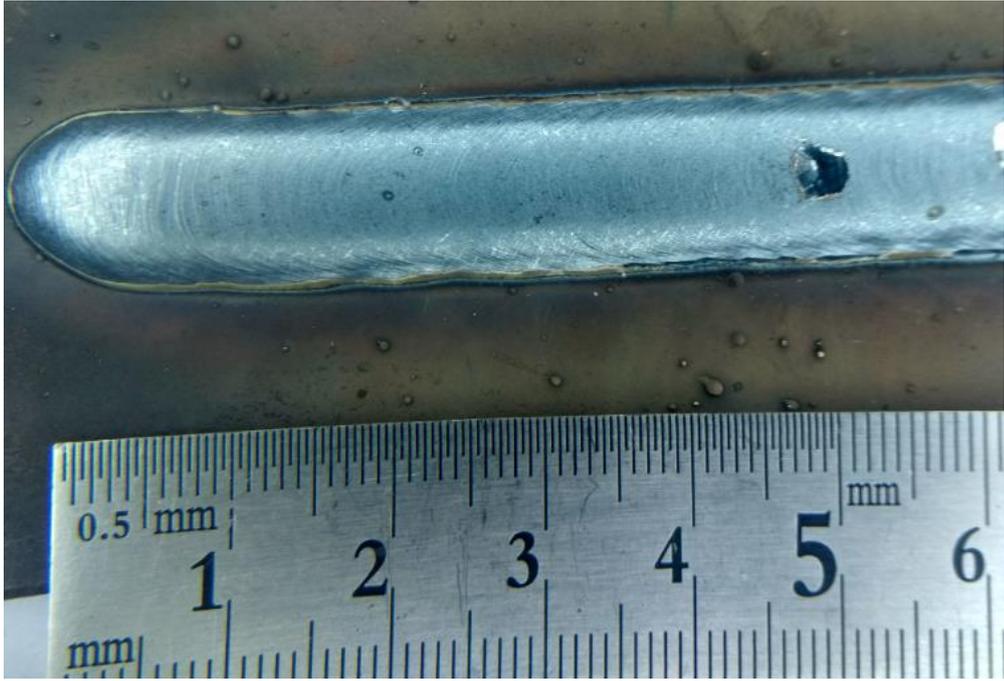
Figura 52 – Respingos ocasionados durante a soldagem em modo pulsado: (a) Arame sólido com energia de 1200 kJ/m; (b) Arame tubular com energia de 1200 kJ/m; (c) Arame sólido com energia de 1000 kJ/m; (d) Arame tubular com energia de 1000 kJ/m; (e) Arame sólido com energia de 800 kJ/m; (f) Arame tubular com energia de 800 kJ/m.



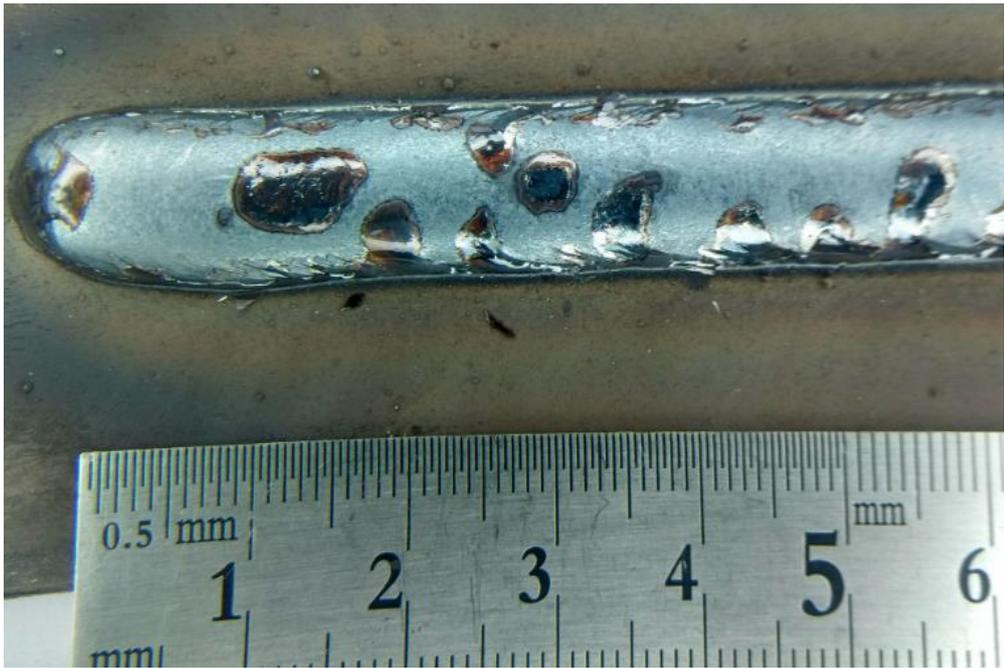
(a)



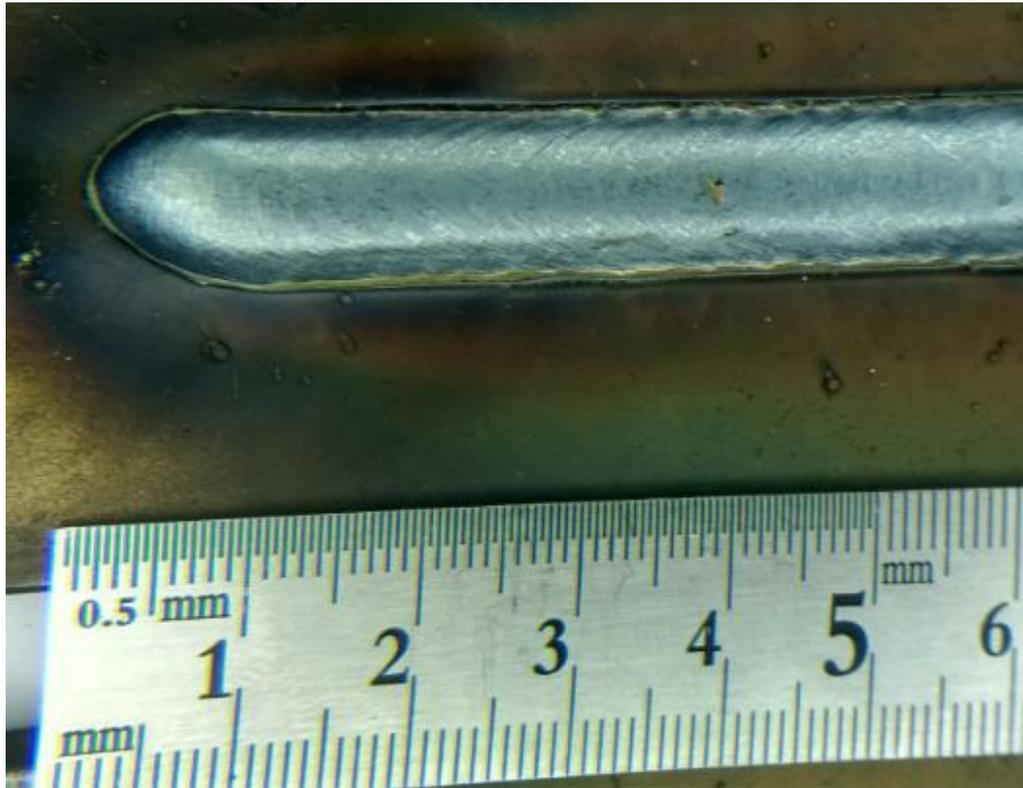
(b)



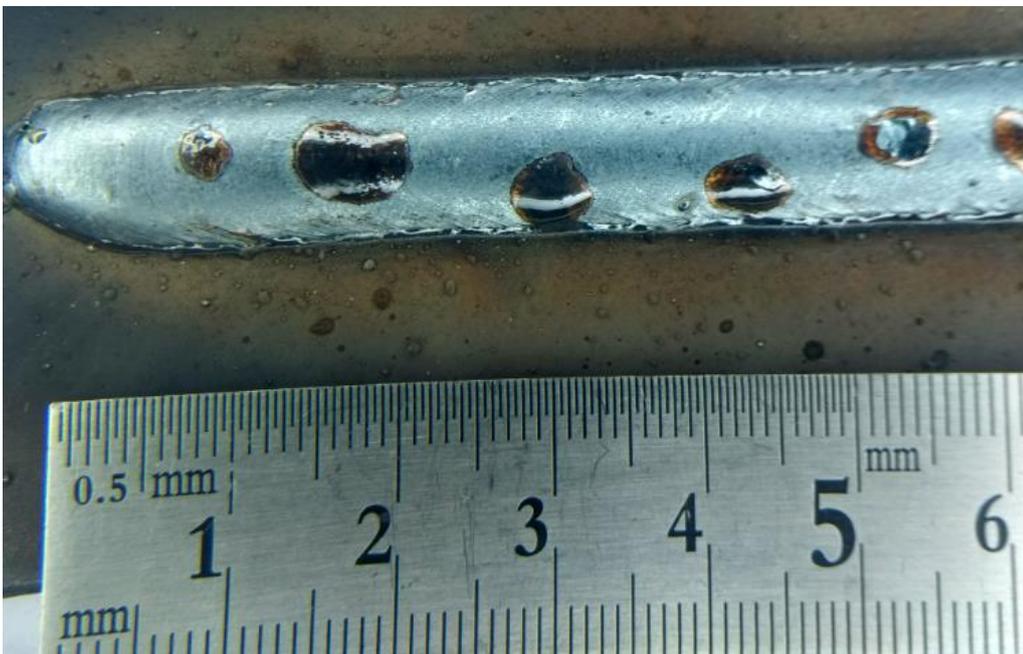
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autor, 2018.

Observa-se ainda por meio da Figura 52 (a), (c) e (f) que o arame tubular quando comparado ao arame sólido produziu maiores quantidades de escória vítrea, que de acordo com Olsoien, Liu e Olson (1996), é produto da oxidação de elementos como manganês e silício, que acabam se perdendo na superfície do cordão de solda. Então

acredita-se que essa maior quantidade de filmes vítreos formados na superfície do cordão seja em virtude da maior quantidade de elementos de liga presentes no fluxo do arame tubular. Em virtude ao maior percentual de escória vítrea notado para o arame tubular em todas as condições exploradas no modo pulsado, supõe-se que esse fator também contribuiu ao menor rendimento constatado.

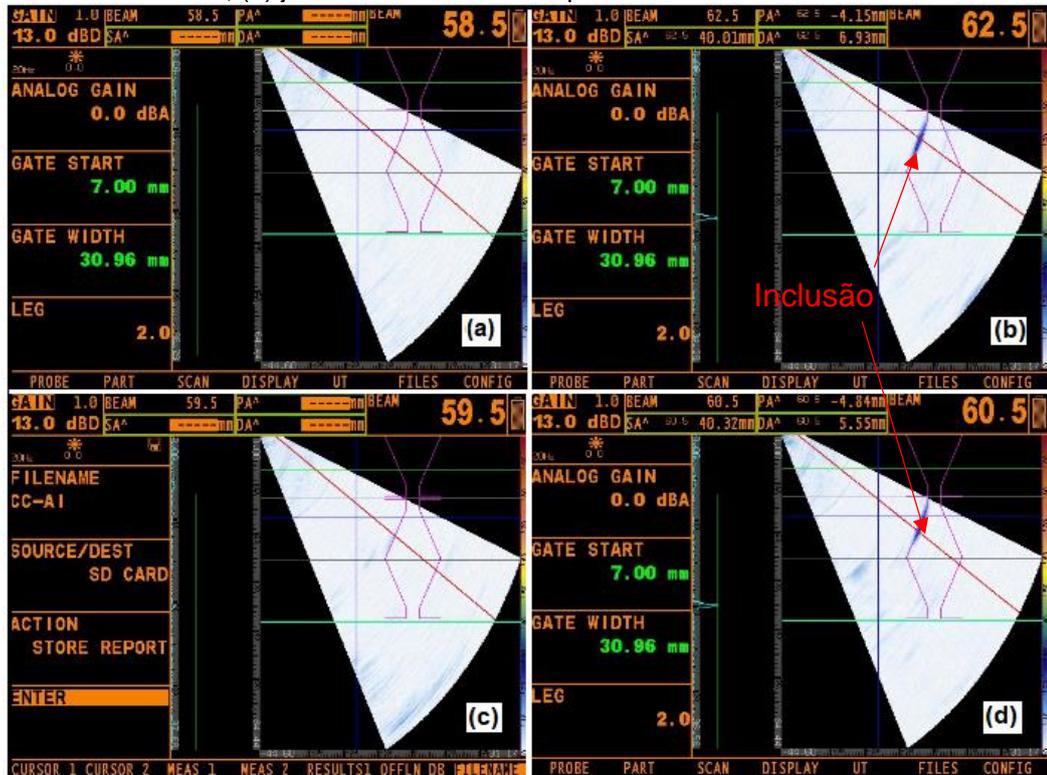
De acordo com os dados de produção apresentados na Tabela 7, verificou-se que o arame sólido para ambos os processos de soldagem (curto-circuito e pulsado) apresentou maior quantidade de material integrado ao metal de base por unidade de tempo em relação ao arame tubular, o que se acredita ser justificado por meio dos maiores valores (embora não tão significativos) observados anteriormente para o consumo do arame sólido.

5.3 QUALIDADE DAS JUNTAS SOLDADAS

Após as avaliações de estabilidade do arco e dos aspectos econômicos, selecionaram-se os parâmetros de maior estabilidade operacional e realizou-se a soldagem de quatro juntas de topo com dimensões de 500 mm x 300 mm x 12,3 mm para realizar correlações em relação ao efeito do modo de soldagem utilizado (curto-circuito e pulsado) sobre o tipo de consumível empregado por meio de avaliações metalúrgicas e testes mecânicos.

Após a soldagem das juntas, foram descartados conforme o requisito QW – 463.1 da seção IX do código ASME (2017), 25 mm em cada extremidade da junta com intuito de eliminar eventuais falhas decorrentes do início e fim do cordão. Antes de seccionar as juntas (Figura 17) para confecção dos corpos de provas dos ensaios mecânicos e metalográficos, verificou-se a presença de possíveis descontinuidades tais como trincas, porosidade, falta de fusão, falta de penetração, inclusões de escória, entre outras por meio da técnica de ultrassom nos sete passes realizados em cada junta. A Figura 53 ilustra uma visão geral dos resultados obtidos para as quatro juntas soldadas por meio da técnica de ultrassom com *phased array*.

Figura 53 – Resultados ensaios de ultrassom em juntas soldadas: (a) junta soldada por curto-circuito com arame tubular; (b) junta soldada em modo pulsado com arame tubular; (c) junta soldada por curto-circuito com arame sólido; (d) junta soldada em modo pulsado com arame sólido.



Fonte: Autor, 2018.

Por meio do ensaio de ultrassom não se observou a presença de descontinuidades como trincas, porosidade e falta de penetração em todas as quatro juntas soldadas como é apresentado na Figura 53. Em relação à presença de inclusões, para a soldagem por curto-circuito as juntas também não apresentaram esta falha para ambos os arames, todavia para a soldagem em modo pulsado verificou-se a presença de pequenas inclusões (tom mais azul) próximo ao bisel como é ilustrado nas Figuras 53 (b) e (d).

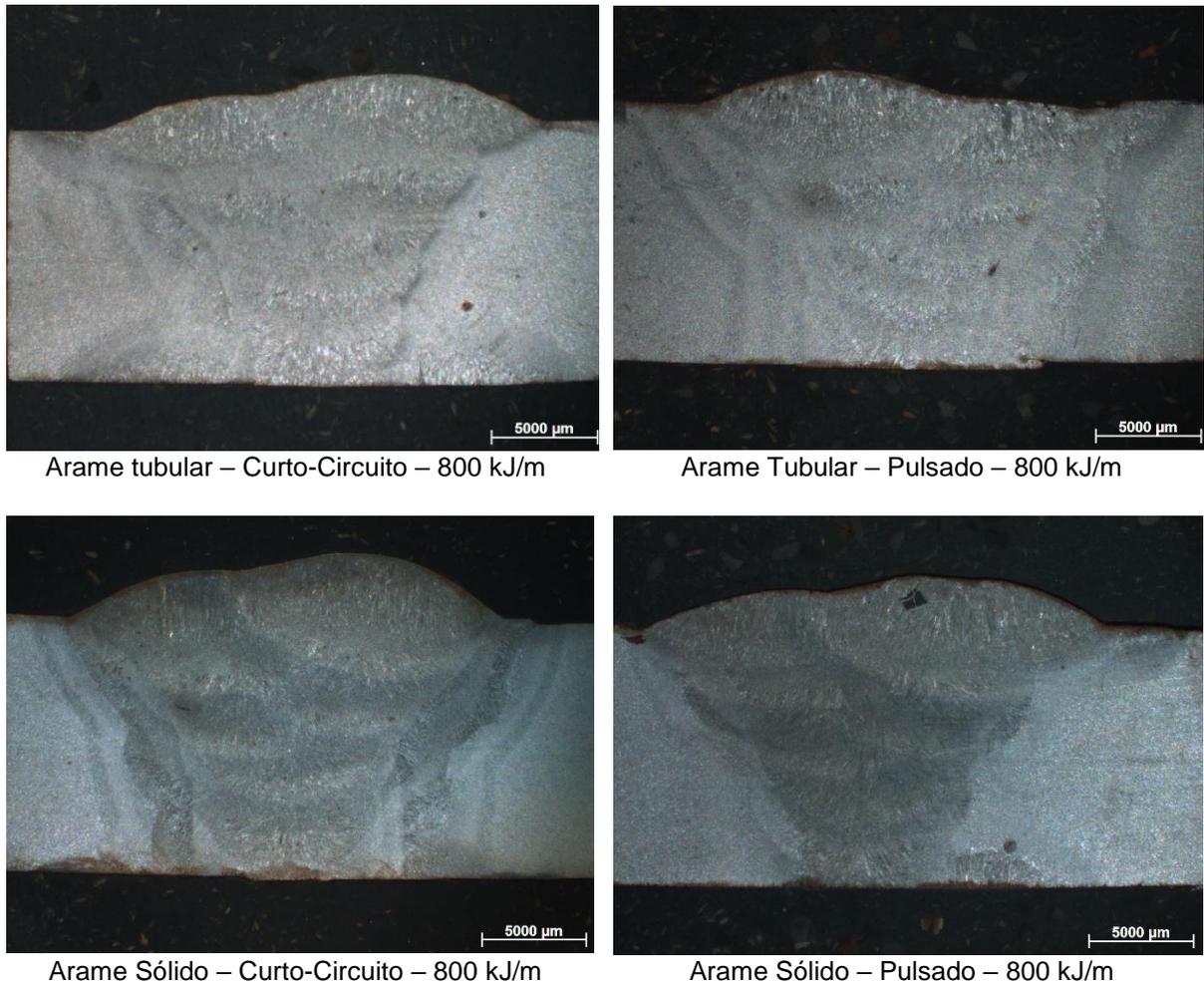
Acredita-se, que essas inclusões notadas nas Figuras 53 (b) e (d) para a soldagem em modo pulsado possam estar relacionadas as características observadas quanto ao comportamento de ambos os arames como visto em outrora, em que se observou que os mesmos produziram maior quantidade de escória vítrea e fumos metálicos em torno do cordão de solda em relação a soldagem por curto-circuito. Nesse sentido, acredita-se que uma parcela dessa escória vítrea possa ter ficado retida entre a margem do cordão com o metal de base mesmo com a limpeza realizada com escova de aço rotativa, favorecendo a ocorrência dessa descontinuidade.

5.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA DO METAL DE SOLDA

5.4.1 Análise Macrográfica

A Figura 54 expõe as macrografias das seções transversais das juntas soldadas com os arames sólido e tubular pertinentes aos processos por curto-circuito e pulsado, onde nota-se a sequência de passes realizados. Nas juntas soldadas em modo pulsado para o arame tubular, constata-se uma pequena quantidade de inclusões, o que é condizente ao resultado do ensaio de ultrassom mostrado na Figura 53 (b).

Figura 54 – Macrografias das seções transversais das juntas soldadas com arames sólido e tubular para processos por curto-circuito e modo pulsado



Fonte: Autor, 2018.

Observa-se ainda por meio das análises macrográficas que não houve diferença significativa no percentual de região de grãos colunares e de regiões retransformadas

quando se compara o efeito do fator arame para um mesmo processo de soldagem. Acredita-se que esta situação possa ser atribuída ao fato de terem sido aplicadas energias de soldagem similares com a mesma quantidade de passes proporcionando ciclos térmicos semelhantes em ambas juntas.

Por outro lado, o processo de soldagem aplicado ocasiona maior influência em relação às características das regiões de grãos colunares e das regiões retransformadas, o qual pode ser verificado por meio da Figura 54 que o processo de soldagem em modo pulsado produz maiores distâncias de refinamento de grãos nos cordões antecedentes. Em relação à maior recristalização dos grãos observada para o modo pulsado em comparação à soldagem por curto-circuito, supõe-se que esse efeito seja em virtude da maior potência instantânea do sistema arco voltaico – poça de fusão que ocorre quando se utiliza esse tipo de corrente.

5.4.2 Análises Micrográficas

Por meio da microscopia óptica (MO) com aumento de 500X, foi realizada análises qualitativa e quantitativa dos microconstituintes na região colunar referente ao último passe e na região retransformada coincidente com o entalhe dos corpos de prova para o ensaio Charpy-V. Para auxiliar na discussão dos resultados obtidos em relação às microestruturas, a Tabela 8 apresenta os resultados médios da espectrometria de emissão óptica da composição química das soldas referente aos arames sólido e tubular, pois o produto das microestruturas obtidas na zona fundida é influenciado tanto pelo perfil de resfriamento, quanto pela composição química da solda (MOORE; WALLACH; HOWSE, 2003).

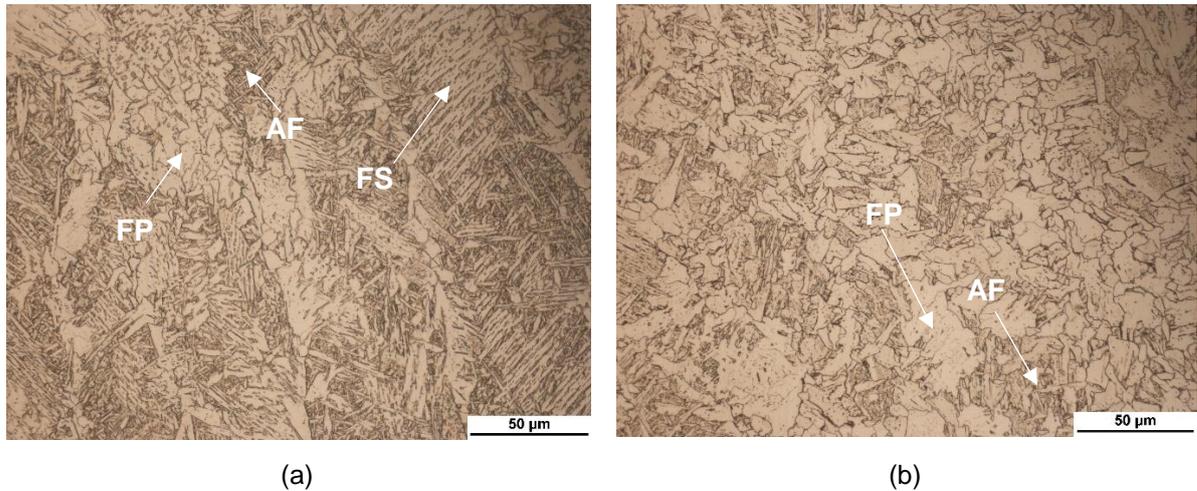
Tabela 8 – Composição química metal de solda para os arames sólido e tubular.

Composição química (%)							
Arame	C	Fe	Mn	P	Si	S	Ni
Sólido	0,1360	Balanço	1,06	0,0178	0,728	0,0115	0,0070
Tubular	0,0665	Balanço	1,60	0,0145	0,296	0,0185	0,0388

Fonte: Autor, 2018.

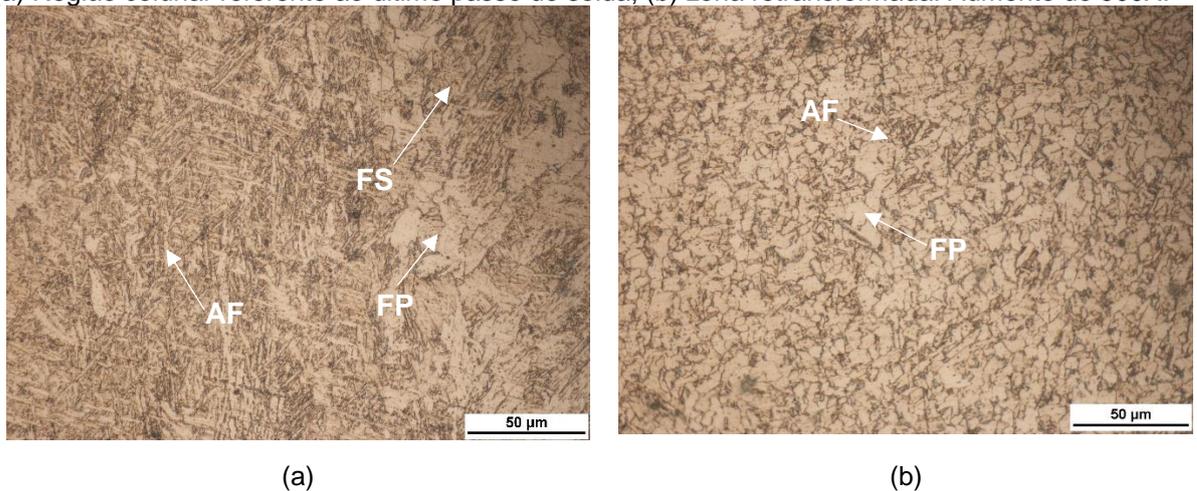
As Figuras 55 e 56 ilustram as micrografias do metal depositado para as soldas com o arame sólidos pelos processos por curto-circuito e pulsado..

Figura 55 – Micrografias para o metal de solda utilizando arame sólido pelo processo convencional por curto-circuito; (a) região colunar referente ao último passe de solda; (b) zona retransformada. Aumento de 500 X.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 56 – Micrografias para o metal de solda utilizando arame sólido pelo processo em modo pulsado; (a) Região colunar referente ao último passe de solda; (b) zona retransformada. Aumento de 500X.



Fonte: Autor, 2018.

Por meio das Figuras 55 (a) e 56 (a), observa-se que para ambos os processos de soldagem utilizando-se arame sólido, os principais microconstituintes presentes são ferrita primária (FP), ferrita acicular (AF) e ferrita de segunda fase (FS). Todavia, comparando o efeito do processo soldagem em relação à microestrutura observada, nota-se que o processo em modo pulsado produz “ripas” de menores tamanhos. Para a região retransformada, devido ao ciclo térmico do passe subjacente apresentadas nas Figuras 55 e 56 (b), verifica-se a presença de uma estrutura equiaxial com pacotes dispersos de ferrita acicular.

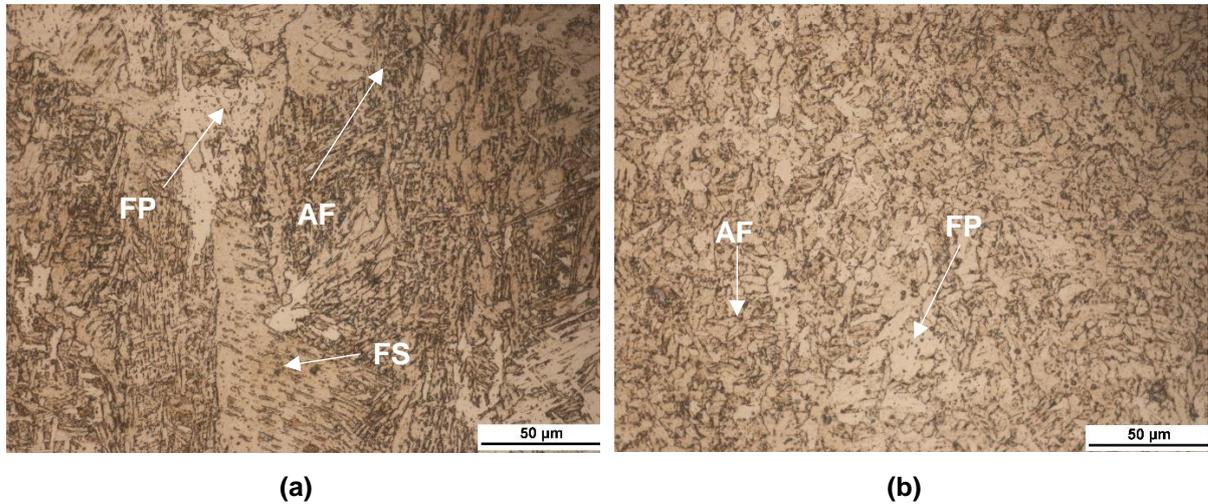
A quantidade de ferrita acicular observada para ambos os processos utilizando o arame sólido foi maior que a de ferrita de segunda fase. Acredita-se que a formação de ferrita acicular na soldagem utilizando o arame sólido esteja relacionada à adição de elementos de liga, em especial ao manganês e silício que se encontram em maior percentual na composição química (% p.) no metal de solda como pode ser observado na Tabela 8, e desta maneira, quando estes elementos se combinam com o oxigênio despreendido do dióxido de carbono do gás de proteção, a poça absorve parte do oxigênio, que por sua vez se associa ao manganês e silício, resultando em produtos como MnO , SiO_2 , $2MnO.SiO_2$, em que parte desses elementos é perdida na superfície do cordão como escória e/ou por vaporização e outra parte remanescente fica retida dentro da poça de fusão, na forma de solução sólida, ou partículas de óxidos finamente dispersas (OLSOIEN, LIU e OLSON, 1996).

Esses óxidos, que ficam retidos na poça de fusão, tornam-se locais para a nucleação de produtos da austenita, resultando em produtos tais como a ferrita acicular (AF) (OLSOIEN, LIU e OLSON, 1996; MOORE, WALLACH e HOWSE, 2003; KOU, 2003). Ainda nesse sentido Olsoien, Liu e Olson (1996) também utilizaram em seus estudos o mesmo arame sólido avaliado na pesquisa em questão (ER 70S6) e obtiveram os mesmos microconstituintes observados nas Figuras 55 e 56.

Verificou-se também que a soldagem em modo pulsado proporcionou maior refinamento dos grãos em relação à soldagem em modo convencional por curto-circuito, possivelmente relacionado às altas taxas de densidade de energia geradas pelo processo pulsado, que propiciam elevadas taxas de resfriamento (BABU e DAVID, 2002).

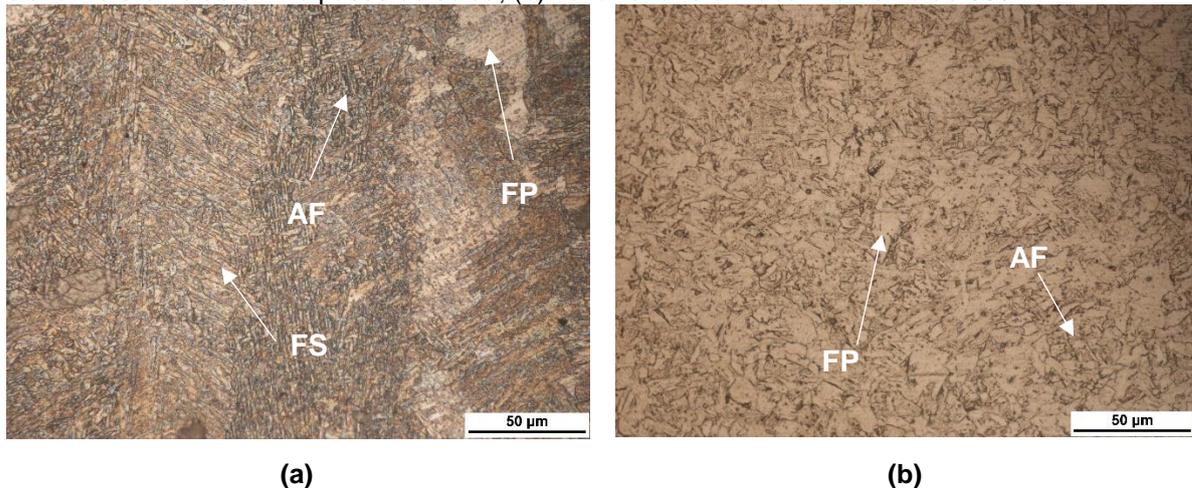
As Figuras 57 e 58 ilustram a evolução das microestruturas para o metal de solda depositado com o arame tubular por meio do processo de soldagem convencional por curto-circuito e modo pulsado.

Figura 57 – Micrografias para o metal de solda utilizando arame tubular pelo processo convencional por curto-circuito; (a) região colunar referente ao último passe de solda; (b) zona retransformada. Aumento de 500 X.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 58 – Micrografias para o metal de solda utilizando arame sólido pelo processo pulsado; (a) região colunar referente ao último passe de solda; (b) zona retransformada. Aumento de 500 X.



Fonte: Autor, 2018.

Para a soldagem utilizando o arame tubular, constatou-se de maneira análoga ao arame sólido a presença dos microconstituintes ferrita acicular (AF), ferrita de segunda fase (FS) e ferrita primária (FP). Estes microconstituintes também foram observados por Starling *et. al.* (2011) e por French e Bosworth (1995) para um arame tubular *metal cored* da mesma classe metalúrgica ao empregado na pesquisa.

Avaliando as micrografias apresentadas nas Figuras 57 e 58, nota-se que o arame tubular apresenta menor fração de ferrita de segunda fase quando comparado ao

arame sólido, característica esta que também foi verificada por meio da quantificação dos microconstituintes e será apresentado a posteriori.

Em relação à zona retransformada, pode-se observar que o arame tubular para ambos os processos apresenta a predominância de uma estrutura com grão equiaxial. Pela composição química apresentada na Tabela 8, nota-se que o arame tubular apresentou maior quantidade de manganês em percentual de peso. Esse elemento tem como característica favorecer maior formação de inclusões e respectivamente maiores pontos de nucleação devido estabilizar o campo de transformação da austenita por aumentar a faixa de temperatura da austenita estável (SILVA e MEIO, 2010).

Para o arame tubular, a composição química indicou a presença de carbono em menores quantidades comparadas com as do arame sólido no metal de solda. Todavia, Keehan *et al* (2006) afirmaram que consumíveis com essa característica são extremamente dependentes de outros elementos para manter suas propriedades mecânicas.

Dessa forma, foi observado que o arame tubular apresentou maiores percentuais em peso de manganês, níquel e enxofre com relação ao arame sólido. O maior percentual em peso de níquel também pode ter contribuído para o maior refinamento da microestrutura notada para este consumível nos dois processos de soldagem utilizados nesse trabalho.

Mota (1998), verificou que o aumento no teor de níquel em arames tubulares auto protegidos proporciona maior refinamento na microestrutura, enquanto Keehan, Karlsson e Andrén (2006) constataram que o aumento nos teores de manganês e níquel simultaneamente no metal de solda favoreceram a formação de martensita, proporcionando no metal de solda boa resistência à tração, com redução da tenacidade.

O resultado da análise quantitativa dos microconstituintes no metal de solda e o percentual de zona colunar, coincidente com entalhe para realização do ensaio Charpy-V, é exposto na Tabela 9. As quantidades percentuais dos constituintes

identificados apresentados nessa Tabela se referem ao último passe de solda (região com 100 % de grão colunar), constituída por ferrita primária (FP) seguida pela ferrita acicular (AF) em maiores quantidades, com menores percentuais de ferrita de segunda fase (FS).

Por fim, utilizou-se a identificação “outros” (O), com valores não tão significativos em relação aos outros microconstituintes, normalmente menores que 5%. Essa última classificação foi adotada devido a locais de maior dificuldade para identificação por meio de microscopia óptica, locais estes que indicam possíveis inclusões e/ou outros microconstituintes.

Tabela 9 – Percentagens de microconstituintes referentes à análise quantitativa no último passe de solda.

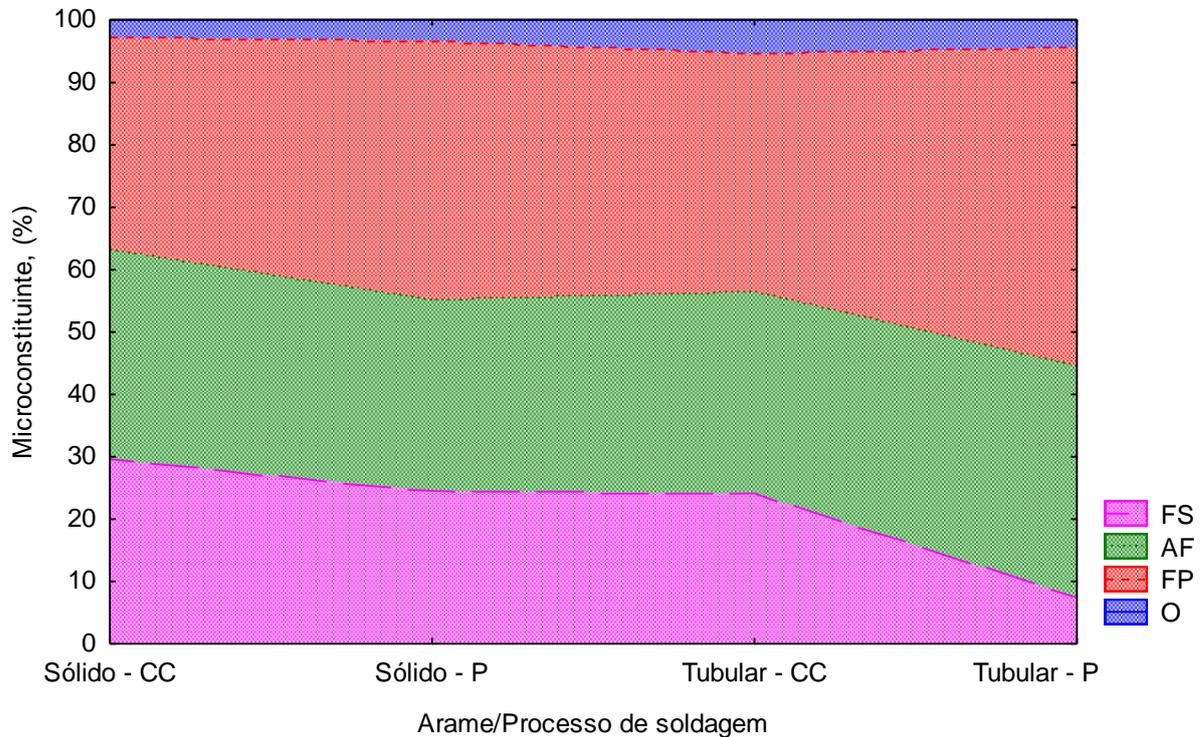
Arame	Processo	Microconstituente (%)				% Entalhe
		FS	FA	FP	O	Zona Colunar
Sólido	Curto-circuito	29,60	33,61	34,06	2,73	34,31
	Pulsado	24,53	30,67	41,56	3,24	34,90
Tubular	Curto-circuito	24,11	32,32	38,22	5,35	31,89
	Pulsado	7,42	37,15	51,10	4,33	27,66

Fonte: Autor, 2018.

Também é possível verificar na Tabela 9 que os percentuais de ferrita de segunda fase (FS), ferrita acicular (AF), ferrita primária (FP) e “outros” (O) apresentaram valores similares, com exceção a soldagem no modo pulsado para o arame tubular que apresentou uma queda no percentual de ferrita de segunda fase. Acredita-se que essa equivalência notada nos percentuais possa estar correlacionada ao efeito do ciclo térmico decorrente em todas as quatro juntas produzidas ter sido similar, ou seja, aplicou-se a mesma energia de soldagem (800 kJ/m), à mesma quantidade de passes (7 passes) e com o mesmo número de camadas (5 camadas).

Para expressar de maneira mais clara os resultados obtidos em relação aos microconstituintes, a Figura 59 expõe de maneira gráfica os resultados da análise quantitativa realizada.

Figura 59 – Frações volumétricas dos microconstituintes (%) para os arames sólidos e tubular obtidos pelos processos de soldagem convencional por curto-circuito e modo pulsado.



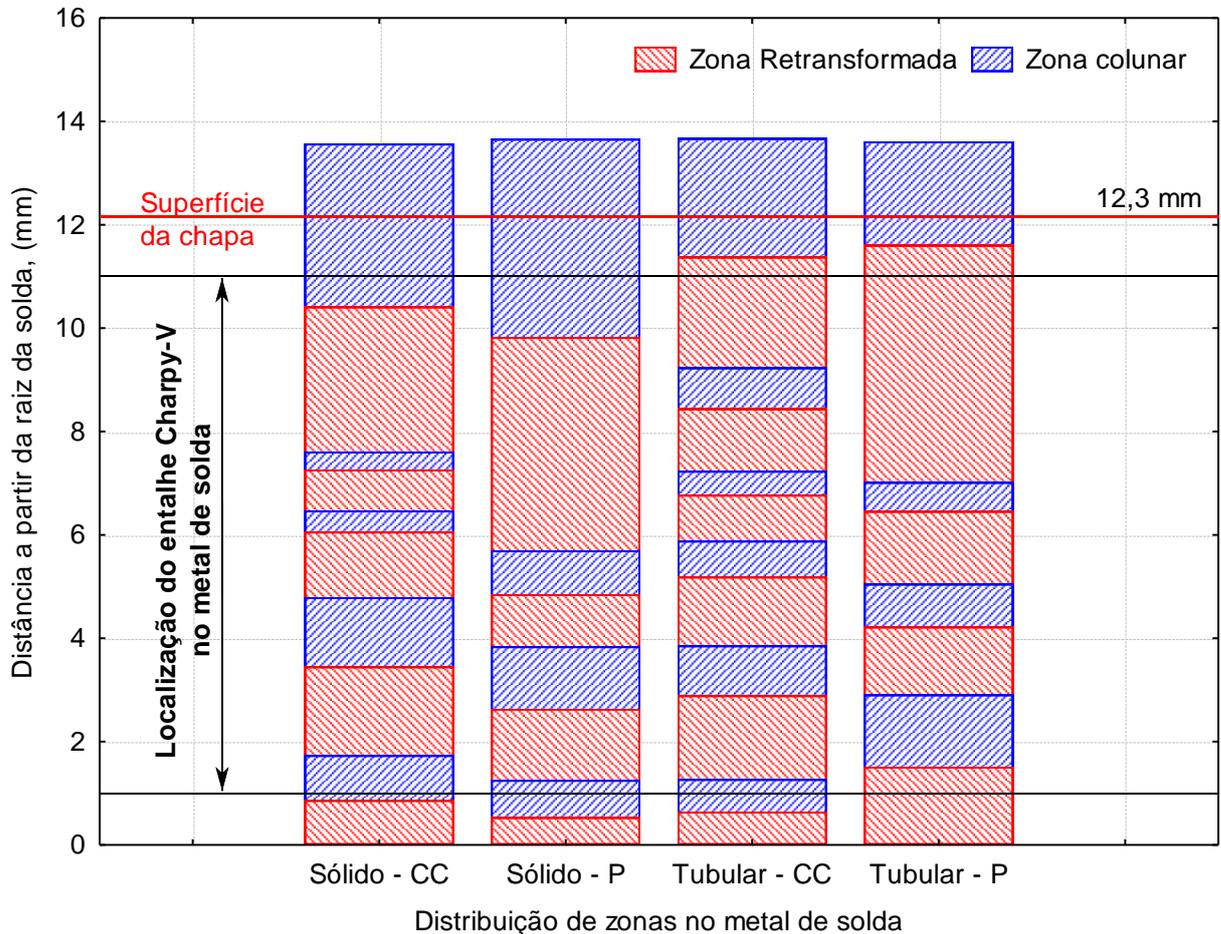
Fonte: Autor, 2018.

Observa-se que a ferrita primária (FP) foi predominante para os dois arames independente do processo de soldagem utilizado, acompanhada pela ferrita acicular (AF). Observando o processo de soldagem em modo pulsado para o arame tubular, verificou-se que houve uma queda acentuada de ferrita de segunda fase (FS), proporcionando, assim, mais teores de ferrita primária e ferrita acicular.

Com relação aos resultados apresentados na Tabela 9 para os percentuais verificados para de zonas colunar e retransformada, observa-se que todas as condições investigadas apresentaram percentuais inferiores a 35% de zona colunar e predominância de zona retransformada, características essas que proporcionam maior tenacidade ao metal de solda. Nesse sentido, Mota (1998) mencionou que as frações obtidas para as zonas colunar e retransformada estão diretamente relacionadas aos parâmetros de soldagem e ao procedimento aplicado, e como já foi citado anteriormente, o procedimento de soldagem utilizado foi análogo em todas as juntas soldadas.

A Figura 60 apresenta as distribuições das zonas colunar e retransformada em uma “linha vertical” correspondente à localização do entalhe Charpy-V no metal de solda.

Figura 60 – Distribuição das zonas colunar e retransformada no metal de solda referente a soldagens com arames sólido e tubular pelos processos por curto-circuito e pulsado.



Fonte: Autor, 2018.

Para as juntas soldadas por meio do modo pulsado para os dois arames utilizados, nota-se que o mesmo proporcionou maior maiores distâncias de zonas retransformada (Figura 60), embora os percentuais tenham sido semelhantes aos da soldagem por curto-circuito. Presume-se que este efeito possa ter sido ocasionado em virtude das altas correntes de pico verificadas e apresentadas na Tabela 6, com a possibilidade de que o controle sinérgico tenha garantido o destacamento das gotas na fase de pulso.

Além disso, Scotti e Ponomarev (2008) explicaram que as altas taxas de penetração são ocasionadas quando o destacamento ocorre no pulso em virtude das gotas

destacadas colidirem em alta velocidade com à poça de fusão devido a aceleração promovida pela força axial de Lorentz.

5.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

5.5.1 Ensaio de tração

Os resultados do ensaio à tração estão pautados na Tabela 10, onde são apresentados os valores referentes à tensão máxima (limite de resistência a tração, σ_u), limite de escoamento ($\sigma_{0,2}$). O arame tubular apresentou valores menores de limite de resistência e tração e limite de escoamento especificado pelo fabricante conforme pode ser comparado por meio dos dados apresentados na Tabela 3. O arame sólido por sua vez, mostrou valores correspondentes aos que são propostos pelos fabricantes.

Tabela 10 – Dados dos ensaios de resistência à tração para as soldagens com arames sólido e tubular pelos processos convencional por curto-circuito e pulsado.

Arame	Processo Soldagem	Nome CP	Local Ruptura	Propriedade Mecânica			
				σ_u MPa	σ_u Médio (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	$\sigma_{-0,2}$ Médio (MPa)
Sólido	Curto Circuito	3-A	MB	492,78	492,12	375,57	379,71
		3-B	MB	491,46	$\pm 0,93$	383,84	$\pm 5,85$
	Pulsado	2-A	MB	491,40	492,40	383,75	381,29
		2-B	MB	493,40	$\pm 1,41$	378,82	$\pm 3,49$
Tubular	Curto Circuito	4-A	MB	500,01	505,67	398,37	404,65
		4-B	MB	511,34	$\pm 8,01$	410,93	$\pm 8,88$
	Pulsado	1-A	MB	500,70	485,28	394,23	380,23
		1-B	MB	469,86	$\pm 21,81$	366,22	$\pm 19,81$

Fonte: Autor, 2018.

Considerando um limite de resistência à tração de 400 MPa para o metal de base conforme o critério QW/QB - 422 do código ASME seção IX (2017), os corpos de provas para ambos os arames/processos de soldagem utilizados nesse trabalho estão aprovados segundo o critério QW-153 do código ASME IX (2017), uma vez que todos os corpos de prova romperam com mais de 5% acima do limite de resistência à tração do metal de base. Outro ponto que aprova todos os ensaios realizados é atribuído ao fato de que todos os corpos de provas se romperam no metal de base, como pode ser verificado na Figura 61.

Figura 61 – Resultados dos ensaios de resistência à tração. (a) e (b) arame tubular – pulsado; (c) e (d) arame sólido – pulsado; (e) e (f) arame sólido – curto-circuito; (g) e (h) arame tubular – curto-circuito.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

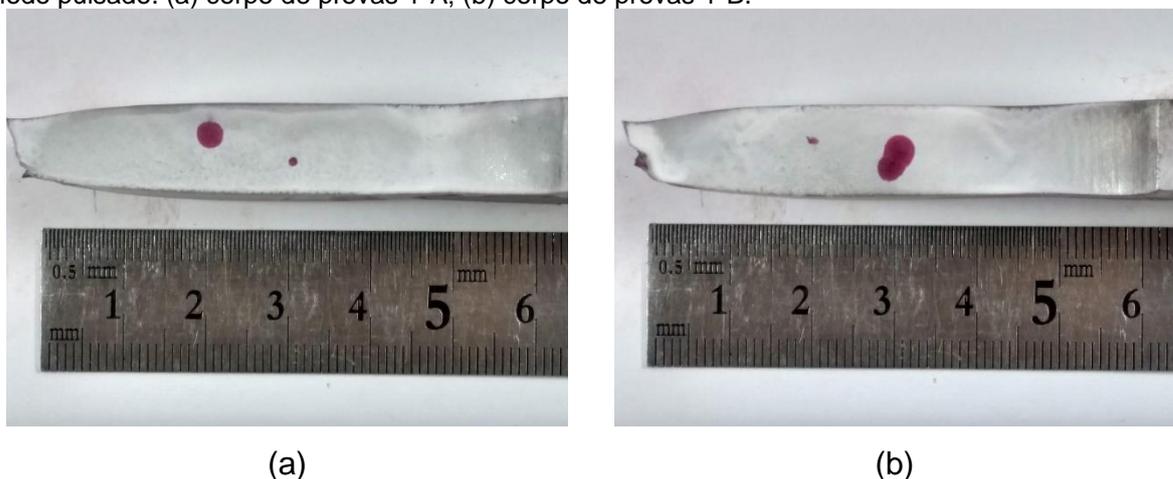
Fonte: Autor, 2018.

Para cada par de corpos de prova ensaiado, com exceção dos corpos de prova 1-A e 1-B, não se constatou diferença significativa entre os valores dos limites de resistência da tração e limite de escoamento.

O maior desvio padrão verificado para a soldagem em modo pulsado com arame tubular pode ser explicado devido a ter ocorrido a propagação de uma abertura entre a interface metal de base/zona fundida de grande magnitude no corpo de prova 1-B, durante a aplicação da carga axial, em virtude da presença de pequenas inclusões que paralelamente acabaram proporcionando falta de fusão neste ponto da junta soldada.

Essa falha também foi constatada por meio do ensaio não destrutivo por ultrassom, como foi apresentado na Figura 53. Por meio do ensaio não destrutivo com líquidos penetrantes realizado nos corpos de prova 1- A e B, confirmou-se a presença de descontinuidades que estão abertas tanto para o corpo de prova 1-A, quanto para o 1-B. Entretanto, o corpo de prova 1-B apresentou descontinuidade maior que a do corpo de prova 1-A (Figura 62).

Figura 62 – Ensaio de líquido penetrante para os corpos de provas soldados com arame tubular em modo pulsado. (a) corpo de provas 1-A; (b) corpo de provas 1-B.



Fonte: Autor, 2018.

Ainda observando os resultados apresentados na Tabela 10, exceto para o corpo de prova 1-B, todos os demais corpos de prova para arame tubular apresentaram limites de resistência à tração com pequena diferença, embora não tão significativa, com relação ao arame sólido independente ao processo de soldagem.

Supõe-se que os maiores valores de limite de resistência à tração e limite de escoamento apresentados para o arame tubular possam ser devido à maior inserção de elementos de liga nos depósitos com esse consumível, ocasionando maior refinamento de grãos.

Além disso, outro ponto que corrobora para a proximidade entre os valores das propriedades mecânicas avaliadas para os consumíveis em discussão é o fato dos mesmos também terem apresentados similaridade para as frações dos microconstituintes presentes no metal de solda (Figura 59), além de frações similares para as zonas de grãos colunares e retransformadas (Figura 60).

5.5.2 Ensaio de Impacto

Os resultados médios dos ensaios de resistência ao impacto realizados nas temperaturas de -30°C conforme a norma ASME BPVC.II.C de 2017 para os arames sólido e tubular por meio dos processos convencional por curto-circuito e modo pulsado são apresentados na Tabela 11 (os resultados para todas as condições estão disponíveis no Apêndice C). De forma geral, todas as condições avaliadas apresentaram resistência ao impacto apreciável.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência ao impacto para os arames sólido e tubular.

Arame	Processo	Resistência ao Impacto – (J)	
		Energia Média (J)	Energia Média (J) ASME BPVC.II.C
Sólido	Curto-Circuito	79,4 \pm 13,44	78,5 \pm 9,35
	Pulsado	73,6 \pm 20,71	70,8 \pm 12,55
Tubular	Curto-Circuito	45,6 \pm 9,14	48,6 \pm 2,74
	Pulsado	51,5 \pm 13,33	54,4 \pm 6,37

Fonte: Autor, 2018.

Em relação aos resultados apresentados na Tabela 11, todos os corpos de provas atenderam ao requisito da norma ASME BPVC.II.C (2017), a qual estabelece que devem ser eliminados os valores extremos dos cinco corpos de prova ensaiados, e dos três restantes, dois devem apresentar energia superior a 27 J e o terceiro pode apresentar energia menor do que 20 J, porém não podendo ser menor do que 15 J. Dessas três energias selecionadas, o valor médio deve ser maior ou igual a 27J. Como

pode ser verificado na Tabela 11, todos os valores médios para os três corpos de provas selecionados apresentaram energia superior a 45 J. Ainda avaliando os valores obtidos para as condições apresentadas e comparando com o valor sugerido pelo fabricante (Tabela 3), os dois arames, independente ao processo utilizado, apresentaram valores para energias absorvidas próximas ou até ligeiramente superiores aos propostos pelo fabricante.

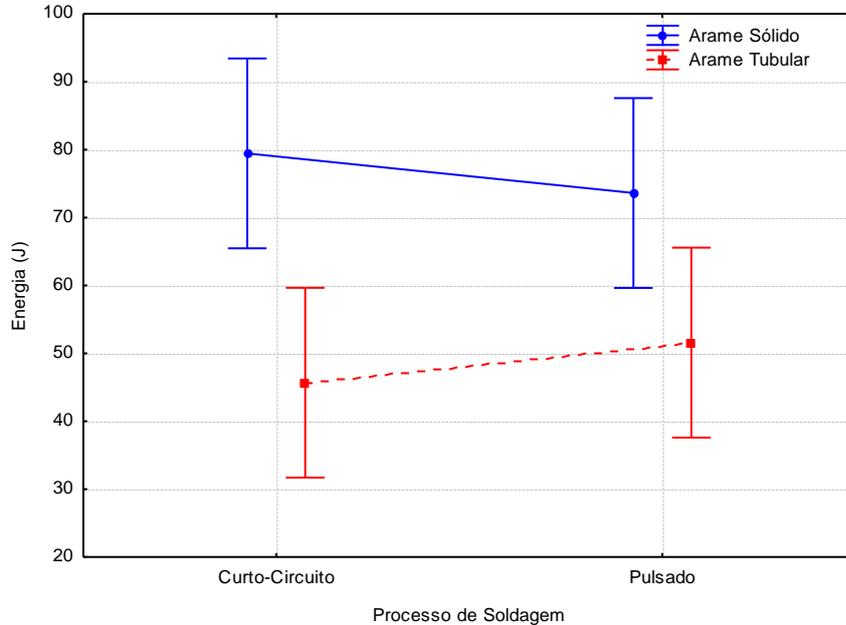
Os resultados apreciáveis de resistência ao impacto apresentados na Tabela 11 podem ser atribuídos aos teores de ferrita acicular (AF) verificados em todos os metais de solda. De acordo com a literatura técnica, resultados de elevada resistência mecânica com boa tenacidade são obtidos em materiais com ferrita acicular uma vez que este microconstituente apresenta morfologia com grãos pequenos e com elevado nível de densidade de discordâncias (ALBUQUERQUE et.al., 2011; EVANS, 1980). Além disso, Rissone *et. al* (2005) investigaram a influência da soldagem com arames tubulares *metal cored* em diferentes posições de soldagem e atribuíram que os melhores valores obtidos de tenacidade ao impacto foram para condições onde ocorria a redução de ferrita primária (FP) e conseqüente aumento de ferrita acicular (AF) e ferrita de segunda fase (FS), onde neste sentido, pode ser constatado na Tabela 9 que todos os metais de solda apresentaram valores acima de 50% para esses microconstituintes quando associados.

Em relação ao arame tubular, percebe-se que este arame apresentou menor energia absorvida em relação ao arame sólido, o que sugere que este consumível tenha maior resistência mecânica, característica essa que pode ser comprovada por meio dos resultados de resistência à tração apresentados na Tabela 10, embora que, quando se compara os arames/processo, os valores não apresentam diferença significativa (exceto para o corpo de provas 1-B). Baseado na literatura técnica, outro ponto que contribuiu para o comportamento mecânico do arame tubular pode ser atribuído ao maior teor elementos de liga incorporados em seu fluxo interno, pois Mn, Si, C aumentam a temperabilidade e o refinamento de grãos do metal de solda (RISSONE *et. al.*, 2005; MOTTA, 1998).

A Figura 63 ilustra o efeito do processo de soldagem utilizado sobre a energia ao impacto para ambos os arames. Por meio desta Figura nota-se que não há efeito

significativo em relação ao processo de soldagem utilizado, sendo mais proveniente em relação ao tipo de arame.

Figura 63 – Relação entre a energia absorvida ao impacto com os fatores arame e processo de soldagem.



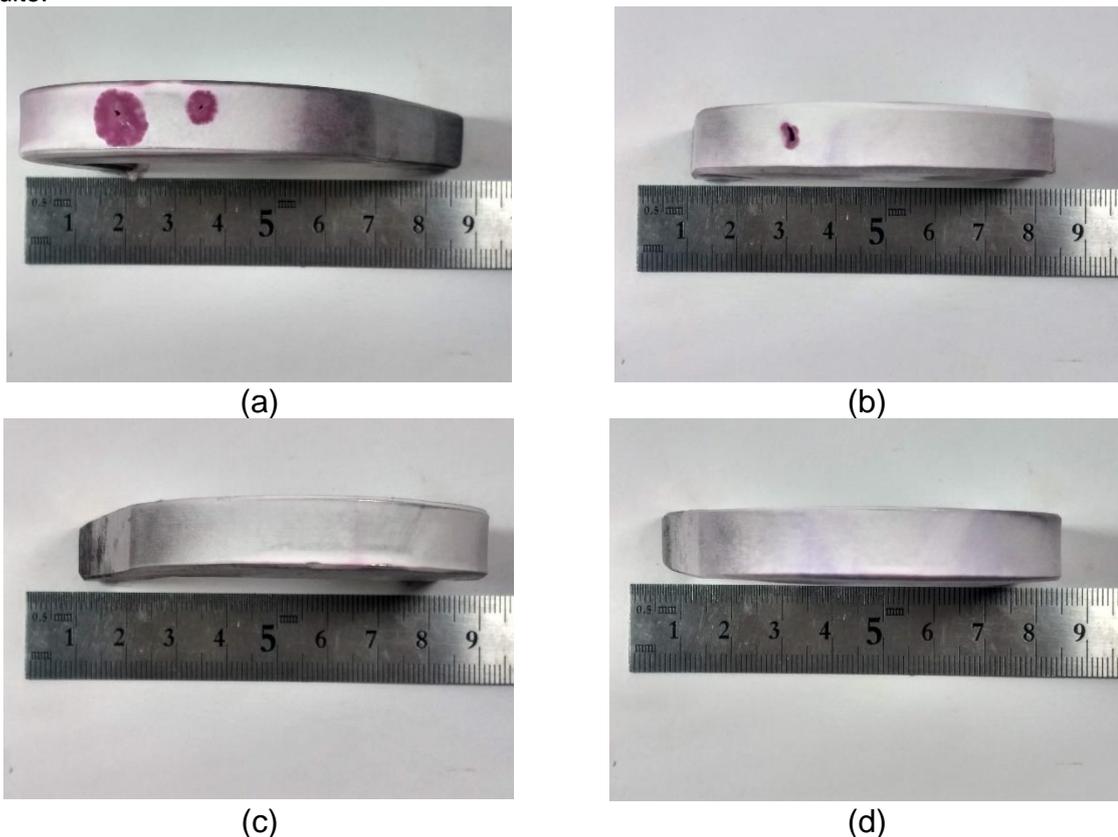
Fonte: Autor, 2018.

Ainda de acordo com a Figura 63 e os resultados apresentados na Tabela 9, podem-se tirar algumas conclusões em relação aos efeitos dos percentuais de zona colunar na região do entalhe e microconstituintes presentes no último cordão de solda. Tomando como exemplo os resultados para as soldagens utilizando o arame tubular, verifica-se que a soldagem em modo pulsado proporcionou menor percentual de zona colunar em relação a soldagem por curto-circuito, além de menores quantias de ferrita de segunda fase e maiores teores de ferrita acicular, favorecendo assim aos maiores valores de resistência ao impacto apresentados para dada condição (ALBUQUERQUE et al., 2011). Em relação ao arame sólido, supõe-se que a diferença notada em relação a maior resistência ao impacto para a soldagem por curto-circuito, embora que não seja relativamente alta (em torno de 5,8 J) seja devido ao maior percentual de ferrita acicular, embora também não tenha apresentado diferença significativa. Para as soldagens com arame sólido, acredita-se que a zona colunar referente ao entalhe não tenha participação direta em relação a diferença notada entre os processos por apresentarem o mesmo percentual de zona colunar.

5.5.3 Ensaio de dobramento guiado

O ensaio de dobramento guiado foi realizado de acordo com a norma do código ASME seção IX de 2017. Para as soldagens utilizando o processo de soldagem convencional por curto-circuito, os dois arames estudados apresentaram bom desempenho, não sendo encontradas descontinuidades na interface entre o metal de base/zona fundida pelo ensaio não destrutivo com líquidos penetrantes. Para as soldagens em modo pulsado, foram encontradas pequenas descontinuidades entre a interface metal de base/zona fundida para ambos os arames; entretanto as maiores falhas foram notadas para o arame tubular. A Figura 64 ilustra um resumo dos resultados dos ensaios de dobramento.

Figura 64 – Comportamento dos arames sólido e tubular no ensaio de dobramento lateral. (a) arame tubular-pulsado; (b) arame sólido-pulsado; (c) arame sólido – curto-circuito; (d) arame tubular – curto-circuito.



Fonte: Autor,2018.

Embora a Figura 64 não apresente todos os 16 corpos de prova ensaiados, os resultados qualitativos ilustrados na mesma expressam, de maneira geral, o que pode

ser observado em relação ao comportamento geral das operações de soldagem efetuadas.

Para as quatro condições avaliadas, a soldagem com arame tubular em modo pulsado foi a que apresentou o menor grau de sanidade além de ter um dos corpos de provas rompido, enquanto que para a soldagem por curto-circuito com o mesmo arame não se verificou quaisquer descontinuidades. Para o arame sólido utilizando corrente pulsada, dos quatro corpos de prova analisados, apenas no corpo de prova apresentado na Figura 64 (b) apresentou descontinuidade, enquanto que para o mesmo arame utilizando a soldagem por curto-circuito não se evidenciou nenhuma descontinuidade nos corpos de prova.

O critério de aceite QW 163 da norma do código ASME seção IX de 2017 descreve que, para que os corpos de prova estejam aprovados, as descontinuidades entre a linha de fusão da zona afetada pelo calor e a zona fundida não devem ser maiores que 3,2 mm (1/8") de extensão. Nesse contexto, todos os corpos de provas estão aprovados, pois quando apresentaram descontinuidades, estas foram menores que 3,2 mm, exceto para os corpos de provas soldados com o arame tubular no modo pulsado, pois houve rompimento de uma das amostras, reprovando o procedimento para esta condição de soldagem.

Do ponto de vista prático e levando-se em consideração os resultados observados para o arame tubular, acredita-se que o maior nível de descontinuidades pode ter sido proporcionado pela maior formação de escória vítrea e de fumos metálicos observados quando se utilizou a corrente pulsada (Figura 52), e que, embora tenham sido realizadas limpezas minuciosas com escovas rotativas sobre toda a superfície do cordão entre os passes realizados, provavelmente pequenas inclusões ficaram acumuladas entre a margem do cordão com o metal de base, ocasionando essas descontinuidades.

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após realizar as soldagens com os arames sólido e tubular pelos processos de soldagem convencional por curto-circuito e em modo pulsado, conclui-se que:

a) Estabilidade operacional por curto-circuito

- O arame sólido apresenta menor variabilidade durante as soldagens em seus sinais de corrente e tensão por meio de curtos-circuitos bem definidos, apresentando maiores períodos de transferência de gotas em relação ao arame tubular, caracterizando, assim, em transferência de gotas de maior volume para a poça de fusão e com maior regularidade de transferência metálica que o arame tubular;
- O arame tubular apresenta maior ocorrência de transferência mista por apresentar grande variabilidade nos sinais de tensão e corrente, causando menor regularidade da transferência metálica. Em relação ao arame sólido, esse consumível transfere maior quantidade de gotas por unidade de tempo para a poça de fusão, todavia com menor volume;
- O arame tubular tem maior faixa de trabalho em relação ao arame sólido, pois dentre as três velocidades de soldagem utilizadas, não se notou desvios padrões altos dos resultados dos índices, quando comparado ao arame sólido;

b) Estabilidade modo pulsado

- Para os parâmetros selecionados por meio do controle sinérgico, constatou-se maior incidência de curtos-circuitos nos sinais de corrente e tensão do arame sólido;
- O arame tubular apresentou maior estabilidade operacional para a soldagem em modo pulsado, pois apresentou menor variação em seus sinais dinâmicos de corrente e tensão;

- O arame tubular aponta para maior faixa operacional de trabalho, pois basicamente não apresentou alteração nos valores obtidos de estabilidade para as três velocidades de soldagem impostas, de maneira similar ao da soldagem por curto-circuito;

c) Aspectos econômicos

- O consumo e a produção para os dois arames em um mesmo processo de soldagem não apresentaram diferença significativa, sendo levemente maior para o arame sólido;
- O rendimento de deposição apresentado pelo arame sólido mostrou-se superior em ambos os processos de soldagem quando comparado com o apresentado pelo arame tubular;
- O arame tubular apresentou a formação de um maior volume de “micro respingos” nas margens do cordão de solda, além de maior quantidade de escória vítrea quando se utilizou corrente pulsada, proporcionando queda no rendimento em relação ao arame sólido;
- Do ponto de vista econômico, torna-se mais favorável o uso do arame sólido, pois apresenta bom desempenho em relação às características econômicas, tendo menor custo de aquisição;

d) Propriedades metalúrgicas

- O arame sólido apresentou percentuais similares dos microconstituintes para as soldagens por curto-circuito e pulsado no metal de solda;
- O arame tubular, independente do processo de soldagem, também apresenta percentuais similares dos microconstituintes identificados no metal de solda;

- O arame tubular apresentou metal de solda com menor tamanho de grãos em virtude do maior percentual de elementos de liga;
- O arame sólido apresentou limites de resistência à tração e de escoamento semelhantes aos expostos pelo arame tubular, características essas que provavelmente ocorreram devido aos percentuais de microconstituintes presentes no último cordão de solda e de zona colunar na região do entalhe terem apresentado valores similares para ambos os arames/processos de soldagem;
- O arame tubular produz um maior percentual de fumos metálicos e escória vítrea na soldagem em corrente pulsada, o que favoreceu maior percentual de inclusão de escória presente no cordão de solda para esta dada condição;
- Os arames sólidos e tubular apresentaram resistência ao impacto superiores aos exigidos pelas normas para todas as quatro condições avaliadas, característica essa atribuída aos percentuais de ferrita acicular e valores de zona retransformada superiores a 60%.

Considerando os resultados obtidos após as avaliações de estabilidade do arco, dos aspectos econômicos e nas propriedades mecânicas e metalúrgicas para ambos os arames/processos de soldagem, conclui-se que não se faz jus a substituição do arame sólido pelo arame tubular *metal cored* investigado, pois notou-se que em diversas situações, como por exemplo, nas avaliações de estabilidade para a soldagem com transferência por curto-circuito, nos rendimentos de deposição, que o arame sólido apontou para melhores condições.

Outro ponto chave que colabora com a hipótese de não substituir o arame sólido pelo tubular *metal cored* pode ser atribuído em relação as propriedades mecânicas obtidas para ambos os consumíveis, em que mais uma vez notou-se que o arame sólido apresentou valores similares em termos de limites de resistência a tração, todavia se mostrando ser mais tenaz independente o processo de soldagem aplicado (curto-circuito e/ou pulsado).

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Estudar o efeito de diferentes taxas de resfriamento sobre os percentuais de ferrita acicular formados no metal de solda;
- Estudar o efeito de diferentes teores de oxigênio na atmosfera protetora na formação para de pontos de inclusão para a formação de ferrita acicular;
- Realizar microscopia eletrônica de varredura para identificação de possíveis microconstituintes não identificados por meio de microscopia óptica;
- Realizar filmagem de alta velocidade para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos nos parâmetros selecionados durante a execução das soldagens;
- Aumentar a frequência da oscilação da tocha para verificar o efeito sobre a microestrutura;
- Otimizar os parâmetros no modo sinérgico, em especial os valores de corrente de pico e tempo de base para avaliar o efeito sobre os “micro respingos” e fumos metálicos observados para o arame tubular.

REFERENCIAS

ADOLFSSON, S. et al. **On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding**. Welding Journal, pp. 59s-74-s, december 1997.

ALBUQUERQUE, S. F et al. **Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Metais de Solda Obtidos por Processos de Soldagem Manual e Automatizado utilizado na Soldagem de Aço API 5L X80**. Soldagem & Inspeção. São Paulo, v.16, n. 4, pp.322-332, Out/Dez 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23-16b: Standart Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E370-17a: Standart Test Methods for Mechanical Testing of Steel Products**.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E562-11: Standart Test Methods for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count**.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME BPVC.II.C-2017: Specifications for Welding Rods Electrodes, and Filler Metals**.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME BPVC.IX-2017: Qualificatios Standart for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators**.

ANDRADE, A. F. C. **Influência da Corrente de Pulso, Tempo de Pulso e Diâmetro da Gota sobre a Estabilidade da Transferência Metálica no Processo MIG-P**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Rio Grande do Norte, 2012.

ANZEHAEE, M. M.; HAERI, M. **Estimation and control of droplet size and frequency in projected spray mode of a gas metal arc welding (GMAW) process**. ISA transactions, v. 50, n. 3, p. 409–18, jul. 2011.

ARAÚJO, W.R. **Comparação entre Soldagem Robotizada com Arame Sólido e “Metal Cored” – A ocorrência do “Finger”**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

ASM HandBook, “Metals Handbook Volume 6 – **Welding Brazing and Soldering**”, ASM International, 1993. 2873p.

BABU, S.S.; DAVID, S.A. **Inclusion Formation and Microstructure Evolution in Low Alloy Steel Welds**. ISIJ International, v.42, n.12, pp. 1344-1353, 2002.

BÁLSAMO, P. S. S. et al. **Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: Synchronized shadowgraphy**. International Journal for the Joining of Materials, v. 12, n. 2, p. 48–59, 2000.

BARBEDO, N.D.D. **Avaliação Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW Utilizando Aço ASTM A-36 para Verificar a Soldabilidade, Propriedades Metalúrgicas e Geométricas, e Resistência Mecânica.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

BEIDOKHTI, B. AND POURIAMANESH, R. **Effect of Filler Metal on Mechanical Properties of HSLA Welds.** Welding Journal, v.94, pp. 334s-341s, october, 2015.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos.** 5° Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2008

COSTA, V.M. **Análise da Tenacidade de uma Junta Soldada em Aço Resistente a Abrasão da Série 450 HB.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DE MENESES, V. A.; GOMES, J. F. P.; SCOTTI, A. **The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding.** Journal of Materials Processing Technology, v. 214, n. 7, p. 1388–1397, jul. 2014.

DE REZENDE, G. M. C. et al. **Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito.** Soldagem e Inspecao, v. 16, n. 2, p. 98–103, 2011.

EVANS, G.M. **Effect of Manganese on the Microstructure and Properties of All-Weld-Metal Deposits.** Welding Journal, pp.67s-75s, march 1980.

EVANS, G.M. **The Effect of Heat Input on the Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld-Metal Deposits.** Welding Journal, pp.125s-132s, april 1982.

FARIAS, J. P. **Magnésio metálico como componente do revestimento na soldagem com eletrodos ao C-Mn-Ni.** Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, dezembro de 1993.

FORTES, C. **Arames Tubulares OK.** Revisão 28/03/2003, ESAB S/A Indústria e Comércio, Contagem, p. 2-40

FRENCH, I.E.and BOSWORTH, M. R. **A Comparison of Pulsed and Conventional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires.** Welding Journal, pp.197s-205s, june 1995.

GARCIA, R. P.; SCOTTI, A. **Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular).** Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol.16, No. 2, pp.146-155, Abr/Jun 2011.

HERMANS, J. M. and OUDEN, G. DEN. **Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding.** *Welding Journal*, pp.137s-141-s, april 1999.

JOSEPH, A. et al. **Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding.** *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 8, n. 6, p. 400–406, 4 dez. 2003.

JURICA et al. **Effect of the GMAW Metal-Transfer mode on the Weld-Metal Structure of HSLA X80.** *Materiali in Tehnologije/Materials and Technology*, v.51, n 3, pp. 449-453, 2017.

KEEHAN, E.; KARLSSON, L.; ANDRÉN, H.O. **Influence of carbon, manganese and nickel on microstructure and properties of Strong steel weld metals: Part 1 - Effect of nickel content.** *Science and Technology of Welding and Joining*, v.11, n.1, pp. 1-7, 2006.

KEEHAN, E., KARLSSON, L., ANDRÉN, H.O., BRADESHIA, H.K.D.H. **Influence of carbon, manganese and nickel on microstructure and properties of strong steel weld metals: Part 3 - Increased strength resulting from carbon additions.** *Science and Technology of Welding and Joining*, v.11, n.1, pp. 19-24,2006.

KIM, J. W.; NA, S. J. **A Study on the Effect of Contact Tube-to-Workpiece Distance on Weld Pool Shape in Gas Metal Arc-Welding.** *Welding Journal*, v. 74, n. 5, p. s141–s152, 1995.

KIM, Y. S.; EAGAR, T. W. **Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding.** *Welding Journal*, v. 1, p. 269s–278s, 1993.

KOU, S. **Welding Metallurgy.** 2ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 461 p.

KUMAR, S.; SHAHI, A. S. **Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints.** *Materials & Design*, v. 32, n. 6, p. 3617–3623, jun. 2011.

KURTULMUS, M.; BILICI, M. K.; CATALGOL, Z. **Effects of Welding Current and Arc Voltage on Fcaw Weld Bead Geometry.** p. 23–28, 2015.

LANCASTER, J.F. **The Physics of Welding,** Pergamon Press.1984

LIAO, M. T.; CHEN, W. J. A. **Comparison of Gas Metal Arc Welding with Flux-Cored Wires and Solid Wires Using Shielding Gas.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 15, n. 1, p. 49–53, jan. 1999.

LISKEVYCK, O. **Estudo da Influência do Teor de CO₂ na Regularidade da Transferência de Metal e Estabilidade do Processo MIG/MAG.** *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais*, 2010.

LIU, S. and SIEWERT, T. A. **Metal transfer in gas metal arc welding: droplet rate.** *Welding Journal*, pp. 52s-58s, 1989.

LUKSA, K. **Influence of weld imperfection on short circuit GMA Welding arc stability**. Journal of Materials Processing Technology, v.175, pp 285-290, 2006.

LUZ, T.S. **Aspectos Operacionais e Metalúrgicos da Soldagem do Aço Inoxidável Ferrítico com 11% de Cromo**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2009

MARGARITA, E. et al. **Parameter Optimization in Gmaw Process With Solid and Metal-Cored Wires**. Cobem, v. 6, n. Cobem, p. 5256–5266, 2013.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. 2º Edição. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2007

MIRANDA, H.C. **Reconhecimento e controle da transferência metálica no processo MIG/MAG Pulsado**. 1999. 215 f. Tese Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, 2002

MODENESI, P. J. et al. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular “Metal Cored”**. Soldagem & Inspeção, v. 16, n. 3, p. 285–300, 2011.

MODENESI, P.J. AND NIXON, J.H. Arc Instability Phenomena in GMA Welding. **Welding Journal**, pp.219s-224s, setember 1994.

MOHD, S.; PARVEZ, M.; KUMARI, P. **Effect of Mig Welding Input Process Parameters on Weld Bead Geometry on Hsla Steel**. International Journal of Engineering & Technology, v. 5, n. 1, p. 200–212, 2013.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. Tese de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Paulista, São Paulo, Brasil, 2008.

MOTA, C.A.M. **Níquel e Manganês como controladores da Tenacidade na Soldagem com Arames Tubulares Autoprottegidos**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

NASCIMENTO, A. S. **Aspectos Operacionais e Metalúrgicos da Soldagem com Arame Metal Cored. Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

NORRISH, J.; CUIURI, D. **The controlled short circuit GMAW process: A tutorial**. Journal of Manufacturing Processes, v.16, pp.86-92, 2013.

NORRISH, J. **Advanced welding processes: Technologies and process control**. Cambridge, England. Woodhead Publishing Limited, Institute of Materials,

Minerals & Mining, 2006. 288p.

NOWACKI, J.; SAJEK, A.; MATKOWSKI, P. **The influence of welding heat input on the microstructure of joints of S1100QL steel in one-pass welding.** Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. 16, n. 4, p. 777–783, 2016.

ONSOIEN, M.I.; LIU, S.; OLSON, D. L. **Shielding Gas Oxygen Equivalent in Weld Metal Microstructure Optimization.** Welding Journal, pp.216s-224s, July 1996.

PALANI, P. K.; MURUGAN, N. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. v. 172, p. 1–10, 2006.

PESSOA, E. C. P. et al. **Arc Stability Indexes Evaluation on Underwater wet welding.** Proceedings of the ASME 2010, 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp. 1-7, 2010.

QUINN et al. **Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding.** Welding Journal, pp.322s-328s, September 1999.

RAJASEKARAN, J. **The experimental studies on the process-integrated quality assurance in pulsed current GMA welding of aluminium.** Eleventh International Conference on Computer Technology in welding, pp.03-19, 2002.

RISSONE, N. M. RAMINI de et al. **Influence of Procedure Variables on C-Mn-Ni-Mo Metal Cored Wire Ferritic All-Weld Metal.** Welding Journal, pp.139s-148s, September 1995.

RODRIGUES, C.E.A.L; SCOTTI, A. **Determination of the Momentum of Droplets Impinging on the Pool during Aluminium GMAW.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.16, n. 2, pp. 336-343, Out/Dez 2009.

RODRIGUES, E. R. **Influência de Parâmetros do Processo FCAW-G nas Características da Solda do Aço ASTM A-36.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica do Paraná - Curitiba, 2010.

RODRIGUES, L. O. **Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

SANTOS, R. P. G. **Uma Avaliação Comparativa dos Processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em Termos de Capacidade Produtiva, Geração de Fumos e de Respingos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2010.

SARMA, D.S.; KARASEV, A.V. and JÖNSSON, P.G. **On the Role of Non-metallic in the Nucleation of Acicular Ferrite in Steels.** ISIJ International, v.49, n.7, pp.1063-1074, 2009.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artiber Editora, 2008. 284p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. **A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding**. Journal of Materials Processing Technology, v. 212, n. 6, p. 1406–1413, 2012.

SCOTTI, A.; RODRIGUES, C.E.A.L. **A methodology for Determining Kinematic and Dynamic Characteristics of a Transferring Droplet Aiming Modeling Validation for MIG/MAG Welding**, 17th International Conference on Computer Technology in Welding and Manufacturing, TWI, Cranfield, UK, Jun. 2008, 11p.

SHI, Y.; HAN, Z. **Effect of weld thermal cycle on microstructure and fracture toughness of simulated heat-affected zone for a 800 MPa grade high strength low alloy steel**. v. 7, p. 30–39, 2007.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo. Editora Blucher, 2010. 646p.

SOEIRO JUNIOR, J. C.; LUZ, M. A. DA; BRANDI, S. D. **Comparação da Taxa e Eficiência de Deposição entre os Consumíveis ER70S-6 e E71T-1C**. Soldagem & Inspeção, v. 20, n. 1, p. 2–15, mar. 2015.

STARLING, C. M. D et al. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular “Metal Cored”**. Soldagem & Inspeção. São Paulo, v.16, n. 3, p.285-300, Jul/Set 2011.

SUBAN, M.; TUSEK, J. **Methods for the determination of arc stability**. Journal of Materials Processing Technology, pp.430-437, 2003.

VILARINHO, L.O.; SCOTTI. **Um algoritmo não-linear para controle sinérgico de equipamento para soldagem MIG pulsada de alumínio**. 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba, Paraná, Brasil, 2001.

YU, J., CHO, S.M. **Metal-cored welding wire for minimizing weld porosity of zinc-coated steel**. Journal of Materials Processing Technology, 8/6/2017.

APENDICE A

Tabela para seleção de parâmetros (corrente, tensão, tipo de material, velocidade e energia de soldagem) desenvolvida a partir do banco de dados do robô Panasonic, modelo TM -1400WGIII.

		Material	Gás	Processo	Diâm. Arame	Stick-Out	Corrente	Tensão	Velocidade de Soldagem (m/min)																											
2		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	80,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
4		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	81,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
5		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	82,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
6		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	83,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
7		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	84,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
8		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	85,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
9		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	86,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
10		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	87,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
11		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	88,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
12		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	89,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
13		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	90,00	15,80	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
14		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	91,00	15,82	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
15		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	92,00	15,84	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
16		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	93,00	15,86	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
17		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	94,00	15,88	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
18		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	95,00	15,90	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
19		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	96,00	15,92	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
20		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	97,00	15,94	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
21		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	98,00	15,96	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
22		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	99,00	15,98	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
23		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	100,00	16,00	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	
24		Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,20	15,00	101,00	16,01	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,	

Fonte: Autor, 2018.

APÊNDICE A

Salvamento Automático Tabela Parametros de Solda - Excel Entrar

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Diga-me o que você deseja fazer Comparti

Normal Visualização da Quebra de Página Layout da Página Modos de Exibição Personalizados Modos de Exibição de Pasta de Trabalho

Régua Barra de Fórmulas Linhas de Grade Títulos

Zoom 100% Zoom na Seleção Nova Janela Organizar Tudo Congelar Painéis

Dividir Ocultar Reexibir Exibir Lado a Lado Rolagem Sincronizada Redefinir Posição da Janela Alternar Janelas Macros

D10 Pulsado

Material	Gás	Processo	Diâm. Arame (mm)	Stick-Out (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. Sold. (m/min)	E. Sold. (kJ/m)	INCREMENTO DE ENERGIA (%)		20	
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Pulsado	1,2	15	150	23,80	0,12	1.785,00				
CURTO-CICUITO							-20% DE ENERGIA DE SOLDAGEM		MESMA ENERGIA DE SOLDAGEM		+20% DE ENERGIA DE SOLDAGEM	
Material	Gás	Processo	Diâm. Arame (mm)	Stick-Out (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. Sold. (m/min)	E. Sold. (kJ/m)	Vel. Sold. (m/min)	E. Sold. (kJ/m)	Vel. Sold. (m/min)	E. Sold. (kJ/m)
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	100	16,00	0,07	1.428,00	0,05	1.785,00	0,04	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	110	16,10	0,07	1.428,00	0,06	1.785,00	0,05	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	120	16,20	0,08	1.428,00	0,07	1.785,00	0,05	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	130	16,40	0,09	1.428,00	0,07	1.785,00	0,06	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	140	16,60	0,10	1.428,00	0,08	1.785,00	0,07	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	150	16,80	0,11	1.428,00	0,08	1.785,00	0,07	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	160	17,10	0,11	1.428,00	0,09	1.785,00	0,08	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	170	17,30	0,12	1.428,00	0,10	1.785,00	0,08	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	180	17,50	0,13	1.428,00	0,11	1.785,00	0,09	2.142,00
Aço Carbono	MAG (80 : 20)	Curto Circuito	1,2	15	190	17,80	0,14	1.428,00	0,11	1.785,00	0,09	2.142,00

Fonte1; Autor, 2018.

APÊNDICE B

Tabela completa com os resultados referentes aos aspectos econômicos para as soldagens com os arames sólido e tubular pelos processos convencional por curto-circuito e modo pulsado.

Arame	Processo	Energia Soldagem (kJ/m)	Consumo (kg/h)	Produção (kg/h)	Rendimento (%)		
Sólido	Curto-Circuito	1200	1,92	1,907	99,85		
			1,92	1,88	98,52		
			1,92	1,87	98,26		
		1000	1,92	1,87	98,12		
			1,92	1,87	97,84		
			1,92	1,87	98,03		
		800	1,92	1,88	96,06		
			1,92	1,88	97,97		
			1,92	1,88	97,04		
		Pulsado	1200	2,46	2,34	96,52	
				2,46	2,35	97,87	
				2,46	2,36	98,14	
	1000		2,46	2,33	95,75		
			2,46	2,33	96,00		
			2,46	2,33	96,21		
	800		2,46	2,34	97,17		
			2,46	2,33	97,31		
			2,46	2,35	97,33		
	Tubular		Curto-Circuito	1200	1,83	1,74	97,78
					1,83	1,74	98,05
					1,83	1,73	97,43
		1000		1,83	1,73	97,00	
				1,83	1,71	96,00	
				1,83	1,73	96,90	
800		1,83		1,73	97,83		
		1,83		1,73	98,02		
		1,83		1,71	97,45		
Pulsado		1200		2,31	2,08	92,90	
				2,31	2,07	92,08	
				2,31	2,07	93,50	
		1000	2,31	2,09	93,49		
			2,31	2,09	93,23		
			2,31	2,1	93,71		
		800	2,31	2,09	92,03		
			2,31	2,07	91,13		
			2,31	2,07	91,40		

Fonte: Autor, 2018.

APÊNDICE C

Tabela completa com os resultados referentes aos ensaios de impacto realizados para as soldagens com os arames sólido e tubular pelos processos convencional por curto-circuito e modo pulsado.

Resistência ao Impacto – (J)							
Arame	Processo	Amostra	Rompeu	Energia (J)	Energia Média (J)	Energia (J) ASME BPVC.II.C	Energia Média (J) ASME
Sólido	Curto Circuito	CP-3A	Sim	71,7	79,46 ±13,44	71,7	78,5 ±9,35
		CP-3B	Sim	64,4		-	
		CP-3C	Sim	89,2		89,2	
		CP-3D	Sim	74,7		74,7	
		CP-3E	Sim	97,3		-	
	Pulsado	CP-2A	Sim	70,3	73,6 ± 20,71	70,3	70,8 ±12,55
		CP-2B	Sim	83,6		83,6	
		CP-2C	Sim	58,6		58,6	
		CP-2D	Sim	51,9		-	
		CP-2E	Sim	103,7		-	
Tubular	Curto Circuito	CP-4A	Sim	48,0	45,68 ±9,14	48,0	48,6 ±2,74
		CP-4B	Sim	46,2		46,2	
		CP-4C	Sim	51,6		51,6	
		CP-4D	Sim	52,6		-	
		CP-4E	Sim	30,0		30,0	
	Pulsado	CP-1A	Sim	30,4	51,58 ± 13,33	-	54,4 ±6,37
		CP-1B	Sim	58,2		58,2	
		CP-1C	Sim	47,1		47,1	
		CP-1D	Sim	58,1		58,1	
		CP-1E	Sim	64,1		-	

Fonte: Autor, 2018.