

**EDITH ARYEL DE MESQUITA MOURA**

**AVALIAÇÃO DE FLUXOS VISANDO A APLICAÇÃO  
EM COBREJUNTA MOLDÁVEL NÃO PERMANENTE  
EM SOLDAGEM DE PASSE DE RAIZ POR MIG/MAG**



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

**2024**

**EDITH ARYEL DE MESQUITA MOURA**

**AVALIAÇÃO DE FLUXOS VISANDO A APLICAÇÃO EM  
COBREJUNTA MOLDÁVEL NÃO PERMANENTE EM SOLDAGEM  
DE PASSE DE RAIZ POR MIG/MAG**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Américo Scotti (PhD)

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Souza

**Uberlândia**

**2024**

**Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

M929    Moura, Edith Aryel de Mesquita, 1997-  
2024      Avaliação de Fluxos Visando a Aplicação em Cobrejunta  
                 Moldável Não Permanente em Soldagem de Passe de Raiz por  
                 MIG/MAG [recurso eletrônico] / Edith Aryel de Mesquita  
                 Moura. - 2024.

Orientador: Américo Scotti .  
Coorientador: Daniel Souza.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.644>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. , Américo Scotti,1955-,(Orient.). II. Souza, Daniel,1978-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-  
MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - [www.posmecanica.ufu.com.br](http://www.posmecanica.ufu.com.br) - [secposmec@mecanica.ufu.br](mailto:secposmec@mecanica.ufu.br)



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 643, PPGEM				
Data:	30/01/2024	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	12:15
Matrícula do Discente:	12122EMC001				
Nome do Discente:	Edith Aryel de Mesquita Moura				
Título do Trabalho:	AVALIAÇÃO DE FLUXOS VISANDO A APLICAÇÃO EM COBREJUNTA MOLDÁVEL NÃO PERMANENTE EM SOLDAGEM DE PASSE DE RAIZ POR MIG/MAG				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	"DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS E CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM"				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Luiz Eduardo dos Santos Paes - FEMEC/UFU; Cláudio Turani Vaz - CEFET-MG, Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos - UENF; Daniel Souza (coorientador) - UFG e Américo Scotti - FEMEC/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Américo Scotti, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Cláudio Turani Vaz, Usuário Externo**, em 03/04/2025, às 14:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Américo Scotti, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/04/2025, às 20:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Usuário Externo**, em 04/04/2025, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo dos Santos Paes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/04/2025, às 08:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos, Usuário Externo**, em 07/04/2025, às 13:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5983587** e o código CRC **1C247A37**.

*Dedico,*  
*À minha mãe, Helena de Mesquita.*  
*À minha irmã, Maria Valentine de Mesquita,*  
*À minha vó, Maria Helena de Albuquerque.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de realização deste curso.

Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiânia por ceder seu espaço e recursos para realização dessa dissertação.

Ao professor Américo Scotti, pelas orientações, conhecimento repassados e paciência durante a realização do mestrado

Ao professor Daniel Souza, pelos ensinamentos, pelo incentivo e apoio a realização deste trabalho, mas, principalmente, pelos anos de amizade.

Ao professor Demostenes Ferreira, pelas sugestões e suporte a realização deste trabalho.  
À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

À empresa Lincoln Electric do Brasil, na pessoa de Antônio Souza, pelo fornecimento dos fluxos e ensaios realizados, assim como conhecimentos repassados, possibilitando a realização deste trabalho.

Aos engenheiros, técnicos e alunos do Laprosolda/UFU e LAMAF/UFG, pelo apoio a realização dos experimentos, aprendizados, pelos conhecimentos repassados e suporte em momentos que eu não pude estar presente. Em especial ao Cristiano Faria, Hiago Leão, Douglas Mazer, Felipe Teixeira e Lucas Lannes.

Aos membros da banca, que doaram tempo e experiência para aperfeiçoar esta dissertação.

À minha família, pelo amor incondicional e compreensão diante dos momentos ausentes durante a realização deste trabalho.

A todos os meus professores.

**MOURA, E. A. M. Avaliação de Fluxos Visando a Aplicação em Cobrejunta Moldável Não Permanente em Soldagem de Passe de Raiz por MIG/MAG .2024. 162 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.**

## **RESUMO**

Nesse trabalho foi proposto avaliar diferentes composições de fluxos passíveis de utilização em suporte de raiz moldável não permanente, para soldagem de passes de raiz depositados pelo processo de soldagem MIG/MAG com alta corrente (alta produção). Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi reunir conhecimentos dos efeitos de características físico-químicas de fluxos sobre o desempenho dessa matéria prima na confecção de um suporte de raiz moldável. Foi desenvolvido um método para utilização de fluxo como suporte de raiz, simulando as condições de um suporte de raiz moldável em uma junta para soldagem, evitando assim mascarar os resultados pelos ligantes utilizados. Critérios de não aceitabilidade de passes de raiz, baseados na geometria do cordão e capacidade de produção foram propostos e aplicados nas análises de desempenho. Cinco diferentes tipos de fluxos não comerciais foram avaliados (diferentes basicidades, granulometrias e pontos de fusão), sob uma única condição de corrente de soldagem (transferência por spray) e uma faixa de folga de raiz. Foram confeccionados passes de raiz com cada fluxo sob diversas velocidades de soldagem, a fim de determinar a capacidade de máxima velocidade de soldagem com cada fluxo. Uma análise estatística para diferenciar médias e redução de incerteza foi aplicada como ferramenta. Os efeitos de cada fluxo sobre a geometria da raiz (índice de convexidade, regularidade e reforço) foram analisados. Microscopia óptica foi utilizada para avaliar o efeito da reação escória-metal sobre a microestrutura. Como conclusão, verificou-se que as 3 características dos fluxos agem de forma concorrente sobre o desempenho do suporte de raiz. Fluxos de granulometrias mais grosseiras têm efeito moderado em termos do aumento da capacidade de produção. Por outro lado, a granulometria grosseira confere reforço de raiz com maior altura, que também é alcançada por fluxos mais ácidos. Por fim, para os fluxos com índice de basicidade e granulometria semelhantes, os fluxos com menores temperaturas de fusão atribuíram cordões mais regulares e menos convexos.

**Palavras-Chave:** Suporte de Raiz Moldável, Cobrejunta, Soldagem a Arco, Passe de Raiz.

**MOURA, E. A. M. Flux Evaluation Aiming at Application in Non-Permanent Moldable Backing in Root Pass Welding Using by MIG/MAG.** 2024. 162 p. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

In this work, it was proposed to evaluate different flux compositions that could be used in non-permanent moldable backing, for welding root passes deposited by the MIG/MAG welding process with high current (high production). In this context, the objective of the work was to gather knowledge of the effects of the physical-chemical characteristics of flux on the performance of this raw material in the manufacture of moldable backing. A method was developed for using flux as a backing, simulating the conditions of a moldable backing in a welding joint, thus avoiding masking the results by the binders of a non-permanent moldable backing. Criteria for the non-acceptability of root passes, based on bead geometry and production capacity, were proposed and applied in performance analyses. Five different types of non-commercial fluxes were evaluated (different basicities, particle sizes, and melting points), under a single welding current condition (spray transfer) and a root gap range. Root passes were made with each flux at different welding speeds, to determine the maximum welding speed capacity with each flux. A statistical analysis to differentiate means and uncertainty reduction was applied as an analysis tool. The effects of each flux on the root geometry (convexity index, regularity, and reinforcement depth). Optical microscopy was used to evaluate the effect of the slag-metal reaction on the microstructure. In conclusion, it was found that the 3 characteristics of the fluxes act concurrently on the performance of the copper joint. Coarser particle size fluxes have a moderate effect in terms of increasing production capacity. On the other hand, coarse grain size provides root reinforcement with greater depth, which is also achieved by more acidic fluxes. Finally, for fluxes with similar basicity index and grain size, fluxes with lower melting temperatures attributed more regular and fewer convex beads.

**Keywords:** Moldable Backing, Backing, Gas Metal Arc Welding, Root Pass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquemático da utilização de um suporte de raiz: a) antes; e b) após a realização do passe de raiz.....	16
Figura 2.1 - Sequência de gotas e oscilogramas de corrente e tensão típicos para transferência goticular (Scotti; Ponomarev, 2014).....	21
Figura 2.2 - Parâmetros geométricos mais representativos de um cordão de solda .....	23
Figura 2.3 – Terminologias de uma junta: a) geometria da junta; e b) passes sobre a junta em uma soldagem multipasse .....	24
Figura 2.4 – Escorramento do passe de raiz em uma junta confeccionada com processo MIG/MAG sem a utilização de suporte de raiz (para facilitar a visualização, a figura está invertida em 180°).....	25
Figura 2.5 – Modelo para demonstrar a ação das forças envolvidas na formação do passe de raiz .....	26
Figura 2.7 – Modelo para demonstrar a ação das forças (propriedade dinâmica x estática) durante: T1) ação do arco; T2) solidificação; e T3) cordão solidificado (Adaptado de Américo Scotti, notas de aula).....	27
Figura 2.8 - Campo Magnético e consequente Força de Lorentz na coluna de arco (Adaptado Reis et al., 2011).....	30
Figura 2.9 - Modelo para explicar as forças que influenciam na formação do passe de raiz, demonstrando esquematicamente as forças que atuam e o aumento apenas da resultante força gravitacional com o aumento da folga e consequente aumento da largura do cordão (Adaptado Scotti; Ponomarev, 2014) .....	32
Figura 2.10 - Resultante dos efeitos da energia imposta e da interposição da poça entre o arco e o metal base sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente (Scotti; Ponomarev, 2014).....	35
Figura 2.11 – Figura esquemática da instalação para os testes com suporte de raiz de fluxo (Adaptado Biswas; Mandal, 2009) .....	38
Figura 2.12 – Figura esquemática da instalação para os testes com suporte de raiz de fluxo (Adaptado Ushio et al., 1993).....	38
Figura 2.13 - Efeito da corrente de soldagem no reforço (hrr) e largura (wrr) da raiz (MALIN, 2011a) .....	42
Figura 2.14 - Seção transversal do passe de raiz depositado em dois níveis de corrente: A) 600 A; B) 1000 A (MALIN, 2001a).....	42
Figura 2.15 - Efeito da velocidade de soldagem no reforço (hrr) e largura (wrr) da raiz (MALIN, 2011a).....	43

Figura 3.1 - Suporte para testes de soldagem com suporte de raiz de fluxo.....	46
Figura 3.2 - Chapas de teste (em mm) e detalhes da junta .....	48
Figura 3.3 – Vista explodida do suporte de fixação das chapas para os experimentos com fluxo constituído por: (1) dispositivo para acomodação do fluxo; (2) estrutura; (3) chapa para fechamento, (4) dispositivo dissipador de calor; (5,6) grampos; (7) fixação; e (8) chapa de teste .....	51
Figura 3.4 – Suporte de fixação das chapas para os experimentos com o fluxo disposto sobre o rasgo para acomodação.....	52
Figura 3.5 – Fluxograma do método de definição da velocidade máxima de soldagem em que se mantem uma poça estável (e que se forma um cordão em conformidade) .....	53
Figura 3.6 – Vista de baixo da junta, mostrando perfurações ao longo do cordão devido ao excesso de velocidade de soldagem.....	54
Figura 3.7 – Fluxograma do método de definição da velocidade de soldagem crítica acima da qual sempre ocorre a perfuração (e não se forma um cordão em conformidade) .....	56
Figura 3.8 – Representação esquemática da faixa de variabilidade (ocorrência ou não de não conformidade) entre as velocidades de soldagem $V_{s\max}$ e $V_{scrít}$ .....	57
Figura 3.9 – Faixa de variabilidade em função da composição do fluxo .....	62
Figura 3.10 – Representação da área da seção transversal da junta .....	66
Figura 3.11 – Velocidade máxima de soldagem utilizando o Fluxo 4 para diferentes aberturas de junta .....	67
Figura 3.12 – Velocidade máxima soldagem em função de duas granulometrias distintas para o Fluxo 4 .....	70
Figura 4.1 – Demonstração dos perfis de seção transversal da raiz para uma (a) variação suave e (b) variação do perfil do reforço de raiz .....	72
Figura 4.1 – Demonstração das medições realizadas ao longo de seções da raiz para determinação das características geométricas (“altura do reforço da raiz” e “largura máxima da altura do reforço da raiz”) .....	73
Figura 4.2 - Seções para análise da micrografia e identificação de possíveis defeitos de soldagem.....	79
Figura 4.3 – Demonstração dos pontos de análise microestrutural (usando como padrão imagens do experimento nº 57) .....	80
Figura 4.4 – Curva da distribuição normal das medições de reforço de raiz ao longo do cordão em 10 seções distintas de cada um dos 3 cordões com cada fluxo.....	81
Figura 4.6 – Vista de baixo da junta demonstrando um reforço de raiz com (a) menor regularidade e (b) maior regularidade .....	84
Figura 4.5 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições no reforço de raiz ao longo do cordão na $V_{s\max}$ e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 1 .....	85

Figura 4.6 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na $V_{smáx}$ e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 2 .....	86
Figura 4.7 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na $V_{smáx}$ e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 3 .....	86
Figura 4.8 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na $V_{smáx}$ e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 4 .....	87
Figura 4.9 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na $V_{smáx}$ e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 5 .....	87
Figura 4.10 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na $V_{smáx}$ para o Fluxo 4 com granulometria grosseira e refinada .....	88
Figura 4.11 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições no reforço de raiz ao longo do cordão na $V_{smáx}$ para duas aberturas de junta: 3 e 2 mm .....	89
Figura 4.12 – Curva da distribuição normal das medições da largura máxima da altura do reforço da raiz ao longo do cordão em 10 seções distintas .....	90
Figura 4.13 – Índice de convexidade do cordão em função do fluxo .....	93
Figura 4.14 – Microestrutura típica no centro da raiz do cordão utilizadas para validação do efeito do fluxo sobre a microestrutura da zona fundida do passe de raiz: (a) Fluxo 1; (b) Fluxo 2; (c) Fluxo 3; (d) Fluxo 4; e (e) Fluxo 5, onde AF representa ferrita acicular, PF(G) ferrita de contorno de grão e FS(A) ferrita de segunda fase alinhada .....	95
Figura 4.15 – Microestrutura típica na interface entre a raiz do cordão e a escória utilizadas para validação do efeito da reação escória-metal (para facilitar a visualização, as figuras estão invertidas em 180°): (a) Fluxo 1; (b) Fluxo 2; (c) Fluxo 3; (d) Fluxo 4; e (e) Fluxo 5, onde AF representa ferrita acicular, PF(G) ferrita de contorno de grão e FS(A) ferrita de segunda fase alinhada Microestruturas ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)) .....	96
Figura 4.16 – Presença de descontinuidade no cordão (a) do ensaio 137 fluxo2 e (b) ensaio 149 Fluxo 3 .....	97
Figura 5.1 – Corrente média se soldagem para cada fluxo testado na condição de máxima velocidade de soldagem (Valim = 6 m/min, gás de proteção = 98% Ar + 2 % O <sub>2</sub> , vazão do gás de proteção = 18 l/min, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, abertura de raiz = 3 mm, fonte operando no modo tensão constante) .....	99
Figura 5.2 – Energia de soldagem por unidade de comprimento para cada fluxo testado na condição de máxima velocidade de soldagem (Valim = 6 m/min, gás de proteção = 98% Ar + 2 % O <sub>2</sub> , vazão do gás de proteção = 18 l/min, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, fonte operando no modo tensão constante) .....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição e índice de basicidade dos fluxos (dados fornecidos pela Lincoln Eletric do Brasil).....	48
Tabela 3.2 - Granulometria dos fluxos, em % de peso por faixa de malha, de amostras de 500 g de cada fluxo (dados fornecidos pela Lincoln Eletric do Brasil)) .....	48
Tabela 3.3 – Corrente e tensão médias, e respectivos desvios padrão, em função do fluxo na máxima velocidade e à uma unidade de velocidade abaixo (- 1 cm/min) (Continua)...	57
Tabela 3.4 – Corrente e tensão médias, e respectivos desvios padrão, em função da variação da abertura de raiz e granulometria utilizando o Fluxo 4 (Continua)	59
Tabela 3.5 – Efeito da composição do fluxo sobre a máxima velocidade de soldagem e velocidade crítica de soldagem.....	60
Tabela 3.6 - Dados estatísticos do grupo para máxima velocidade de soldagem, onde: $x_p$ = velocidade de soldagem média amostral para ocorrência de perfuração; $s_p$ = desvio padrão amostral; $n_p$ = número de amostras .....	63
Tabela 3.7 – Teste de Hipóteses para comparação estatística das velocidades de perfuração ( $V_p$ ) dos fluxos.....	64
Tabela 3.8 – Relação entre a dimensão da folga e $V_{smáx}$ .....	68
Tabela 3.9 - Granulometria do fluxo original comparado ao fluxo refinado (dados fornecidos pela Lincoln Eletric do Brasil) .....	69
Tabela 4.1 – Reforço e largura médios de raiz, e respectivos desvios padrão, obtidas em função do fluxo na máxima velocidade e à uma unidade de velocidade abaixo (- 1 cm/min) (Continua).....	74
Tabela 4.2 – Reforço e largura médios de raiz, e respectivos desvios padrão, obtidas em função da variação da abertura de raiz e granulometria utilizando o Fluxo 4.....	77
Tabela 4.3 – Testes de hipótese para comparar o reforço de raiz entre cada fluxo (Continua).....	82
Tabela 4.4 - Dados estatísticos do grupo para máxima velocidade de soldagem, onde: $\bar{x}_{rr}$ = altura média do reforço de raiz; $s_{rr}$ = desvio padrão amostral; CV = coeficiente de variação; e $n_{rr}$ = número de seções avaliadas .....	83
Tabela 4.5 - Dados estatísticos do grupo para máxima velocidade de soldagem, onde: $\bar{x}_{lr}$ = média da largura máxima do reforço de raiz; $s_{lr}$ = desvio padrão amostral; CV = coeficiente de variância; e $n_{rr}$ = número de seções avaliadas .....	90
Tabela 4.6 – Resultados dos testes de hipótese para média da largura máxima de raiz para cada fluxo avaliado (Continua)....	91
Tabela 5.1 – Tabela resumo com uma ponderação arbitrária da caracterização dos fluxos....	98

Tabela 5.2 – Razão entre o volume depositado e o volume total da junta para os 5 fluxos testados sob a máxima velocidade de soldagem para cada fluxo e abertura de junta de 3 mm .....	101
Tabela 5.3 – Tabela resumo dos resultados obtidos para os 5 fluxos testados .....	105
Tabela 5.4 – Tabela resumo dos resultados obtidos para os 5 fluxos testados após aplicação dos pesos definidos .....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$A_e$  – Área da seção transversal do arame

AF – Ferrita acicular

CV – Coeficiente de variação

DBCP – Distância bico de contato-peça

$f$  – Frequência

IB – Índice de basicidade

IC – Índice de convexidade

$I_m$  – Corrente média de soldagem

L- Largura máxima da altura do reforço da raiz

P – Altura do reforço da raiz

PF – Ferrita primária

PS – Ferrita secundária

$t_{calc}$  – Valor de t student calculado

$t_{crit}$  – Valor de t student crítico

$U_{ref}$  – Tensão de referência

$V_{alim}$  – Velocidade de alimentação

$V_{S_{crit}}$  – Velocidade de soldagem crítica

$V_{S_{máx}}$  – Máxima velocidade de soldagem

$Vol_d$  – Volume de material depositado

## SUMÁRIO

<b><u>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</u></b> .....	<b>14</b>
1.1 Contextualização .....	14
1.2 Justificativa .....	17
1.3 Objetivo Geral .....	18
<b><u>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u></b> .....	<b>19</b>
2.1 Fundamentos da aplicação da soldagem MIG/MAG a passes de raiz .....	19
2.1.2 <i>Formação do cordão</i> .....	22
2.2 Passes de raiz .....	25
2.2.1 <i>Tensão superficial</i> .....	28
2.2.2 <i>Força eletromagnética</i> .....	28
2.2.3 <i>Força devido ao jato de plasma</i> .....	29
2.2.4 <i>Força devido ao momentum das gotas em transferência</i> .....	30
2.2.5 <i>Força gravitacional</i> .....	32
2.3 Mecanismos de penetração .....	33
2.4 Suporte de raiz de fluxo .....	37
2.4.1 <i>Fluxos</i> .....	39
<b><u>CAPÍTULO III - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA DE SOLDAGEM EM FUNCAO DO FLUXO</u></b> .....	<b>44</b>
3.1 Materiais, Equipamentos e Métodos .....	47
3.2 Etapas Metodológicas .....	49
3.2.1 <i>Parametrização</i> .....	49
3.2.2 <i>Realização dos experimentos</i> .....	50
3.2.3 <i>Resultados</i> .....	60
3.3 Análise dos Resultados .....	60
3.3.1 <i>Definição da velocidade média de perfuração e tratamento estatístico dos dados</i> .....	61
3.3.2 <i>Influência do volume de material depositado sobre a <math>Vs_{máx}</math></i> .....	65
3.3.3 <i>Influência da granulometria do fluxo sobre a <math>Vs_{máx}</math></i> .....	68
<b><u>CAPÍTULO IV - INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO FLUXO SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E GEOMÉTRICAS DA RAIZ</u></b> .....	<b>71</b>

4.1 Método para avaliação das características geométricas da raiz.....	71
4.2 – Método para avaliação das características físicas da raiz.....	78
4.2.1 - <i>Microestrutura do cordão</i>	78
4.2.2 - <i>Presença de descontinuidade</i>	80
4.3 Apresentação dos resultados e análises .....	81
4.4 – Análise dos resultados da largura máxima da altura do reforço da raiz .....	89
4.5 – Análise dos resultados do índice de convexidade da raiz.....	92
4.6 – Análise qualitativa da seção transversal da raiz .....	94
<b>CAPÍTULO V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>98</b>
<b>CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES.....</b>	<b>109</b>
<b>CAPÍTULO VII - SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>111</b>
<b>CAPÍTULO VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO DO SUPORTE PARA SOLDAGEM.....</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE B – TESTES DE HIPÓTESE PARA MÁXIMA VELOCIDADE DE SOLDAGEM.....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE C – TESTES DE HIPÓTESE PARA LARGURA MÁXIMA DE RAIZ...</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE D – TESTES DE HIPÓTESE PARA REFORÇO DE RAIZ.....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXO A – TABELA DA DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT.....</b>	<b>158</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

O passe de raiz tem a função de suportar os demais passes por si só ou preencher uma junta soldada de materiais de base de pequena espessura. Esse passe é dito por muitos ser o mais problemático dos passes. Quando se realiza a soldagem de uma junta, o primeiro passe deve preencher a raiz da junta para que, em seguida, seja feito o preenchimento completo. A confecção desse passe detém certas dificuldades operacionais, visto a complexa relação entre diversas variáveis (tipo de junta, espessura do material base e posição de soldagem) e parâmetros de soldagem. O passe de raiz pode ser feito de forma automática ou manual.

Quando realizado de forma manual, o soldador tem controle da poça de fusão, sendo ele o responsável por obter a penetração desejada, sem promover o escorramento da poça. Dessa forma, o soldador é o agente direto de controle do processo e qualidade do passe de raiz. Depende, então, de sua habilidade e treinamento. O uso de sistemas robóticos ou mecanizados, por outro lado, promove o aumento na capacidade de produção quando comparados à soldagem manual. Porém, durante a confecção do passe de raiz é preciso lidar com desalinhamentos prévios e possíveis distorções, o que dificulta o controle da penetração da raiz sem a capacidade adaptativa de um soldador.

Um fator agravante na produção do passe de raiz é a tendência ao escorramento da poça na confecção desse passe, principalmente quando se busca altas taxas de produção por meio do aumento dos níveis de corrente. Por isso, os passes de raiz são quase sempre confeccionados, manualmente ou por meios automatizados, com processos em baixa energia

(TIG e Eletrodo Revestido em baixa correntes e MIG/MAG em curto-círcuito). Além da baixa energia, deve-se também evitar arcos com alta pressão de jato de plasma e utilizar tecimento para distribuir o calor sobre a junta. O papel do soldador, associado ao seu controle sensitivo, é avaliar se a poça se torna muito fluida e controlar através da velocidade de deslocamento e da forma de tecimento a viscosidade da poça, evitando ao escorramento no passe de raiz. No processo de soldagem TIG, pode-se também controlar a viscosidade pela introdução periódica do arame de alimentação – afastando e aproximando quando conveniente. No modo automático, somente software e sensores sofisticados conseguem imitar este papel do soldador (Viviani, 2015; Kindermann et al., 2015).

Concentrando nas soldagens de passes de raiz pelo processo MIG/MAG, algumas tecnologias buscam manipular os modos de transferência metálica durante o processo de soldagem MIG/MAG como forma de manter as propriedades favoráveis de modos de transferência metálica e contornar suas desvantagens para aplicações em passes de raiz. A manipulação da transferência metálica pode se dar por meio do controle da corrente, o que leva a variantes do processo MIG/MAG. No entanto, a execução dessas técnicas exige a utilização de fontes de soldagem com maior versatilidade implicando em alto custo operacional (Cirino, 2020). As versões do processo MIG/MAG com controle de corrente melhoram ou viabilizam a confecção de passes de raiz, porém demandam maior investimento devido às suas complexidades tecnológicas.

Uma estratégia que independa da modulação da corrente para evitar o escorramento da poça e manter a estabilidade na confecção passes de raiz, mas podendo trabalhar com maior taxa de deposição, é a utilização de suporte de raiz. O suporte de raiz (também denominado como cobre-junta ou *backing*, do termo em inglês “*backing strips*”) é um artifício utilizado para promover o suporte da poça durante o estado líquido na confecção do passe de raiz. A Figura 1.1 demonstra esquematicamente a utilização de um suporte de raiz genérico na confecção do passe de raiz. Como se vê, a utilização de suporte de raiz reduz a possibilidade de escorramento da poça de fusão, possibilita a soldagem por apenas um lado, modela a raiz e permite trabalhar com maiores níveis de corrente (e consequente, maior produção e produtividade).

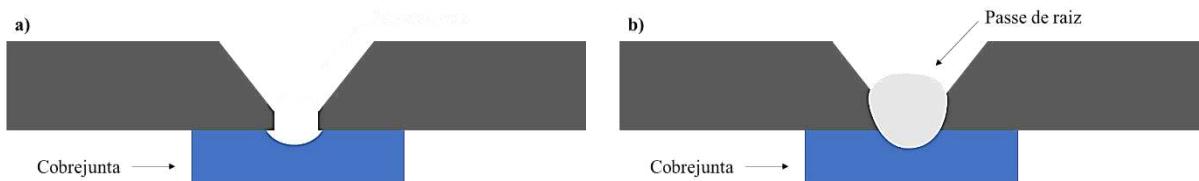


Figura 1.1 - Esquemático da utilização de um suporte de raiz: a) antes; e b) após a realização do passe de raiz

Os suporte de raiz se dividem em duas categorias principais: suporte de raiz permanentes e não permanentes. Os suporte de raiz permanentes têm como característica a aderência à raiz da junta, e são de materiais similares aos da junta a ser soldada, sendo necessário um processo de usinagem para removê-lo da raiz (se for necessário). Os suporte de raiz não permanentes não são soldados ao passe de raiz. De forma geral, esse tipo de suporte de raiz são fabricados de cobre (em alguns casos de alumínio), e promovem retirada fácil do calor para não permitir a poça se diluir sobre eles. Também podem ser de material cerâmico (alta refratariedade). Os suporte de raiz podem ter diversos tamanhos e geometrias para se adaptar às necessidades da junta. O uso de suporte de raiz, apesar de promover a sustentação da poça, apresenta algumas limitações operacionais. Entre elas podem-se citar: a possibilidade de difusão de elementos estranhos ou indesejáveis para a poça, ocasionando a fragilização e deterioração das propriedades mecânicas; a formação de concentradores de tensão; dificuldade de utilização em juntas desalinhadas e fora de posição. O suporte de raiz de cobre, por exemplo, pode causar inclusões no material depositado e reduzir as propriedades mecânicas da junta soldada. A utilização pode ocasionar trincas, descontinuidade e corrosão (VARGAS, 2013). Kim (2010) identificou em seu estudo que a colisão do arco com a barra de cobre ocasionou a contaminação da junta soldada. Nas amostras nas quais a contaminação não foi identificada, o autor observou resultados mais satisfatórios nos ensaios de tração e flexão. O uso de suporte de raiz cerâmicos apresenta dificuldades associadas à montagem. Juntas de formatos e posições complexas dificultam a utilização desse tipo suporte de raiz, tendo em vista as limitações para posicioná-lo sem a utilização de um dispositivo externo de fixação (fita). Porém, estes dispositivos estão disponíveis em diversos formatos e tamanhos no mercado, e sua forma de fixação lhe atribui uma série de possíveis aplicações.

Como visto ao longo dessa seção, a confecção de passes de raiz se apresenta como uma limitação quando se busca o aumento de produção no processo de soldagem. Para altos níveis de corrente, o uso de suporte de raiz se apresenta como uma alternativa para garantir a

sustentação da poça e estabilidade do processo. Como mencionado, o uso de suporte de raiz convencionais (permanentes ou não) é uma opção conhecida para confecção de passes de raiz, porém possuem limitações físicas e operacionais. Dessa forma, buscam-se técnicas para garantir um processo prático, que facilite a confecção dos passes de raiz em posições e geometrias variadas, e que permita um processo de alta produção.

## 1.2 Justificativa

A utilização de altas correntes de soldagem na manufatura de passes de raiz é uma forma de promover altas taxa de deposição. Porém para realizar os passes de raiz é necessário um princípio que impeça a ação das forças que tendem a perfurar a poça de fusão nessas condições. Como visto, a confecção de passes de raiz com utilização de suporte de raiz tem por característica a sustentação da poça de fusão, o que impede o escorramento. O mesmo comportamento é esperado do suporte de raiz moldável. A alta energia de soldagem atribui ao processo maior produção, ou seja, maiores taxas de fusão do arame. Enquanto isso, maiores velocidade de soldagem, atribuem maior produtividade, ou seja, capacidade de produzir maiores comprimentos de cordão para um mesmo período (ou reduzir o tempo necessário para confecção de determinado comprimento de cordão). Porém, o aumento da velocidade de soldagem sem alterar o nível de corrente ocasiona a instabilidade da poça de fusão (Scotti; Ponomarev, 2014).

Um suporte de raiz que promove a penetração total na soldagem unilateral, com uma elevada capacidade de produção, que absorva os desníveis provenientes da montagem, que seja de fácil manuseio e tolere uma ampla faixa de posições promoveria um impacto significativo na produção de passes de raiz. Tendo em vista as limitações dos suporte de raiz existentes e buscando aumentar a eficiência e qualidade na produção de passes de raiz, foi proposto por Scotti e Souza (2012), por meio do pedido de patente Nº BR 102012012324-0, um suporte de raiz moldável não permanente para soldagem, cuja base se assemelha mais ao suporte de raiz de fluxo. Outras patentes já foram depositadas visando a aplicação de fluxo como suporte de raiz. Haeck (1969), patente US 3,662,144, se trata de um dispositivo que mantém fixo o fluxo sob a raiz. Keith (1975), patente US 3,929,270, propõe a utilização de uma fita para manter o fluxo sob a raiz. Paranhos (2015), patente Nº BR 1020150105320, propõe a utilização de escória de fluxo como matéria prima para confecção de suporte de raiz

cerâmico. Quando comparada as demais patentes, o método proposto por Scotti e Souza (2012) se diferencia por apresentar uma solução que permite fixar e moldar o fluxo sob a raiz, visto que não possui um formato prévio e permanece aderido sob a raiz durante o processo de soldagem.

Devido ao seu método de aplicação, esse suporte de raiz pode ser moldado à raiz (flexibilidade de forma da junta), permitindo o uso em juntas desajustadas, juntas de difícil acesso, posições variadas e diferentes geometrias. O suporte de raiz moldável é formado por uma mistura de minerais e um aglomerante, onde minerais são misturados previamente no estado sólido. Um líquido aglomerante é adicionado na hora da aplicação para a mistura e formação de uma massa moldável. Em outras palavras, o suporte de raiz moldável é um tipo de suporte de raiz postiço (não permanente) formado por uma mistura de minerais e um aglomerante, que adere ao metal após sua cura por meio de um catalisador inorgânico.

Por se tratar de um trabalho de inovação, o suporte de raiz moldável ainda não foi estudado na literatura. Algumas vantagens operacionais como a possibilidade de soldar passes de raiz com alta energia de soldagem e soldar em juntas desalinhadas são esperadas da aplicação dessa tecnologia, porém o tema carece de estudos científicos para constatar suas características operacionais. Além disso, ainda se faz necessário o estudo dos fundamentos envolvidos na utilização do suporte de raiz moldável, como a relação da composição do fluxo com a formação do passe, a relação da velocidade de soldagem e formação do passe de raiz e as variáveis que governam a geometria da raiz durante a aplicação do fluxo como suporte de raiz.

### 1.3 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar diferentes composições de fluxos para suporte de raiz moldável, buscando reunir os conhecimentos necessários para tornar viável a utilização dessa abordagem em soldagens de passe de raiz em processos de soldagem a arco com alta taxa de deposição.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De forma geral, a confecção do passe de raiz é uma tarefa de alta complexidade operacional. Diversos fatores de interrelação agem sobre a formação do cordão e na tendência ao escorramento da poça. É difícil avaliar a influência de cada fator individualmente. Nesse capítulo, busca-se dar ênfase aos temas pertinentes de maior influência sobre a formação do passe de raiz, cujo conhecimento foi necessário para entender e discutir os resultados do trabalho desenvolvido. Além disso, também são apresentados conceitos de soldagem MIG/MAG aplicáveis à formação do cordão e uma breve revisão sobre a utilização de fluxos como suporte de raiz em processos de soldagem a arco.

#### 2.1 Fundamentos da aplicação da soldagem MIG/MAG a passes de raiz

O processo de soldagem MIG/MAG (também conhecido como Gás Metal Arc Welding – GMAW) é um processo a arco elétrico que forma um arco entre um eletrodo nu consumível, na forma de arame continuamente alimentado, e o metal base. A transferência ocorre na formação de gotas que são sucessivamente depositadas sobre a peça a soldar. As gotas, a poça de fusão e o arco são protegidos por um gás de proteção inerte (MIG – Metal Inert Gas), ativo (MAG - Metal Active Gas) ou uma mistura de ambos. Esse processo tem

como característica uma relativamente alta capacidade de produção, a qual está atribuída principalmente ao uso de uma alta densidade de corrente e a alimentação contínua do arame (Scotti; Ponomarev, 2014). Outra vantagem do processo MIG/MAG é a possibilidade de se alterar o modo de transferência metálica. Tanto a capacidade de produção do processo quanto o modo de transferência metálica dependem da correta regulagem dos parâmetros de soldagem. Contudo, a regulagem é complexa, visto a gama de fatores e fenômenos físicos envolvidos.

### 2.1.1 Influência do modo de transferência metálica no passe de raiz

Os modos naturais de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG se dividem em duas categorias principais: mecanismo de transferência por contato e mecanismo de transferência por voo livre (Scotti et al.; 2012). O modo de transferência por contato se dá quando ocorre o contato direto da gota com a poça antes do dessacamento, enquanto no segundo grupo o dessacamento da poça ocorre antes do contato com a poça (Scotti; Ponomarev, 2014). Entre os modos de transferência por contato, a transferência por curto-circuito é a mais aplicada para confecção de passes de raiz, devido aos baixos níveis de correntes empregados nesse modo favorecer a formação do passe de raiz sem promover o escorramento da poça. Todavia, nesse modo de transferência não se atinge taxas de deposição e produção elevadas como quando aplicados modos de transferência com níveis de correntes mais elevados. Os fenômenos descritos resumem a complexa relação de se realizar a confecção de passes de raiz com alta taxa de produção e se obter cordões adequados. Os conceitos que justificam esta relação estarão descritos ao longo das seções deste capítulo.

Na classe de transferência metálica por voo livre encontra-se a transferência góticular projetada (também conhecida pelo termo em inglês *spray*), que ocorre pela transferência das gotas de forma sequencial em alta frequência, o que resulta em um oscilograma de corrente e tensão sem variações significativas nos sinais. A Figura 2.1 mostra quadros fotográficos obtidos em alta velocidade e sincronizadas com os oscilogramas de tensão e corrente.

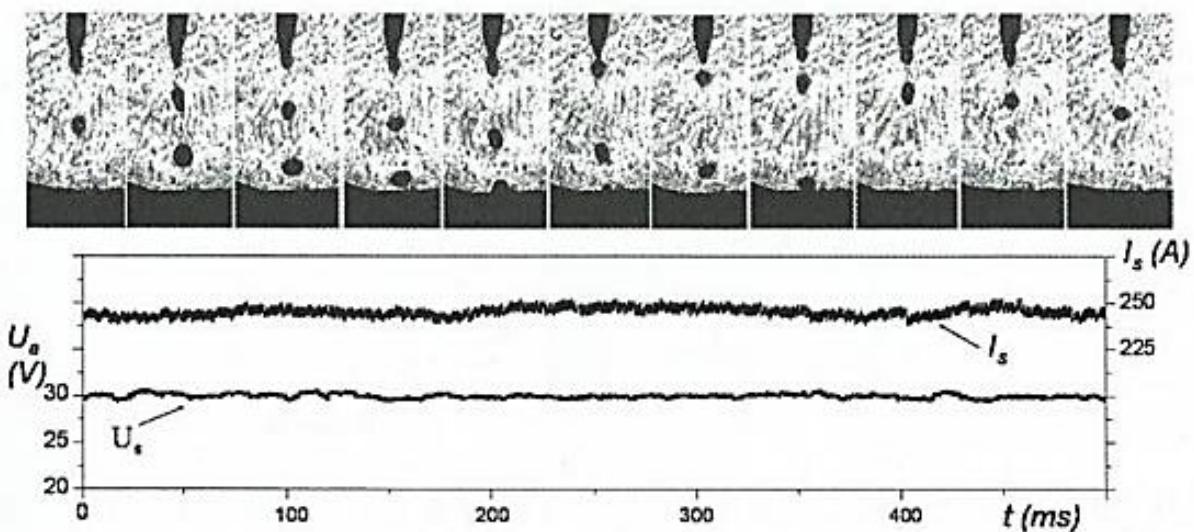


Figura 2.1 - Sequência de gotas e oscilogramas de corrente e tensão típicos para transferência goticular (Scotti; Ponomarev, 2014)

Esse modo de transferência é caracterizado por altas de taxas deposição, baixa incidência respingos, por apresentar molhabilidade satisfatória, boa penetração e cordões com bom aspecto superficial. A trajetória do voo da gota coincide com o eixo do eletrodo. Esse fenômeno ocorre devido as Forças de Lorentz que tentam deslocar o material da gota no sentido da superfície para o centro do condutor. A Força de Lorentz é uma força eletromagnética e está entre as forças que governam a transferência metálica. A importância dessa força se dá pelo fato de que para altos níveis de corrente atua na parte superior da gota exercendo pressão e um consequente estrangulamento que impulsiona a poça e resulta em seu dessacramento (efeito denominado como efeito Pinch) com gotas de tamanho reduzido. Porém, os altos níveis de corrente necessários para esse modo de transferência induzem altas energias de soldagem (consequentemente uma grande poça de fusão), o que dificulta a soldagem fora de posição. A poça de grande volume também prejudica a soldagem de chapas finas e passe de raiz (Scotti; Ponomarev, 2014), sobretudo quando aliado à alta pressão do jato de plasma, também advindo de uma alta corrente.

Camargo et al. (2016) buscaram a possibilidade de induzir a Força de Lorentz por meio de dispositivo externo na região do arco voltaico. Os autores tinham a intenção de promover o dessacramento de pequenas gotas, mantendo assim a estabilidade e qualidade da transferência goticular, entretanto com baixos níveis de corrente, a fim de reduzir o aporte de energia (como no modo de transferência curto-círcuito). Após as análises, foi identificado que

apesar de ser possível criar o campo magnético externo, os níveis de corrente necessários seriam muito elevados, o que inviabiliza tecnologicamente a proposta.

### 2.1.2 Formação do cordão

O cordão de solda pode ser definido pela penetração linear do metal fundido sobre o metal base, pela largura e reforço do cordão. A formação do cordão se deve a dois efeitos principais: o efeito térmico e o efeito mecânico. Na soldagem a arco elétrico, energia térmica necessária para fundir o material de adição é gerada pelo arco elétrico, formado no contato com o metal base, o que resulta em uma grande concentração de corrente elétrica e uma alta geração de calor. Outra fonte de energia térmica é a entalpia dos gases de proteção, cujo calor se transfere principalmente por convecção forçada, mas também por radiação. A entalpia se caracteriza como a energia que o gás tem que absorver para passar do estado gasoso à temperatura ambiente para o plasmático (processo endotérmico). Ao retornar para o estado gasoso, o gás antes ionizado, libera calor para o material de base e meio ambiente (processo exotérmico). Quanto maior o potencial de ionização do gás, maior a entalpia (Scotti; Ponomarev, 2014).

Outro fenômeno associado aos gases é a capacidade de troca térmica. Quanto maior a troca térmica promovida por um determinado gás, maior será a transferência de calor para o metal de base, o que influencia diretamente na geometria do cordão. Um exemplo que pode ser citado é uma comparação entre o Hélio e o Argônio na função de gás de proteção. O Hélio, por ter maior condutividade térmica que do que o Argônio, produz cordões mais largos (poça de fusão maior e mais distribuída), enquanto o Argônio utilizado como gás de proteção resulta em cordões com maior penetração (Lyttle, K.A., 1993, apud ASM, 1993, p. 173).

Por fim, o calor transportado pelas gotas do metal da adição em transferência também tem participação na formação do cordão (Hirata et al., 2014). Segundo Dupont e Marder, 1995, o calor transferido pelas gotas representam aproximadamente de 38 a 42 % do calor transferido para a poça de fusão. Da energia aportada pela fonte de soldagem, apenas parte dela é de fato imposta sobre o material. A norma AWS A3.0 define o calor imposto como a energia transferida para a peça, ou seja, a parte do calor que é transferida por condução para o metal base sem considerar o que é perdido para o ambiente.

É importante ressaltar que o mecanismo de condução ocorre apenas a partir da superfície do metal. Quando se trata da formação do cordão, a parcela do calor imposto

denominada de calor efetivo de fusão ( $Q_f$ ) tem a maior influência. Essa parcela desconta o calor que foi difundido pelo metal base e considera apenas o que realmente foi empregado para a fusão do material. Soldas executadas com baixa eficiência de fusão ocasionam um aquecimento demasiado do metal de base (Quintino et al.; 2013; Reis et al.; 2011). É importante dessacar que a distribuição de corrente e temperatura ao longo do metal de base não é uniforme, promovendo o aquecimento mais intenso no centro do cordão.

O efeito mecânico na formação do cordão ocorre devido a três mecanismos: o impacto do jato de plasma, a pressão dos campos magnéticos e a colisão das gotas. O efeito do impacto do jato de plasma ocorre basicamente pela consequência do jato de plasma sobre a poça líquida que tende a ser empurrada para os lados e para frente, facilitando a ação do arco no metal base. A pressão dos campos magnéticos é criada pela corrente conduzida através do arco. Por fim, o impacto do metal de adição promove ação mecânica sobre a poça de fusão devido à transferência da quantidade de movimento das gotas (Scotti; Ponomarev, 2014).

A geometria do cordão de solda é composta por três mensurandos: reforço; largura e penetração. A Figura 2.2 demonstra de forma esquemática esses parâmetros geométricos na seção transversal do cordão. O reforço de cordão ocorre quando o metal de solda está em uma quantidade além da necessária para preencher a junta. O reforço pode ser localizado na raiz ou na face do cordão e quando em excesso é considerado um tipo de descontinuidade altamente indesejável, pois atua como um concentrador de tensão (AWS, 2001). A largura do cordão é a distância horizontal do cordão de um lado ao outro da junta. Um cordão com largura em excesso é caracterizado como desperdício de material, além de aumentar a área da zona termicamente afetada.

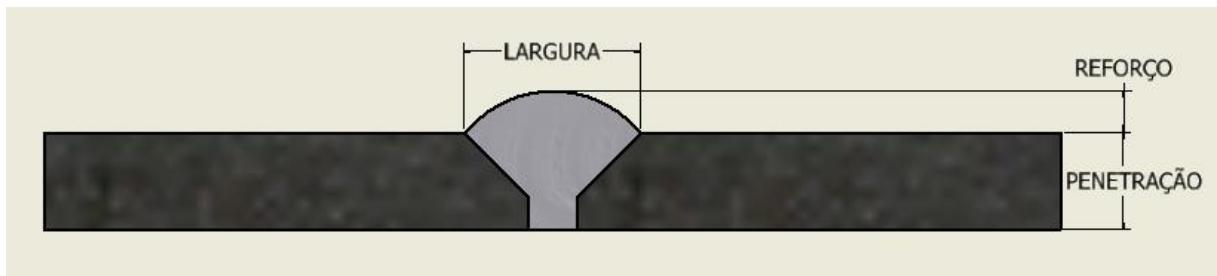


Figura 2.2 - Parâmetros geométricos mais representativos de um cordão de solda

De forma geral, a largura do cordão é governada pela velocidade de soldagem, onde maiores velocidade ocasionam cordões mais estreitos (Cruz et al., 2015), o que ocorre devido à menor quantidade de material depositado por unidade de comprimento. A largura do cordão também está relacionada com a tensão de soldagem, onde maiores tensões ocasionam cordões mais largos (Carry, 1979), devido ao aumento da tensão acompanhar o aumento do comprimento do arco (devido à exigência de potencial para a manutenção dos portadores de carga apropriados entre o eletrodo e a placa base), que ocasiona o aquecimento das laterais da junta e maior molhamento (AWS, 2001).

Por fim, a penetração é a distância entre a superfície original do metal de base e a altura total de fusão, medida na direção da deposição do material. Conforme a velocidade de soldagem é elevada, a penetração reduz quando avaliado apenas o efeito do calor imposto (Kim et al., 1996). Além disso, a penetração está estreitamente relacionada com a energia de soldagem.

O primeiro cordão depositado sobre o metal base é o passe de raiz, enquanto os passes subsequentes são os passes de enchimento e acabamento. A junta muitas vezes precisa ser preparada com um chanfro devido às exigências do processo para facilitar o acesso à raiz e garantir penetração. A Figura 2.3 demonstra de forma esquemática uma junta e as regiões importantes para confecção do cordão, entre elas estão: a face de raiz, que é composta por duas faces paralelas que não fazem parte do chanfro e onde se concentra boa parte da deposição do passe de raiz; o ângulo de bisel, que é o ângulo no qual o chanfro foi usinado; o ângulo do chanfro, que representa o ângulo total; e, por fim, a abertura de raiz (folga) sendo a menor distância entre as chapas.

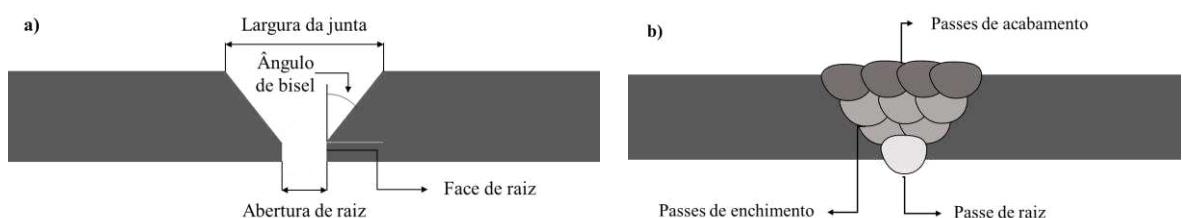


Figura 2.3 – Terminologias de uma junta: a) geometria da junta; e b) passes sobre a junta em uma soldagem multipasse

## 2.2 Passes de raiz

A formação de um passe de raiz sem defeitos durante a soldagem realizada em diversos passes por apenas um lado é essencial para se obter uma junta de alta qualidade (Malin, 2001). Por essa razão é imprescindível o controle com precisão dos parâmetros envolvidos no processo de soldagem (Yamane et al., 2004). Para confecção do passe de raiz, é essencial que toda a raiz da junta seja preenchida sem a ocorrência de escorramento da poça de fusão. A norma AWS A3.0 defini o escorramento (citado com o termo em inglês *burn-through*) como uma cavidade que surge no passe de raiz ocasionado pela penetração em excesso. Este defeito de soldagem se caracteriza como uma depressão que ocorre devido ao escorramento do material depositado através da raiz. Este fenômeno está associado ao excesso de material fundido. A Figura 2.4 demonstra uma raiz onde ocorreu o escorramento do material depositado.

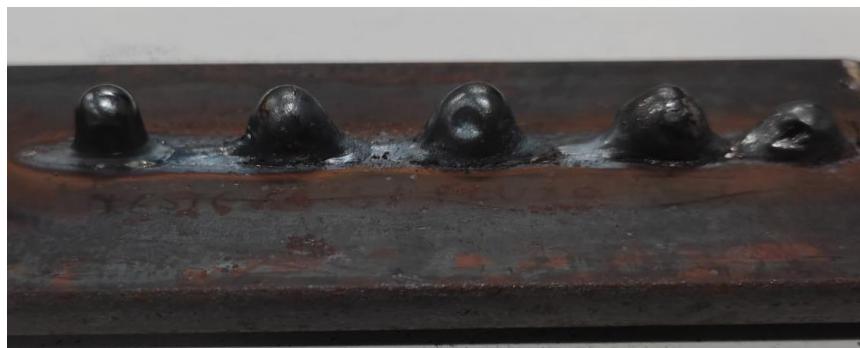


Figura 2.4 – Escorramento do passe de raiz em uma junta confeccionada com processo MIG/MAG sem a utilização de suporte de raiz (para facilitar a visualização, a figura está invertida em 180°)

A execução do passe de raiz é afetada por diversos fatores, tais como, geometria da junta (abertura da junta, ângulo do chanfro, dimensões da face de raiz), posição de soldagem, inclinação da tocha (ângulo de ataque), velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação. Todos os fatores que favorecem a penetração são desfavoráveis para a confecção do passe de raiz (Scotti; Ponomarev, 2014). Existe uma contradição entre fornecer calor o suficiente para preencher a raiz e procurar paralelamente um resfriamento breve o suficiente para não causar o escorramento da poça. Segundo Ziberov (2013) e Skhabovskyi (2014), o

colapso ou não colapso da poça depende do balanço das forças estáticas atuantes na formação do cordão. O modelo matemático proposto pelos autores para um passe de raiz na posição plana é apresentado na Eq. (2.1) e desmonstrado esquematicamente na Figura 2.5.

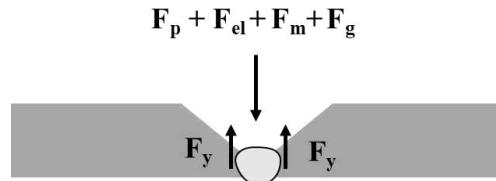


Figura 2.5 – Modelo para demonstrar a ação das forças envolvidas na formação do passe de raiz

$$F_y \geq F_p + F_{el} + F_m + F_g \quad (2.1)$$

Onde:

$F_y$  – Força resultando que ocorre devido a tensão superficial nas paredes da junta;

$F_p$  – Força do jato de plasma;

$F_{el}$  – Força eletromagnética;

$F_m$  – Força devido ao momentum das gotas em transferência;

$F_g$  – Força gravitacional.

A partir desse modelo de equilíbrio estático de forças, é possível entender a influência de determinados fatores sobre a perfuração do passe de raiz. Porém, é importante levar em consideração também o efeito dinâmico do escorramento da poça, que não ocorrerá de forma instantânea após superar o equilíbrio de forças estáticas. Quanto menor a viscosidade da poça, maior será a tendência ao perfuração (Skhabovskvi, 2014). A viscosidade é governada pela temperatura do metal líquido e pelo material. Para metais com viscosidade alta na temperatura de processo, esta pode agir a favor da força resultante da tensão superficial, promovendo a sustentação da poça.

No processo de soldagem, quando o arco incide sobre a poça, nesse momento o material está fundido. Nesse primeiro momento, além da força da gravidade, agem sobre a poça todas as forças devido à ação do arco. A única resistência contrária é a força resultante da tensão superficial. Um modelo estático foi apresentado para explicar como os fenômenos favorecem, ou não, o escorramento da poça, porém a resultante da tensão superficial é na verdade uma resistência às forças que atuam sobre a poça. A viscosidade também atua para favorecer a resistência ao perfuração da poça fundida. Em um segundo momento, quando o arco não mais incide sobre a poça, apenas a força da gravidade tende a promover o escorramento, enquanto a resistência resultante da tensão superficial permanece e o efeito da viscosidade se torna mais significativo devido a redução da temperatura (e consequente aumento da viscosidade). No terceiro e último momento, a poça está solidificada. Esses três *frames* de tempo estão representados esquematicamente na Figura 2.6.

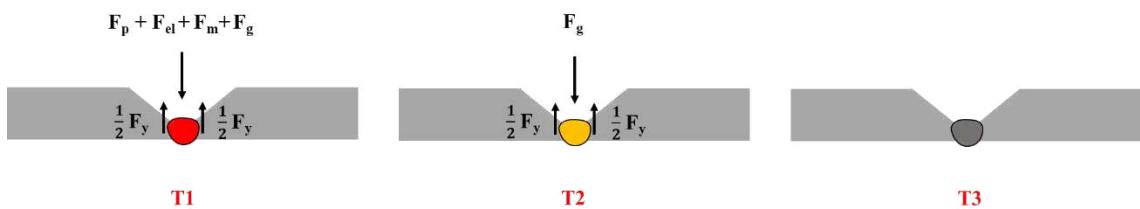


Figura 2.6 – Modelo para demonstrar a ação das forças (propriedade dinâmica x estática) durante: T1) ação do arco; T2) solidificação; e T3) cordão solidificado (Adaptado de Américo Scotti, notas de aula)

Dessa forma, o efeito da viscosidade é capaz de evitar que ocorra o escorramento da poça antes da solidificação. Todavia, quando a viscosidade do material líquido durante o processo é baixa, esse tende a escorrer antes da solidificação do material, ocasionando o escorramento da poça. Nesse caso, com a utilização do suporte de raiz, a consequencia do efeito dinâmico é contornada, visto que o suporte de raiz promove uma barreira mecânica ao perfuração da poça mantendo o metal fundido no lugar até a completa solidificação do material.

### 2.2.1 Tensão superficial

Nos líquidos surge uma força como resultante do desequilíbrio entre as forças agindo sobre as moléculas da superfície quando comparada àquelas que se encontram no interior do material. As moléculas de qualquer líquido localizadas na interfase líquido-gás realizam menos interações intermoleculares quando comparadas com as moléculas que se encontram no interior, o que permite que as moléculas da superfície formem ligações mais fortes entre si (formando uma espécie de membrana elástica na superfície). A atração moléculas da superfície de um líquido para o seu interior caracteriza-se como tensão superficial (Adamson, A. W.; Gast, A. P, 1997). Essa tensão resulta em forças de coesão que tendem a reduzir a área superficial ocupada pelo material. A interação entre as moléculas de um líquido com uma superfície pode ser caracterizada de duas formas: adesiva ou coesiva. Uma interação adesiva se dá quando ocorre uma forma de atração entre o líquido e a superfície em contato, enquanto a interação coesiva ocorre quando as forças moleculares promovem a união das moléculas do líquido entre si (Brown et al, 2016). Se as forças de coesão prevalecem, a gota tende a ter um formato esférico, enquanto se as forças de adesão forem predominantes no sistema de interseção líquido-sólido, a gota tende a se espalhar sobre a superfície. Quando a gota do material de adição desprende do eletrodo e se junta à poça de fusão, toda a superfície do material líquido possui uma tensão superficial que o retém nas paredes da junta. Essa resultante da tensão superficial será vencida por outras forças que irão interferir e promover o escorramento da poça. Para entender melhor esse fenômeno, pode-se pensar por analogia nas gotas de água presentes no vidro de uma janela após um dia de chuva, por exemplo. As gotas pequenas ficam retidas no vidro devido às forças resultantes de tensão superficial entre o vidro e as gotas serem o suficiente para sustentá-las, enquanto gotas maiores escorrem pela superfície devido a ter maior massa que as gotas menores. No caso das gotas de maior massa, a força da gravidade vence a força devida à tensão superficial.

### 2.2.2 Força eletromagnética

A pressão induzida pelo efeito eletromagnético é resultante da força magnética estática, provocada pelo arco quando este se acopla à peça. Essa força é criada devido aos campos magnéticos resultantes da condução da corrente através do arco. Quanto maior a intensidade e mais concentrada a corrente, maior será a resultante eletromagnética (Scotti; Ponomarev, 2014). Esse fenômeno ocorre, pois, quanto maior a corrente, mais intenso será o

campo magnético. Isso irá gerar um campo magnético mais forte e um melhor acoplamento entre o arco e a peça (Hirata et al., 2014).

### 2.2.3 Força devido ao jato de plasma

Quando a corrente é conduzida ela gera um campo magnético circuferencial e a interação da corrente através desse campo gera as forças de Lorentz, que agem de forma radial ao centro do campo magnético (Lin; Eagar, 1986). As forças resultantes agem ao longo de toda a coluna do arco conforme demonstrado na Figura 2.7. Segundo Reis, Souza e Scotti (2011), a diferença da densidade de corrente entre a seção próxima ao eletrodo, que tende a ser menor, e a próxima ao metal de base ocasiona uma diferença de pressão (alta próxima ao eletrodo e baixa próxima ao metal de base) que resulta no fluxo de plasma para a região de menor pressão. A velocidade do jato de plasma pode exceder centenas de metros por segundo.

Quando esse jato de plasma com alta velocidade colide contra a superfície da poça de fusão, ocorre uma pressão dinâmica de quase estagnação conhecida como pressão do arco. A pressão do jato de plasma tem uma relação íntima com distância entre o bico de contato e a peça (DBCP), onde a pressão cresce conforme a distância (Cunha; Bohorquéz, 2014). Essa característica está associada ao fato de o fluxo de plasma apresentar a velocidade máxima próximo ao eletrodo (Wu et al., 1997), o que ocasiona uma maior diferença de pressão para maiores valores de DBCP.

Quanto à relação com a corrente de soldagem, resultados da literatura demonstram que a velocidade máxima do fluxo, para uma mesma DBCP, aumenta conforme a corrente de soldagem (Lee; Na, 1996) e que a pressão do arco está concentrada no centro da poça, tendendo a ser constante para distâncias radiais acima de 2 mm (Fan; Shi, 1996).

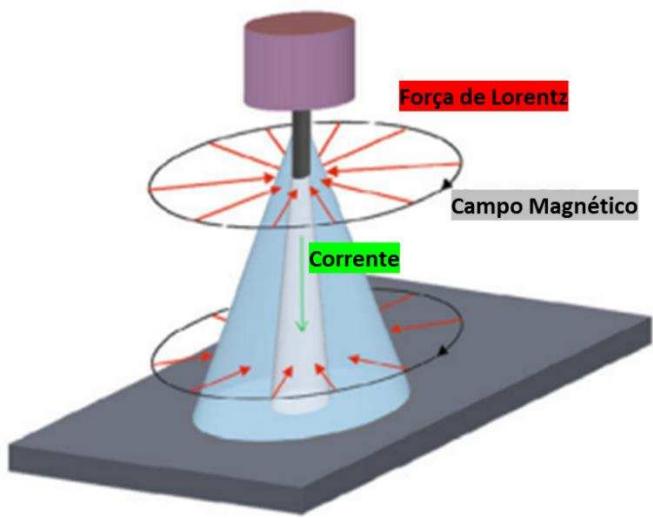


Figura 2.7 - Campo Magnético e consequente Força de Lorentz na coluna de arco (Adaptado Reis et al., 2011)

#### 2.2.4 Força devido ao *momentum* das gotas em transferência

O impacto das gotas em transferência contra o metal base geram a transferência da quantidade de movimento para a superfície, energia essa conhecida como *momentum*. Segundo Scotti e Rodrigues (2011), a quantidade de movimento transferido por uma gota (M) pode ser expressa pela Eq. (2.2).

$$M = \rho \times \pi \times \frac{d^3}{6} \times V_{\text{chegada}} \quad (2.2)$$

Onde:

M – *Momentum*;

$\rho$  – Densidade do material da gota;

d – Diâmetro da gota;

$V_{\text{chegada}}$  – Velocidade média da gota em transferência.

Ainda de acordo com Scotti e Rodrigues (2011), a equação do *momentum* por si só carece de representatividade do fenômeno físico de transferência de gotas para a poça em soldagem. O dessacamento das gotas ocorre continuamente (não sendo uma só, como expresso na Eq. (2.2)), fazendo com que a quantidade de movimento seja transferida ao longo do tempo seguindo uma frequência de dessacamento (Scotti; Ponomarev, 2014). Desse modo, para melhor representar a transferência, Scotti e Rodrigues (2011) sugerem o cálculo da força resultante do impacto das gotas atuando sobre a poça de acordo com a Eq. (2.3). Essa equação considera a frequência contínua de dessacamento das gotas sobre o metal fundido, o que ocasiona a transferência intermitente de quantidade de movimento.

$$F = M \times f \quad (2.3)$$

Onde:

$F$  – Resultante da força que as gotas atingem o cordão;

$f$  – Frequência de dessacamento das gotas.

Se essa força for dividida pela velocidade de soldagem, é possível chegar ao que os autores chamaram de Momento Efetivo ( $M_e$ ). Esse parâmetro descrimina a quantidade de movimento transferida para a poça por unidade de comprimento de solda (Scotti; Ponomarev, 2014).

Ao final dos experimentos, Scotti e Rodrigues (2011) concluíram que a velocidade de chegada das gotas à poça de fusão é função direta da corrente e do tamanho do arco. O diâmetro da gota é inversamente proporcional à corrente, porém não de forma linear. Nas condições de soldagem com correntes acima da transição, a frequência de transferência das gotas cresce consideravelmente, superando o efeito redutivo das gotas. Porém, para correntes de soldagem muito altas, o aumento da frequência de dessacamento não acompanha a redução do diâmetro das gotas (Scotti; Ponomarev, 2014). Desse modo, o aumento da corrente só é favorável até certo ponto para o  $M_e$ , influenciando negativamente para correntes muito acima da corrente de transição.

## 2.2.5 Força gravitacional

A resultante da gravidade está correlacionada à massa e força da gravidade, podendo ser quantificada em função da dimensão e densidade da gota (Tokar, 2011). Dependendo da posição, essa força pode atuar contra ou a favor da formação do passe de raiz. Para procedimentos de soldagem sobrecabeça, por exemplo, essa força agiria no sentido contrário à penetração. Para soldagem em posição plana, essa força atua no sentido de aumentar a penetração e, consequentemente, possibilidade de perfuração. Considerando um passe de raiz com diferentes folgas e altura de nariz constante, a tensão superficial é a mesma enquanto a força gravitacional tende a aumentar devido aos maiores volumes atribuídos ao crescimento da largura (Scotti; Ponomarev, 2014). Esse fenômeno é representado de forma esquemática na Figura 2.8 e justifica a maior dificuldade de soldar passes de raiz devido à penetração excessiva e tendência à perfuração conforme o acréscimo da abertura de raiz. Chanfros com abertura de raiz dificultam a sustentação da poça do ponto de vista gravitacional devido à tendência ao perfuração do material fundido. O aumento da abertura de raiz ocasiona uma necessidade de maior de volume de material para preencher a junta e o aumento aumento de volume da poça ocasiona uma maior resultante gravitacional (de acordo com o conceito de energia potencial gravitacional). A resultante. Diferente da resultante gravitacional, a resultante das forças superficiais independem da massa do material depositado.

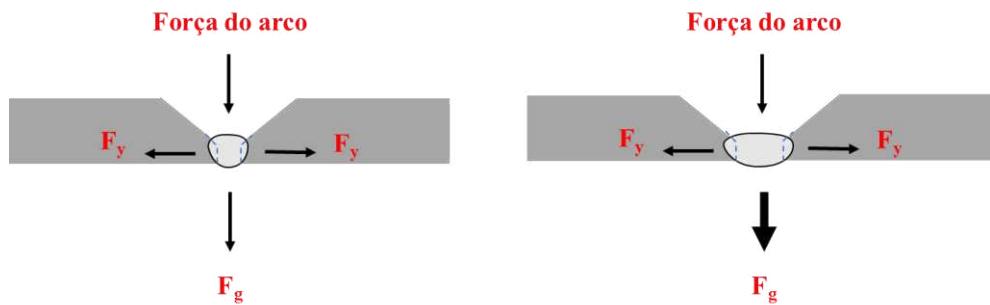


Figura 2.8 - Modelo para explicar as forças que influenciam na formação do passe de raiz, demonstrando esquematicamente as forças que atuam e o aumento apenas da resultante força gravitacional com o aumento da folga e consequente aumento da largura do cordão (Adaptado Scotti; Ponomarev, 2014)

### 2.3 Mecanismos de penetração

O fluxo de calor imposto sobre a superfície do metal de base é a grosso modo diretamente proporcional à energia de soldagem ( $E_s$ ) no processo, apesar de depender de outros fatores. Podem existir situações em que a energia do arco aumenta, mas a parcela de energia transferida para o meio ambiente cresce mais do que para a superfície do corpo a soldar, como quando se aumenta o comprimento do arco. De toda forma, a energia de soldagem é com razoável precisão calculada, enquanto mesmo a estimativa do calor imposto é carregado de erros.

Segundo Scotti et. al (2022), o método da Potência Instantânea é a forma mais segura de se determinar a energia de soldagem, contornando possíveis erros estatísticos relacionados à correlação das grandezas envolvidas e atribuindo maior confiabilidade ao resultado. A determinação da Energia de Soldagem está expressa na Eq. (2.4):

$$E_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{U(k_i) \times I(i)}{V_s} \quad (2.4)$$

Onde:

$U$  - Tensão do arco instantânea medida;

$I$  - Corrente de soldagem instantânea medida ao mesmo tempo de  $U$ ;

$n$  – Número de medições

$V_s$  - Velocidade de soldagem.

A Eq. (2.4) deixa explícito que a relação da energia de soldagem (e, como consequência, até certo ponto do calor imposto) com a corrente é diretamente proporcional, enquanto a relação com a velocidade de soldagem é inversamente proporcional. Por outro lado, tende-se a acreditar que quanto maior e mais concentrado o calor, maior será a penetração do cordão. Dessa forma, era de se esperar que quanto maior a corrente, e menor a velocidade de soldagem, maior seria a penetração (devido à relação de energia de soldagem e calor imposto). Essa dedução simplória ocasiona erros, pois a relação entre os parâmetros e a

geometria do cordão é um tanto mais complexa. Quando é aportada um corrente alta durante o processo de soldagem com alimentação contínua de arame obtém-se igualmente altas velocidades de alimentação (e consequente alta produção). Apesar de parecer uma condição propícia para a altas penetrações no cordão, devido ao aporte térmico, essa condição pode causar a tendência à redução da penetração conforme o aumento da corrente. Isso ocorre devido às altas taxas de deposição ocasionarem um volume expressivo de material da poça que promove o bloqueio da raiz da junta, impedindo a ação do arco. Esse efeito é denominado por Scotti e Ponomarev (2014) como efeito da interposição da poça.

Essa condição que ocorre entre o arco e o metal dificulta a transferência de calor para o metal de base, impedindo que se possa afirmar que o um aumento da corrente se traduza em um aumento do rendimento de fusão. Por outro lado, o aumento da velocidade de soldagem reduz o efeito da interposição ao reduzir também a quantidade de material por unidade comprimento fundido sobre a junta, possibilitando a ação do arco. Todavia, o aumento da velocidade de soldagem reduz a ação do arco devido à redução do aporte de calor por unidade de comprimento, reduzindo também a penetração.

Essa complexa relação é mostrada na Figura 2.9. Existem dois efeitos que podem prevalecer na formação da altura do cordão: a energia imposta ou a interposição da poça. No campo onde a energia imposta prevalece, quanto maior a corrente de soldagem, maior será a penetração e quanto maior a velocidade de soldagem, menor será a penetração. No campo onde a interposição da poça predomina, quanto maior a velocidade, maior será a penetração e quanto maior a corrente de soldagem menor será a penetração. Velocidades baixas de soldagem permitem o efeito da interposição da poça prevalecer, enquanto para maiores velocidades o efeito do aporte de energia se torna o principal.

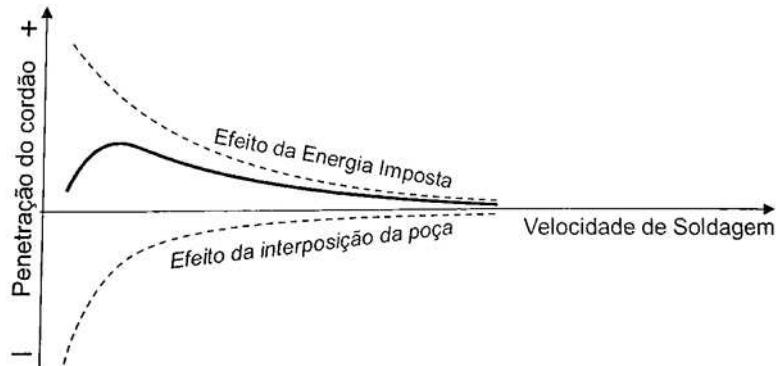


Figura 2.9 - Resultante dos efeitos da energia imposta e da interposição da poça entre o arco e o metal base sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente (Scotti; Ponomarev, 2014).

A variação da distância entre as chapas a serem soldadas tem também importante relevância na penetração alcançada. Folgas maiores ocasionam penetração excessiva e até perfuração da união, enquanto folgas pequenas ocasionam falta de penetração. Segundo Ziberov (2013), a forma de se contornar esses defeitos é a partir da manipulação do calor imposto. Para evitar a falta de penetração, o calor importo deve aumentar e para reduzir a penetração excessiva o calor imposto deve ser reduzido. O calor imposto (CI) pode ser descrito conforme a Eq. (2.5), em função da energia de soldagem.

$$CI = \sum \frac{U \times I}{v_s} \times \eta_{térmico} \quad (2.5)$$

Para determinação do calor imposto é necessário determinar a constante de rendimento térmico  $\eta_{térmico}$ , que representa a parcela da energia que é perdida do arco para o ambiente. Segundo Pépe et al. (2011), o calor é perdido por meio da evaporação do metal de adição e em forma de radiação, convecção e condução para a tocha. Scotti, Reis e Liskevych (2012) atribuem características como a condutividade térmica, espessura da chapa, comprimento do arco, energia de soldagem, formato da poça e gás de proteção como fatores determinantes na eficiência térmica. Os autores afirmam que a variedade de fatores que influenciam na eficiência térmica impossibilita a estimativa de um único valor de rendimento térmico.

Outro parâmetro que governa a penetração é a pressão do arco. Para se obter cordões com boa penetração é necessário o incremento da pressão do arco, porém pressões muito altas ocasionam o escorramento da poça de fusão (Fan; Shi, 1996). Na soldagem automatizada, onde o aumento da velocidade de soldagem conduz ao aumento da produtividade atrelado ao emprego de maiores intensidades de corrente, o ideal é reduzir a pressão do arco para contornar o colapso da poça (Cunha; Bohorquéz, 2014).

Outro fenômeno responsável por governar a penetração é o efeito da força resultante da quantidade de movimento das gotas em transferência. Essa varável atua sobre a penetração de forma complexa, e isso ocorre devido à relação do diâmetro da gota e da velocidade de chegada da gota com a corrente. Conforme o estudo de Rodrigues (2007), a velocidade de chegada e a frequência de dessacamento são uma função direta da corrente de soldagem, onde o incremento da corrente ocasiona o aumento da quantidade de movimento transferido e consequente força resultante. O autor também explora a influência do diâmetro da gota, onde compara a transferência gótica (pequenas gotas, alta frequência de dessacamento e velocidade de chegada) com a transferência globular (gotas volumosas, baixa frequência de dessacamento e velocidade de chegada), e conclui que a transferência gótica ocasiona maiores aportes de quantidade de movimento. Todavia, o diâmetro das gotas em transferência é uma função inversamente proporcional ao nível de corrente, porém não de forma linear. Ou seja, entende-se que para correntes acima da corrente de transição o efeito da corrente, se sobressai sobre o efeito diâmetro das gotas. Porém, acima de determinados níveis de corrente o incremento não ocasionará necessariamente o aumento da frequência, ou velocidade de chegada, tanto quanto ocasionará a redução das gotas em transferência. Sendo assim, o aumento da corrente favorece a penetração até certo ponto, reduzindo gradativamente para correntes muito acima da corrente de transição (Scotti; Ponomarev, 2014).

Uma forma de controle da penetração é a técnica de tecimento que consiste em movimentar a tocha transversalmente de forma cíclica ao longo da confecção do cordão. O movimento da tocha aumenta a área de ação do arco, distribuindo o calor sobre o metal de base e reduzindo a eficiência de fusão. O uso de tecimento reduz significativamente a penetração, e um dos efeitos está associado à redução do calor no centro da poça de fusão (Miranda et al., 2015). O outro efeito atribuído pelo tecimento é permitir que a força do arco seja distribuída para as laterais, impossibilitando a ação concentrada sobre o centro do cordão, reduzindo dessa forma o efeito da pressão do arco sobre a penetração (Scotti; Ponomarev, 2014).

O aumento da penetração está associado a diversas variáveis que apresentam uma complexa inter-relação que por vezes podem ser contraditórias entre si. De forma geral, pode-se afirmar que o aumento da penetração está intimamente relacionado à energia de soldagem, tanto devido ao aporte térmico quando ao volume de material depositado (Silva, 2010). A corrente de soldagem acompanha a energia de soldagem e promove o aumento da intensidade das forças eletromagnéticas, pressão do arco, velocidade do jato de plasma arco e temperatura da poça (Du et al., 2009; Fan, Shi, 1996). O aumento da corrente para uma velocidade de soldagem constante resulta em poças de maior volume e maior penetração, enquanto um acréscimo proporcional da velocidade de soldagem ainda ocasiona boa penetração, porém poças menos volumosas. Por fim, deve-se utilizar com cuidado o aumento da velocidade de soldagem sem alteração da corrente, visto que a relação com a baixa taxa de deposição pode ocasionar o colapso da poça (*humping*) (Scotti; Ponomarev, 2014).

## 2.4 Suporte de raiz de fluxo

A capacidade de suporte da poça de fusão atribuída à utilização de suporte de raiz se deve ao fato das forças atuantes no sentido de promover o escorramento do cordão serem suportadas durante a sua aplicação, devido ao surgimento de uma força de reação e a própria resistência intrínseca do suporte de raiz. Dentre os suporte de raiz não permanentes, existe uma categoria denominada suporte de raiz de fluxo. O suporte de raiz de fluxo é um tipo de suporte de raiz formado por grãos de materiais cerâmicos e que deve estar mecanicamente posicionado junto à raiz. Os fluxos empregados são geralmente os mesmos utilizados no processo Arco Submerso, o que confere a esse tipo de suporte de raiz um baixo custo e diversas opções no mercado.

O uso de suporte de raiz de fluxo em soldagens com o processo Arco Submerso já é conhecido. Para sua utilização é necessário que seja desenvolvido um sistema que permita que o fluxo seja acomodado mecanicamente na raiz da junta. De forma geral, é utilizado algum dispositivo que promova tanto a fixação do fluxo contra a raiz quanto não permita seu perfuração. O dispositivo utilizado por Biswas e Mandal (2009) consiste em um suporte de alumínio para acomodação do fluxo posicionado sob a placa de teste. Uma figura esquemática do modelo é representada na Figura 2.10 – Figura esquemática da instalação para os testes

com suporte de raiz de fluxo (Adaptado Biswas; Mandal, 2009), funcional do ponto de vista de pesquisa, mas pouco prático para utilização.

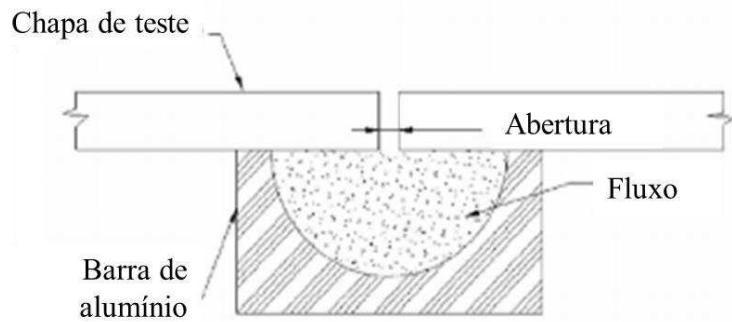


Figura 2.10 – Figura esquemática da instalação para os testes com suporte de raiz de fluxo (Adaptado Biswas; Mandal, 2009)

Outra forma de acomodar o fluxo é proposta por Ushio et al., (1993). Nesse, o fluxo é acomodado sobre uma mangueira (tipo de incêndio) e disposto contra a raiz da junta. Em seguida, é aplicada uma pressão do fluxo contra a raiz, por meio da injeção de fluido no interior da mangueira. Esse método está demonstrado de forma esquemática na Figura 2.11. Mesmo sendo utilizado em pesquisas, tem uma visão maior de aplicação, que ainda não é fácil.

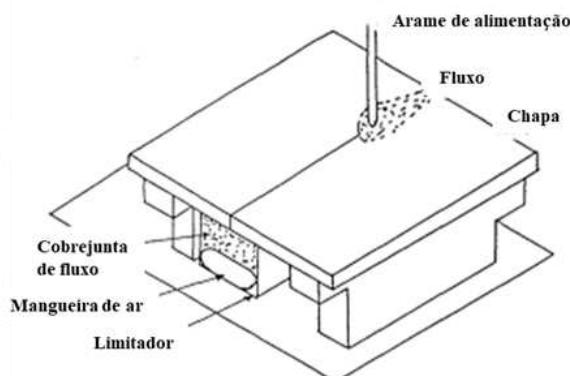


Figura 2.11 – Figura esquemática da instalação para os testes com suporte de raiz de fluxo (Adaptado Ushio et al., 1993)

De forma geral, devido à sua forma física, o suporte de raiz de fluxo é facilmente adaptável ao formato da junta e possíveis desalinhamentos, porém é de difícil aplicação em juntas (principalmente fora de posição) devido à sua forma física. Isso ocorre pois os fluxos têm a tendência de “escorrer” para fora da raiz, o que torna imprescindível um dispositivo para acomodá-lo sob ou sobre a raiz da junta.

#### 2.4.1 Fluxos

Os fluxos utilizados no processo de soldagem Arco Submerso são constituídos por uma mistura de óxidos e desempenham o papel de proteger o arco da contaminação atmosférica (AWS, 2001), papel esse desempenhado pelos gases de proteção no processo MIG/MAG, por exemplo. Quanto à classificação dos fluxos, pode ser feita pelo método de fabricação, pela influência na composição química do metal de solda ou por suas características químicas (Marques; Modenesi; Bracarense, 2008). Em termos de processo de fabricação, os fluxos podem ser fundidos ou aglomerados. Quando se trata de influência na composição química do cordão de solda, esses fluxos são classificados como ativos, neutros ou ligados (Ogborn, 1993, apud ASM, 1993, p. 622-637). Os fluxos ativos possuem quantidade significativa de manganês e silício em sua composição. Esses elementos são adicionados para reduzir formação de porosidades e aumentar a resistência a trincas. Os fluxos neutros praticamente não influenciam na composição do cordão. Por fim, os fluxos ligados contêm outros elementos, como o cobre, molibdênio, cromo e níquel e podem atribuir propriedades à união soldada como resistência à corrosão e resistência ao desgaste (Machado, 1996).

Quanto à característica química, os fluxos podem ser classificados como ácidos, básicos ou neutros. Os fluxos básicos proporcionam menores teores de oxigênio, enxofre e fósforo no metal de adição (menos inclusões). A redução do índice de basicidade tenta a promover uma redução do teor de O<sub>2</sub>, o que proporciona microestruturas mais tenazes e maior resistência a trincas durante a solidificação. Simultaneamente, esses fluxos apresentam instabilidade operacional e pior dessacabilidade da escória. Os fluxos ácidos tendem a ter um metal de solda com altos teores de oxigênio, enxofre e fósforo (Modenesi et al., 2012). Os fluxos ácidos tendem a promover a formação de cordões com melhor geometria e acabamento. Os fluxos ácidos também atribuem melhor dessacabilidade da escória que os fluxos básicos (Anonni, 2011). O enquadramento de um fluxo na classificação do fluxo (como básico, ácido ou neutro) é facilitada pelo índice de basicidade (IB) proposto pelo IIW

(International Institute of Welding). Segundo Olson et al. (1993, apud ASM, 1993, p. 55-63), fluxos com índice de basicidade maior que 1,2 são quimicamente básicos, enquanto fluxos com índice menor que 1 são ácidos. Os fluxos com índice entre 1 e 1,2 são considerados neutros. Assim, o índice de basicidade quantifica indiretamente a tendência de transferência de oxigênio para a poça de fusão. Tuliani et al. (1969) propuseram a Eq. (2.6) para mensurar o índice de basicidade:

$$IB = \frac{\frac{1}{2}(Mn + FeO_3) + CaO + MgO + BaO + SiO + Na_2O + K_2O + Li_2O + CaF_2}{\frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2) + SiO_2} \quad (2.6)$$

Durante a reação química entre o metal e o fluxo ocorre a transferência de elementos químicos que causam alterações microestruturais na junta soldada devido ao grau de interação metalúrgica entre o metal fundido e a escória fundida (Machado, 1996; Kou, 2003). Esse fenômeno é objeto de diversos estudos na literatura. Kanjilal et al. (2006) analisaram o efeito de um fluxo com CaO, MgO, CaF<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em sua composição e parâmetros de soldagem SAW na composição química do metal soldado. Os autores observaram que a composição do fluxo tinha maior influência sobre a tenacidade do cordão quando comparado aos parâmetros de soldagem. Paniagua-Mercado et al. (2009) determinaram que o aumento de titânio no fluxo melhora a tenacidade e a ductilidade das juntas soldadas e promoveu a formação de ferrita acicular, resultado semelhante ao de Evans (1995).

#### 2.4.2 Aplicações do suporte de raiz de fluxo

Ushio, Sadek, Morsy (1993) utilizaram o processo SAW para avaliar o suporte de raiz de fluxo em comparação ao suporte de raiz de cobre em chapas finas. Os autores concluíram que o suporte de raiz de fluxo permite a utilização de uma faixa maior de corrente de soldagem e folga de raiz. Foram utilizados dois fluxos; o fluxo AWS-F7A2 com granulometria grosseira e o fluxo AWS-F7A6 com granulometria fina. O fluxo com grãos finos ocasionou um cordão com penetração mais irregular para uma mesma faixa de corrente e abertura de raiz do que o fluxo com granulometria grosseira. Os autores atribuíram a irregularidade de penetração ao fluxo de granulometria fina exercer uma maior resistência ao escape de gases durante o processo de soldagem. É importante citar que o autor utilizava o mesmo fluxo como suporte de raiz e como proteção do arco.

Mandal e Maiti (2005) utilizaram outra configuração para fixar suporte de raiz de fluxo sem exercer pressão sob a raiz, apenas apoando a junta sobre o fluxo. Esses autores também utilizaram o suporte de raiz de fluxo para soldagem de chapas finas com o processo SAW e obtiveram resultados satisfatórios quanto ao desempenho do fluxo como suporte de raiz sem exercer pressão sob a raiz. Os autores ainda avaliaram a influência da granulometria do fluxo sobre a geometria do passe de raiz e identificaram a ocorrência de falta de fusão quando o fluxo de granulometria mais grosseira foi utilizado.

Malin (2001) utilizou em seu estudo o processo de soldagem SAW para avaliar a influência da variação de diversos parâmetros na geometria do passe de raiz. Para a confecção dos cordões, o autor utilizou um suporte de raiz de fluxo apoiado sob a raiz da junta. Um dos parâmetros investigado foi a corrente de soldagem em uma faixa de 500 a 1000 A. O efeito da corrente na altura da raiz e largura da altura do reforço da raiz é apresentado na Figura 2.12. Até a faixa de corrente de 600 A não houve penetração o suficiente, ocasionando falta de fusão nas laterais da junta. Ao nível de corrente de 600 A, a altura do reforço da raiz apresentou a altura máxima, reduzindo gradativamente conforme o aumento da corrente até 1000 A. A redução da altura do reforço da raiz com o aumento da corrente em níveis acima de 600 A poder ser explicado pelo efeito da interposição da poça. Abaixo de 600 A o efeito do aumento da corrente (maior calor imposto) é o que predomina, ocasionando o aumento da altura do reforço da raiz. A penetração do cordão nas laterais se comportou independente da variação da corrente após 600 A. Conforme a corrente sofreu variação, a taxa de deposição variou proporcionalmente, conforme a velocidade de alimentação, visto que o autor cita que a velocidade de soldagem foi constante. Observa-se um claro aumento do volume na sessão transversal na Figura 2.13.

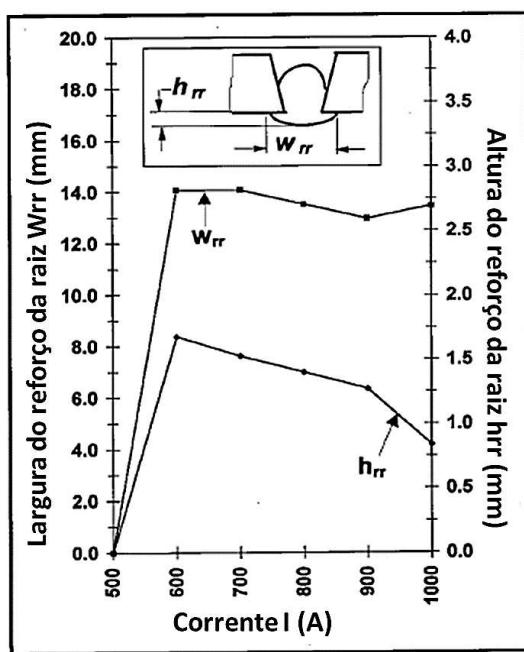


Figura 2.12 - Efeito da corrente de soldagem no reforço (hrr) e largura (wrr) da raiz (MALIN, 2011a)

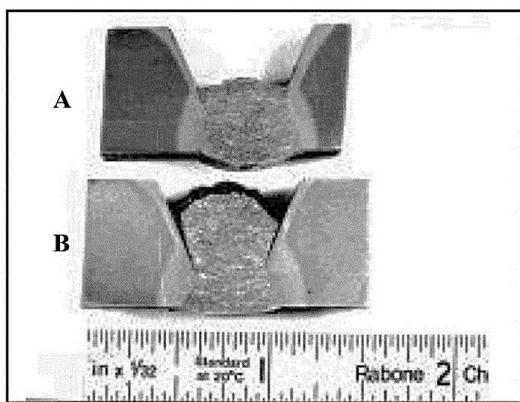


Figura 2.13 - Seção transversal do passe de raiz depositado em dois níveis de corrente: A) 600 A; B) 1000 A (MALIN, 2001a)

Quando variada a velocidade de soldagem, mantendo-se uma corrente constante ( $I = 600$  A), também foi observada uma variação na altura do reforço da raiz. Essa condição de teste também altera a taxa deposição, porém de forma inversamente proporcional. O que é observado na Figura 2.14 é a redução da altura da altura do reforço da raiz conforme a velocidade de soldagem aumenta. O autor constata que acima de 39,6 cm/min, à altura do

reforço passa a ser negativa, enquanto abaixo de 28,7 cm/min, o cordão sofre ondulações devido à demasiada largura da poça de fusão, o que trouxe como consequência cordões com variações na altura da altura do reforço da raiz. Desse modo, o autor estabelece as velocidades dentro dessa faixa como usuais para esse caso. Na faixa de corrente onde esses dados foram obtidos, o efeito do calor imposto predomina sobre a geometria do cordão.

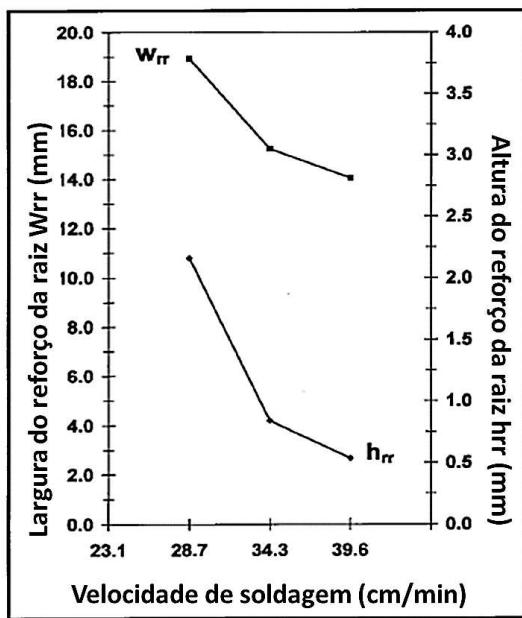


Figura 2.14 - Efeito da velocidade de soldagem no reforço (hrr) e largura (wrr) da raiz (MALIN, 2011a)

## CAPÍTULO III

### DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA DE SOLDAGEM EM FUNCAO DO FLUXO

Quando se trata da metodologia e dos experimentos aplicados nesse trabalho, é importante descrever previamente alguns conhecimentos importantes para entendimento do capítulo. Em primeiro momento, os experimentos propostos representam restritamente a confecção de passes de raiz em juntas de diferentes aberturas de raiz (folgas) de um aço carbono baixa liga. Por definição, o passe de raiz é o primeiro passe a ser executado em uma união soldada na soldagem multipasse.

Para executar as soldagens, o equipamento de soldagem foi regulado para operar no modo convencional, sem sinergismo. Previamente, uma série de experimentos foram realizados para determinar os parâmetros de soldagem (velocidade de alimentação e tensão de regulagem) que viriam a ser aplicados. Esses experimentos foram executados sem a utilização de suporte de raiz e sobre chapa. O envelope de trabalho selecionado buscou necessariamente promover o modo de transferência Spray (que como proposto no objetivo, caracteriza o MIG/MAG com alta taxa de produção).

Uma vez definido os parâmetros que promoveram o modo de transferência proposto, foi iniciada uma nova rodada de experimentos, dessa vez utilizando 5 fluxos de soldagem, com composições distintas, cumprindo o papel de suporte de raiz. A utilização dos fluxos como suporte de raiz, buscou iniciar os estudos sobre a influência das composições dos fluxos sobre o desempenho de um suporte de raiz moldável. Por definição, o suporte de raiz moldável é um tipo de suporte de raiz formado pela mistura de minerais e um aglomerante, os quais podem ser fixados e moldados à raiz da junta. A metodologia empregada utilizando

fluxos e não um suporte de raiz moldável é para permitir entender os fenômenos e parâmetros envolvidos com uma maior eficiência (eliminando a variável do aglomerante e método de fixação), visto que dispensa a necessidade de empregar os recursos financeiros e de tempo necessários para confecção de suporte de raiz moldáveis (mesmo assim buscando-se sustentabilidade da poça e a moldabilidade da face da raiz, sob maiores aportes de energia). Para simular a confecção de passes de raiz sem utilizar chapas grossas, e dessa forma reduzir os recursos empregados, foi desenvolvido um suporte que visa simular uma alta restrição natural e chapas grandes e promover a dissipação de calor de uma chapa fina, como se fossem juntas de chapas mais espessas. Cada fluxo empregado foi disposto sobre o suporte que possui um rasgo para acomodar os fluxos e simular sua aplicação como suporte de raiz moldável (os detalhes do rasgo estão disponíveis no APÊNDICE A).

Na Figura 3.1 está ilustrado o suporte de fixação das chapas de teste (detalhamento e funcionamento demonstrados no APÊNDICE A), utilizado para auxiliar na confecção dos passes. Além de seu objetivo maior (simular uma junta de chapas mais espessas), esse suporte, instalado sobre a mesa posicionadora do robô, impede que as chapas se deformem durante o processo de soldagem. O suporte é constituído de uma base de aço (a) que possui uma peça em alumínio no centro com um rasgo passante que possibilita a acomodação do fluxo e garante o papel de suporte de raiz. É importante ressaltar que a placa de teste (b) é apoiada sobre o fluxo, sem que ocorra pressão contra a raiz. Outras duas peças de alumínio (c) promovem a fixação da chapa garantindo a abertura e o alinhamento das juntas enquanto, paralelamente, promovem a simulação da dissipação de calor que ocorreria no passe de raiz na condição real (onde chapas de maior espessura seriam aplicadas). Para garantir a fixação dos dissipadores de calor sobre as chapas de teste foram desenvolvidos quatro gramos (d) que promovem o aperto. Esse método foi empregado para evitar a utilização de chapas espessas e reduzir custos. No APÊNDICE A é representados o desenho do dispositivo com os demais detalhes técnicos e dimensões.

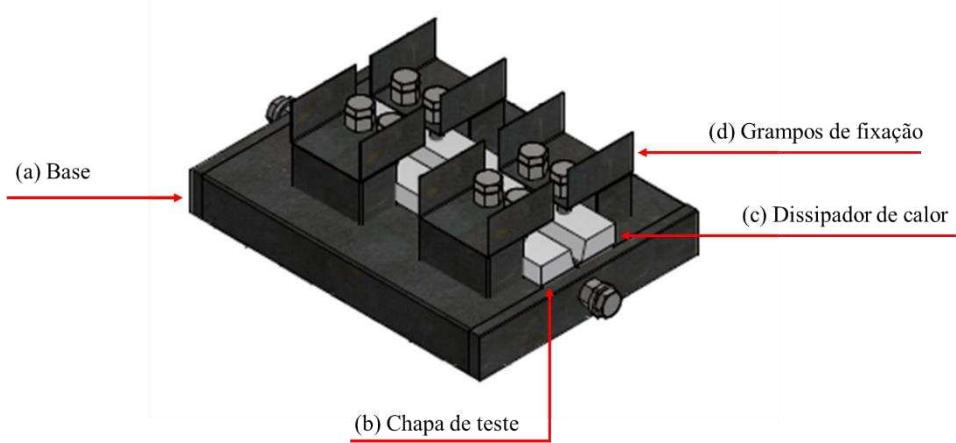


Figura 3.1 - Suporte para testes de soldagem com suporte de raiz de fluxo

Após a execução dos experimentos, buscou-se em primeiro momento, avaliar qual a influência de diferentes composições de fluxo sobre a máxima velocidade de soldagem que o processo pode atingir para a dada corrente de soldagem, sem promover o escorramento da poça. O primeiro critério de avaliação foi a velocidade de soldagem máxima sem promover o escorramento. Em seguida, foi avaliada a influência de cada composição de fluxo sobre as propriedades geométricas do cordão, utilizando os resultados dos mesmos experimentos da avaliação anterior. O segundo critério de avaliação foi, então, a altura do reforço de raiz. Aproveitando o experimento, micro e macroestruturas do cordão foram empregadas para entender a influência da composição do fluxo sobre a formação das fases e presença de imperfeições na junta. Esses compuseram o terceiro critério de avaliação, sendo este unicamente qualitativo.

Para sintetizar a relevância dos aspectos avaliados (máxima velocidade de soldagem, geometria da raiz, fases obtidas e presença de imperfeições) sobre a utilização do suporte de raiz moldável e confecção de passe de raiz, foi aplicado um método que permite simular as condições de aplicação do suporte de raiz moldável sobre a confecção de passes de raiz. A aplicação desse método buscou possibilitar o entendimento da influência da composição dos diferentes fluxos aplicáveis ao suporte de raiz moldável sobre a qualidade do passe de raiz, para uma alta produção (maiores comprimentos de cordão em menores intervalos de tempo) e produtividade (alta taxa de deposição), a fim de construir os conhecimentos necessários para avaliar as composições aplicáveis e entender as possibilidades de aplicação de um suporte de raiz moldável, sem necessariamente utilizar de todos os recursos em uma aplicação real. O detalhamento dos experimentos executados está descrito ao longo deste capítulo.

### 3.1 Materiais, Equipamentos e Métodos

Para confecção dos passes de soldagem, foi utilizada uma fonte multiprocesso do fabricante IMC Soldagem, modelo Digiplus A7, regulada para soldar em MIG/MAG no modo tensão constante sem sinergismo). Ou seja, os parâmetros de regulagem foram tensão de regulagem e velocidade de alimentação do arame. A tocha utilizada foi do tipo automática com refrigeração por água. Foi utilizado um alimentador de arame do fabricante IMC, modelo STA-20 e um arame-eletrodo de 1,2 mm de diâmetro, embobinado capa-a-capa, de classificação AWS ER70S-6. O equipamento utilizado para o deslocamento da tocha de soldagem foi um robô com seis graus de liberdade, modelo HP20 com controlador DX100, do fabricante MOTOMAN YASKAWA. A configuração das trajetórias é feita com o auxílio de um controle com interface gráfica, usando a linguagem própria de programação do robô.

A aquisição contínua dos sinais elétricos (tensão (U) e corrente (I)) foi realizada por um sistema de aquisição digitalizada de dados, a uma frequência de 5000 Hz durante um tempo de amostragem de 10 s.

Como mencionado, foi utilizado um suporte confeccionado em aço carbono para fixação das chapas. As chapas de teste e geometrias quantificadas na Figura 3.2, foram confeccionadas a partir de barras chatas de aço comum ao carbono (sem certificado de composição química, por não ser relevante para o trabalho). Para a elaboração do chanfro, as extremidades das chapas foram cortadas com o auxílio de uma serra fita e o chanfro em V foi realizado por fresamento. Após o preparo das chapas, as juntas foram construídas a partir do ponteamento de pares. Foi utilizado um suporte de ponteamento e espaçadores para mitigar o risco de desalinhamento. As juntas foram confeccionadas com três aberturas distintas, a saber, 2 mm, 3 mm ou 4 mm (a justificativas para a escolha da abertura utilizada será discutida posteriormente). Todos os cordões foram realizados em juntas de topo em V na posição plana.

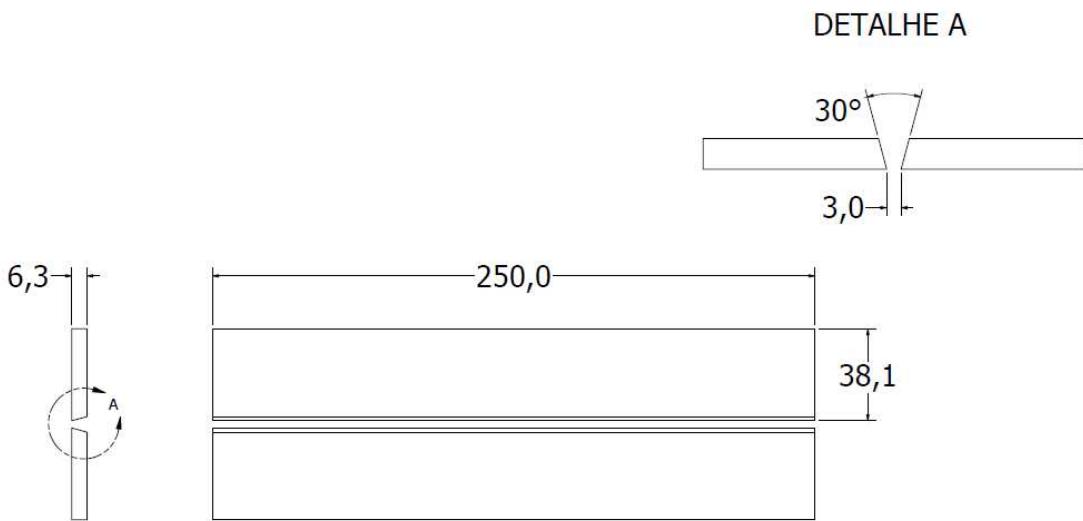


Figura 3.2 - Chapas de teste (em mm) e detalhes da junta

Para realização dos testes, foram utilizados 5 fluxos aglomerados de diferentes composições (fornecido pela empresa Lincoln Electric do Brasil, porém misturas não comerciais), onde suas características estão demonstradas na Tabela 3.1 e Tabela 3.2. Os fluxos utilizados possuem diferentes basicidades e temperaturas de fusão. Estas informações foram determinadas pelo fabricante dos fluxos empregados (Lincoln Eletric do Brasil)

Tabela 3.1 - Composição e índice de basicidade dos fluxos (dados fornecidos pela Lincoln Eletric do Brasil)

Fluxo	Composição	Índice de Basicidade	Temperatura de fusão
Fluxo 1	40% SiO <sub>2</sub> – 25% MgO – 15% MnO	0,85	1300 °C
Fluxo 2	40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 15% SiO <sub>2</sub> – 10% MnO – 10% CaF <sub>2</sub>	0,65	1500 °C
Fluxo 3	30% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 15% SiO <sub>2</sub> – 15% MgO – 10% MnO	0,75	1450 °C
Fluxo 4	30% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 20% SiO <sub>2</sub> – 20% MgO – 15% CaF <sub>2</sub>	1,25	1500 °C
Fluxo 5	40% CaF <sub>2</sub> – 45% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 10% SiO <sub>2</sub>	1,40	1350 °C

Tabela 3.2 - Granulometria dos fluxos, em % de peso por faixa de malha, de amostras de 500 g de cada fluxo (dados fornecidos pela Lincoln Eletric do Brasil))

Malha	Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 3	Fluxo 4	Fluxo 5
<12	1%	0%	1%	1%	1%
14	0%	1%	0%	0%	0%
20	40%	60%	65%	65%	65%
35	0%	27%	28%	28%	28%
40	50%	0%	0%	0%	0%
50	0%	10%	6%	6%	5%
60	9%	1%	0%	0%	0%
100	0%	0%	0%	0%	0%
>200	0%	1%	0%	0%	0%

## 3.2 Etapas Metodológicas

### 3.2.1 Parametrização

Para garantir a qualidade do processo de soldagem é necessário assegurar a estabilidade do modo de transferência metálica e do arco. A estabilidade da transferência metálica depende da correta regulagem dos parâmetros e consumíveis. A fonte foi regulada para operar com característica estática tensão constante, ou seja, operando no modo de tensão constante. Este modo foi escolhido pois é comumente aplicado na prática. Nesse modo, o operador/soldador regula na fonte os parâmetros de soldagem velocidade de alimentação do arame e a tensão de referência (tensão de regulagem), obtendo como consequência a tensão e corrente de soldagem para um dado conjunto formado de gás de proteção e arame (diâmetro, composição química, ângulo de ataque e distância bico de contato-peça).

Para realização dos experimentos, foi empregado um arame de aço (AWS ER70S-6) de 1,2 mm de diâmetro. O gás de proteção utilizado, tanto para a parametrização quanto para a etapa posterior de testes, foi uma mistura g Ar + 2 % O<sub>2</sub>, a uma vazão de 18 l/min. Essa mistura foi escolhida devido à sua capacidade atingir a corrente de transição do modo de transferência goticular com baixa intensidade de corrente, e ser recomendado em termos de estabilidade operacional quando a comparado a outras misturas que proporcionam a mesma condição.

Para avaliar o processo de soldagem em modo de transferência goticular, foi realizada simples deposição sobre chapa com a variação da velocidade de alimentação até a corrente de transição ser alcançada. Foi mantido um arco longo, com regulagem de tensão  $U_r = 30$  V. A distância bico de contato-peça empregada foi de 22 mm. A distância bico de contato peça, também conhecida como DBCP, é a distância total entre o bico de contato e a chapa. Sabe-se que para soldagem com fonte convencional e característica estática de tensão constante, é possível variar a corrente por meio da variação da DBCP. Quando se aumenta a distância, mantendo-se os parâmetros de regulagem constantes, ocorre a redução da corrente devido ao aumento do comprimento energizado de arame. Esse fenômeno ocorre porque o aumento do eletrodo ocasiona o aumento da resistência elétrica. Dessa forma, a DBCP foi mantida constante para não ocasionar variações da corrente de soldagem. O ângulo de ataque da tocha também se manteve constante (ângulo do ataque = 90°), assim como a velocidade de soldagem  $V_{sold} = 30$  cm/min. A velocidade de alimentação encontrada foi  $V_{alim} = 6$  m/min, para uma corrente média de soldagem  $I_m = 210$  A.

A velocidade de soldagem utilizada no processo de parametrização foi definida como velocidade inicial, ou seja, na realização de cada série de experimentos posterior a primeira velocidade de soldagem empregada era  $V_{sold} = 30$  cm/min, aumentando ou reduzindo progressivamente a partir dessa. A série de experimentos é definida nesse trabalho como o conjunto de experimentos realizados para condições constantes (parâmetros de regulagem da fonte, DBCP, fluxo e abertura de raiz), variando-se apenas a velocidade de soldagem.

### 3.2.2 Realização dos experimentos

Após a etapa de parametrização e definição de uma  $V_{\text{alim}} = 6\text{m/min}$ , foi iniciada a execução das séries de experimentos. As cinco composições de fluxos foram utilizadas individualmente em cada série, sendo os fluxos separados e catalogados antes da realização dos experimentos. O suporte demonstrado em vista explodida na Figura 3.3, era posicionado sobre a mesa de operação. Para execução dos experimentos o fluxo era disposto no suporte sobre o dispositivo para acomodação do fluxo (Figura 3.3 (1)). Esse dispositivo tinha por objetivo a acomodação do fluxo sob a raiz afim de simular a condição do suporte de raiz moldável, onde o suporte de raiz estaria fixado à raiz sem pressão. Como já dito, era necessário garantir o alinhamento do fluxo com a superfície e a acomodação da chapa sobre o suporte sem desnívelamento. A superfície livre do suporte era limpa com o auxílio de um pincel para evitar que os grãos ocassem desalinhamento. Para tal, após a acomodação do

fluxo, era realizada a raspagem da superfície que garantia o nível do fluxo. O dispositivo de acomodação foi confeccionado em alumínio para conferir maior dissipação de calor, visando a simulação do suporte de raiz moldável, visto que durante a sua utilização a superfície abaixo do suporte de raiz estaria livre. A parte estrutural do suporte (Figura 3.3 (2)) garantia a rigidez necessária para que não houvesse distorção do suporte durante os experimentos enquanto a chapa (Figura 3.3 (3)) promovia a união das estruturas com o dispositivo de acomodação. Os dispositivos de dissipação de calor (Figura 3.3 (4)) foram confeccionados em alumínio e tinham como objetivo simular a dissipação de calor na superfície durante a confecção de passes de raiz em situações reais, para possibilitar a utilização de barras chatas de pequena área superficial livre durante os experimentos. Os grampos (Figura 3.3 (5 e 6)) e parafusos (Figura 3.3 (7)) foram utilizados como dispositivos de fixação para garantir que não houvesse empenamentos ou deslocamentos durante os experimentos. Após a acomodação do fluxo, as chapas (Figura 3.3 (8)) eram dispostas sobre o fluxo. Em seguida os dispositivos de dissipação de calor eram colocados sob as chapas e por fim pressionados pelos dispositivos de fixação sobre as chapas, sem exercer pressão demasiada contra o fluxo. Lembrando que detalhes do posicionamento dos dispositivos no suporte de soldagem assim como medidas estão dispostos no APÊNDICE A.

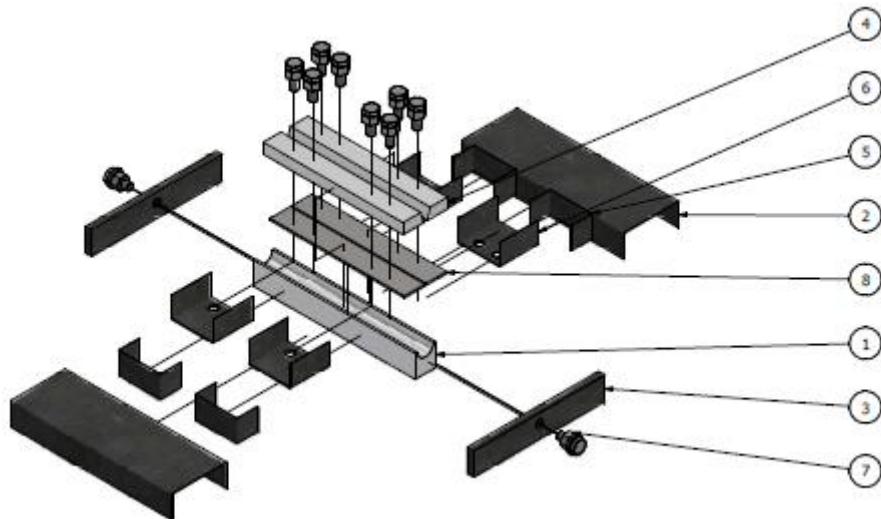


Figura 3.3 – Vista explodida do suporte de fixação das chapas para os experimentos com fluxo constituído por: (1) dispositivo para acomodação do fluxo; (2) estrutura; (3) chapa para fechamento, (4) dispositivo dissipador de calor; (5,6) grampos; (7) fixação; e (8) chapa de teste

Os experimentos foram executados para cada fluxo aumentando a velocidade de soldagem gradativamente a partir da velocidade inicial  $V_{\text{sold}} = 30 \text{ cm/min}$ , até a ocorrência do escorramento do cordão. A velocidade inicial é a velocidade na qual não ocorre o escorramento do cordão, pois ela foi a velocidade utilizada para parametrização e repetida diversas vezes, nunca promovendo o escorramento da raiz. A partir dessa velocidade, a velocidade de soldagem apenas era aumentada, buscando a máxima velocidade possível sem promover perfuração. As demais condições foram mantidas constantes em todas as séries, resultando em 5 séries distintas (uma para cada fluxo). Era realizado um processo de limpeza do suporte após a utilização de cada fluxo, para mitigar o risco de contaminar os fluxos com resquícios do fluxo anterior. A Figura 3.4 – Suporte de fixação das chapas para os experimentos com o fluxo disposto sobre o rasgo para acomodação demonstra o suporte com o fluxo disposto sobre o rasgo.



Figura 3.4 – Suporte de fixação das chapas para os experimentos com o fluxo disposto sobre o rasgo para acomodação

Optou-se por utilizar tecimento durante a confecção dos cordões experimentais com uma amplitude  $A = 3 \text{ mm}$  e uma frequência  $f = 2 \text{ Hz}$ . O tecimento é uma forma de controle da poça de fusão de comum aplicação na soldagem de passes de raiz. Com esse método é possível, tanto na soldagem manual como automática, distribuir de forma mais adequada o calor e a quantidade de material sobre a junta. Isso ocorre por meio de movimentos

oscilatórios realizados com a tocha entre as bordas e o centro do chanfro. Dessa forma, o aporte de calor não se concentra no centro da poça, reduzindo a incidência de perfuração devido à melhor distribuição de calor para as laterais da junta. Foram utilizadas três aberturas de raiz distintas:  $3,0 \pm 0,1$  mm,  $2,0 \pm 0,1$  mm e  $4,0 \pm 0,1$  mm. Na Figura 3.5 é apresentado um fluxograma que define o método de realização da série de experimentos.

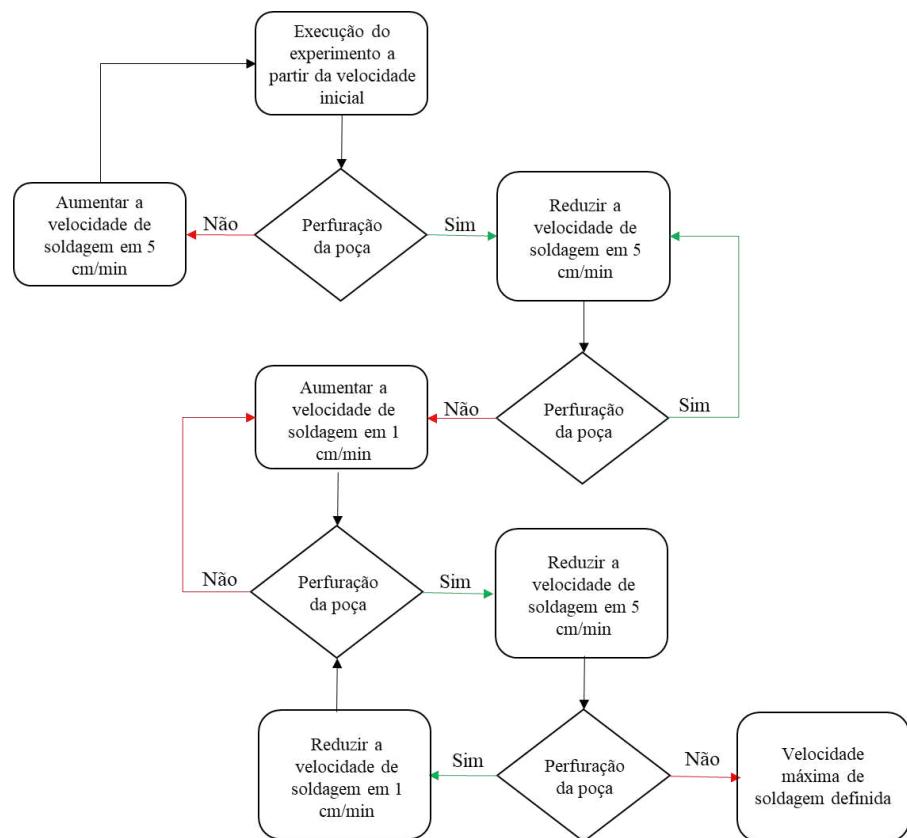


Figura 3.5 – Fluxograma do método de definição da velocidade máxima de soldagem em que se mantém uma poça estável (e que se forma um cordão em conformidade)

Foi estabelecido um critério para avaliar o aspecto de máxima velocidade de soldagem ( $V_{S\max}$ ) em cada fluxo empregado, que é a perfuração do material pela raiz. Enquanto o escorrimento da poça pode ocorrer quando há um desequilíbrio das forças estáticas e dinâmicas que agem no cordão antes da sua solidificação (conforme apresentado no capítulo anterior), a perfuração ocorre em uma condição de excesso de velocidade de soldagem. Enquanto o escorrimento da poça está associado ao excesso de material, a perfuração está mais intimamente relacionada a falta de material para formar a poça, causando instabilidade

na formação do cordão. A Figura 3.6 demonstra um exemplo da ocorrência de perfuração da raiz devido a altas velocidades de soldagem.



Figura 3.6 – Vista de baixo da junta, mostrando perfurações ao longo do cordão devido ao excesso de velocidade de soldagem

Quando o processo de soldagem MIG/MAG é realizado com uma alta velocidade de soldagem, deve ocorrer um aumento proporcional da taxa de deposição do arame com o consequente aumento do nível de corrente. O aumento da corrente conforme a taxa de deposição do arame ocorre na soldagem MIG/MAG porque ao se utilizar fontes com característica estática tipo tensão constante, quanto maior for a velocidade alimentação, maior será a corrente de soldagem. O aumento da corrente na soldagem de passes de raiz é um fator limitador, pois ocasiona maiores penetrações e a perfuração da raiz. Quando a taxa de deposição, e como consequência a corrente, não acompanha o aumento da velocidade de soldagem, a quantidade de material depositada por unidade de comprimento é gradativamente reduzida ocasionando perfurações ao longo do cordão devido a falta de material. É esperado que, durante a aplicação de suporte de raiz moldável, a ação das forças que agem sobre o cordão a fim de promover o escorrimento não exerçam nenhuma ou pouca influência sobre perfuração do cordão, sendo o único fenômeno responsável pela ocorrência da perfuração a falta de material necessário para preenchimento da junta. Conforme a velocidade de soldagem é incrementada para uma taxa de deposição constante, ocorre a redução da espessura de material (ou altura da poça) que pode ser depositado sobre a junta. Todavia, durante a formação da gota forças de tensão superficial agem sobre esta que tende a manter um formato gótico após a deposição caso não ocorra o molhamento sobre o material de base.

É importante dessacar que cada série de experimentos é constituída pelos parâmetros constantes já citados (distância bico de contato-peça, amplitude e frequência de tecimento, abertura de raiz, velocidade de alimentação, ângulo de ataque da tocha e tensão de regulagem)

e um fluxo variável. Ou seja, os parâmetros constantes foram mantidos em todas as séries de experimentos. Em seguida, era empregado um determinado fluxo e para este fluxo a velocidade de soldagem foi variada com as demais condições constantes (ver Figura 3.4).

O incremento positivo da velocidade de soldagem na série de experimentos era realizado em escalas de 5 cm/min, a partir dos 30 cm/min empregados na etapa de parametrização (velocidade de soldagem de inicial). Essa alteração na velocidade de soldagem é incrementada pela programação do robô a cada experimento realizado. Quando se alcançava o critério de não aceitação (perfuração do cordão), a velocidade de soldagem era reduzida em 5 cm/min para o patamar anterior e a variação era novamente empregada progressivamente, porém na casa de 1 cm/min até alcançar novamente um dos critérios de não aceitação. Quando perfuração do cordão ocorria a velocidade de soldagem era reduzida em 1 cm/min e o experimento era repetido 3 vezes nessa velocidade. Caso não ocorresse perfuração nesses três experimentos, constatava-se que esta era a velocidade máxima de soldagem com repetibilidade do resultado. Realizando este método foi possível otimizar a execução dos experimentos em termos de tempo e recursos financeiros, assim como refinar os resultados.

Após constatar a repetibilidade da  $V_{smáx}$ , a velocidade de soldagem crítica  $V_{scrít}$  também foi avaliada. Essa velocidade é definida no presente trabalho como a velocidade de soldagem acima da qual sempre ocorrerá perfuração do cordão, e o fluxograma da sequência de testes empregados para sua determinação está apresentado na Figura 3.7. A partir da máxima velocidade de soldagem foram realizados novos experimentos aumentando gradativamente a velocidade em 1 cm/min e testando três vezes para esta mesma velocidade de soldagem. Quando após três experimentos ocorria perfuração, era definida a  $V_{scrít}$ . Essa segunda velocidade foi empregada pois durante a execução dos experimentos foi constatado que existe uma faixa de variabilidade onde para uma dada velocidade de soldagem pode ou não ocorrer a perfuração.

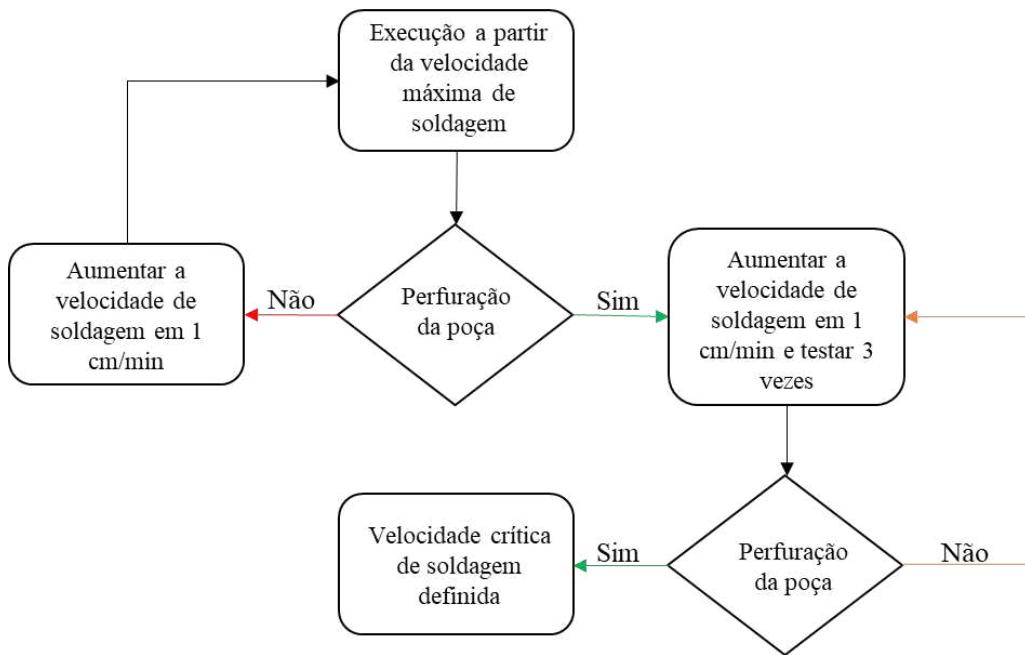


Figura 3.7 – Fluxograma do método de definição da velocidade de soldagem crítica acima da qual sempre ocorre a perfuração (e não se forma um cordão em conformidade)

Dessa forma, foi determinada uma faixa entre as duas velocidades ( $V_{smáx}$  e  $V_{scrít}$ ) na qual a poça apresenta variabilidade, abaixo o cordão sempre apresentaria boas condições operacionais. Essa faixa de velocidades está representada esquematicamente na Figura 3.8 – Representação esquemática da faixa de variabilidade (ocorrência ou não de não conformidade) entre as velocidades de soldagem  $V_{smáx}$  e  $V_{scrít}$ . Na região de conformidade, não ocorre perfuração do cordão, enquanto na região de não conformidade qualquer cordão soldado apresentará perfuração. Na região de variabilidade, o resultado é aleatório, sendo este de difícil estimativa. Dessa forma, os experimentos realizados na região de inconstância é um processo estocástico que gera uma variável aleatória. Conforme a velocidade de soldagem se distancia da velocidade máxima de soldagem e se aproxima da crítica, o número de perfurações se torna mais frequente nas repetições do experimento. Foi observado desse modo, uma maior probabilidade de ocorrência de perfuração nas velocidades de soldagem mais próximas à velocidade crítica. Nesse trabalho, para fins estatísticos, a faixa de variabilidade foi considerada como um grupo amostral onde para cada valor de velocidade testado ocorria ou não a perfuração. Ou seja, uma mesma velocidade quando submetida ao experimento três vezes apresentava um resultado positivo ou negativo para perfuração em cada grupo de experimentos realizados. Conforme os valores de velocidade se aproximavam da velocidade crítica de soldagem, maior era o número de experimentos com perfurações até

que ocorriam as três perfurações seguidas. Os resultados dos experimentos serão utilizados na avaliação estatística afim de comparar a tendência de resultados dessa faixa de variabilidade entre os diferentes grupos de fluxo, e assim verificar se houve de fato diferença estatística entre as velocidades de soldagem alcançadas para ocorrer a perfuração do cordão. Porém, apesar da  $V_{scrít}$  ter sido determinada para limitar a faixa de variabilidade, para valores práticos apenas a  $V_{smáx}$  será utilizada. A  $V_{scrít}$  é uma velocidade de soldagem que nunca será utilizada, nesse trabalho ela tem apenas fins estatísticos.

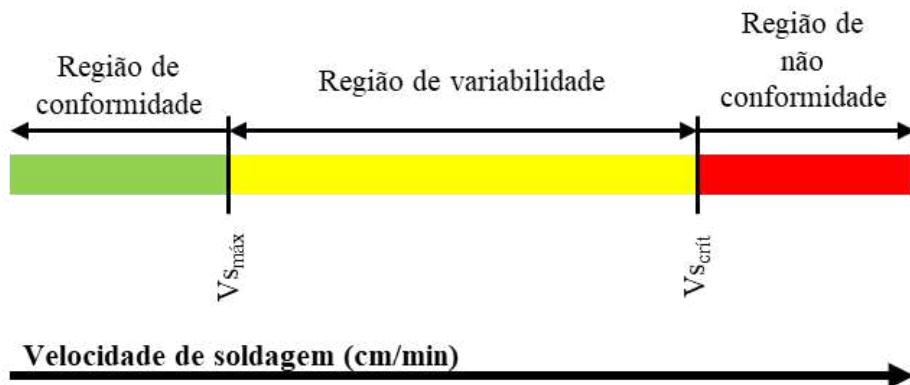


Figura 3.8 – Representação esquemática da faixa de variabilidade (ocorrência ou não de não conformidade) entre as velocidades de soldagem  $V_{smáx}$  e  $V_{scrít}$

Nas linhas sombreadas da Tabela 3.3, os cordões analisados, caracterizados pelas velocidades máximas alcançadas para cada fluxo, estão apresentados, juntamente com corrente média  $I_m$  e a tensão média  $U_m$ . A Tabela 3.3 inclui similarmente estes cordões depositados com uma unidade de velocidade de soldagem abaixo (- 1 cm/min), em linhas não sombreadas. Na Tabela 3.4 estão apresentados de forma análoga os resultados dos experimentos complementares realizados com o Fluxo 4 para duas aberturas de junta distintas (2 e 4 mm) e granulometria refinada.

Tabela 3.3 – Corrente e tensão médias, e respectivos desvios padrão, em função do fluxo na máxima velocidade e à uma unidade de velocidade abaixo (- 1 cm/min) (Continua)

Fluxo	Velocidade de Soldagem regulada (cm/min)	Corrente Média (A)	Tensão Média (V)	Experimento
1	31	$214,4 \pm 11,9$	$29,6 \pm 0,3$	53
				135
				128
1	30	$213,31 \pm 8,1$	$29,6 \pm 0,2$	134
				127
				132
2	31	$211,2 \pm 8,6$	$29,6 \pm 0,3$	54
				137
				136
2	30	$210,3 \pm 9,5$	$29,5 \pm 0,3$	133
				43
				48
3	32	$217,4 \pm 10,1$	$29,6 \pm 0,3$	64
				123
				122
3	31	$208,5 \pm 9,5$	$29,5 \pm 0,3$	63
				121
				62
4	33	$208,1 \pm 7,6$	$29,8 \pm 0,3$	112
				111
				68

(Conclusão)

Fluxo	Velocidade de Soldagem regulada (cm/min)	Corrente Média (A)	Tensão Média (V)	Experimento
4	32	$209,4 \pm 8,0$	$29,7 \pm 0,2$	146
				67
				66
5	32	$215,6 \pm 9,5$	$29,3 \pm 0,4$	147
				145
				144
5	31	$212,3 \pm 8,1$	$29,4 \pm 0,3$	143
				75
				79

*Valim = 6 m/min, gás de proteção = 98% Ar + 2 % O<sub>2</sub>, vazão do gás de proteção = 18 l/min, abertura de raiz = 3 mm, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, fonte operando no modo tensão constante*

Tabela 3.4 – Corrente e tensão médias, e respectivos desvios padrão, em função da variação da abertura de raiz e granulometria utilizando o Fluxo 4  
(Continua)

Granulometria do fluxo	Abertura de raiz (mm)	Velocidade de Soldagem regulada (cm/min)	Corrente Média (A)	Tensão Média (V)	Experimento
Refinado	3	32	$217,4 \pm 7,9$	$29,8 \pm 0,3$	148
					149
					151
Grosseiro (original)	2	42	$208,9 \pm 8,4$	$28,9 \pm 0,3$	112
					111
					68

(Conclusão)

Granulometria do fluxo	Abertura de raiz (mm)	Velocidade de Soldagem regulada (cm/min)	Corrente Média (A)	Tensão Média (V)	Experimento
Grosseiro (original)	4	25	$203,6 \pm 7,2$	$29,5 \pm 0,2$	176
					177
					178

$V_{alim} = 6 \text{ m/min}$ , gás de proteção = 98% Ar + 2 % O<sub>2</sub>, vazão do gás de proteção = 18 l/min, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, fonte operando no modo tensão constante.

### 3.2.3 Resultados

Ao final dos experimentos empregados, os resultados são finalmente estabelecidos e totalizam 5 seleções básicas. Cada resultado é constituído de: parâmetros de soldagem uma vez já definidos constantes; fluxo; velocidade máxima de soldagem e velocidade crítica de soldagem. A Tabela 3.5 apresenta os dados das 5 séries de experimentos iniciais. A matriz serve de base para todos os critérios que serão avaliados ao longo do trabalho, assim como para a execução de outros séries de experimentos variantes para comparação.

Tabela 3.5 – Efeito da composição do fluxo sobre a máxima velocidade de soldagem e velocidade crítica de soldagem

Fluxo	$V_{s_{máx}} \text{ (cm/min)}$	$V_{s_{crít}} \text{ (cm/min)}$
1	31	34
2	31	34
3	32	36
4	33	36
5	32	35

### 3.3 Análise dos Resultados

Nesse primeiro momento, foi avaliado como a composição do fluxo atribui ou não uma maior  $V_{s_{máx}}$ , favorecendo, assim, maior capacidade de produção ao processo. Com a

utilização do suporte de raiz moldável em condições de simulação (suporte de raiz fluxo) é esperado que as forças estáticas e dinâmicas que agem sobre a poça não influenciem na velocidade limite. Porém, buscou-se verificar se o fluxo teria influência sobre a molhabilidade da poça sobre a junta.

A capacidade de produção pode ser definida como a capacidade de se confeccionar um determinado cordão em um menor período tempo sem a ocorrência de irregularidades, ou seja, a relação entre unidade de comprimento de solda e o tempo empregado. Quanto maior a resultante dessa relação, maior a capacidade de produção. Pode-se dizer então, que a capacidade de produção está intimamente relacionada com a velocidade de soldagem.

### 3.3.1 Definição da velocidade média de perfuração e tratamento estatístico dos dados

Após os resultados das séries de experimentos realizadas, os dados de  $V_{S\max}$  obtidos para cada fluxo proposto foram comparados e analisados na Figura 3.9. As  $V_{S\max}$  e  $V_{S\text{crit}}$  para cada composição de fluxo avaliada estão representadas na figura, assim como a faixa de instabilidade. Ao observar os dados em um primeiro momento é possível atribuir aos fluxos a característica de promover, ou não, maiores  $V_{S\max}$ . Porém, os resultados demonstram pequenas diferenças numéricas entre os dados obtidos para cada fluxo. Para avaliar os resultados obtidos, foi aplicado um teste de hipótese (também conhecido como teste de significância) para determinar se os resultados são ou não similares do ponto de vista estatístico. A estatística é a ciência responsável por coletar, analisar e interpretar dados. Nos casos em que existe variabilidade de resultados dentro de uma mesma faixa atribuindo incerteza experimental, a aplicação de métodos estatísticos é adequada. Dessa forma é possível determinar resultados mais significativos. O teste de hipótese é um método estatístico que permite determinar se os dados amostrais informam que determinada suposição é verdadeira ou não. A suposição (hipótese nula) feita a partir dos dados obtidos é: um determinado fluxo **A** promove o aumento da  $V_{S\max}$  quando comparado ao fluxo **B**?

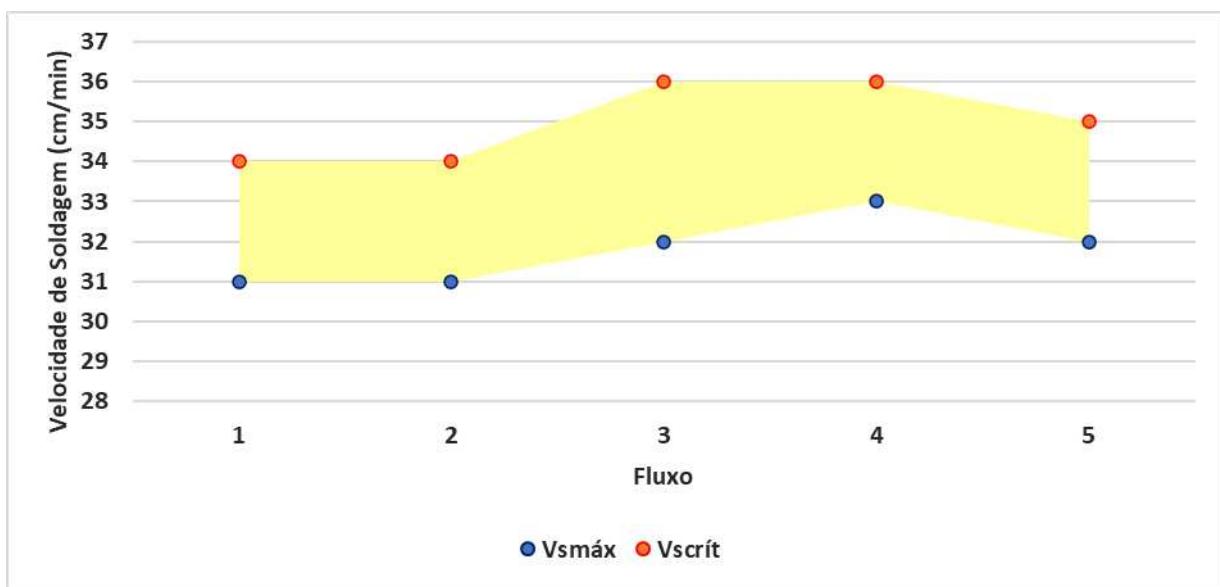


Figura 3.9 – Faixa de variabilidade em função da composição do fluxo

A seguir será demonstrado o passo a passo Eq. (3.1), Eq. (3.2) e Eq. (3.3) para validar a primeira hipótese nula (teste de igualdade entre médias, variância populacional desconhecida), ou seja:  $V_{s\max}$  do Fluxo 1 ( $V_{s\text{perf}1}$ ) é estatisticamente igual a  $V_{s\max}$  do Fluxo 2 ( $V_{s\text{perf}2}$ ), com nível de significância 1 %. Os dados estatísticos das amostras estão dispostos na Tabela 3.6 - Dados estatísticos do grupo para máxima velocidade de soldagem, onde:  $\bar{x}_p$  = velocidade de soldagem média amostral para ocorrência de perfuração;  $s_p$  = desvio padrão amostral;  $n_p$  = número de amostras. A velocidade de soldagem média ( $V_{s\text{med}}$ ) é obtida do grupo de amostras da faixa variabilidade. Para cada de velocidade de soldagem na faixa de variabilidade, ocorreram experimentos que ocasionaram uma ou duas perfurações. Velocidades de soldagem próximas à velocidade máxima tenderam a ocasionar pelo menos uma perfuração, enquanto próximo à velocidade de soldagem crítica ocorriam ao menos duas. Desses experimentos foi obtido um grupo de resultados, onde para determinada velocidade ocorria uma perfuração e conforme aumentava eram ocasionadas duas, até ocorrência de três na velocidade de soldagem crítica. Desse modo, existe uma tendência central simétrica nesta faixa de variabilidade. Essa tendência central, em termos estatísticos, resulta em uma melhor comparação entre os resultados dos fluxos através dos dados de dispersão.

Tabela 3.6 - Dados estatísticos do grupo para máxima velocidade de soldagem, onde:  $\bar{x}_p$  = velocidade de soldagem média amostral para ocorrência de perfuração;  $s_p$  = desvio padrão amostral;  $n_p$  = número de amostras

Fluxo	$\bar{x}_p$ (cm/min)	$s_p$ (cm/min)	$n_p$
Fluxo 1	30,8	0,8	8,0
Fluxo 2	30,8	0,7	6,0
Fluxo 3	31,7	1,5	9,0
Fluxo 4	32,2	1,5	12,0
Fluxo 5	32,2	1,5	9,0

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp_1 = Vp_2 \\ H_1: Vp_1 \neq Vp_2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n_1 + n_2 - 2 = 12 \quad (3.2)$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{\text{calc}} = t_{12} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} = 0,098 \quad (3.3)$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $V_p1 > V_p2$  ou  $V_p1 < V_p2$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{12}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 12 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crt}$  (probabilidade 0,01 e 12 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 3,9545. Para rejeitar a hipótese nula, a condição da Eq. (3.4) deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{cri}(0,01; 12 \text{ graus de liberdade}) \quad (3.4)$$

Conclusão deste teste de hipótese: Como  $0,098 < 3,9545$ , não há evidência estatística de que as médias de  $V_p1$  seja diferente da média de  $V_p2$ , dessa forma a hipótese nula é **aceita**.

As demais hipóteses foram testadas conforme o método de estatística descritiva apresentado, e os resultados estão dispostos na Tabela 3.7. O desenvolvimento dos demais testes está detalhado no APÊNDICE B. Através dos testes de hipótese é possível concluir que **não** existe prova estatística para afirmar que algum dos fluxos atribui maior velocidade de soldagem que os demais para um nível de significância de 1 %. A escolha do nível de significância se deu para atribuir maior confiabilidade aos resultados, visto que um nível de significância maior que 1 implicaria % em aceitar que mais de 1 % dos valores de velocidade de soldagem obtidos não atenderiam a hipótese nula imposta. Ou seja, mais de 1% dos resultados obtidos não aceitariam a hipótese nula. Da forma como está apresentado, 99 % dos resultados dentro do espaço amostraram aceitam a hipótese nula.

Tabela 3.7 – Teste de Hipóteses para comparação estatística das velocidades de perfuração ( $V_p$ ) dos fluxos

Hipótese	Resultado
----------	-----------

$H_0: Vp1 = Vp2$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp1 \neq Vp2$	
$H_0: Vp1 = Vp3$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp1 \neq Vp3$	
$H_0: Vp1 = Vp4$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp1 \neq Vp4$	
$H_0: Vp1 = Vp5$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp1 \neq Vp5$	
$H_0: Vp2 = Vp3$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp2 \neq Vp3$	
$H_0: Vp2 = Vp4$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp2 \neq Vp4$	
$H_0: Vp2 = Vp5$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp2 \neq Vp5$	
$H_0: Vp3 = Vp4$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp3 \neq Vp4$	
$H_0: Vp3 = Vp5$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp3 \neq Vp5$	
$H_0: Vp4 = Vp5$	Hipótese nula aceita
$H_1: Vp4 \neq Vp5$	

### 3.3.2 Influência do volume de material depositado sobre a $V_{S_{\max}}$

O aumento da velocidade de soldagem, sem alterar a corrente, foi utilizado para controlar a produção por unidade de comprimento de solda nos experimentos executados. Maiores velocidades de soldagem atribuem maior capacidade de produção ao processo. Porém, utilizar o aumento da velocidade de soldagem para realizar o controle da produção é uma estratégia que deve ser aplicada levando alguns fatores em consideração. Altas velocidades de soldagem, para uma taxa de deposição, provoca a instabilidade da poça fundida (Scotti; Ponomarev, 2014). Em um determinado nível de velocidade de soldagem (estatisticamente igual) as 5 séries apresentam a perfuração da poça com aparência semelhante ao fenômeno “costa de dragão”. Como não houve a manutenção da corrente junto a velocidade de soldagem, um fator que deve ser observado, é a possibilidade de falta de material suficiente na poça associado a baixa incidência do arco sobre a poça.

Desse modo, para constatar que a ocorrência de perfurações está intimamente relacionada com o volume da poça de fusão foi elaborado um modelo para quantificar a quantidade de material depositado antes da ocorrência da perfuração. Como a junta utilizada nos primeiros testes não variou (3 mm de abertura de raiz e espessura 6,35 mm) pode-se

concluir que o volume de material necessário para preencher a junta para todas as séries de experimentos é constante. Sabendo-se que a junta tem o formato de um trapézio isósceles, é possível calcular a área total da seção transversal da junta. A partir da determinação da área da seção transversal, é obtido o volume a partir do produto da área com o comprimento dos cordões. Conforme os dados apresentados na Figura 3.10, para que a junta utilizada nos experimentos seja completamente preenchida é necessário um volume de 4065,88 mm<sup>3</sup>.

Folga (mm)	3,0
Espessura da Chapa (mm)	6,3
Ângulo de Bisel (graus)	15,0
<b>Área da Seção Transversal da Junta (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>20,3</b>
<b>Volume da Junta (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>4065,9</b>

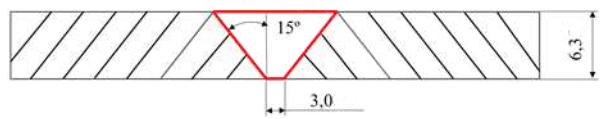


Figura 3.10 – Representação da área da seção transversal da junta

O volume de material depositado pode ser obtido a partir dos parâmetros de velocidade de alimentação, propriedades geométricas do arame e o tempo necessário para preenchimento da junta (considerando que todo material fundido é transferido para a poça). O cálculo do volume depositado está descrito na Eq. (4.5).

$$Vol_d = \frac{A_e \times V_{alim} \times L}{V_{sold}} \quad (4.5)$$

Onde:

$Vol_d$  = Volume de material depositado;

$A_e$  = Área da seção transversal do arame;

$V_{alim}$  = Velocidade de alimentação;

$V_{sold}$  = Velocidade de soldagem;

$L$  = Comprimento do cordão.

De todas as informações que compõe a equação proposta, apenas a velocidade de soldagem não é constante nesse estudo. Após a elaboração dos cálculos, o volume de material depositado foi identificado como  $4110,6 \text{ mm}^3$  ( $V_{\text{sold}} = 33 \text{ cm/min}$ ). O valor do volume depositado retornou uma relação muito próxima ao volume necessário para preencher a junta, em torno da razão 1,0 (Volume depositado/Volume da junta). Ou seja, para a máxima velocidade alcançada a relação entre volume depositado e volume do total junta é 1.

Para estabelecer se a máxima velocidade de soldagem está condicionada, nesse caso, apenas ao volume da junta, foram realizados testes com juntas de 2 e 4 mm de folga com o Fluxo 4. A escolha do Fluxo 4 se deu por durante os ensaios este fluxo apresentar maiores velocidades de soldagem, apesar de após os testes de hipótese ser confirmado não ocorrer diferença estatística entre as velocidades de soldagem alcançadas. Os parâmetros de soldagem, assim como a metodologia para determinar  $V_{s\text{máx}}$ , foram mantidos conforme os testes anteriores (o único parâmetro alterado foi a amplitude do tecimento que acompanha a dimensão da folga). O resultado da comparação entre os testes com o Fluxo 4 para as duas dimensões de folga é apresentado na Figura 3.11

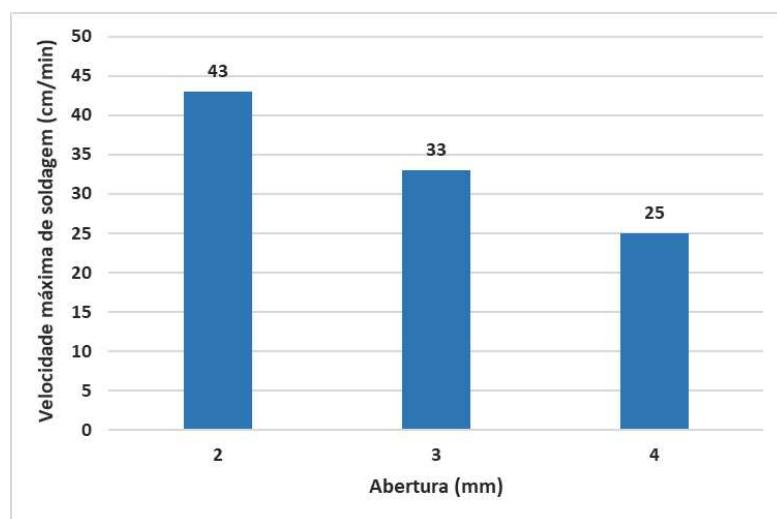


Figura 3.11 – Velocidade máxima de soldagem utilizando o Fluxo 4 para diferentes aberturas de junta

Reproduzindo-se os cálculos da área da seção transversal da junta e volume de material depositado para a folga de 2 e 4 mm, a comparação dos resultados está expressa na Tabela 3.8. O resultado da função do volume depositado e do volume total da junta demonstra que a ocorrência de perfuração, e consequentemente a  $V_{s\text{máx}}$ , está mais condicionada ao volume de material depositado do que à composição de fluxo utilizado como suporte de raiz.

Os fluxos nesse caso cumprem o papel de suporte proposto e independe da composição selecionada, enquanto a relação entre volume depositado e volume da junta se mostra praticamente constante.

Tabela 3.8 – Relação entre a dimensão da folga e  $V_{smáx}$

Folga (mm)	2,0	3,0	4,0
<b>Velocidade de Soldagem Máxima (cm/min)</b>	42,0	33,0	25,0
<b>Volume Depositado/Volume da Junta</b>	1,1	1,0	0,9

Para constatar que a velocidade alcançada estava relacionada com o uso do fluxo como suporte de raiz, o teste para a folga de 3 mm foi reproduzido sem a utilização do fluxo ou qualquer dispositivo como suporte de raiz ( $V_{sold} = 30$  cm/min). Os testes sem nenhum dispositivo para suporte da poça apresentaram perfuração total da poça de fusão, para as velocidades em que a utilização do fluxo apresentou estabilidade. Esse experimento final demonstra que sem a utilização de nenhum dispositivo de suporte para a poça, as forças estáticas e dinâmicas presentes na confecção do cordão são suficientes para ocasionar a perfuração do cordão. Dessa forma, a utilização de suporte de raiz fluxo, apesar de não possuir uma estrutura como os demais suporte de raiz também exerce papel de suporte mecânico. Porém, a partir de uma determinada velocidade, o material depositado não é suficiente para a formação de um cordão conforme. Essa característica não tem seus efeitos reduzidos pelo efeito das diferentes composições de fluxos empregados.

### 3.3.3 Influência da granulometria do fluxo sobre a $V_{smáx}$

Para compreender melhor a relação da forma física do fluxo com os resultados, foram realizados testes com um fluxo de menor granulometria. Essa comparação busca entender se a granulometria de fluxo utilizada poderia interferir na sustentação da poça de fusão e promover maiores ou menores velocidades de soldagem, baseado nas características estáticas que interferem na formação do passe de raiz. O Fluxo 4 em sua granulometria original foi considerado como um fluxo grosseiro. Uma amostra de 500 g desse fluxo foi coletada e submetida ao processo de moagem. O fluxo resultante foi denominado como fluxo refinado. Ao final do ensaio, parte dos grãos foi destinado ao ensaio de granulometria. Os grãos foram submetidos ao mesmo ensaio e condições que o fluxo em sua forma original (grosseiro). Os

dados obtidos para granulometria do fluxo antes e após o processo de moagem estão dispostos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Granulometria do fluxo original comparado ao fluxo refinado (dados fornecidos pela Lincoln Eletric do Brasil)

Malha	Fluxo 4 – Granulometria Grosseira	Fluxo 4 – Granulometria Refinada
12	1%	0%
14	0%	0%
20	65%	0%
35	28%	0%
40	0%	42%
50	6%	0%
60	0%	28%
100	0%	20%
200	0%	10%

Foram realizadas séries de experimentos idênticas à realizada com o Fluxo 4 em condições grosseiras para a folga de 3 mm. O resultado obtido para máxima velocidade de soldagem está apresentado na Figura 3.12. Comparando os resultados para granulometria refinada e grosseira, não ocorreu diferença significativa entre as velocidades máximas de soldagem. A relação entre a o volume da junta e o volume depositado é praticamente constante (1,0). Esses resultados demonstram mais uma vez uma relação íntima entre a máxima velocidade de soldagem e o volume da junta, assim como a baixa influência da composição ou granulometria do fluxo sobre a máxima velocidade de soldagem, pois a relação entre volume depositado e volume necessário para preenchimento da junta se demonstra constante.

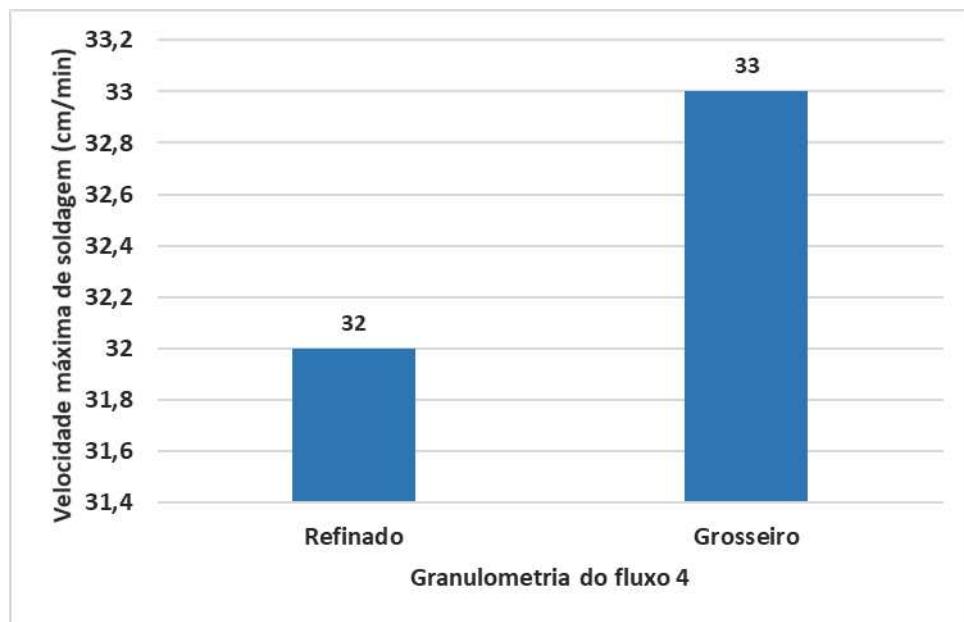


Figura 3.12 – Velocidade máxima soldagem em função de duas granulometrias distintas para o Fluxo 4

## CAPÍTULO IV

### INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO FLUXO SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E GEOMÉTRICAS DA RAIZ

O método aplicado e experimentos realizados até esta fase buscaram determinar a máxima velocidade de soldagem exequível com segurança (mínima chance de perfuração) com cada composição de fluxo, assim como a velocidade crítica de soldagem acima da qual sempre ocorre a perfuração da poça, para uma dada condição de soldagem (processo, modo operacional, tensão de regulagem, velocidade de alimentação, distância bico de contato-peça, etc.). Apesar da determinação da velocidade máxima de soldagem ser o principal critério de avaliação da influência dos fluxos utilizados (considerando o foco em máxima produção), algumas outras características do cordão foram também avaliadas, devido à sua importância na qualidade da raiz da junta obtida. Dessa forma, o que o procedimento de análise aplicado neste capítulo busca é determinar a influência da composição do fluxo sobre o comportamento geométrico da raiz, microestrutura e presença de porosidade no cordão.

#### 4.1 Método para avaliação das características geométricas da raiz

Regiões de mudança brusca na geometria de uma estrutura configuram-se como um ponto concentrador de tensão. Baseado nesse fenômeno, a forma do contorno do perfil da raiz do cordão é o principal critério de avaliação definido para este trabalho. Um perfil com

variação brusca (menor ângulo na congruência entre o plano tangente do reforço da raiz e a chapa) é caracterizado como um defeito de soldagem, que, além de ser concentrador de tensões, tende a dificultar a remoção da escória. Esse último aspecto afeta a capacidade operacional de uso de fluxos em suporte de raiz moldáveis. Relembrando, defeito do ponto de vista de qualidade em soldagem são aquelas imperfeições ou descontinuidades que afetam o desempenho da junta soldada em função das solicitações dos esforços sobre ela. Na Figura 4.1 está representado esquematicamente as seções transversais esperadas, sendo uma variação suave no perfil o desejado no passe de raiz.

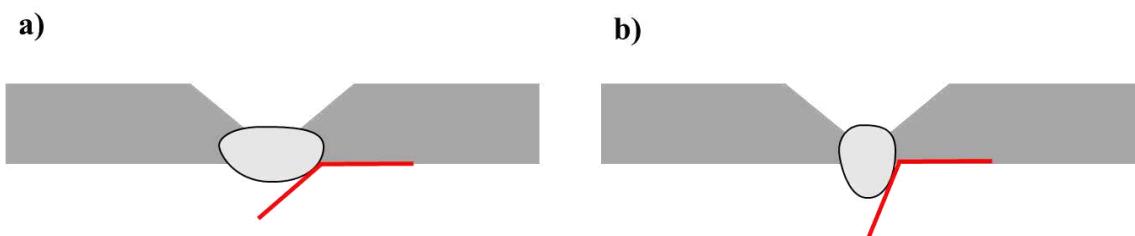


Figura 4.1 – Demonstração dos perfis de seção transversal da raiz para uma (a) variação suave e (b) variação do perfil do reforço de raiz

Mas focando no efeito concentrador de tensão do perfil da raiz de uma junta, de acordo com a norma API 1104 19<sup>a</sup> Ed. (2001) (*Welding of Pipelines and Related Facilities*), uma das principais normas aplicadas à soldagem de dutos onshore, a presença de concavidade no passe de raiz e a falta de penetração são considerados defeitos de soldagem. Essa norma estabelece certo grau de aceitação para a presença dessa imperfeição na seção 9 (*Acceptance Standards for Nondestructive Testing*). Já de acordo com a norma AWS D1.1:2000 (1999), o reforço não deve exceder 1/8 pol. (3 mm). Apesar de não ser dito claramente, essa recomendação vale também para reforço no lado da raiz, referido como “melt-through”. A norma a DNV-OD-F101 (2012) (*Submarine Pipeline Systems*), por sua vez, é mais explícita e define como critério de aceitabilidade do reforço de raiz para soldagem longitudinal, que este não deve exceder 3 mm para chapas de até 13 mm de espessura, ou máximo de 4,0 mm para chapas com espessura maior que 13 mm.

Foram selecionados para avaliação dos parâmetros geométricos de cordões confeccionados com cada fluxo, os 3 cordões que foram usados para validação da máxima velocidade de soldagem (tópico apresentado no capítulo III). Para substanciar a análise do perfil da raiz desses cordões, foram realizadas 10 medições ao longo de cada cordão,

conforme ilustrado na Figura 4.2. As medições da largura máxima da altura do reforço da raiz e do reforço de raiz foram realizadas individualmente nas 10 seções ao longo da raiz de cada cordão, desconsiderando os 10 mm iniciais e finais do comprimento do cordão de solda, com o auxílio de um paquímetro de resolução 0,1 mm. Enquanto o reforço se deu pela altura máxima alcançada pela penetração do cordão, a largura máxima da raiz é caracterizada como a medida máxima entre uma extremidade e outra do reforço de raiz (conforme ilustrado na, seção A-A). Foi, então, calculada a média aritmética e o desvio padrão das dez medições de cada cordão, para atuarem como instrumentos no tratamento estatístico e determinar a diferença entre os reforço de raiz médio entre os fluxos testados.

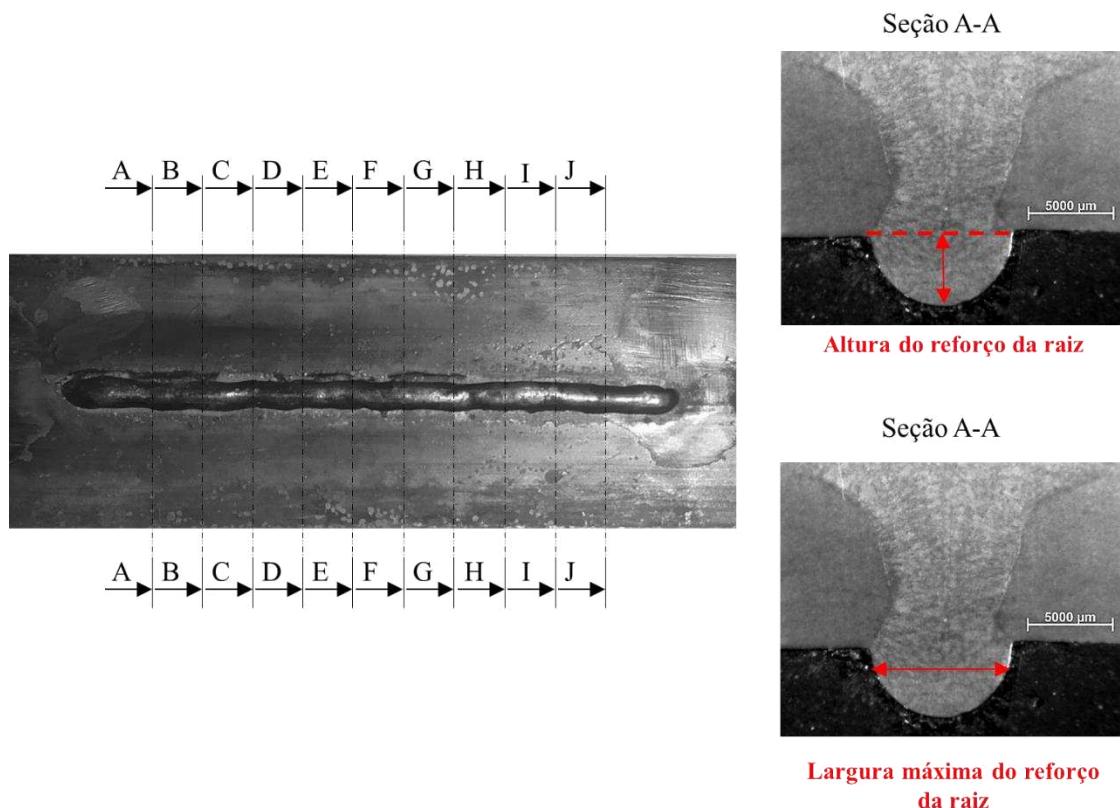


Figura 4.2 – Demonstração das medições realizadas ao longo de seções da raiz para determinação das características geométricas (“altura do reforço da raiz” e “largura máxima da altura do reforço da raiz”)

Nas linhas sombreadas da Tabela 4.1, os cordões analisados, caracterizados pelas velocidades máximas alcançadas para cada fluxo, estão apresentados, juntamente com as a médias das 10 medições de altura do reforço da raiz e largura máxima da altura do reforço da raiz. Com a intenção de avaliar também a raiz dos cordões com a velocidade de soldagem

abaixo da velocidade máxima de soldagem, e como isso se observar a possível influência da variação da velocidade na geometria da raiz, ainda foram avaliados 3 cordões depositados com uma unidade de velocidade de soldagem abaixo (- 1 cm/min). A Tabela 4.1 inclui similarmente esses cordões, em linhas não sombreadas.

Tabela 4.1 – Reforço e largura médios de raiz, e respectivos desvios padrão, obtidas em função do fluxo na máxima velocidade e à uma unidade de velocidade abaixo (- 1 cm/min)

(Continua)

Fluxo	Velocidade de Soldagem regulada (cm/min)	Média do reforço de raiz (mm)	Média da largura máxima do reforço de raiz (mm)	Experimento
1	31	$3,2 \pm 0,6$	$5,0 \pm 0,8$	53
				135
				128
1	30	$4,0 \pm 0,8$	$5,4 \pm 0,8$	134
				127
				132
2	31	$2,5 \pm 0,7$	$4,5 \pm 0,8$	54
				137
				136
2	30	$3,8 \pm 0,7$	$5,8 \pm 0,6$	133
				43
				48
3	32	$2,8 \pm 0,7$	$5,0 \pm 0,6$	64
				123
				122

(Conclusão)

Fluxo	Velocidade de Soldagem regulada (cm/min)	Média do reforço de raiz (mm)	Média da largura máxima do reforço de raiz (mm)	Experimento
-------	--	-------------------------------	---	-------------

3	31	$3,0 \pm 0,6$	$5,1 \pm 0,5$	63
				121
				62
4	33	$3,4 \pm 1,1$	$5,5 \pm 0,6$	112
				111
				68
4	32	$2,4 \pm 1,0$	$4,5 \pm 0,7$	146
				67
				66
5	32	$3,5 \pm 0,5$	$5,7 \pm 0,4$	147
				145
				144
5	31	$2,8 \pm 0,3$	$5,0 \pm 0,6$	143
				75
				79

$Valim = 6 \text{ m/min}$ , gás de proteção = 98% Ar + 2 % O<sub>2</sub>, vazão do gás de proteção = 18 l/min, abertura de raiz = 3 mm, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, fonte operando no modo tensão constante e  $Im = 212,6 \pm 9,8$  (conforme

Tabela 3.3)

Para avaliar a tendência do fluxo em favorecer maior ou menor reforço e/ou largura de raiz (o que difere de variabilidade das dimensões das raízes), foram utilizadas a média aritmética da Tabela 4.1. Para garantir a confiabilidade estatísticas nessas comparações, foram realizados testes de hipótese (teste t de Student). Esse teste visa comparar médias encontradas para cada grupo de amostras e determinar se existe diferença significativa entre elas. A hipótese nula foi a igualdade entre o reforço de raiz entre os cordões, quando comparados cordões confeccionados com composições de fluxos diferentes. As hipóteses são as afirmações sobre as médias calculadas, ou seja, se determinado fluxo promove maior reforço de raiz do que outro. O teste determina se essa afirmação é estatisticamente correta ou não, baseado em um certo grau de confiança dos resultados.

Os dados usados no teste de hipótese são geralmente dispostos em uma distribuição gaussiana, para possibilitar a comparação visual (no caso, dos diferentes resultados de reforço e largura máxima de raiz obtidos). A distribuição gaussiana (ou distribuição normal) possui a média centralizada, enquanto os demais dados estão distribuídos proporcionalmente ao longo da curva. Para se assegurar que os resultados das amostras poderiam ser dispostos dessa forma, foi realizado um teste de normalidade (teste de normalidade Shapiro-Wilk) nos dados obtidos das amostras (caso contrário, inviabilizaria a aplicação do teste de hipóteses nos dados amostrais).

Por outro lado, em um mesmo cordão (com mesmo fluxo), ocorreram diversos valores obtidos para reforço de raiz (variabilidade). Quando ocorre grande variação desses valores para um mesmo cordão, é um indicativo de que a raiz do cordão apresenta uma geometria irregular. À primeira vista, a comparação dos desvios padrão das médias desses valores poderia ser usado para comparar a regularidade da reforço e largura máxima da altura do reforço da raiz. Porém, como se observa na Tabela 4.1, as médias são diferentes, a uma relação não relativa (normalizada) pode levar a interpretações erradas. Deve-se lembrar que o desvio padrão é uma medida estatística intimamente relacionada a média obtida no grupo amostral utilizado, o que dificulta a comparação com outros grupos amostrais de médias distintas. Não é representativo comparar o desvio padrão de diferentes grupos amostrais, visto que a média destes grupos são distintas.

Para calcular esta variabilidade do reforço de raiz e da largura máxima da altura do reforço da raiz ao longo do cordão, e assim, quantificar a regularidade geométrica, usou-se o Coeficiente de Variação (CV). O CV é uma medida estatística, é adimensional (expressa em porcentagem), capaz de promover a comparação entre diferentes grupos de amostras, com diferentes médias. A fórmula para o cálculo do CV é apresentada na Eq. (4.1). Quanto maior o CV, maior a variabilidade dos resultados em relação à média. Com os resultados de CV obtidos para os diferentes grupos de amostra será possível analisar qual fluxo/condição resultou em cordões mais irregulares.

$$CV = \frac{s}{x} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

s – Desvio padrão amostral;

$\bar{x}$  – Média aritmética amostral.

Para ampliar o alcance dos resultados, foi ainda realizada uma comparação entre cordões depositados com o Fluxo 4 refinado e com granulometria normal (ver Tabela 3.7) assim como usando o Fluxo 4 com granulometria normal em placas e teste com abertura de raiz 3 e 2 mm. Ambas comparações foram realizadas na máxima velocidade de soldagem. A Tabela 4.2, analogamente à Tabela 4.1, apresenta os dados para estas últimas comparações. O teste de hipótese também foi aplicado para comparação dos resultados da largura do cordão, assim como o CV para a irregularidade da largura máxima ao longo do cordão.

Tabela 4.2 – Reforço e largura médios de raiz, e respectivos desvios padrão, obtidas em função da variação da abertura de raiz e granulometria utilizando o Fluxo 4

Granulometria do fluxo	Abertura de raiz (mm)	Velocidade de Soldagem regulada (cm/min)	Altura Média do reforço de raiz (mm)	Média da largura máxima do reforço de raiz (mm)	Experimento
Refinado	3	32	$0,7 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,4$	148
					149
					151
Grosseiro (original)	3	33	$3,4 \pm 1,1$	$5,5 \pm 0,6$	112
					111
					68
Grosseiro (original)	2	42	$1,9 \pm 0,6$	$3,7 \pm 0,7$	176
					177
					178

$V_{alim} = 6 \text{ m/min}$ , gás de proteção = 98% Ar + 2% O<sub>2</sub>, vazão do gás de proteção = 18 l/min, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, fonte operando no modo tensão constante e  $I_m = 209,9 \pm 9,8$  (conforme Tabela 3.4)

Para finalizar a análise geométrica, foi calculado o índice de convexidade dos cordões, conforme a Eq. (4.2). O índice de convexidade é também um parâmetro adimensional. Cordões com maior largura máxima e menor reforço resultam em menores índices de convexidade. Um reforço de raiz menos convexo apresenta melhor distribuição da largura conforme a altura da raiz, demonstrando assim um melhor preenchimento e molhabilidade sob o cordão.

$$IC = \frac{P}{L} \quad (4.2)$$

Onde:

P – Altura do reforço da raiz;

L – Largura máxima da altura do reforço da raiz.

## 4.2 – Método para avaliação das características físicas da raiz

### 4.2.1 - Microestrutura do cordão

De forma complementar, para identificar possíveis alterações microestruturais atribuídas à utilização de determinada composição de fluxo, foram selecionadas amostras das seções transversais dos cordões confeccionados. As placas de teste selecionadas foram cortadas e submetidas à caracterização metalográfica, ou seja, após os cortes, as amostras passaram por um processo de preparação metalográfica (lixamento e polimento), e posteriormente foram atacadas quimicamente por imersão em uma solução de Picral e esfregamento por 30 s. A técnica de microscopia óptica foi utilizada para revelar a microestrutura das seções, com o auxílio de um microscópio óptico Microscópio ZEISS Axio Imager M2. Os cortes para avaliação da microestrutura foram realizados em dois pontos da seção transversal para cada cordão analisado, conforme ilustrado na Figura 4.3

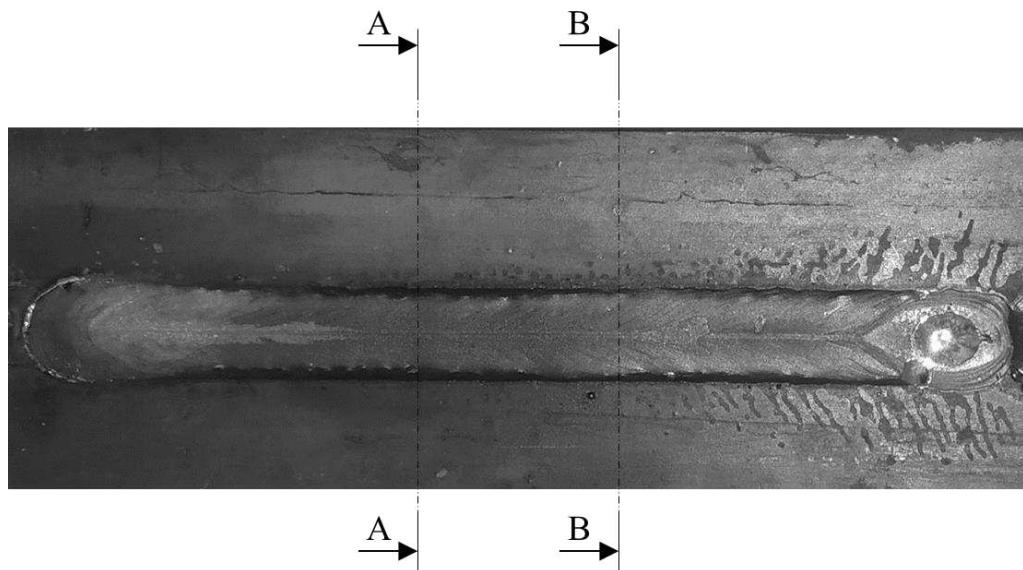


Figura 4.3 - Seções para análise da micrografia e identificação de possíveis defeitos de soldagem

Para a avaliação da microestrutura, foram analisadas as imagens com suporte de diversos trabalhos da literatura. A microestrutura do material utilizado para teste é comum, o que possibilita a avaliação por comparação devido ao banco de dados abrangente em trabalhos científicos. Cada condição de experimento foi avaliada para a velocidade de soldagem máxima somente. Foram determinados dois pontos de avaliação, na região central do cordão e na interface entre a raiz e o fluxo. Na interface com o fluxo, podem haver reações metal-escória, menos provável do que no centro do cordão. No limite foi realizado em mais um aumento, para verificar a interação do fluxo com o cordão. A Figura 4.4 exibe os pontos de análise microestrutural de um dos experimentos realizados.

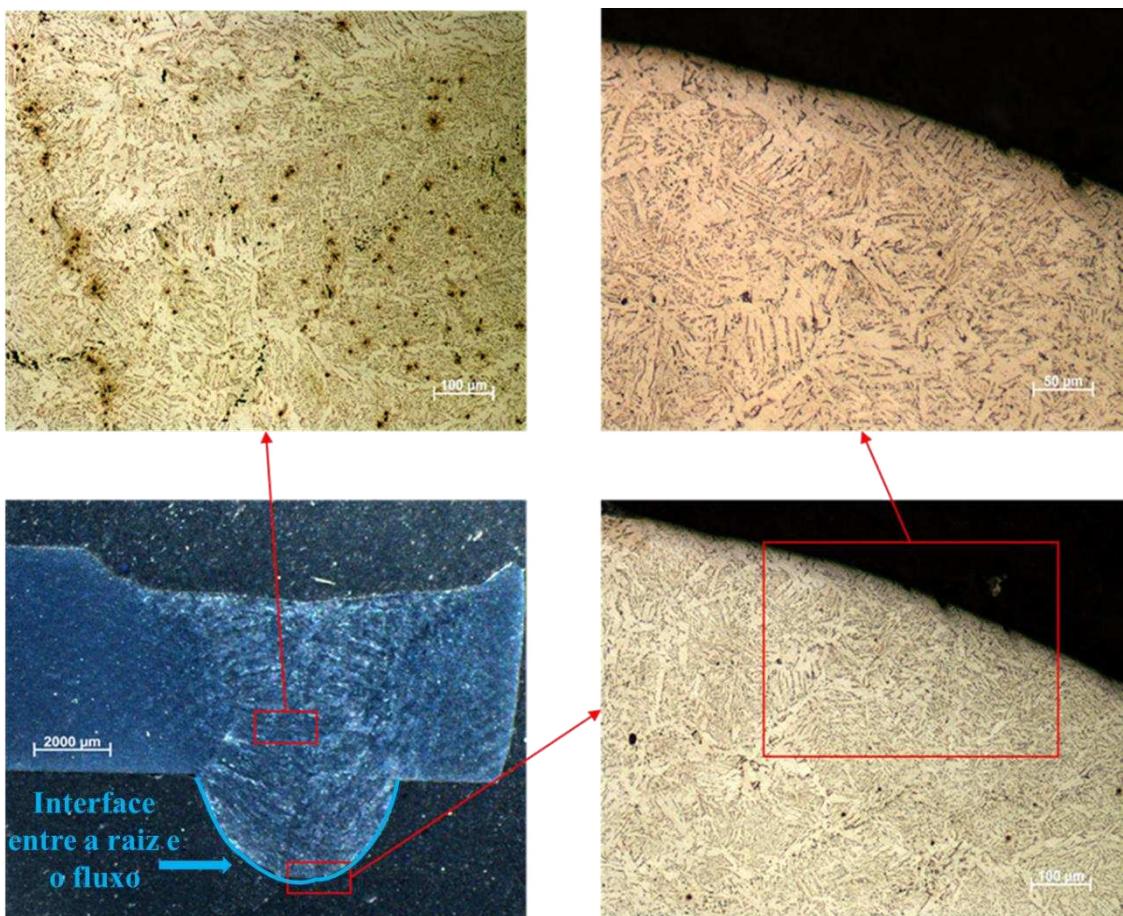


Figura 4.4 – Demonstração dos pontos de análise microestrutural (usando como padrão imagens do experimento nº 57)

#### 4.2.2 - Presença de descontinuidade

Além da identificação das fases, a obtenção das imagens da seção transversal também permite a detecção de possíveis imperfeições na zona fundida. Entre essas imperfeições pode-se citar porosidades como uma possibilidade em destaque no estudo desenvolvido, isso porque a utilização do fluxo como suporte de raiz pode ocasionar a emissão de fumos e promover a presença de poros nos cordões confeccionados devido à dificuldade de escape desses fumos e de gases. Para analisar o efeito das composições de fluxos sobre o surgimento de defeitos no cordão, foram realizados dois cortes nas seções transversais dos testes selecionados (A-A, B-B) conforme demonstrado na Figura 4.3. Foi obtida a macrografia destas seções com uma câmera do Microscópio ZEISS Stereo Discovery V.8 para identificar de forma qualitativa a presença de defeitos de soldagem ao longo dos cordões.

#### 4.3 Apresentação dos resultados e análises

Os dados obtidos das amostras dos cordões confeccionados com a velocidade máxima e diferentes fluxos (ver linhas sombreadas da Tabela 4.1) estão apresentadas na Figura 4.5, para altura do reforço da raiz. Mesmo com uma amostragem razoavelmente pequena (10 medições em cada cordão, 3 cordões para cada fluxo), confirma-se a distribuição Gaussiana. Percebe-se, coerentemente com os dados da Tabela 4.1, que as médias não são as mesmas, até porque as velocidades máximas (e consequentemente energia de soldagem), não foram as mesmas.

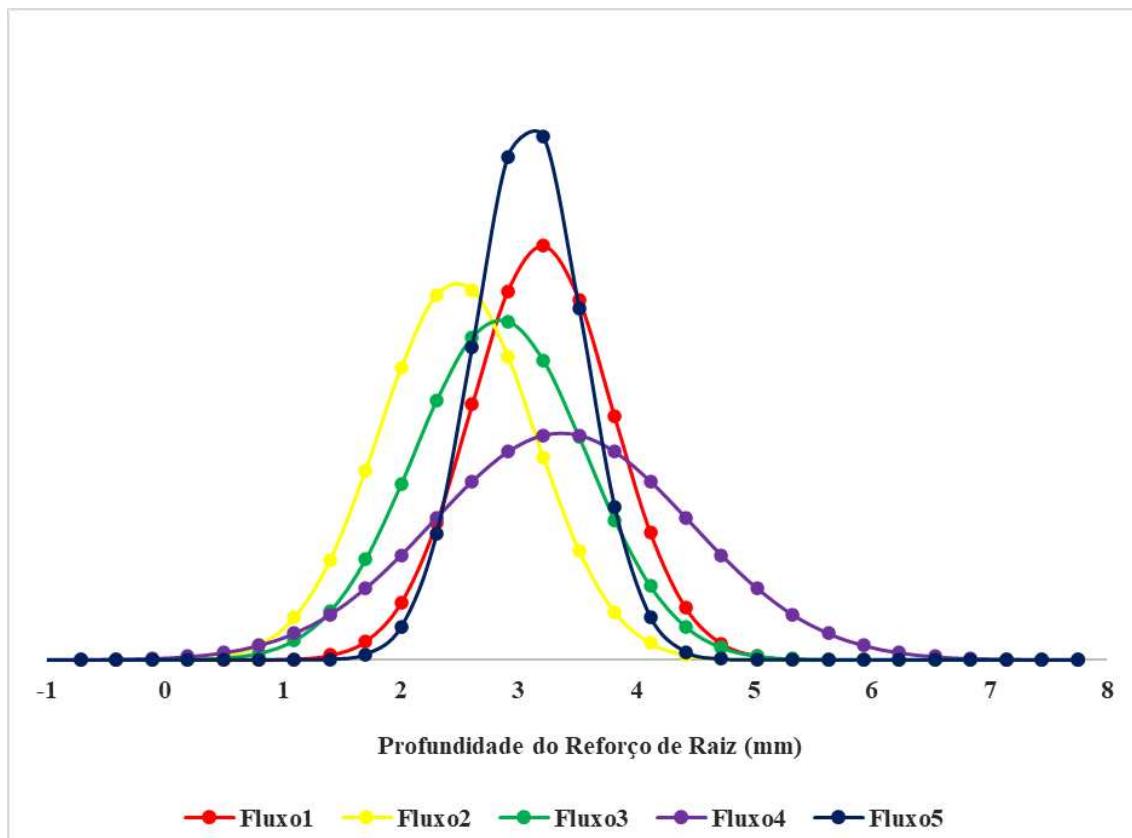


Figura 4.5 – Curva da distribuição normal das medições de reforço de raiz ao longo do cordão em 10 seções distintas de cada um dos 3 cordões com cada fluxo

Observando-se as curvas obtidas, foram identificadas algumas tendências de comportamento entre os fluxos no que diz respeito à reforço de raiz e regularidade da

formação do cordão de raiz. Cordões que apresentam maior dispersão dos resultados tendem a demonstrar curvas mais largas e achatadas na distribuição gaussiana, enquanto dispersões menores resultam em uma curva mais esbelta. Quanto mais o pico da curva estiver deslocado à direita, maior é a altura média do reforço de raiz. Observando-se apenas a distribuição gaussiana, a dispersão dos resultados, e consequente dispersão da altura da raiz, apresenta maior regularidade de resultados para o Fluxo 5 quando comparado aos demais. Quanto ao reforço de raiz, o Fluxo 2 apresenta uma melhor condição.

Para validar os resultados, foi realizado o teste de hipótese para comparação das máximas alturas e o cálculo do CV para comparar a regularidade dos cordões. Os resultados do tratamento estatístico estão apresentados na Tabela 4.3 e Tabela 4.4

Tabela 4.3 – Testes de hipótese para comparar o reforço de raiz entre cada fluxo (Continua)

Hipótese	Resultado
$H_0: RR1 = RR2$ $H_1: RR1 > RR2$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: RR1 = RR3$ $H_1: RR1 > RR3$	Hipótese nula aceita
$H_0: RR1 = RR4$ $H_1: RR1 > RR4$	Hipótese nula aceita
$H_0: RR1 = RR5$ $H_1: RR1 > RR5$	Hipótese nula aceita
$H_0: RR2 = RR3$ $H_1: RR2 \neq RR3$	Hipótese nula aceita

(Conclusão)

Hipótese	Resultado
$H_0: RR2 = RR4$ $H_1: RR2 < RR4$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: RR2 = RR5$ $H_1: RR2 < RR5$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: RR3 = RR4$ $H_1: RR3 < RR4$	Hipótese nula aceita
$H_0: RR3 = RR5$ $H_1: RR3 < RR5$	Hipótese nula aceita
$H_0: RR4 = RR5$ $H_1: RR4 > RR5$	Hipótese nula aceita

Tabela 4.4 - Dados estatísticos do grupo para máxima velocidade de soldagem, onde:  $\bar{x}_{rr}$  = altura média do reforço de raiz;  $s_{rr}$  = desvio padrão amostral; CV = coeficiente de variação; e  $n_{rr}$  = número de seções avaliadas

Fluxo	$\bar{x}_{rr}$ (mm)	$s_{rr}$ (mm)	CV	n
Fluxo 1	3,2	0,6	19%	30
Fluxo 2	2,5	0,7	27%	30
Fluxo 3	2,8	0,7	26%	30
Fluxo 4	3,4	1,1	33%	30
Fluxo 5	3,1	0,5	15%	30

Dos resultados do teste de hipóteses e do coeficiente de variação, pode-se dizer que altura média do reforço de raiz para o Fluxo 1 é estatisticamente maior que o do Fluxo 2. Quando o Fluxo 1 foi comparado aos demais fluxos, a média da reforço de raiz demonstrou ser estatisticamente igual. A reforço de raiz alcançado pelo Fluxo 2 demonstrou estatisticamente igual ao Fluxo 3, porém menor que a reforço de raiz alcançado pelos fluxos 4 e 5. Os resultados dos fluxos 3 e 4 possuem a mesma relação. Enquanto isso, o Fluxo 3 apresentou reforço de raiz estatisticamente igual aos do Fluxo 4 e 5. O Fluxo 5 apresentou reforço de raiz estatisticamente igual ao Fluxo 4. De forma resumida, baseado nos resultados

obtidos após o tratamento estatístico, pode-se dizer apenas que o Fluxo 2 proporcionou menor altura de reforço que os fluxos 1, 4 e 5. O Fluxo 2, assim como o Fluxo 1, promoveu a menor velocidade de soldagem (31 cm/min). As demais comparações se mostraram estatisticamente semelhantes, não podendo ser feita nenhuma afirmação.

Analizando-se os resultados do coeficiente de variação, o Fluxo 4 e Fluxo 2 apresentara, maior dispersão de dados de reforço de raiz (visível na distribuição normal e validado pelo CV) enquanto o Fluxo 1 e Fluxo 5 apresentaram um conjunto melhor de dados para regularidade do cordão. A Figura 4.8 demonstra dois cordões, um com maior CV (a) e outro com menor CV (b).

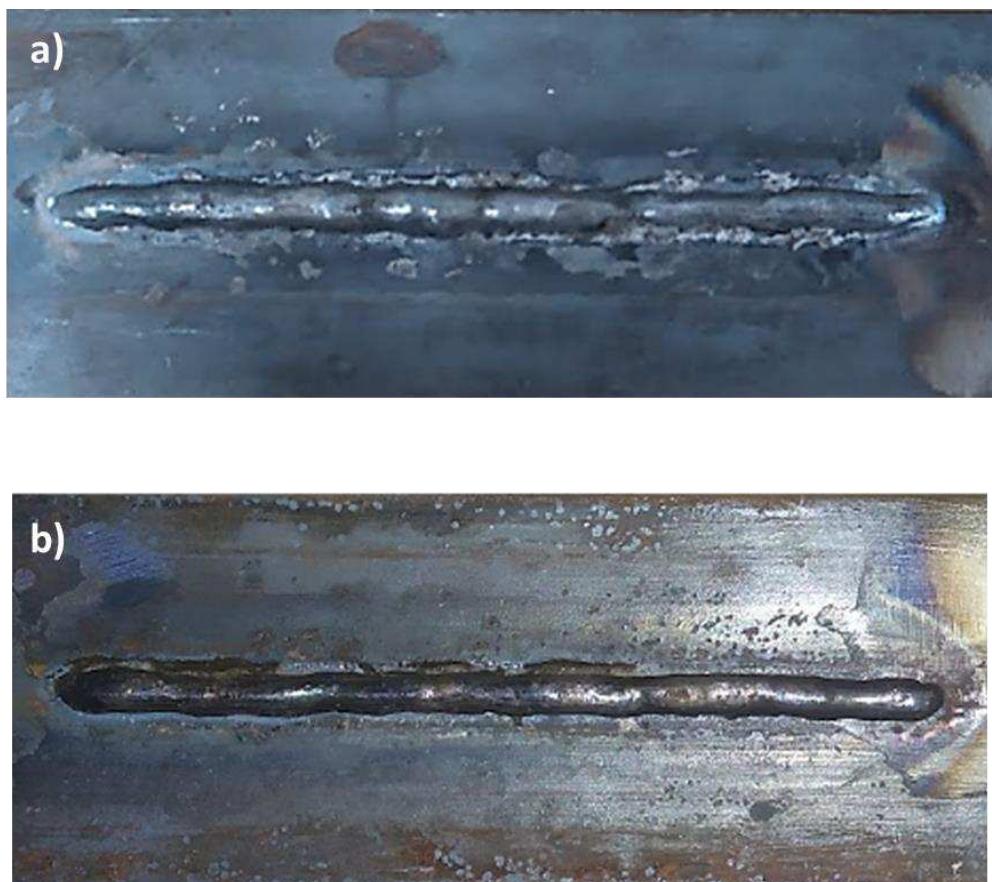


Figura 4.6 – Vista de baixo da junta demonstrando um reforço de raiz com (a) menor regularidade e (b) maior regularidade

Para avaliar se as mesmas tendências de ter o Fluxo 2 produzindo cordões com a menor altura e os fluxos 1 e 5 maior regularidade da altura quando se aplica uma menor velocidade de soldagem (velocidade máxima à uma unidade abaixo), análises análogas às

feitas com os fluxos soldando com a velocidade máxima foram feitas. Ver linhas não sombreadas na Tabela 4.1 para as combinações em questão.

Para permitir uma melhor visualização, a análise gráfica foi feita por fluxo, comparando-se o mesmo fluxo com a velocidade máxima (linhas sombreadas da Tabela 4.1) e com a velocidade com uma unidade abaixo da máxima (linhas não sombreadas da Tabela 4.1). As Figuras 4.5 até 4.9 ilustram os comportamentos. Como se percebe, o comportamento depende do tipo de fluxo. O Fluxo 1 apresentou uma tendência de reduzir a reforço de raiz com o incremento da velocidade (reforço de raiz médio de 3,09 para 2,67 mm), e cordão mais regular com o incremento da velocidade. O Fluxo 2 realizado na mesma velocidade de soldagem que o Fluxo 1 atribuiu reforços de raiz médios com diferença expressiva (2,48 e 3,83 mm). O Fluxo 3 apresentou reforço de raiz médio e regularidade semelhantes para ambas as velocidades. O Fluxo 4 foi confeccionado com a maior velocidade de soldagem obtida (33 cm/min), e apresentou uma tendência diferente dos demais para a influência do incremento da velocidade sobre a reforço de raiz, onde a reforço aumentou conforme o aumento da velocidade. A regularidade do cordão no Fluxo 4 para ambas as velocidades é semelhante. Essa tendência mostra que o Fluxo 4, dentre os fluxos avaliados, apresentou uma maior dispersão dos resultados de reforço de raiz e uma regularidade consequentemente inferior aos demais em ambas as condições de velocidade. Por fim, o Fluxo 5 apresentou a mesma tendência que o Fluxo 4 para a relação entre velocidade e reforço de raiz. Quanto à regularidade, o incremento da velocidade reduziu a regularidade do cordão. Comparado aos demais fluxos, o Fluxo 5 de fato apresentou melhores tendências de resultados para regularidade do cordão.

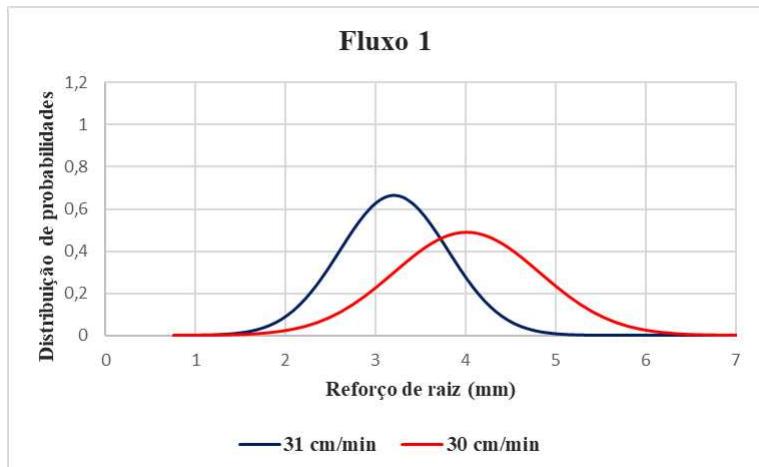


Figura 4.7 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições no reforço de raiz ao longo do cordão na  $V_{smáx}$  e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 1

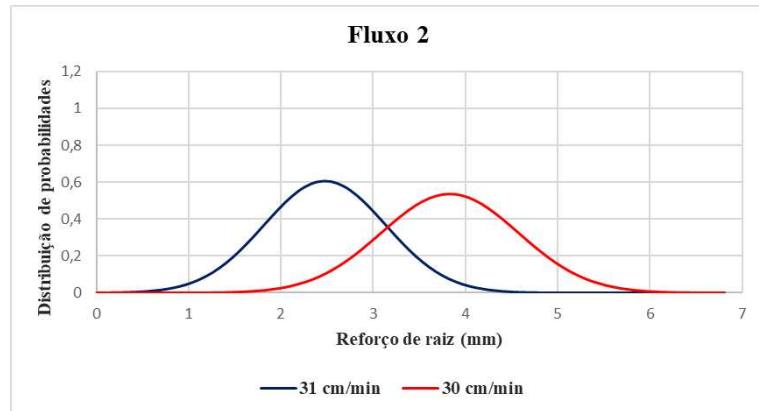


Figura 4.8 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na  $V_{smáx}$  e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 2

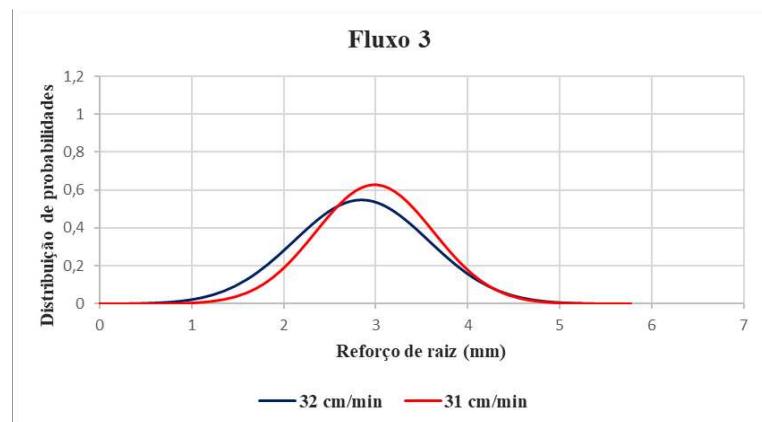


Figura 4.9 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na  $V_{smáx}$  e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 3

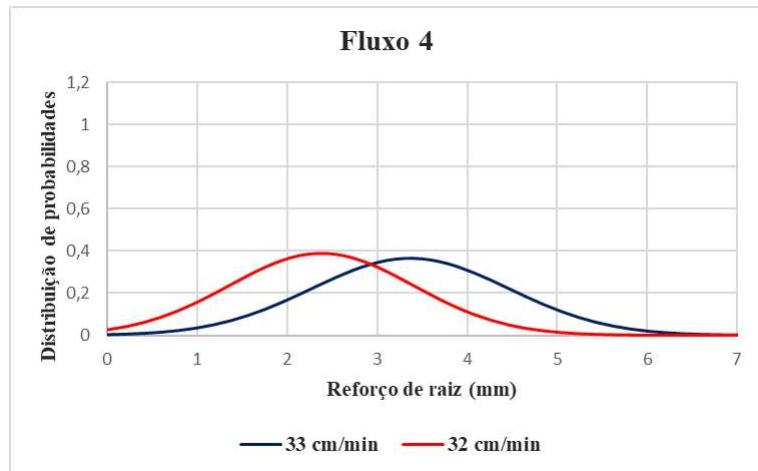


Figura 4.10 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na  $V_{smáx}$  e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 4

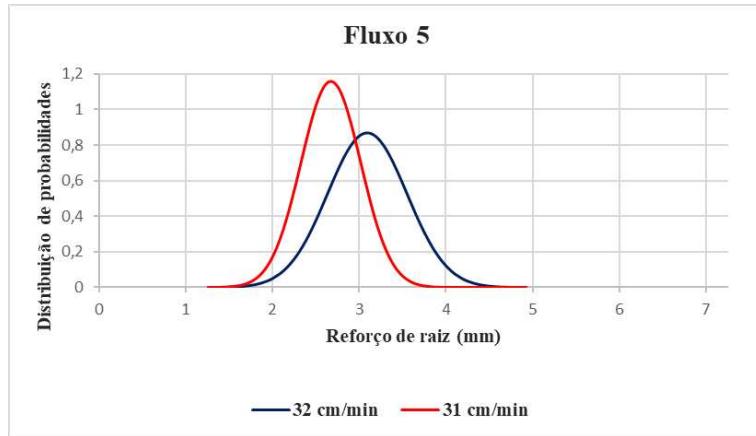


Figura 4.11 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na  $V_{smáx}$  e a uma velocidade inferior, utilizando o Fluxo 5

Após a avaliação destes resultados, ficou constatado não haver evidência clara da influência da velocidade sobre o reforço de raiz, assim como em sua distribuição. Um ponto que se sobressai é que cordões confeccionados com velocidades maiores promoveram menores alturas de raiz que os demais (como é o caso do Fluxo 2 quando comparado aos demais. Esse fenômeno será abordado a frente juntamente com os dados obtidos para largura máxima da altura do reforço da raiz.

Na Figura 4.12 está representada a comparação do reforço de raiz dos cordões para duas granulometrias distintas do Fluxo 4. O Fluxo 4, quando refinado, atribuiu aos cordões reforço de raiz inferior ao fluxo de granulometria grosseira (0,72 contra 3,37 mm). A possível causa é maior calor consumido da poça pelos grãos refinado (maior área superficial). Mas não se pode dessacar também o efeito da maior compactação do fluxo refinado, o que indiretamente também requer mais calor da poça para se fundir. É importante lembrar nessa análise que a fusão do fluxo no lado oposto do arco difere da fusão do fluxo no lado do arco, como em soldagem SAW, que tem ainda calor do arco.

A redução é expressiva, o que leva a acreditar que a redução da granulometria atribui um efeito benéfico para a geometria do cordão. Além de um reforço de raiz menor, o fluxo refinado também atribuiu uma menor dispersão dos resultados, configurando uma maior qualidade na regularidade do cordão de acordo com os critérios utilizados nesse trabalho. Esse resultado demonstra que, apesar de não interferir na velocidade de soldagem máxima, a granulometria do fluxo tem uma interferência significativa sobre a geometria da raiz.

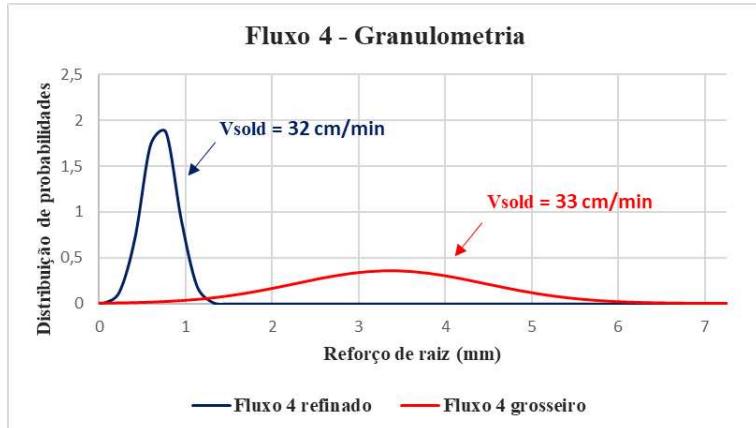


Figura 4.12 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições do reforço de raiz ao longo do cordão na  $V_{smáx}$  para o Fluxo 4 com granulometria grosseira e refinada

Na Figura 4.13 é apresentada a comparação do reforço de raiz alcançado para duas aberturas de raiz distintas depositando na  $V_{smáx}$ . De acordo com a distribuição Gaussiana dos resultados das amostras, a abertura de junta menor favorece uma menor reforço de raiz assim como uma menor variação dos resultados. É importante ressaltar que ambos os cordões foram realizados com relação entre volume depositado e volume da junta semelhantes (1,1 e 1,0).

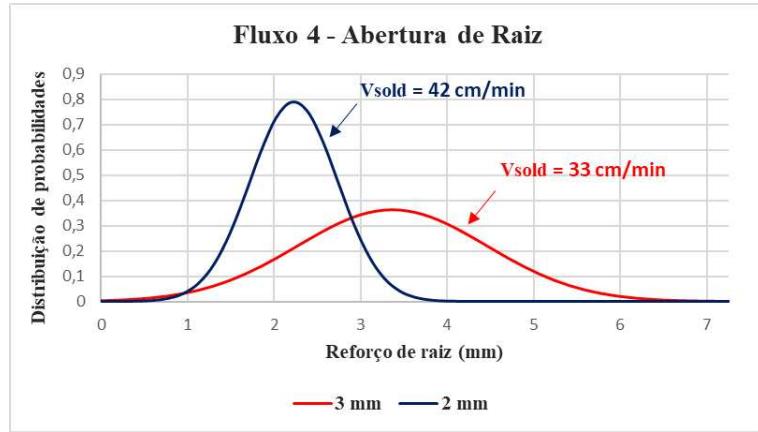


Figura 4.13 – Curva da distribuição normal dos resultados de medições no reforço de raiz ao longo do cordão na  $V_{smáx}$  para duas aberturas de junta: 3 e 2 mm

#### 4.4 – Análise dos resultados da largura máxima da altura do reforço da raiz

Após a avaliação obtenção dos dados para reforço de raiz, foi avaliada a largura máxima da altura do reforço da raiz do cordão. A distribuição gaussiana da altura de reforço é mostrada na Figura 4.14 – Curva da distribuição normal das medições da largura máxima da altura do reforço da raiz ao longo do cordão em 10 seções distintas, enquanto a Tabela 4.5 apresenta os resultados da média, desvio padrão e CV das seções analisadas. É importante ressaltar que a largura máxima da altura do reforço da raiz foi medida nas mesmas seções que o reforço de raiz.

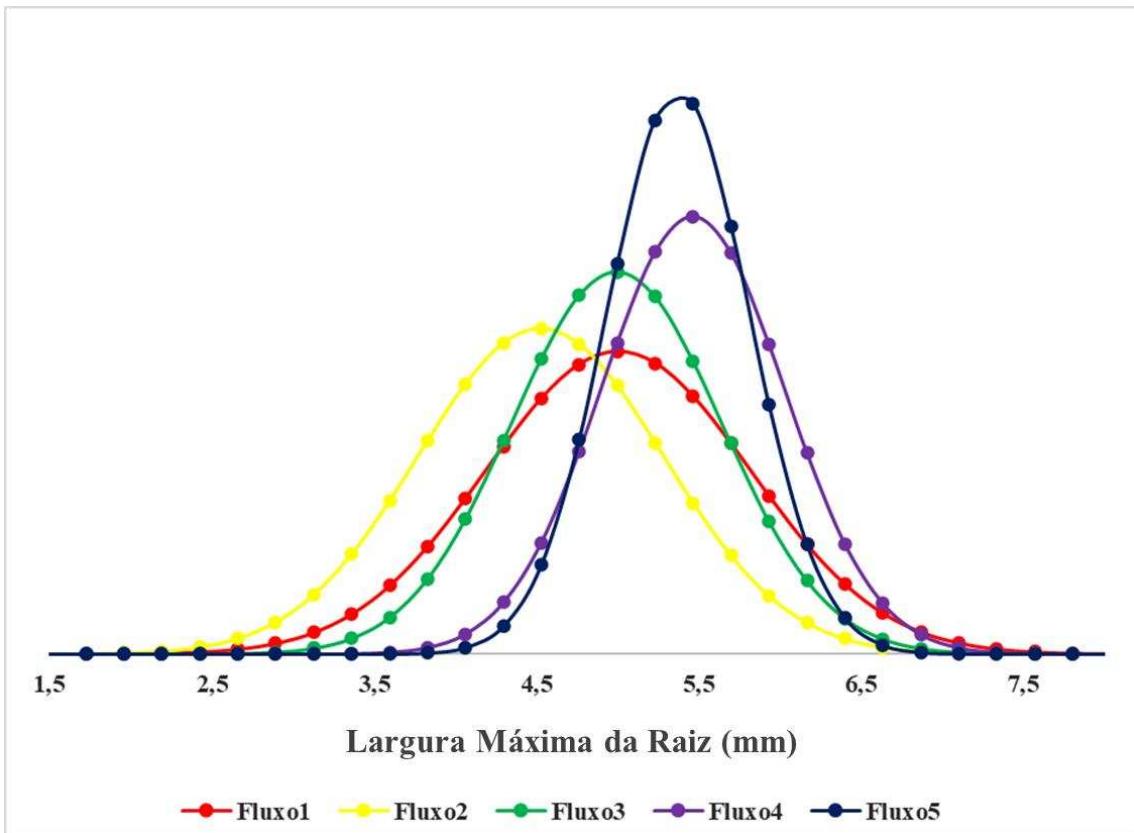


Figura 4.14 – Curva da distribuição normal das medições da largura máxima da altura do reforço da raiz ao longo do cordão em 10 seções distintas

Tabela 4.5 - Dados estatísticos do grupo para máxima velocidade de soldagem, onde:  $\bar{x}_{lr}$  = média da largura máxima do reforço de raiz;  $s_{lr}$  = desvio padrão amostral; CV = coeficiente de variância; e  $n_{rr}$  = número de seções avaliadas

Fluxo	$\bar{x}_{lr}$ (mm)	$s_{lr}$ (mm)	CV	n
Fluxo 1	5,0	0,4	8%	30
Fluxo 2	4,5	0,5	12%	30
Fluxo 3	5,0	0,5	9%	30
Fluxo 4	5,4	0,5	9%	30
Fluxo 5	5,7	0,4	7%	30

De acordo com a curva de distribuição gaussiana é observado que o Fluxo 2 atribuiu uma menor largura máxima à raiz, enquanto os fluxos 4 e 5 apresentaram maior largura. Esse resultado será estatisticamente validado por mais rodadas de testes de hipótese, dessa vez para

as médias de largura máxima da altura do reforço da raiz do cordão onde a hipótese nula é as largura máxima ser estatisticamente iguais. Os resultados dos testes de hipóteses estão dispostos na Tabela 4.6. Quanto à dispersão de largura máxima ao longo do cordão, a curva gaussiana o Fluxo 2 apresentou maior dispersão (curva achatada), enquanto o Fluxo 5 apresenta a menor dispersão (curva esbelta). É importante citar que a irregularidade da largura acompanhou o IB dos fluxos, onde o fluxo mais ácido gerou maior irregularidade e o mais ácido se mostrou mais regular. Estes resultados também foram evidenciados por Junior (2014). Esse resultado é confirmado pelo CV dos dois fluxos apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados dos testes de hipótese para média da largura máxima de raiz para cada fluxo avaliado  
(Continua)

Hipótese	Resultado
$H_0: LR2 = LR2$ $H_1: LR1 > LR2$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: LR1 = LR3$ $H_1: LR1 \neq LR3$	Hipótese nula aceita
$H_0: LR1 = LR4$ $H_1: LR1 < LR4$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: LR1 = LR5$ $H_1: LR1 < LR5$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: LR2 = LR3$ $H_1: LR2 < LR3$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: LR2 = LR4$ $H_1: LR2 < LR4$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: LR2 = LR5$ $H_1: LR2 < LR5$	Hipótese nula rejeitada

(Conclusão)

Hipótese	Resultado
$H_0: LR3 = LR4$ $H_1: LR3 < LR4$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: LR3 = LR5$ $H_1: LR3 < LR5$	Hipótese nula rejeitada
$H_0: LR4 = LR5$ $H_1: LR4 < LR5$	Hipótese nula rejeitada

De acordo com os resultados do teste de hipótese foram obtidas as relações de máxima largura de raiz para cada fluxo utilizado, sem apresentar conflitos estatísticos. De forma resumida, o Fluxo 5 promoveu maior largura máxima e menor irregularidade dessa largura ao longo do cordão. Quando comparamos esse resultado junto ao resultado de reforço, observou-se um resultado semelhante para regularidade do cordão (também o menor CV do grupo). Dessa forma, o Fluxo 5 foi o fluxo que atribuiu melhor regularidade do cordão. O Fluxo 4 é o próximo em termos de largura máxima e a segunda pior irregularidade (9 %), porém possui o pior resultado de regularidade da altura da raiz (33 %). Esse fluxo foi o que promoveu a maior velocidade de soldagem. Os fluxos 3 e 1 apresentaram a mesma média de largura máxima e regularidade semelhante. O Fluxo 2 atribuiu a menor média de largura máxima de raiz. O Fluxo 2 também promoveu a menor altura de reforço. Esse resultado pode ser atrelado a um melhor preenchimento da junta a confecções com esse fluxo, mantendo a maior parte da poça dentro das paredes da junta. É importante destacar que o Fluxo 2 conferiu a maior irregularidade de largura ao longo das seções (12 %), e tinha conferido a segunda maior irregularidade para reforço (27 %).

#### 4.5 – Análise dos resultados do índice de convexidade da raiz

Entende-se que cordões mais largos demonstram uma maior tendência de molhabilidade sob a raiz. Porém, cordões largos com uma altura relativa grande ainda apresentariam uma alta convexidade. Dessa forma, foi calculado também o índice de convexidade da raiz do cordão. Esse índice foi calculado por meio da razão entre a reforço de raiz e sua respectiva largura. Cordões menos convexos também conferem maior qualidade, visto que reduzem a possibilidade de a raiz atuar como um concentrador de tensões e representam um menor espalhamento da gota. Os resultados do índice de convexidade estão demonstrados na Figura 4.15.

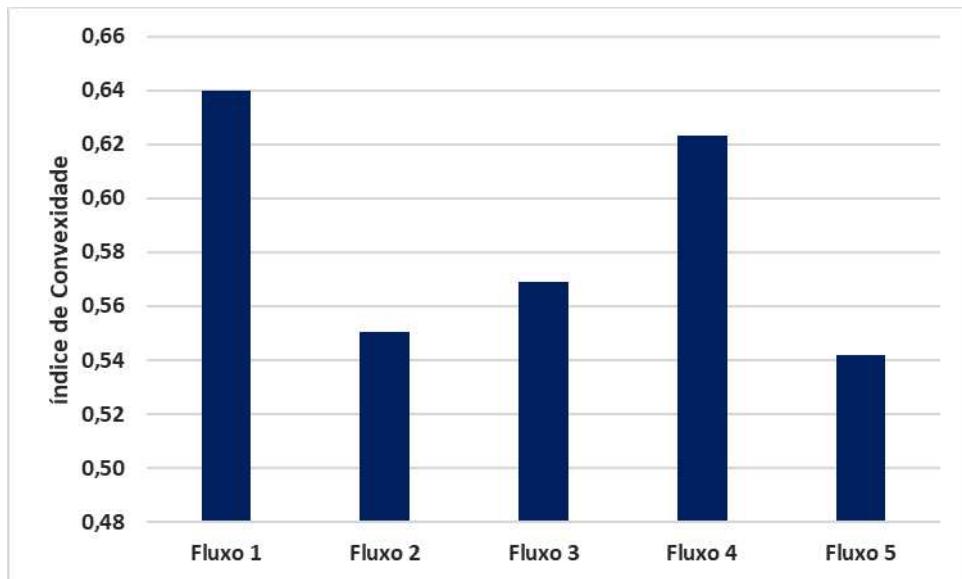


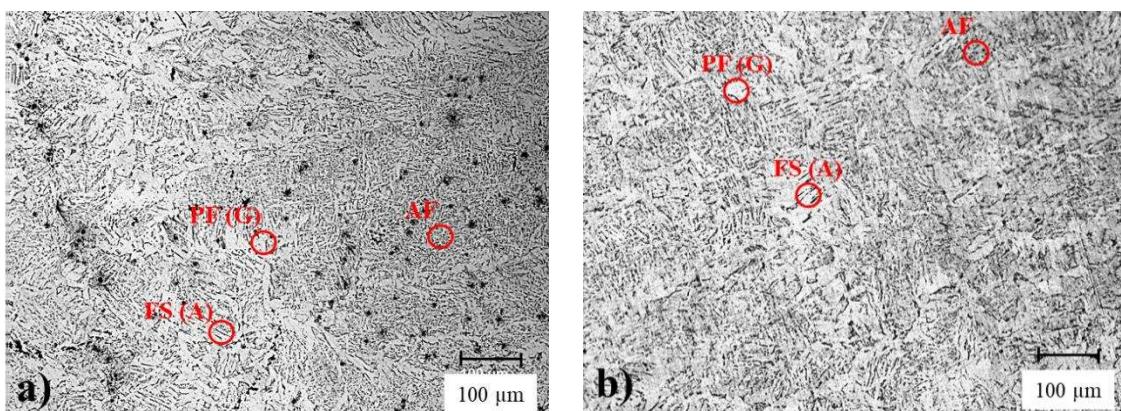
Figura 4.15 – Índice de convexidade do cordão em função do fluxo

O Fluxo 2 apresentou bons resultados para largura máxima e reforço de raiz, e os resultados do índice de convexidade demonstram que esse fluxo apresentou melhor espalhamento sob a raiz. Porém, o Fluxo 2 apresentou os maiores resultados para o coeficiente de variação, demonstrando assim uma alta irregularidade da raiz quando comparado aos demais fluxos. O Fluxo 5 também atribuiu bons resultados quanto à convexidade e a maior largura máxima obtida. Os resultados de coeficiente de variação tanto para largura máxima quanto para a reforço de raiz foram satisfatórios, e estatisticamente só demonstrou reforço de raiz maior que o Fluxo 2. O Fluxo 3 também apresentou os baixos valores de índice de convexidade, porém apresentou resultados insatisfatórios para regularidade da reforço de raiz. O Fluxo 4 apresentou um dos maiores índices de convexidade

e o maior valor de irregularidade da altura do cordão. Além disso, pode-se afirmar que ele atribui reforço de raiz estatisticamente maior que o Fluxo 2. Por fim, o Fluxo 1 apresentou o pior resultado para índice de convexidade e satisfatório para os demais itens avaliados. Para esse fluxo, também se pode afirmar que ele atribui reforço de raiz estatisticamente maior apenas que o Fluxo 2.

#### 4.6 – Análise qualitativa da seção transversal da raiz

A partir deste ponto, foram avaliadas características qualitativas dos cordões obtidos com as diferentes composições químicas propostas. O primeiro fator analisado foi o efeito do fluxo sobre a microestrutura da zona fundida do passe de raiz. Durante a análise por microscopia óptica não foram identificadas diferenças significantes entre as microestruturas obtidas para as diferentes composições de fluxo. Na Figura 4.16, é possível identificar uma microestrutura composta majoritariamente por ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)), de acordo com a nomenclatura do International Institute of Welding (IIW). Segundo IIW DOC IX-1533-88 (1988), essas são umas das três fases mais comuns identificáveis por microscopia óptica em aço carbono ferrítico. As três fases identificadas eram esperadas visto que são fases comuns em aços carbono baixa liga. Desse modo, não se pode afirmar que as diferentes composições de fluxo ocasionaram alteração da microestrutura no interior do cordão, ou seja, não houve reações significativas fluxo-poça de fusão.



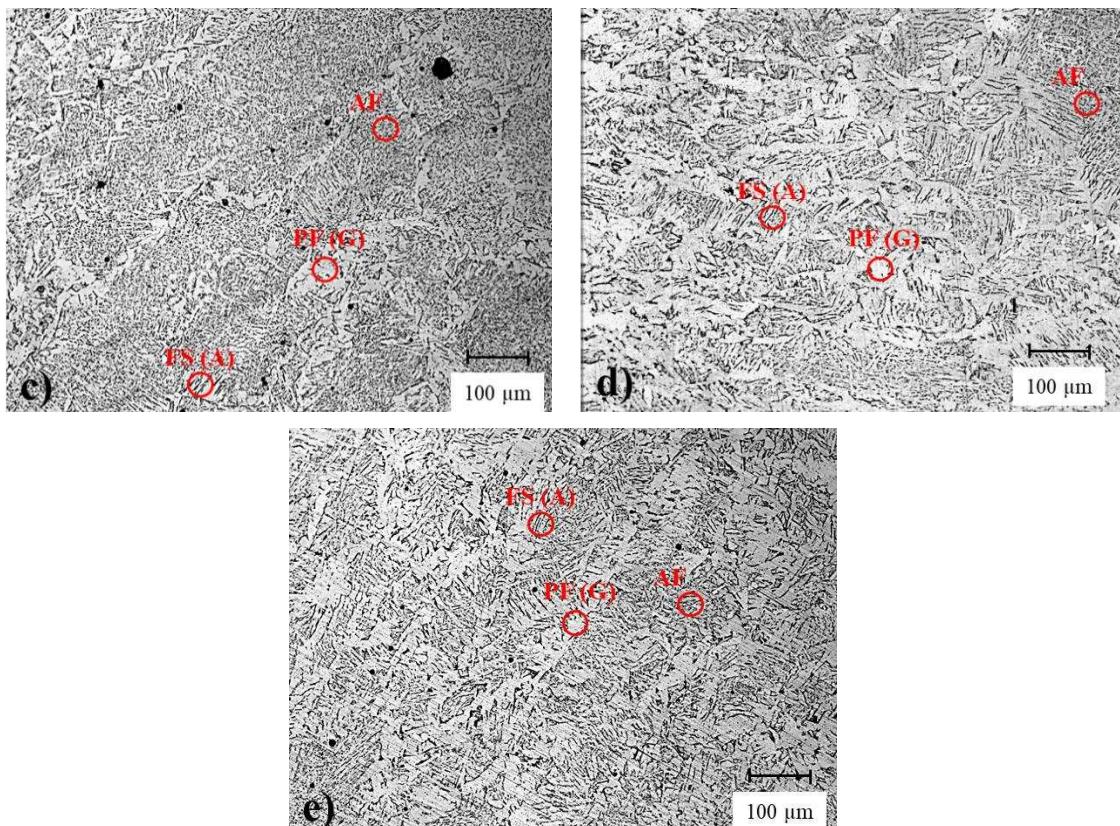


Figura 4.16 – Microestrutura típica no centro da raiz do cordão utilizadas para validação do efeito do fluxo sobre a microestrutura da zona fundida do passe de raiz: (a) Fluxo 1; (b) Fluxo 2; (c) Fluxo 3; (d) Fluxo 4; e (e) Fluxo 5, onde AF representa ferrita acicular, PF(G) ferrita de contorno de grão e FS(A) ferrita de segunda fase alinhada

Para explorar mais a fundo o efeito da composição do fluxo sobre a microestrutura obtida, foram analisadas as regiões de interface entre o fluxo e o cordão, onde se esperaria haver maior intensidade da reação escória-metal (lembrando-se que o calor da poça, e não o do arco, que estaria ativando essa reação). A Figura 4.17 apresenta as imagens obtidas também constituídas majoritariamente por ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)). Sabe-se que a microestrutura das soldas de aços ao carbono e manganês após os processos de soldagem protegidos por fluxo se desenvolve a partir da transformação da austenita e é governada pela energia de soldagem e ciclos térmicos impostos (calor imposto), a taxa de remoção de calor pela junta e fluxo na face da raiz e composição química da poça de fusão.

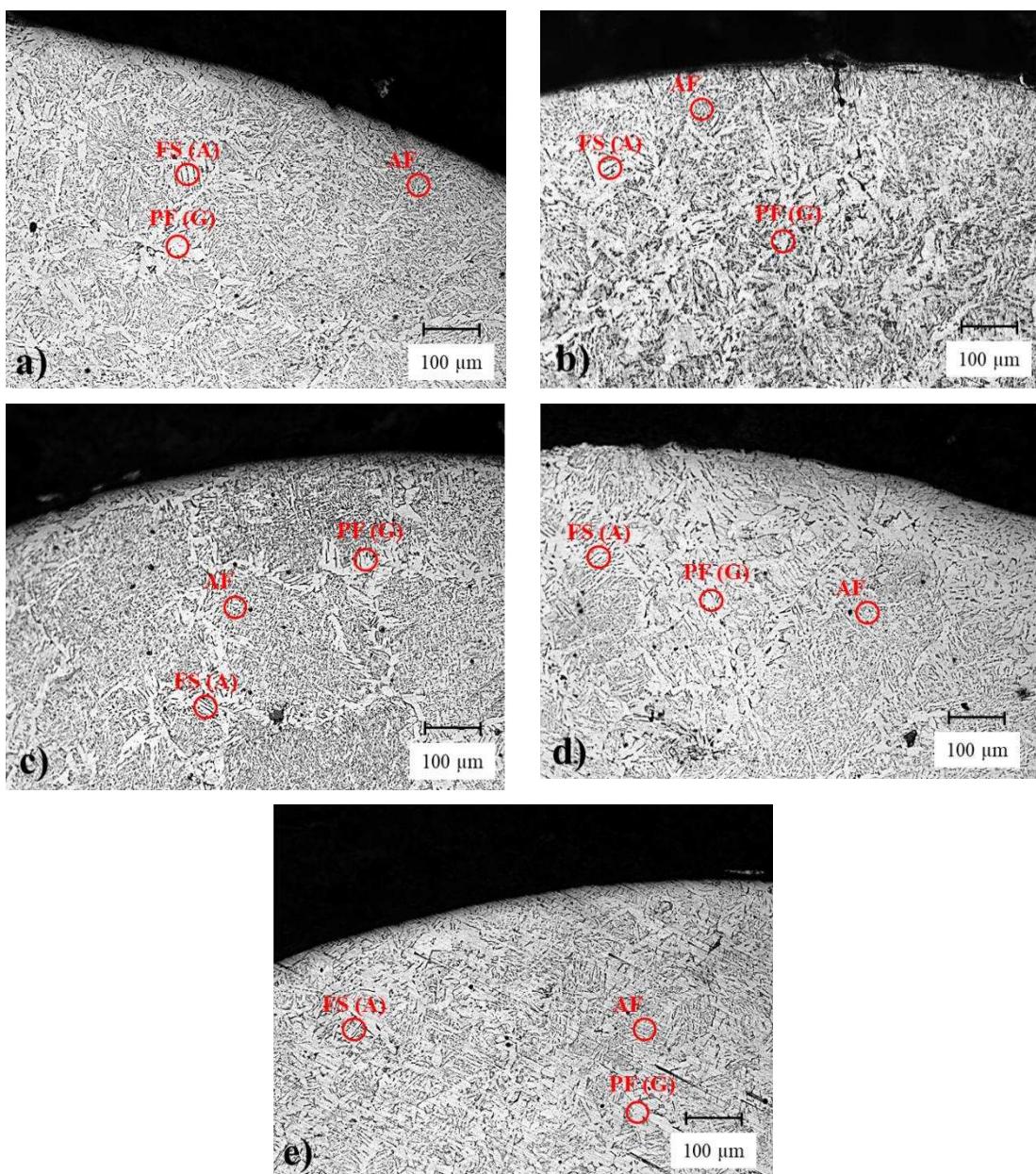


Figura 4.17 – Microestrutura típica na interface entre a raiz do cordão e a escória utilizadas para validação do efeito da reação escória-metal (para facilitar a visualização, as figuras estão invertidas em 180°): (a) Fluxo 1; (b) Fluxo 2; (c) Fluxo 3; (d) Fluxo 4; e (e) Fluxo 5, onde AF representa ferrita acicular, PF(G) ferrita de contorno de grão e FS(A) ferrita de segunda fase alinhada. Microestruturas ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita de segunda fase alinhada (FS(A))

A energia de soldagem empregada nos testes realizados pode ser considerada constante, visto que os fatores determinantes apresentados na seção 2.1 não sofrem grande variação para cada teste proposto. Desse modo, a influência dessa variável pode ser ignorada

no presente trabalho. O ciclo térmico da soldagem, consequência do calor imposto, que por sua vez tem proporcionalidade com a energia de soldagem, pode ser caracterizado como a variação da temperatura ao longo do tempo ao qual está submetido a poça. Esse ciclo térmico possui quatro características que o determinam: temperatura máxima; período de permanência acima da temperatura de transformação; velocidade de aquecimento; e velocidade de resfriamento. É razoável acreditar que os cordões confeccionados foram submetidos a ciclos térmicos semelhantes, visto que foram confeccionados na mesma condição em um único ciclo. A composição química dos materiais utilizados também é constante, visto que o mesmo material de base e metal de adição foram utilizados em todos os testes. Ficaria então a possibilidade de haver efeito do fluxo sobre a retirada de calor da poça e a modificação da composição da poça pelas reações escória-metal. Poderia ser considerada alguma alteração da taxa de transferência de calor dos diferentes fluxos empregados. Porém, não foram identificadas microestruturas divergentes ao que era esperado para este material para nenhum fluxo utilizado. Este é um resultado semelhante ao de outros autores que utilizaram misturas com diferentes índices de basicidade sob a raiz durante a soldagem de aços ferríticos, como Junior (2014) e Mendonça (2017).

Finalmente, durante a avaliação das macrografias das seções, se observou a presença de porosidades em algumas amostras analisadas. Os fluxos 2 e 5 apresentaram a presença de descontinuidades nos cordões, conforme demonstrado na Figura 4.18.

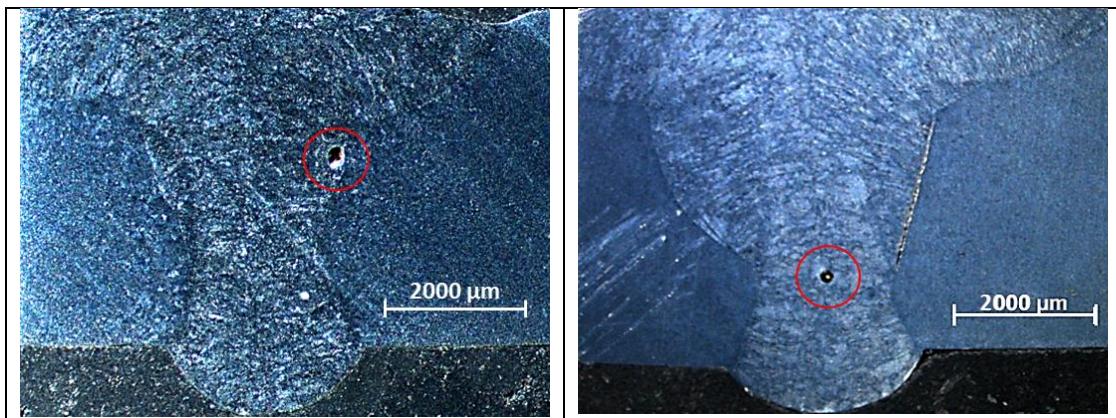


Figura 4.18 – Presença de descontinuidade no cordão (a) do ensaio 137 fluxo2 e (b) ensaio 149 Fluxo 3

## CAPÍTULO V

### DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Baseado nos resultados obtidos nesse estudo, alguns conhecimentos importantes para a aplicação do suporte de raiz moldável ficaram potencialmente disponíveis. Porém, é essencial que se faça a relação desses resultados com as propriedades de cada fluxo avaliado, para substanciar as conclusões.

Os fluxos utilizados foram arbitrariamente ordenados quantitativamente na Tabela 5.1 em função das principais características relacionadas ao escopo deste trabalho (essas características foram mais detalhadamente apresentadas nos capítulos anteriores). Para facilitar o entendimento, essas informações estão dispostas numericamente de forma crescente, onde 1 é o menor grau e 5 o maior.

Tabela 5.1 – Tabela resumo com uma ponderação arbitrária da caracterização dos fluxos

Propriedade	Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 3	Fluxo 4	Fluxo 5
Tamanho dos grãos	1	2	3	3	3
Basicidade	3	1	2	4	5
Temperatura de fusão	1	4	3	4	2

*Informações obtidas a partir das Tabelas 3.1 e 3.2*

Para se comparar o efeito de diferentes fluxos e obter os conhecimentos alvos (objetivo do trabalho), primeiro é necessário estabelecer e demonstrar a base de comparação.

Scotti e Ponomarev (2014), ao explicar a formação do cordão no processo MIG/MAG, citam que a geometria do cordão sofre grande influência da pressão exercida sobre a poça durante o processo de soldagem. Como a resultante dessa pressão (conforme explicado no Capítulo II) é consequência direta da corrente ( $I_m$ ) e do momentum das gotas, essa última também dependente de  $I_m$  (para um mesmo arame, gás e comprimento livre do eletrodo), manter a  $I_m$  constante nos experimentos realizados com diferentes fluxos possibilita manter a pressão o mais constante possível entre os diferentes fluxos. Desta forma, pela Figura 5.1 – Corrente média se soldagem para cada fluxo testado na condição de máxima velocidade de soldagem ( $V_{alim} = 6$  m/min, gás de proteção = 98% Ar + 2 % O<sub>2</sub>, vazão do gás de proteção = 18 l/min, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, abertura de raiz = 3 mm, fonte operando no modo tensão constante, percebe-se ter se mantido a corrente média em valores similares nos experimentos (com confidencialidade estatística alta, considerando o desvio padrão). É importante ressaltar que os experimentos que estão sendo discutidos e cujos dados de corrente média são apresentados na Figure 5.1 foram depositados com a máxima velocidade de soldagem para cada fluxo, obtidas no Capítulo III e com resultados apresentados no Capítulo IV.

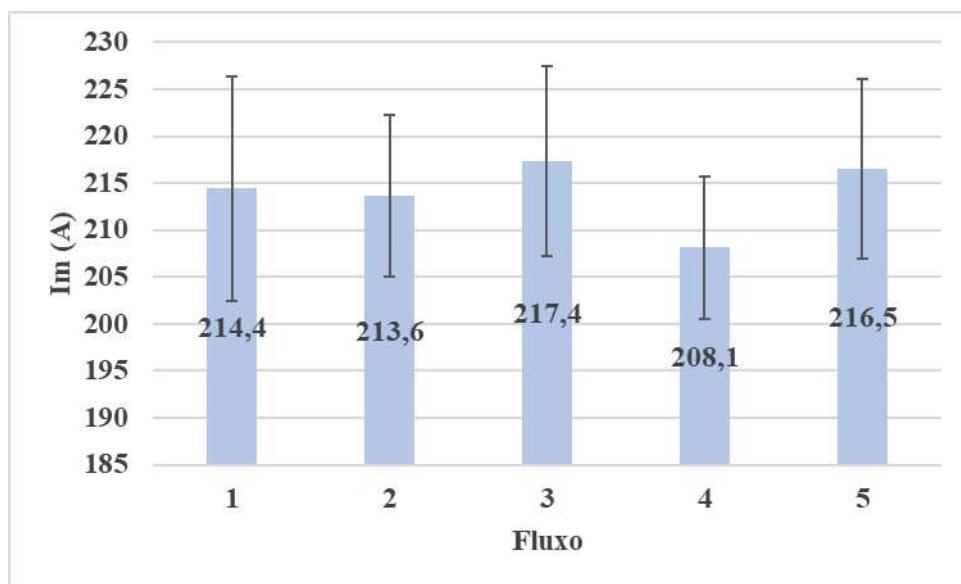


Figura 5.1 – Corrente média se soldagem para cada fluxo testado na condição de máxima velocidade de soldagem ( $V_{alim} = 6$  m/min, gás de proteção = 98% Ar + 2 % O<sub>2</sub>, vazão do gás de proteção = 18 l/min, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, abertura de raiz = 3 mm, fonte operando no modo tensão constante)

Outro ponto de importante na abordagem da base de comparação é que, como consequência das correntes de soldagem médias similares, as energias em soldagem resultantes do processo também apresentaram intensidades similares, mesmo não se mantendo a velocidade de soldagem diferentes. Essa informação se faz importante pois, conforme visto no Capítulo II, há uma íntima relação entre a energia de soldagem e a penetração máxima do cordão, principalmente quando o aumento da velocidade de soldagem não atua mais na região de efeito da interposição da poça e passa a atuar na região onde o efeito da energia de soldagem se sobressai. A comparação entre as energias de soldagem obtidas nos experimentos para máxima velocidade de soldagem estão disponíveis na Figura 2.9, onde podem ser observadas intensidades similares entre as soldas com diferentes fluxos.

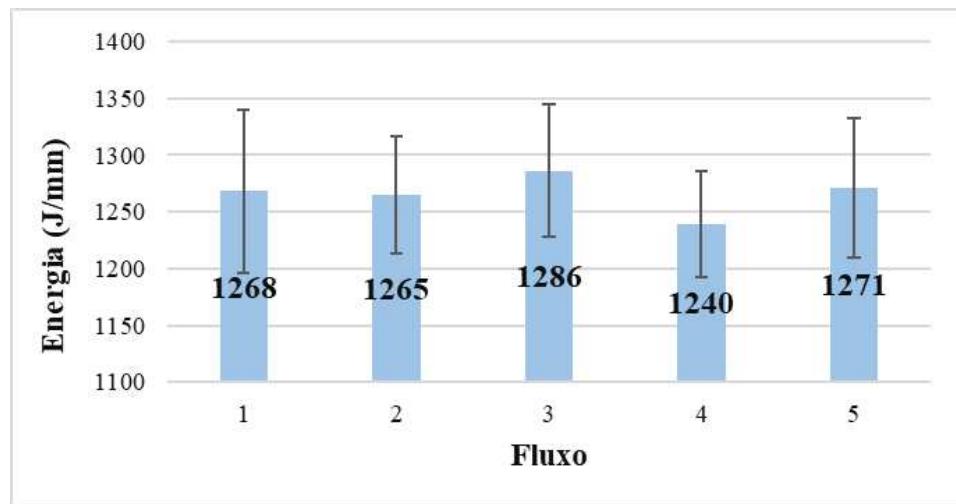


Figura 5.2 – Energia de soldagem por unidade de comprimento para cada fluxo testado na condição de máxima velocidade de soldagem (Valim = 6 m/min, gás de proteção = 98% Ar + 2 % O<sub>2</sub>, vazão do gás de proteção = 18 l/min, arame AWS ER70S-6 1,2 mm, fonte operando no modo tensão constante)

Outra base de comparação importante é a relação entre volume total da junta e volume depositado para cada fluxo utilizado. Como as velocidades máximas utilizadas no experimento apresentado de casa fluxo foram diferentes e se constatou uma forte relação entre volume depositado e ocorrência de perfuração da poça, a Tabela 5.2 apresenta a razão volume depositado/volume da junta para cada fluxo testado. O volume depositado é calculado a partir da velocidade de alimentação, diâmetro do arame velocidade de soldagem. Importante

destacar que o volume da junta é constante (ver Fig. 3.7), visto que neste momento estão sendo discutidos apenas os resultados obtidos para máxima velocidade de soldagem com os 5 fluxos avaliados, para demais parâmetros constantes.

Tabela 5.2 – Razão entre o volume depositado e o volume total da junta para os 5 fluxos testados sob a máxima velocidade de soldagem para cada fluxo e abertura de junta de 3 mm

Parâmetro	Fluxo 1 (Vs =31 cm/min)	Fluxo 2 (Vs =31 cm/min)	Fluxo 3 (Vs =32 cm/min)	Fluxo 4 (Vs =33 cm/min)	Fluxo 5 (Vs =32 cm/min)
Volume depositado/ Volume da junta	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0

Tendo em vista que os fenômenos físicos associados à geometria foram mantidos em uma relação praticamente constante, entende-se que os diferentes resultados estarão relacionados com as características físico-químicas dos fluxos utilizados (Tabela 5.1).

Para avaliar o desempenho das diferentes composições de fluxo, foram utilizados alguns critérios de avaliação. O primeiro critério foi determinar se a composição dos fluxos teria ou não influência sobre a máxima velocidade de soldagem possível para depositar um mesmo cordão dentro do chanfro (passe de raiz sobre suporte de raiz de fluxo). Antes de se fazer a discussão dos resultados quanto a este critério, deve-se ressaltar que quando avaliado do ponto de vista de máxima velocidade de soldagem, não se pode estatisticamente afirmar que um dos fluxos atribuiu maiores capacidades de produção. Isso porque, foi identificada uma região de variabilidade dos resultados (Capítulo III). Dessa forma, para um mesmo fluxo, apesar de haver sido identificada uma máxima velocidade de soldagem (após três experimentos sem perfuração), a velocidade ainda poderia ser aumentada resultando em cordões sem perfuração. Porém esse resultado era variável e não ocasionava repetibilidade. Após o tratamento estatístico, foi identificado que não há diferença significativa entre as máximas velocidades de soldagem, para o número de experimentos realizados e nível de significância empregado. Dessa forma, entende-se que possivelmente a composição do fluxo utilizado na confecção do suporte de raiz moldável não teria impacto sobre a capacidade de produção do processo.

Todavia, é importante destacar que, no sentido prático, os experimentos realizados para avaliar o efeito de fluxos com diferentes características sobre a máxima velocidade de soldagem possível (Capítulo IV) usaram apenas como velocidades máximas as velocidades

que com certeza não haveria perfuração. Isso porque a intenção era justamente avaliar se as características do fluxo afetariam os outros critérios de avaliação na condição de máxima produção de cada fluxo. Na Tabela 5.2 está apresentada a velocidade de soldagem utilizada na confecção dos 3 passes de raiz com a velocidade máxima alcançada com cada fluxo (tirado da Tabela 3.3). Sob essa condição, de uma forma geral, pode-se dizer que a composição do fluxo utilizado na confecção exerce um impacto moderado sobre a capacidade de produção de passes de raiz com o processo MIG/MAG e utilizando suporte de raiz de fluxo. O Fluxo 4 apresentou a maior velocidade de soldagem, antecedido pelos fluxos 3 e 5. O que esses fluxos têm em comum são as suas granulometrias mais grosseiras que o Fluxo 2 e 1 que apresentaram a menor velocidade. O Fluxo 4 quando refinado ocasionou uma breve redução da velocidade de soldagem máxima (de 33 cm/min para 32 cm/min).

A influência do tipo de fluxo sobre as características geométricas do cordão (altura de raiz) é o segundo critério estabelecido para avaliação do desempenho dos fluxos. Os fluxos apresentaram diferentes desempenhos nesse sentido. Avaliando o desempenho quanto à reforço, os resultados demonstraram após o tratamento estatístico que apenas o Fluxo 2 atribuiu de fato reforços de raiz mais curtos. O Fluxo 2 apresentou um resultado abaixo do limite apresentado pelas normas AWS D1.1:2000 (1999) e DNV-OD-F101 (2012). O Fluxo 3 também apresentou um resultado de altura média abaixo do limite especificado, porém quando avaliada estatisticamente a dimensão do desvio padrão da irregularidade do cordão, esse fluxo extrapolou os limites especificados pela norma ao longo da sua seção transversal de forma significativa, diferente do Fluxo 2. É importante ressaltar que o Fluxo 2 é o fluxo mais ácido entre os fluxos utilizados. O próximo fluxo na escala de basicidade é o Fluxo 3.

O terceiro critério de avaliação foi a regularidade da altura de raiz. Esse parâmetro foi implementado para avaliar o quanto o cordão se demonstrou regular ao longo da sua seção. O Fluxo 4 apresentou o pior resultado dessa avaliação (cordões mais irregulares), enquanto o Fluxo 5 apresentou os melhores resultados (cordões mais regulares). Ambos os fluxos são básicos e apresentam índices de basicidade semelhantes, demonstrando que a basicidade do fluxo não é o único fato associado a esse critério. Porém, é importante citar que nos processos de soldagem onde se utiliza fluxo para proteção do cordão, o índice de basicidade exerce grande influência. Essa é uma demonstração de que o fluxo sob a raiz, sem ação direta do arco, confere resultados diferentes aos de processo de soldagem que utilizam fluxo como proteção. O Fluxo 4 e Fluxo 5 apresentam o mesmo tamanho de grão.

O quarto critério de avaliação dos efeitos dos fluxos foi índice de convexidade (IC). Como definido, o IC depende da reforço, mas também da largura máxima da altura do reforço da raiz. Quanto menos convexo a raiz, melhor do ponto de vista de concentração de tensão (possível de ser avaliado também pela reforço), como mais fácil se torna a destacabilidade do fluxo usado como suporte de raiz da raiz do cordão. Ou seja, uma raiz com pequena altura, mas com alta convexidade, pode significar problemas operacionais para retirada do suporte de raiz moldável. O Fluxo 5 apresentou os melhores resultados para IC, seguido pelo Fluxo 2. Uma observação interessante é que o Fluxo 2 resultou na menor largura máxima e altura de reforço que os demais para uma taxa de deposição semelhante. Desse modo, esse fluxo teria atribuído um maior preenchimento da junta para um único passe. Porém, o volume preenchido não foi medido durante o trabalho.

Quando analisados de forma geral, é observado que os resultados são interdependentes e dependem principalmente da composição e granulometria do fluxo. Para o critério de altura da raiz, o Fluxo 2 apresentou os melhores resultados. É importante destacar que o Fluxo 2 é o fluxo mais ácido entre os fluxos utilizados. Fluxos mais ácidos tendem a promover menor interação entre a poça e a escória, o que pode justificar uma maior sustentação da poça dentro da junta e a "perfuração" da escória formada. O Fluxo 3 é o próximo na escala de basicidade e a segunda menor altura de raiz obtida. De forma análoga, os fluxos 4 e 5 apresentam os piores resultados de altura de raiz e são os fluxos mais básicos entre os utilizados. O Fluxo 5 (mais básico) por sua vez, atribuiu melhor desempenho de regularidade da altura e convexidade da raiz ao longo do cordão. Junior (2014) também atribuiu em seu trabalho maior regularidade geométrica a cordões obtidos a partir de fluxos com composição básica. Nos processos de soldagem que utilizam fluxo como proteção do arco, fluxo mais ácidos proporcionam cordões menos convexos e com maior regularidade. Portanto deveria afetar o IC, mas não necessariamente a reforço e sua regularidade. Além disso, deve-se lembrar que esse comportamento dos fluxos ácidos é conhecido para a superfície do cordão, que é aquecido em muito mais altas temperaturas (calor do arco e do metal da poça). Já quando usado como suporte de raiz, o calor para fundir o fluxo e obter assim o efeito de moldador do fluxo, estará vindo só da peça. O fenômeno observado nos processos a arco que utilizam fluxo como proteção não foi observado da mesma forma neste estudo, se apresentando de forma contrária.

Os fluxos 4 e 5 apresentaram, respectivamente, o pior e melhor resultado de regularidade do cordão e convexidade. Esses dois fluxos são semelhantes nas características citadas, com exceção da temperatura de fusão. Segundo Kobayashi (1987), um fluxo de

menor ponto de fusão é favorável quanto à proteção, pois garante ficar líquido mais tempo durante o resfriamento. Mas a quantidade de fluxo fundido seria um fator principal (medido pela espessura da escória). Mas essa característica não depende da temperatura de fusão apenas, mas sim do calor sensível e latente da fusão do fluxo. Pode-se mencionar ainda a viscosidade e tensão superficial da escória líquida. Mas todas as propriedades do fluxo e da escória quando o fluxo se funde são difíceis de determinar e não estavam no foco do presente trabalho. Além disso, a propriedade mais significativa neste caso não seria o ponto de fusão, mas sim a capacidade do fluxo de retirar calor da poça. Esta é uma característica difícil de medir e que estaria intimamente relacionada também à granulometria do fluxo, não apenas a sua composição.

Outro resultado importante é a geometria obtida com o Fluxo 4 refinado quando comparado ao Fluxo 4 grosso. Houve uma grande redução da altura de raiz (de 3,4 mm para 0,7 mm), porém houve um breve aumento do coeficiente de variação (de 19% para 27%) e a redução significativa da largura máxima (de 5,2 mm para 3,4 mm). Ushio, Sadek, Morsy (1993) também demonstraram resultados com cordões mais irregulares quando utilizados fluxos de granulometria mais refinada. Quanto à relação entre largura máxima e reforço de raiz, assim como no Fluxo 2 a redução da altura veio acompanhada da redução da largura, o que pode significar um aumento do volume depositado nos limites da junta. É importante destacar que o Fluxo 4, para ambas as granulometrias, foram realizados para razão volume depositado/volume da junta praticamente constantes. O índice de convexidade do fluxo refinado também apresentou resultados similares, com um breve aumento. Esse fenômeno pode ser justificado pela maior capacidade de sustentação do fluxo refinado, que agiu mais efetivamente em impedir a perfuração da poça além dos limites da junta devido a maior demanda de calor para fundir o material nestas características físicas devido a sua maior compactação.

A Tabela 5.3 apresenta de forma resumida a análise das contribuições de cada fluxo no atendimento dos critérios de aceitabilidade ou desempenho de cada fluxo. Os resultados também foram classificados como melhores (5) ou piores (1), de acordo com os critérios apresentados ao longo desse capítulo. O primeiro critério de avaliação é a altura do reforço da raiz e foi considerado qual fluxo proporciona reforços de raiz mais curtos. Porém, é importante relembrar que conforme citado no capítulo III, um reforço de raiz de até 3 mm é aceitável. Deste modo, como o Fluxo 2 foi o único fluxo que atribuiu valores médios abaixo de 3 mm (com confiabilidade estatística comprovada) este é o único fluxo que recebe a maior

nota neste critério. Enquanto isso, apesar do Fluxo 3 também apresentar um resultado aceitável, o teste de hipótese demonstrou que este fluxo tenta a atribuir maiores reforços de raiz do que o Fluxo 2. Por fim, o Fluxo 1, Fluxo 4 e Fluxo 5 não atribuíram resultados aceitáveis. A convexidade é uma característica associada ao reforço e largura da raiz. Para este critério a pontuação foi distribuída do menor ao maior índice de convexidade, onde o menor índice representa o melhor resultado. A regularidade da altura do reforço da raiz foi pontuada da mesma forma que a convexidade, onde uma maior regularidade (menor CV) representa o melhor resultado. Quanto aos critérios de microestrutura e capacidade de produção, nenhum fluxo atribuiu melhor ou pior resultado para estas avaliações. Desse modo, esses dois critérios foram pontuados com 2,5 pois não exercem influência na seleção do fluxo (positiva ou negativa), e se apresentam de forma neutra na avaliação.

Tabela 5.3 – Tabela resumo dos resultados obtidos para os 5 fluxos testados

(Continua)

Característica	Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 3	Fluxo 4	Fluxo 5
Altura do reforço da raiz	1	5	3	1	1
Convexidade	1	4	3	2	5

(Conclusão)

Característica	Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 3	Fluxo 4	Fluxo 5
Regularidade da altura do reforço da raiz	4	2	3	1	5

Microestrutura/Inclusão	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Capacidade de produção	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<b>Quantificação</b>	<b>11</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>9</b>	<b>16</b>

*Informações obtidas das Tabelas 4.1 e 4.5 e Figura 4.13*

Como para os critérios avaliados o maior resultado é o melhor, o fluxo com o maior resultado ao realizar o somatório das notas obtidas apresenta um melhor conjunto de propriedades. A partir da tabela resumo e discussões apresentadas é possível determinar que os fluxos 5 e 2 são os fluxos que possuem características que apresentaram maiores vantagens operacionais em sua utilização com suporte de raiz. Porém nenhum fluxo foi satisfatório em todos os aspectos avaliados. Deste modo, foram definidos pesos para cada critério de acordo com a sua importância e possibilidade de manipulação. O reforço de raiz, por exemplo, apesar de ser um critério restritor baseado em normas, foi observado neste trabalho que a redução da granulometria favorece a redução do reforço de raiz. Do mesmo modo, o reforço de raiz pode também ser reduzido por meio do ajuste dos parâmetros de soldagem (conforme capítulo II, subseção 2.3). Enquanto isso, a convexidade do reforço está diretamente relacionada ao reforço de raiz, sofrendo também positivamente os efeitos citados para o critério anterior. É importante citar que os fluxos que atribuíram menor reforço não necessariamente resultaram na menor convexidade, por isso a importância de avaliar estes critérios individualmente. Porém sabe-se que a redução do reforço ocasiona consequentemente a redução da convexidade. Por fim, a regularidade está intimamente relacionada a probabilidade do reforço de raiz se manter uniforme e não ultrapassar o limite definido. Este critério é o critério mais atribuído ao efeito fluxante, não havendo possibilidade de manipulá-lo positivamente de outra forma. Por estes motivos citados, foram atribuídos arbitrariamente diferentes pesos para os critérios avaliados. A Tabela 5.4 – Tabela resumo dos resultados obtidos para os 5 fluxos testados após aplicação dos pesos definidos apresenta os pesos citados na coluna sombreada, assim como a nota final da contribuição de cada critério após a ponderação.

Tabela 5.4 – Tabela resumo dos resultados obtidos para os 5 fluxos testados após aplicação dos pesos definidos

Característica	Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 3	Fluxo 4	Fluxo 5	Peso
Altura do reforço da raiz	0,5	2,5	1,5	0,5	0,5	<b>0,5</b>
Convexidade	0,5	2	1,5	1	2,5	<b>0,5</b>
Regularidade da altura do reforço da raiz	4	2	3	1	5	<b>1</b>
Microestrutura/Inclusão	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	<b>1</b>
Capacidade de produção	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	<b>1</b>
<b>Quantificação</b>	<b>10</b>	<b>11,5</b>	<b>11</b>	<b>7,5</b>	<b>13</b>	-

Pode-se então dizer que dos fluxos avaliados o Fluxo 5 apresentou os melhor resultado, enquanto o Fluxo 4 apresentou o pior. Porém, outros critérios poderiam ser estabelecidos para melhor classificar as propriedades favoráveis, como a capacidade de suportar um maior volume de material depositado nos limites da junta e destacabilidade da escória. A destacabilidade da escória depende da diferença de contração entre o fluxo e o metal. Esse último não foi medido quantitativamente, porém durante a execução dos experimentos, se constatou uma maior facilidade do Fluxo 4 e Fluxo 5 (fluxos mais básicos) em produzir escória mais fáceis de destacar. Tal fato é até certo ponto antagônico, mas já explicado acima. Júnio (2014) encontrou resultados semelhantes em seu trabalho.

Finalmente, avaliando-se os resultados de forma global, o Fluxo 5 apresenta as propriedades embutidas com o maior potencial de utilização em suporte de raiz de fluxo, que

inclui os suporte de raiz moldáveis. O Fluxo 5 ainda apresenta potencial significativo de melhor resultado de altura do reforço da raiz através da possibilidade de redução da granulometria. Deste modo, de acordo com os critérios avaliados neste trabalho exploratório, para utilização em suporte de raiz deve-se priorizar fluxos que atribuem melhores resultados de regularidade da raiz. Sopõem-se que este efeito fluxante esteja intimamente relacionado com a composição química do fluxo. É importante destacar que a redução da granulometria influí negativamente na regularidade do reforço de raiz. O IB se mostrou importante do ponto de vista de reforço de raiz, onde fluxos ácidos levam em geral a um menor reforço de raiz. Do ponto de vista prático do que foi explorado neste trabalho, a granulometria é a característica mais imporantes dos fluxos utilizados como suporte de raiz visto que esta pode melhorar todos os critérios avariados, com exceção da microestrutura que não foi avaliada para menores granulometrias e capacidade de produção que também não é alterada.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi a avaliação de diferentes composições de fluxos para suporte de raiz moldável, buscando reunir os conhecimentos necessários para tornar viável a utilização dessa abordagem em soldagens de passe de raiz em processos de soldagem a arco com alta taxa de deposição. A partir das condições de realização deste estudo, utilizando processo de soldagem MIG/MAG com transferência goticular, consumíveis e dispositivos utilizados, as conclusões abaixo são apresentadas:

1. A utilização do fluxo como suporte de raiz em condição de simulação do suporte de raiz moldável possibilitou a realização do passe de raiz em modo de transferência goticular, condição não viável sem a utilização do suporte de raiz;
2. Os fluxos com maiores tamanhos de grão atribuíram maior capacidade de produção (menor tempo para produção para um mesmo comprimento de cordão) quando comparado aos demais;
3. Os fluxos com menor índice de basicidade (ácidos) atribuem melhores resultados de altura do reforço da raiz. O fluxo mais ácido entre os avaliados foi o único que atribui reforço de raiz aceitável ( $< 3$  mm);
4. Os fluxos com menor índice de basicidade (ácidos) atribuem menor regularidade da largura do reforço, enquanto fluxo com maior índice de basicidade (básicos) atribuem maior regularidade;

5. O refinamento da granulometria atribui melhores resultados de altura do reforço da raiz (reforço menor e maior regularidade);

## CAPÍTULO VII

### SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Para aprimorar os resultados obtidos nesse trabalho, a sugestões abaixo são propostas para melhor entender e explicar alguns fenômenos:

- Uma vez que o Fluxo 5 apresentou os melhores resultados em alguns critérios, e um grande potencial de melhora nos demais, avaliar a influência de diferentes granulometrias sobre os critérios avaliados quando utilizado o Fluxo 5;
- Avaliar os resultados obtidos para geometria do cordão com diferentes composições de fluxos sob velocidade de soldagem constante;
- Investigar a influência da composição do fluxo sobre a formação de inclusões e ferrita acicular nos cordões ordões de forma mais elaborada, por exemplo, por meio de preparação de amostra sem ataque químico, auxiliado por microscopia eletrônica de varredura;
- Investigar e quantificar a influência do fluxo sobre a ocorrência de defeitos de descontinuidades;
- Conduzir experimentos para medir a destacabilidade da escória para experimentos realizados com os fluxos com diferentes índices de basicidade.

## CAPÍTULO VIII

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABSON, D. J.; PARGETER, R. J.; Factors Influencing As-deposited Strength, Microstructure, and Toughness of Manual Metal Arc Welds Suitable for C-Mn Steel Fabrications. **International Metals Reviews**. Vol. 31, n. 4, p.141-196, 1986. <https://doi.org/10.1179/imtr.1986.31.1.141>
- ADAMSON, A. W.; GAST, A. P. **Physical Chemistry of Surfaces**. 6 ed. New York: Wiley-Interscience, 1997. 808p.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Standard 1104**: Welding os Pipelines and Related Facilities. Oct. 2001.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1:2000**. Structural Welding Code – Steel. USA, 1999.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook: Welding Science and Technology**. 9 ed. Miami: American Welding Society, 2001. 985p.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook**: Welding, Brazing and Soldering. 10 ed. Ohio: ASM International USA, 1993. 1299p.
- ANDRADE, S.T. **Mapeamento do Processo Mecanizado de Soldagem Unilateral FCAW com Backing Cerâmico Aplicável no Passe de Raiz em Aço Carbono**. 2004. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ANNONI, R. **Lixiviação de Escórias de Soldagem a Arco Submerso Visando à Recuperação dos Óxidos de Alumínio e Titânio.** 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BISWAS, P.; MANDAL, R. N. Experimental Study on Square-Butt Single-Pass Single-Side Submerged Arc Welding of Low-Carbon Microalloyed Steel. **Journal of Ship Production and Design.** Vol.25, n.2, p.109-115, may 2009

BROWN, T.L; LEMAY, H.E.; BURSTEN, B.E; BURDGE, J.R. **Química: A Ciência Central.** 13. ed. Londres: Pearson, 2019. 1216p.

CAMARGO, L.G; DRECHSLER, M.F.; SANTOS, C.M.; CUNHA; T.V. Proposta e Análise de Dispositivo para Otimização do Dessacramento da Gota na Soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção.** Joinville, vol. 21, n.1, p. 83-91, mar.2016. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2101.08>

CARRY, H. B. **Modern Welding Technology.** New Jersey: Prentice Hall, 1979. 736p.

CIRINO, ANDRADE, L.M. **Análise Crítica de Formas de Onda de Corrente e Métodos de Controle no Processo MIG/MAG Pulsado CC/CA.** 2020. 206 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CRUZ, J.G.; TORRES, E.M; ALFARO, S.C.A. A methodology for modeling and control of weld bead width in the GMAW process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.** Brasília, vol.37, p.1529–1541, jan. 2015. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0299-8>

CUNHA, T.V.; BOHÓRQUEZ, C.E.N. Dispositivo para Medição da Pressão do Arco e sua Aplicação no Estudo do Processo TIG. **Soldagem & Inspeção.** São Paulo, vol.19, n.2, p.152–158, jun. 2014. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.07>

DAVID, S.A; DEBROY, T. Current Issues and Problems in Welding Science. **Science.** Vol. 257, p.497-502, 1992. <https://doi.org/10.1126/science.257.5069.497>

DET NORSKE VERITAS. **DNV-OS-F101:** Submarine Pipeline Systems. Aug. 2012.

DU, H.Y.; WEI, Y.H.; WANG, W.X.; LIN, W.M.; FAN, D. Numerical Simulation of Temperature and Fluid in GTAW-arc Under Changing Process Conditions. **Journal of Materials Processing Technology.** Vol.209, n.8,p. 3752-3765, Apr.2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.038>

- DUPONT, J. N.; MARDER, A.R. Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. **Welding Journal.** vol. 74, n. 12, p.406 – 416, dec. 1995.
- EVANS, G M. Microstructure and Properties of Ferritic Steel Welds Containing Al and Ti. **Welding Journal.** Vol. 75, n.8, p.25-29, aug.1 996.
- FAN, H. G.; SHI, Y. W. Numerical Simulation of the Arc Pressure in Gas Tungsten Arc Welding. **Journal of Materials Processing Technology.** vol.61, n.3, p.302-308, 1996. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02190-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02190-6)
- FARHAT, H. **Effects of Multiple Wires and Welding Speed on the Microstructures and Properties of Submerged Arc Welded X80 Steel.** 2007. 160 f. Thesis (masters). University of Saskatchewan, Saskatoon.
- GRONG, O.; KLUKEN, A. O. Microstructure and properties of steel weld metals. **Key Engineering Materials.** Vol. 69-70, p. 21-46, 1992. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.69-70.21>
- HAECK, R. J. **Apparatus for Backing Workpieces for Welding.** Nº US 3929270 (A). May, 1972.
- HIRATA, E. K.; BELTZAC, L. F.; OKIMOTO, P. C.; SCOTTI, A. Influência da Corrente sobre o Rendimento Bruto de Fusão em Soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção.** São Paulo, vol. 19, n.2, p.159-167, apr. 2014. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.08>
- INTERNATIONAL INSTITUTE OD WELDING. Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld Metals. France: IIW, IIW Doc, IX-1533-88, 1988.
- JAIRO, S. F.; GILBERTO A. M. **Curso de Estatística.** 6. ed. São Paulo: Atlas. 1996, 320p.
- JUNIOR, J. N. O. **Desenvolvimento de Suporte de Solda Cerâmico a Base de Resíduo de Escória de Soldagem.** 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- KANJILAL, P.; PAL, T.K.; MAJUMDAR, S.K. Combined Effect of Flux and Welding Parameters on Chemical Composition and Mechanical Properties of Submerged arc Weld Metal. **Journal of Materials Processing Technology.** Kolkata, v.171, p.223–231, jun. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.083>
- KEITH, R. G. **Film-Surface Welding Backup Tape.** Nº US 3929270 (A). Dec, 1975.

KIM, C. Back Bead Characteristics During Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions. **Materials Science Forum**. Switzerland, vol. 654-656, p. 350-353, jun. 2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.350>

KIM, I.S.; BASU, A.; SIORES, E. Mathematical Models for Control of Weld Bead Penetration in the GMAW Process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. London, vol.12, n.6, p.393–401, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF01186927>

KINDERMANN, R. M.; SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. Desenvolvimento e Validação de Algoritmos para Emprego de Sensores na Soldagem Robótica Orbital do Passe de Raiz de Tubulações. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, vol. 20, n. 4, p. 391-402, dez. 2015. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2003.08>

KOBAYASHI, Y. **Influência da Composição do Revestimento de Eletrodos Básicos Sobre as Características Econôminas e Operacionais**. 1987. 157 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. . 2. ed. New York: John Willey & Sons, 2003. 2ed. 480 p.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2.ed. Ireland: Physics technologic, 1984. <https://doi.org/10.1088/0305-4624/15/2/I05>

LEE, T-K.; KIM, H. J.; KANG, B. Y. HWANG, S. K. Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds. **ISIJ International**. Vol.40, n.12, p.1260-1268, 2000. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.1260>

LEE, S. Y.; NA, S. J. A Numerical Analysis of a Stationary Gas Tungsten Welding Arc Considering Various Electrode Angles. **Welding Journal**. Vol.75, n.9, p. 169-279, sept. 1996.

LIN, M. L.; EAGAR, T. W. Pressures Produced by Gas Tungsten Arcs. **Metallurgical Transactions B**. Cambridge, v. 17, p. 601-606, sept. 1986. <https://doi.org/10.1007/BF02670227>

MACHADO, I.G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. 1.ed. Porto Alegre: 1996. 477p.

MALIM, V. Root Weld Formation in Modified Refractory Flux One-Sided Welding: Part 1 — Effect of Welding Variables. **Welding Journal**. Miami, vol. 80, p. 217-226, sept. 2001.

MANDAL, N. R.; MAITI, R. Study of Single Side Single Pass Submerged Arc Welding Using Reusable Backing Strip. **Science and Technology of Welding and Joining**. Vol. 10, n. 3, p. 319-324, 2005. <https://doi.org/10.1179/174329305X40633>

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q., **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008. 363 p.

MENDONÇA, S. V. S. O. **Suporte de Solda a Partir de Geopolimerização de Escória de Fluxo de Soldagem**. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense.

MIRANDA, E.C., SILVA, E.C.; MOTTA, M.F.; MIRANDA, H.C.; FARIA, J.P. Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, vol. 20, n.2, p.180-190, abr. 2015. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2002.06>

MODENESI, P.J.; MARQUES P.V.; SANTOS, D.B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 209p.

MODENESI, P.J.; NIXON, J.H. Arc Instability Phenomena in GMA Welding. **Welding Journal**. v.73, n.9, p.219-224, sept. 1994.

NGUYEN, T. C.; WECKMAN, D. C.; JOHNSON, D. A. The Discontinuous Weld Bead Defect in High-Speed Gas Metal Arc Welds. **Welding Journal**, v. 86, p. 360- 372, nov. 2007.

NGUYEN, T. C.; WECKMAN, D. C.; JOHNSON, D. A; KER, H.W. The Humping Phenomenon During High Speed Gas Metal Arc Welding. **Science and Technology of Welding and Joining**. v. 10, n. 4, p. 447-459, dec. 2013. <https://doi.org/10.1179/174329305X44134>

OLSON, D.; LIU, S.; FROST, R.; EDWARDS, G.; FLEMING, D. Nature and Behavior of Fluxes Used for Welding. **Welding, Brazing and Soldering**. ASM International, 1993. p. 55–63. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.a0001339>

PANIAGUA-MERCADO, A.M.; LOPEZ-HIRATA, V.M.; DORANTES-ROSALES, H.J.; ESTRADA, P.D.; DIAZ, V. Effect of TiO<sub>2</sub>-containing Fluxes on the Mechanical Properties and Microstructure in Submerged-Arc Weld Steels. **Materials Characterization**. Vol. 60, n.1, p.36-39, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.06.003>

PARANHOS, R. P. OLIVEIRA, J.N. **Suporte de Solda Produzido a Base de Resíduo de Escória de Fluxo de Soldagem**. Nº BR 102015010532-0. Depósito: Fev, 2015.

PÉPE, N.; EGERLAND, S.; COLEGROVE, P. A.; YAPP, D.; LEONHARTSBERGER, A.; SCOTTI, A. Measuring the Process Efficiency of Controlled Gas Metal Arc Welding Processes, **Science and Technology of Welding and Joining**. England, v.16, n.5, p.412-417, dec. 2011. <https://doi.org/10.1179/1362171810Y.0000000029>

QUINTINO, L.; LIKEVICH, O.; VILARINHO, L.; SCOTTI, A. Heat Input in Full Penetration Welds in Gas Metal Arc Welding (GMAW). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. London, vol. 68, p. 2833-2840, apr. 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4862-8>

REIS, R. P.; COSTA, A. L. G.; SILVEIRA, F. M.; MOTA, P. R.; SOUZA, R. J.; SCOTTI, A. Influência do Material de Base sobre o Rendimento de Fusão em Soldagem a Arco. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, vol. 16, n.4, p. 369–376, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000400008>

REIS, R. P.; SOUZA, D.; SCOTTI, A. Models to Describe Plasma Jet, Arc Trajectory and Arc Blow Formation in Arc Welding. **Welding in the World**. v. 55, p. 24-32, 2011. <https://doi.org/10.1007/BF03321283>

RODRIGUES, C. E. A. L. **Avaliação Cinemática e Dinâmica da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG**. 2007. 203 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SARMA, D. R.; KARASEV, A. V.; JÖNSSON, P. G.; On the Role of Non-Metallic Inclusions in the Nucleation of Acicular Ferrite in Steels. **ISIJ International**. Vol. 49, n.7, p. 1063-1074, 2009. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1063>

SCOTTI, A. SOUZA, D. **Cobrejunta Moldável Não Permanente para Soldagem, Aplicador de Cobrejunta e Método de Aplicação**. Nº BR 102012012324-0. Depósito: Mai, 2012. Publicação: Dez, 2014.

SCOTTI, A.; BATISTA, M. A.; ESHAGH, M. **Inaccuracy in Arc Power Calculation Through a Product of Voltage and Current Averages**. vol. 44, n.11, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03317-6>

SCOTTI, A.; MONTEIRO, L.S. Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, vol. 17, n.3, p. 271–277, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000300011>

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, p.1406-1413, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021>

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2014. 287p.

SCOTTI, A.; REIS, P. R.; LISKEVYCH, O. Modelo Descritivo do Fluxo de Calor em Soldagem a Arco Visando o Conceito de Calor Imposto Efetivo. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, v.17, n.2, p.166-172, mai. 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000200010>

SCOTTI, A.; RODRIGUES, C. E. A. L. (2009). Determination of the Momentum of Droplets Impinging on the Pool During Aluminium GMAW. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, v.14, n.4, p.336–343, dec. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242009000400008>

SILVA, C. C. **Revestimentos de Liga de Níquel Depositados pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio: Aspectos Operacionais e Metalúrgicos**. 2010. 326 f. Tese (Doutorado) –Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SKHABOVSKYI, I. **MIG/MAG RSSP (com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade) Visando Automação de Soldagem do Passe de Raiz em Tubulações**. 2014. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUZA, D. **Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana**. 2010. 169 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUZA, D.; RESENDE, A.; SCOTTI, A. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, vol.14, n.3, p. 192–198, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242009000300002>

TULIANI, S.; BONISZEWSKI, T.; EATON, N. Notch Toughness of Commercial Submerged Arc Weld Metal. **Welding Metal Fabrication**. vol. 37, 327–339, feb.1969

**TOKAR, A. Efeito dos Parâmetros de Pulsação no Processo TIG sobre a Formação da Poça de Fusão.** 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia..

USHIO, M.; SADEK, A. A.; MORSY, M. A. Welding of Thin Steel Plates Using Submerged Arc Welding Process. **Transactions of JWRI**. Osaka, vol.22, n.2, p.219-225, 1993.

**VARGAS AURES, J. E. Avaliação de Processos MIG/MAG Derivativos Utilizando-se Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação.** 2013. 151 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília..

**VIVIANI, A. B. Integração de um Sensor a Laser a um Manipulador Cartesiano de Soldagem para Seguimento Automático de Juntas.** 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

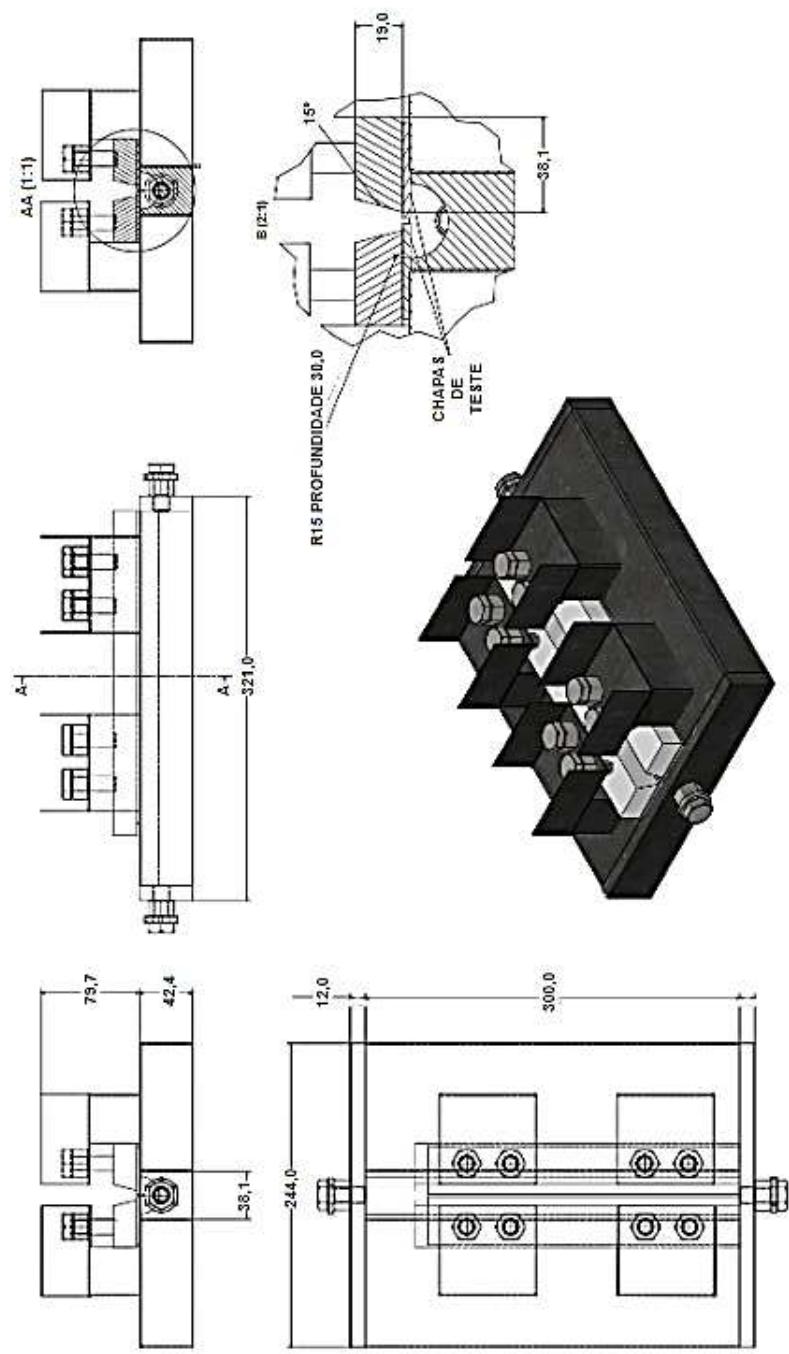
WU, C. S.; USHIO, M.; TANAKA, M. Analysis of the TIG Welding Arc Behavior. **Computational Materials Science**. vol.7, n.3, p. 308-314, july 1997. [https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(96\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(96)00048-1)

YAMANE. S.; YAMAMOTO, H.; ISHIHARA, T.; KUBOTA, T.; EGUCHI, K.; OSHUMA, K. Adaptive Control of Back Bead in V Groove Welding Without Backing Plate. **Science and Technology of Welding and Joining**. vol. 9, n.2, p.138-148, 2004. <https://doi.org/10.1179/136217104225017044>

**ZIBEROV, M. Avaliação da Pulsação Térmica para Controle da Poça de Fusão em Soldagem de Raiz com MIG/MAG Automatizado.** 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## APÊNDICE E ANEXOS

## APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO DO SUPORTE PARA SOLDAGEM



## APÊNDICE B – TESTES DE HIPÓTESE PARA MÁXIMA VELOCIDADE DE SOLDAGEM

1 - A velocidade máxima de soldagem 1 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 3?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp1 = Vp3 \\ H_1: Vp1 \neq Vp3 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n3 - 2 = 5 + 7 - 2 = 10$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{13} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_3}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_3^2}{n_3}}} = \frac{31,4 - 32,3}{\sqrt{\frac{0,5^2}{5} + \frac{1,4^2}{7}}} = -1,5$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $Vp1 = Vp3$  ou  $Vp1 \neq Vp3$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{13}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 10 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crt}$  (probabilidade 0,01 e 10 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 3,1693. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 10 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $1,5 < 3,1$ , não há evidência estatística de que as médias de  $Vp3$  seja maior ou menor que média de  $Vp1$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

2 - A velocidade máxima de soldagem 1 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp1 = Vp4 \\ H_1: Vp1 \neq Vp4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n4 - 2 = 5 + 10 - 2 = 13$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{14} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{31,4 - 32,6}{\sqrt{\frac{0,5^2}{5} + \frac{1,4^2}{7}}} = -2,5$$

Passo 4 - Comparaçao com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $Vp1 = Vp4$  ou  $Vp1 \neq Vp4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{14}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 13 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 13 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 3,0123. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 13 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $2,5 < 3,0$ , não há evidência estatística de que as médias de  $Vp4$  seja maior ou menor que média de  $Vp1$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

3 - A velocidade máxima de soldagem 1 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp1 = Vp5 \\ H_1: Vp1 \neq Vp5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n5 - 2 = 5 + 6 - 2 = 9$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{15} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_3}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_3^2}{n_3}}} = \frac{31,4 - 32,6}{\sqrt{\frac{0,5^2}{5} + \frac{1,3^2}{6}}} = -2,8$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $Vp1 = Vp5$  ou  $Vp1 \neq Vp5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{15}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 9 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 9 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 3,2498. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 9 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $2,8 < 3,2$ , não há evidência estatística de que as médias de  $Vp5$  seja maior ou menor que média de  $Vp1$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

4 - A velocidade máxima de soldagem 2 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 3?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp2 = Vp3 \\ H_1: Vp2 \neq Vp3 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n3 - 2 = 4 + 7 - 2 = 9$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{23} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_3}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_3^2}{n_3}}} = \frac{31,2 - 32,3}{\sqrt{\frac{0,5^2}{4} + \frac{1,4^2}{7}}} = -1,9$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $Vp2 = Vp3$  ou  $Vp2 \neq Vp3$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{23}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 9 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 9 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 3,2498. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 9 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $1,9 < 3,2$ , não há evidência estatística de que as médias de  $Vp3$  seja maior ou menor que média de  $Vp2$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

5 - A velocidade máxima de soldagem 2 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp2 = Vp4 \\ H_1: Vp2 \neq Vp4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n4 - 2 = 4 + 10 - 2 = 12$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{24} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{31,2 - 32,6}{\sqrt{\frac{0,5^2}{4} + \frac{1,4^2}{10}}} = -2,9$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $Vp2 = Vp4$  ou  $Vp2 \neq Vp4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{24}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 12 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 12 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 3,9545. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 12 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $2,9 < 3,9$ , não há evidência estatística de que as médias de  $Vp4$  seja maior ou menor que média de  $Vp2$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

6 - A velocidade máxima de soldagem 2 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp2 = Vp5 \\ H_1: Vp2 \neq Vp5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n5 - 2 = 4 + 6 - 2 = 8$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{25} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{31,2 - 33,0}{\sqrt{\frac{0,5^2}{4} + \frac{1,3^2}{6}}} = -3,1$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $Vp2 = Vp5$  ou  $Vp2 \neq Vp5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{25}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 8 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crt}$  (probabilidade 0,01 e 8 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 3,3554. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 8 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $3,1 < 3,5$ , não há evidência estatística de que as médias de  $Vp5$  seja maior ou menor que média de  $Vp2$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

7 - A velocidade máxima de soldagem 3 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp3 = Vp4 \\ H_1: Vp3 \neq Vp4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n3 + n4 - 2 = 7 + 10 - 2 = 15$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{34} = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_3^2}{n_3} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{32,3 - 32,6}{\sqrt{\frac{1,4^2}{7} + \frac{1,4^2}{10}}} = -0,5$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $Vp3 = Vp4$  ou  $Vp3 \neq Vp4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{34}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi

procurado na tabela da distribuição t de Student para 15 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 15 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,9467. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 15 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $0,5 < 2,9$ , não há evidência estatística de que as médias de  $Vp4$  seja maior ou menor que média de  $Vp3$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

8 - A velocidade máxima de soldagem 3 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp3 = Vp5 \\ H_1: Vp3 \neq Vp5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n3 + n5 - 2 = 7 + 6 - 2 = 11$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{35} = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_3^2}{n_3} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{32,3 - 33,0}{\sqrt{\frac{1,4^2}{7} + \frac{1,3^2}{6}}} = -1,0$$

Passo 4 - Comparaçao com o nível de significânci a:

Como o teste de hipótese do caso estudo é bilateral ( $Vp3 = Vp5$  ou  $Vp3 \neq Vp5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{35}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significânci a 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 11 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 11 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 3,1058. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 11 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $1,0 < 3,1$ , não há evidênci a estatística de que as médias de  $Vp5$  seja maior ou menor que média de  $Vp3$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

9 - A velocidade máxima de soldagem 4 é estatisticamente diferente ou igual a velocidade máxima de soldagem 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: Vp4 = Vp5 \\ H_1: Vp4 \neq Vp5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n4 + n5 - 2 = 10 + 6 - 2 = 14$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{45} = \frac{\bar{x}_4 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_4^2}{n_4} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{32,6 - 33,0}{\sqrt{\frac{1,4^2}{10} + \frac{1,3^2}{6}}} = -0,5$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é bilateral ( $Vp4 = Vp5$  ou  $Vp4 \neq Vp5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{45}$  ser maior que o resultado calculado, multiplicar esta probabilidade por 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 14 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 14 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,9768. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 14 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $1,0 < 3,0$ , não há evidência estatística de que as médias de  $Vp5$  seja maior ou menor que média de  $Vp4$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.



## APÊNDICE C – TESTES DE HIPÓTESE PARA LARGURA MÁXIMA DE RAIZ

1 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 1 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 2?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: LR4 = LR5 \\ H_1: LR4 < LR5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n3 + n2 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{12} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_1^2}{n_1}}} = \frac{3,2 - 2,5}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{0,7^2}{30}}} = 4,4$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $LR1 = LR2$  ou  $LR1 > LR2$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{12}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crt}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $4,4 > 2,4$ , não há evidência estatística de a média RR1 é maior que a média de RR2, dessa forma a hipótese nula é rejeitada.

2 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 1 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 3?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR1 = RR3 \\ H_1: RR1 \neq RR3 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n3 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{13} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_3}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_3^2}{n_3}}} = \frac{3,2 - 2,8}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{0,7^2}{30}}} = 2,1$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR1 = RR3$  ou  $RR1 > RR3$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{13}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,7. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $2,1 < 2,7$ , não há evidência estatística de que a média  $RR1$  seja diferente da média de  $RR3$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

3 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 1 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR1 = RR4 \\ H_1: RR1 > RR4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n3 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{14} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{3,2 - 3,4}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{1,1^2}{30}}} = -0,7$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR1 = RR4$  ou  $RR1 > RR4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{14}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $0,7 < 2,4$ , não há evidência estatística de que a média  $RR1$  seja diferente da média de  $RR4$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

4 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 1 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR1 = RR5 \\ H_1: RR1 > RR5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n3 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{15} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{3,2 - 3,1}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{0,5^2}{30}}} = 0,8$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR1 = RR5$  ou  $RR1 > RR5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{38}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $0,8 < 2,4$ , não há evidência estatística de que a média  $RR1$  seja diferente da média de  $RR5$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

5 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 2 é estatisticamente diferente ou igual que o reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 3?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR2 = RR3 \\ H_1: RR2 \neq RR3 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n3 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{23} = \frac{\bar{x}2 - \bar{x}3}{\sqrt{\frac{s2^2}{n2} + \frac{s3^2}{n3}}} = \frac{2,5 - 2,8}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{0,7^2}{30}}} = -2,0$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR2 = RR3$  ou  $RR2 > RR3$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{23}$  ser maior que o resultado calculado, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,7. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $2,0 < 2,7$ , não há evidência estatística de que a média RR2 seja diferente da média de RR3, dessa forma a hipótese nula é aceita.

6 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 2 é estatisticamente menor ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR2 = RR4 \\ H_1: RR2 < RR4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n4 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{24} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{2,5 - 3,4}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{1,1^2}{30}}} = -3,8$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR2 = RR4$  ou  $RR2 < RR4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{24}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} < -t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $-3,8 < -2,4$ , há evidência estatística de que a média RR2 seja menor que a média de RR4, dessa forma a hipótese nula é rejeitada.

7 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 2 é estatisticamente menor ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR2 = RR5 \\ H_1: RR2 < RR5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n5 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{25} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{2,5 - 3,1}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{0,5^2}{30}}} = -4,2$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR2 = RR5$  ou  $RR2 < RR5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{25}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi

procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} < -t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $-4,2 < -2,4$ , há evidência estatística de que a média RR2 seja menor que a média de RR5, dessa forma a hipótese nula é rejeitada.

8 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 3 é estatisticamente menor ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR3 = RR4 \\ H_1: RR3 < RR4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n5 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{34} = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_3^2}{n_3} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{2,8 - 3,4}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{1,1^2}{30}}} = -2,2$$

Passo 4 - Comparaçao com o nível de significânci a:

Como o teste de hipótese do caso estudo é unilateral ( $RR_3 = RR_4$  ou  $RR_3 < RR_4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{34}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significânci a 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} < -t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $-2,2 > -2,4$ , não há evidênci a estatística de que a média  $RR_3$  seja menor que a média de  $RR_4$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

9 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 3 é estatisticamente menor ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR_3 = RR_5 \\ H_1: RR_3 < RR_5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n3 + n5 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{35} = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_3^2}{n_3} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{2,8 - 3,1}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{0,5^2}{30}}} = -1,6$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR3 = RR5$  ou  $RR3 < RR5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{35}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} < -t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $-1,6 > -2,4$ , não há evidência estatística de que a média  $RR3$  seja menor que a média de  $RR5$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

10 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 4 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR4 = RR5 \\ H_1: RR4 > RR5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n4 + n5 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{45} = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_3^2}{n_3} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{2,8 - 3,1}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{0,5^2}{30}}} = 1,3$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR4 = RR5$  ou  $RR4 < RR5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{45}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $1,3 > 2,4$ , não há evidência estatística de que a média RR4 seja maior que a média de RR5, dessa forma a hipótese nula é aceita.



## APÊNDICE D – TESTES DE HIPÓTESE PARA REFORÇO DE RAIZ

1 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 1 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 2?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR1 = RR2 \\ H_1: RR1 > RR2 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n3 + n2 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{12} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_1^2}{n_1}}} = \frac{3,2 - 2,5}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{0,7^2}{30}}} = 4,4$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR1 = RR2$  ou  $RR1 > RR2$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{12}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crt}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $4,4 > 2,4$ , não há evidência estatística de a média RR1 é maior que a média de RR2, dessa forma a hipótese nula é rejeitada.

2 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 1 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 3?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR1 = RR3 \\ H_1: RR1 > RR3 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n3 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{13} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_3}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_3^2}{n_3}}} = \frac{3,2 - 2,8}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{0,7^2}{30}}} = 2,1$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR1 = RR3$  ou  $RR1 > RR3$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{13}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $2,1 < 2,4$ , não há evidência estatística de que a média  $RR1$  seja diferente da média de  $RR3$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

3 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 1 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR1 = RR4 \\ H_1: RR1 > RR4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n3 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{14} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{3,2 - 3,4}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{1,1^2}{30}}} = -0,7$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR1 = RR4$  ou  $RR1 > RR4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{14}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $0,7 < 2,4$ , não há evidência estatística de que a média  $RR1$  seja diferente da média de  $RR4$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

4 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 1 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR1 = RR5 \\ H_1: RR1 > RR5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n1 + n3 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{15} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{3,2 - 3,1}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{0,5^2}{30}}} = 0,8$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR1 = RR5$  ou  $RR1 > RR5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{38}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $0,8 < 2,4$ , não há evidência estatística de que a média  $RR1$  seja diferente da média de  $RR5$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

5 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 2 é estatisticamente diferente ou igual que o reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 3?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR2 = RR3 \\ H_1: RR2 \neq RR3 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n3 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{23} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_3}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_3^2}{n_3}}} = \frac{2,5 - 2,8}{\sqrt{\frac{0,6^2}{30} + \frac{0,7^2}{30}}} = -2,0$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR2 = RR3$  ou  $RR2 > RR3$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{23}$  ser maior que o resultado calculado, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,7. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$|t_{calc}| > t_{crit}(0,01; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $2,0 < 2,7$ , não há evidência estatística de que a média RR2 seja diferente da média de RR3, dessa forma a hipótese nula é aceita.

6 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 2 é estatisticamente menor ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR2 = RR4 \\ H_1: RR2 < RR4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n4 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{24} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{2,5 - 3,4}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{1,1^2}{30}}} = -3,8$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR2 = RR4$  ou  $RR2 < RR4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{24}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} < -t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $-3,8 < -2,4$ , há evidência estatística de que a média RR2 seja menor que a média de RR4, dessa forma a hipótese nula é rejeitada.

7 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 2 é estatisticamente menor ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR2 = RR5 \\ H_1: RR2 < RR5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n5 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{25} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{2,5 - 3,1}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{0,5^2}{30}}} = -4,2$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR2 = RR5$  ou  $RR2 < RR5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{25}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi

procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} < -t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $-4,2 < -2,4$ , há evidência estatística de que a média RR2 seja menor que a média de RR5, dessa forma a hipótese nula é rejeitada.

8 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 3 é estatisticamente menor ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 4?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR3 = RR4 \\ H_1: RR3 < RR4 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n2 + n5 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{34} = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_4}{\sqrt{\frac{s_3^2}{n_3} + \frac{s_4^2}{n_4}}} = \frac{2,8 - 3,4}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{1,1^2}{30}}} = -2,2$$

Passo 4 - Comparaçao com o nível de significânci a:

Como o teste de hipótese do caso estudo é unilateral ( $RR_3 = RR_4$  ou  $RR_3 < RR_4$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{34}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significânci a 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} < -t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $-2,2 > -2,4$ , não há evidênci a estatística de que a média  $RR_3$  seja menor que a média de  $RR_4$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

9 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 3 é estatisticamente menor ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR_3 = RR_5 \\ H_1: RR_3 < RR_5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n3 + n5 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{35} = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_3^2}{n_3} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{2,8 - 3,1}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{0,5^2}{30}}} = -1,6$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR3 = RR5$  ou  $RR3 < RR5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{35}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$t_{calc} < -t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $-1,6 > -2,4$ , não há evidência estatística de que a média  $RR3$  seja menor que a média de  $RR5$ , dessa forma a hipótese nula é aceita.

10 – O reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 4 é estatisticamente maior ou igual ao reforço de raiz médio alcançado pelo Fluxo 5?

Passo 1 – Definição das hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: RR4 = RR5 \\ H_1: RR4 > RR5 \end{cases}$$

Passo 2 – Definição dos graus de liberdade:

$$gl = n4 + n5 - 2 = 30 + 30 - 2 = 58$$

Passo 3 – Determinação da distribuição t-students:

$$t_{calc} = t_{45} = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_5}{\sqrt{\frac{s_3^2}{n_3} + \frac{s_5^2}{n_5}}} = \frac{2,8 - 3,1}{\sqrt{\frac{0,7^2}{30} + \frac{0,5^2}{30}}} = 1,3$$

Passo 4 - Comparação com o nível de significância:

Como o teste de hipótese do caso estudado é unilateral ( $RR4 = RR5$  ou  $RR4 < RR5$ ), é necessário calcular a probabilidade de que  $t_{45}$  ser maior que o resultado calculado, e dividir esta probabilidade 2, e comparar com o nível de significância 1 % (0,01). O valor foi procurado na tabela da distribuição t de Student para 58 graus de liberdade. A tabela está disponível para consulta no ANEXO A.

O valor de  $t_{crit}$  (probabilidade 0,01 e 58 graus de liberdade) encontrado na tabela foi 2,4. Para rejeitar a hipótese nula, a condição a seguir deve ser satisfeita:

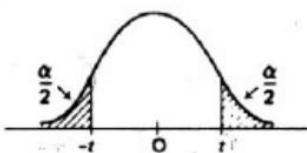
$$t_{calc} > t_{crit}(0,02; 58 \text{ graus de liberdade})$$

Resultado do teste de hipótese:

Como  $1,3 > 2,4$ , não há evidência estatística de que a média RR4 seja maior que a média de RR5, dessa forma a hipótese nula é aceita.

## ANEXO A – TABELA DA DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT

TABELA DA DISTRIBUIÇÃO t de STUDENT



$\varphi$	$\alpha$	0,50	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005
1	1,00000	2,4142	6,3138	12,706	25,542	63,657	127,32	
2	0,81650	1,6036	2,9200	4,3127	6,2053	9,9248	14,089	
3	0,76489	1,4226	2,3534	3,1825	4,1765	5,8409	7,4533	
4	0,74070	1,3444	2,1318	2,7764	3,4954	4,6041	5,5976	
5	0,72669	1,3009	2,0150	2,5706	3,1634	4,0321	4,7733	
6	0,71756	1,2733	1,9432	2,4469	2,9687	3,7074	4,3168	
7	0,71114	1,2543	1,8946	2,3646	2,8412	3,4995	4,0293	
8	0,70639	1,2403	1,8595	2,3060	2,7515	3,3554	3,8325	
9	0,70272	1,2297	1,8331	2,2622	2,6850	3,2498	3,6897	
10	0,69981	1,2213	1,8125	2,2281	2,6338	3,1693	3,5814	
11	0,69745	1,2145	1,7959	2,2010	2,5931	3,1058	3,4966	
12	0,69548	1,2089	1,7823	2,1788	2,5600	3,9545	3,4284	
13	0,69384	1,2041	1,7709	2,1604	2,5326	3,0123	3,3725	
14	0,692	1,2001	1,7613	2,1448	2,5096	2,9768	3,3257	
15	0,69120	1,1967	1,7530	2,1315	2,4899	2,9467	3,2860	
16	0,69013	1,1937	1,7459	2,1199	2,4729	2,9208	3,2520	
17	0,68919	1,1910	1,7396	2,1098	2,4581	2,8982	3,2225	
18	0,68837	1,1887	1,7341	2,1009	2,4450	2,8784	3,1966	
19	0,68763	1,1866	1,7291	2,0930	2,4334	2,8609	3,1737	
20	0,68696	1,1848	1,7247	2,0860	2,4231	2,8453	3,1534	
21	0,68635	1,1831	1,7207	2,0796	2,4138	2,8314	3,1352	
22	0,68580	1,1816	1,7171	2,0739	2,4055	2,8188	3,1188	
23	0,68531	1,1802	1,7139	2,0687	2,3979	2,8073	3,1040	
24	0,68485	1,1789	1,7109	2,0639	2,3910	2,7969	3,0905	
25	0,68443	1,1777	1,7081	2,0595	2,3846	2,7874	3,0782	
26	0,68405	1,1766	1,7056	2,0555	2,3788	2,7787	3,0669	
27	0,68370	1,1757	1,7033	2,0518	2,3734	2,7707	3,0565	
28	0,68335	1,1748	1,7011	2,0484	2,3685	2,7633	3,0469	
29	0,68304	1,1739	1,6991	2,0452	2,3638	2,7564	3,0380	
30	0,68276	1,1731	1,6973	2,0423	2,3596	2,7500	3,0298	
40	0,68066	1,1673	1,6839	2,0211	2,3289	2,7045	2,9712	
60	0,67862	1,1616	1,6707	2,0003	2,2991	2,6603	2,9146	
120	0,67656	1,1559	1,6577	1,9799	2,2699	2,6174	2,8599	
$\infty$	0,67449	1,1503	1,6449	1,9600	2,2414	2,5758	2,8070	

Fonte: FONSECA, S.J; MARTINS, G.A. (1996)