CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NAS CARACTERÍSTICAS DE CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS PELO PROCESSO MCAW COM ELETRODO ROTATIVO (MCAW-RE)

Guilherme Mastrange dos Santos Silveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores:
Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.
Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

Rio de Janeiro
Junho de 2020

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NAS CARACTERÍSTICAS DE CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS PELO PROCESSO MCAW COM ELETRODO ROTATIVO (MCAW-RE)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Guilherme Mastrange dos Santos Silveira

Banca Examinadora:

Presidente, Prof. Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc. (CEFET/RJ) (orientador)

Prof. Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc. (CEFET/RJ) (Coorientador)

Prof. Humberto Nogueira Farneze, D.Sc. (CEFET/RJ)

Prof. Matheus Campolina Mendes, D.Sc. (CEFET/RJ)

Prof. Valter Rocha dos Santos, D.Sc. (PUC-RIO)

Rio de Janeiro
Junho de 2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S587 Silveira, Guilherme Mastrange dos Santos
Efeito dos parâmetros de processo nas características de cordões de solda depositados pelo processo MCAW com eletrodo rotativo (MCAW-RE) / Guilherme Mastrange dos Santos Silveira — 2020.
82f : il.(algumas color.) , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2020.
Bibliografia : f. 78-82
Orientadores: Jorge Carlos Ferreira Jorge
Coorientador: Luís Felipe Guimarães de Souza.

1. Solda e soldagem. 2. Juntas soldadas. 3. Propriedades mecânicas. 4. Microestrutura. I. Jorge, Jorge Carlos Ferreira (Orient.). II. Souza, Luís Felipe Guimarães de Souza (Coorient.). III. Título.

CDD 671.52

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo privilégio da vida e saúde para buscar meus objetivos;

Aos meus pais, por todo o apoio e incentivo a quaisquer que fossem minhas escolhas e por me proporcionarem condições favoráveis ao meu desenvolvimento acadêmico;

À minha irmã Natália, por estar sempre ao meu lado e ser uma referência para mim;

Aos meus avós, fundamentais em minha formação como pessoa e por serem exemplos de inspiração;

À minha noiva Beatriz, pelo apoio e companheirismo durante todos os momentos desta caminhada;

Ao Professor Jorge Carlos Ferreira Jorge (D. Sc.) pela singular dedicação na orientação, ensinamentos e confiança depositada em mim;

Aos Professores Luís Felipe Guimarães de Souza (D. Sc.) e Matheus Campolina Mendes (D.Sc.), pela fundamental contribuição através do conhecimento técnico e realização dos experimentos no MEV;

Aos Engs. Jeferson Costa, Marcos Lobato e Walker Filho, pela experiência transmitida e por me auxiliar na realização de diversas etapas deste projeto;

Ao Laboratório de Materiais do Cefet (LAMAT) e a White Martins, pela integração e apoio ao desenvolvimento técnico e acadêmico, bem como por toda a infraestrutura oferecida para a realização deste trabalho;

Aos Técnicos do LAMAT, pela disponibilidade e auxílio na utilização dos equipamentos;

Ao Laboratório de Materiais do Centro Tecnológico do Exército (CTEx) pelo auxílio na realização da análise química dos materiais.

Aos demais amigos, que me acompanharam ao longo desta jornada.

RESUMO

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NAS CARACTERÍSTICAS DE CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS PELO PROCESSO MCAW COM ELETRODO ROTATIVO (MCAW-RE)

O processo MCAW com eletrodo rotativo (MCAW-RE) é uma variação do MCAW convencional, em que o arame-eletrodo do tipo tubular com alma metálica (*metal cored*) é submetido a um movimento de rotação ao longo de um diâmetro pré-estabelecido. Este processo foi desenvolvido para viabilizar a soldagem em chanfro reto e estreito, uma vez que este movimento de rotação permite ao arco elétrico alcançar regiões periféricas da parede chanfro, evitando a ocorrência de falta de fusão lateral. Por conseguinte, é possível obter ganhos de produtividade e redução de custos em relação ao processo GMAW convencional. No entanto, a literatura ainda é muito limitada sobre o efeito dos parâmetros de processo (frequência e diâmetro de rotação do eletrodo) nas características de juntas soldadas por este processo, o que justifica um estudo para melhor compreendê-los. O presente trabalho investiga a influência dos parâmetros de processo nas características geométricas, mecânicas e microestruturais de cordões de solda depositados pelo processo MCAW-RE sobre aço C-Mn da classe ASTM A 516 Grau 70, de forma a estabelecer critérios para a seleção adequada da combinação da frequência e do diâmetro médio de rotação do eletrodo para utilizar na soldagem de juntas. Para tanto, foram depositados cordões sobre chapa variando os parâmetros de processo segundo o planejamento fatorial 3^k, utilizando as frequências de rotação de 1500, 3000 e 5000rpm, e diâmetros de rotação de 3, 6 e 8mm. Os resultados mostraram que a melhor condição de soldagem foi obtida para uma frequência de 1500rpm e diâmetro médio de rotação de 3mm, com base na avaliação de parâmetros geométricos, tais como penetração, largura do cordão e diluição e das propriedades mecânicas e microestruturais do metal de solda e da zona termicamente afetada.

Palavras-chave: Processo MCAW com eletrodo rotativo (MCAW-RE), Frequência de rotação do eletrodo, diâmetro de rotação do eletrodo; Propriedades mecânicas, Microestrutura

ABSTRACT

EFFECT OF THE PROCESS PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF WELD BEADS OBTAINED BY THE MCAW WITH ROTATING ELECTRODE PROCESS (MCAW-RE)

The MCAW with rotating electrode process (MCAW-RE) is a variation of the conventional MCAW, in which the *metal cored* tubular wire is submitted to a rotational movement along a pre-established diameter. This process was developed to enable narrow gap welding, once the rotational motion of the electrode allows the electric arc to reach peripheral regions of the bevel, preventing lack of fusion on the sidewalls. As a result, it is possible to reduce welding costs and improve productivity compared to the conventional GMAW process. However, there are still few studies about the process, especially about the effect of the process parameters (frequency and diameter of electrode rotation) on the properties of welds obtained by MCAW-RE, which justifies the conduction of this study. The present work investigates the influence of the process parameters on the geometric, mechanical and microstructural characteristics of weld beads deposited by the MCAW-RE process on C-Mn steel of class ASTM A 516 Grade 70, in order to establish criteria for the proper selection of the rotation frequency and the rotation diameter of the electrode for further application in welding joints. For this, beads on plate were produced varying the process parameters according to the 3^k factorial design, using rotation frequencies equal to 1500, 3000 and 5000rpm, and rotation diameters equal to 3, 6 and 8mm. The results showed that the best welding condition was obtained by the combination of 1500rpm for frequency and 3mm for diameter, based on the evaluation of geometric parameters, such as penetration, bead width and dilution, and the mechanical and microstructural properties of the weld metal and the heat affected zone.

Keywords: MCAW with Rotating Electrode Process (MCAW-RE), Electrode Rotation Frequency, Electrode Rotation Diameter, Mechanical Properties, Microstructure.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO 13
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
II.1. O Processo GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE) 15
II.1.1. Características do Processo GMAW-RE 17
II.1.2. Distribuição térmica do Processo GMAW-RE 27
II.1.3. Efeito do ciclo térmico do GMAW-RE nas propriedades da ZTA 32
II.2. Processo GMAW com arame tubular de alma metálica (MCAW) 37
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS 44
III.1. Materiais 45
III.2. Procedimento de Soldagem 45
III.3. Ensaios Mecânicos 47
III.4. Ensaios Metalográficos 47
III.4.1 Aspectos Geométricos 48
III.4.1.1. Diluição 48
III.4.2. Caracterização Microestrutural 49
CAPÍTULO IV - RESULTADOS 50
IV1. Aspectos Geométricos 50
IV.1.1. Diluição 52
IV.1.2. Extensão Média da ZTA 52
IV.2. Ensaio de Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) 54
IV.2.1. Extensão da ZTA nos pontos de maior e menor dureza 56
IV.3. Caracterização Microestrutural 59
IV.3.1. Microscopia Óptica 59
IV.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 61
CAPÍTULO V - DISCUSSÃO 67
V.1. Aspectos Geométricos 67
V.1.1. Diluição 69
V.1.2. Extensão média da ZTA 70
V.2. Propriedades Mecânicas e Microestruturais 71
V.3. Seleção Preliminar dos Parâmetros de Processo 73
V.4. Procedimento de Análise e Seleção dos Parâmetros. 75
CONCLUSÕES 77
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 79

LISTA DE FIGURAS

Figura II. 1 - Tocha com efeito de rotação do eletrodo: a) Com bocal / b) Sem bocal (SILVEIRA, 2018). 15

Figura II. 2 - Esquema similar da tocha com eletrodo rotativo (adaptado de WANG et al., 2007) 16

Figura II. 3- Relação entre a regulagem do diâmetro médio de giro com o diâmetro de giro efetivo (adaptado do Spinarc operational manual, 2017). 17

Figura II. 4 – Representação das forças atuantes na transferência metálica da soldagem processo GMAW-RE (adaptado de SANTOS, 2019) 18

Figura II. 5 - Comparativo entre diâmetro de gota em função da frequência de rotação do eletrodo (adaptado de SANTOS, 2019) 19

Figura II. 6 - Gráfico exibindo o comportamento do diâmetro da gota em função da frequência de rotação do eletrodo (adaptado de SANTOS, 2019). 20

Figura II. 7 - Diâmetro da gota fundida em função da frequência de rotação (adaptado de WANG et al., 2007). 20

Figura II. 8 - Perfil de penetração em função da frequência de rotação 21

Figura II. 9 - Influência do eletrodo rotativo na geometria do cordão (adaptado de SRINIVASA RAO et al., 2004). 22

Figura II. 10 - Efeito do eletrodo rotativo na penetração lateral em chanfro reto 22

Figura II. 11 – Macrografia de junta soldada em chanfro estreito pelo GMAW convencional – (a) Passe único / (b) Multipasses (XU et al., 2017) 23

Figura II. 12 – Macrografia de junta soldada após a otimização dos parâmetros – (a) Passe único / (b) Multipasses (XU et al., 2017) 24

Figura II. 13 – Efeito da frequência na penetração, reforço e largura do cordão de solda (adaptado de SANTOS et al., 2018). 24

Figura II. 14 - Gráfico comparativo do perfil geométrico pela frequência de rotação (SILVEIRA, 2018) 25

Figura II. 15 - Transição do aspecto visual do cordão de solda quando soldado a 1.500rpm e 3.000rpm (SILVEIRA, 2018) 26

Figura II. 16 - Representação esquemática do modelo de Goldak (1984) 27

Figura II. 17- Representação do movimento rotativo do arame de soldagem (BAI et al, 2012) 28

Figura II. 18 – Simulação da Distribuição térmica na poça de fusão pelo processo GMAW-RE a uma frequência de 300rpm e os seguintes diâmetros de rotação: a) 0mm; b) 4mm; c) 6mm e d) 8mm 30

Figura II. 19 – Temperatura média do centro da poça em função do diâmetro de rotação (adaptado de BAI et al, 2012) 30

Figura II. 20 – Filmagem termográfica: distribuição da temperatura em função do diâmetro médio de giro. (a) convencional – 869ºC; (b) 1mm – 715ºC; (c) 2mm – 693ºC; (d) 4mm – 686ºC (SANTOS, 2019) 31

Figura II. 21 - Filmagem termográfica: distribuição da temperatura em função da frequência de rotação. (a) 500rpm – 839ºC; (b) 1.000rpm – 678ºC; (c) 1.500rpm – 636ºC; (d) 2.000rpm – 622ºC (SANTOS, 2019) 32

Figura II. 22 - Diagrama esquemático do comportamento dos ciclos térmicos para os processos de soldagem. (a) GMAW; (b) GMAW-RE (adaptado de GUO et al., 2011). 33

Figura II. 23 - Curvas de Repartição Térmica para os processo GMAW e GMAW-RE (adaptado de GUO et al., 2011) 33

Figura II. 24 - Distribuição microestrutural na ponta do entalhe Charpy-V (indicada pela seta) posicionado na ZTA das juntas soldadas. Ataque: nital 2%. (a) GMAW; (b) GMAW-RE (COSTA et al., 2019) 34

Figura II. 25 - Microestrutura da ZTA na região correspondente à ponta do entalhe do corpo-de-prova Charpy-V (COSTA et al., 2019) 34

Figura II. 26 - Gráfico relacionando a extensão da ZTA em função da frequência de rotação (adaptado de GARCIA, 2019) 35

Figura II. 27 - Localização das impressões de microdureza Vickers (GARCIA, 2019) 36

Figura II. 28 – Perfil dos cordões de solda produzidos por: a) GMAW; b) FCAW (ARAUJO, 2004) 37

Figura II. 29 - Rota de Fabricação de Arame Tubular (ARAUJO, 2004) 38

Figura II. 30 – Comparativo de custos para a posição 2F (PEDROSA, 2012) 40

Figura II. 31 – Comparativo de custos para a posição 3F (PEDROSA, 2012) 40

Figura II. 32 - Propriedades Mecânicas de metais de solda produzidos por MCAW (ZHANG et al., 2016) 42

Figura II. 33 - Energia Absorvida no ensaio de impacto Charpy-V (FARNEZE et al., 2010) 43

Figura III. 1 – Fluxograma de atividades 44

Figura III. 2 – Montagem dos equipamentos 46

Figura III. 3 - Posicionamento dos pontos de dureza (HV0,5) 47

Figura III. 4 - Representação da diluição em cordão de solda (Santos et. al, 2019); 48

Figura IV. 1 – Macrografia dos cordões depositados. Ataque: nital 2%. 51

Figura IV. 2 – Medidas da ZTA retiradas das macrografias dos cordões de solda 53

Figura IV. 3 - Mosaico da Extensão da ZTA nos pontos de maior e menos dureza 58

Figura IV. 4 – Microestrutura das amostras na região de maior dureza na RGGZTA (MO). Aumento: 1.000x. Ataque: nital 2%. 59

Figura IV. 5 – Microestrutura das amostras na região de menor dureza na RGGZTA (MO). Aumento: 1.000x. Ataque: nital 2%. 60

Figura IV. 6 - Microestruturas no metal de solda . Aumento: 1.000x. Ataque: nital 2%..... 60

Figura IV. 7 - Microestruturas RGGZTA nos pontos de menor e maior dureza obtidas por MEV. Aumento: 5000x. Ataque: nital 2%..... 62

Figura IV. 8 - Microestruturas do metal de solda nos pontos de menor e maior dureza obtidas por MEV. Aumento: 5.000x. Ataque: nital 2%. 63

Figura IV. 9 - Resultados da análise EBSD das amostras do metal de solda com D=3..... 65

Figura IV. 10 - Resultados comparativos de diferentes regiões da amostra 1 por EBSD. .. 66

Figura V. 1 - Influência dos parâmetros de processo nos aspectos geométricos dos cordões (largura, penetração e reforço) 68

Figura V. 2 – Relação do volume de metal de solda em função dos parâmetros de processo (frequência e diâmetro médio de rotação). 70

Figura V. 3 - Extensão média da ZTA em função da: (a) Frequência de Rotação; (b) Diâmetro médio de rotação. 71

Figura V. 4 – Maiores durezas obtidas das amostras de acordo com: (a) A posição do ponto de medição da dureza; (b) Frequência de rotação..... 72

Figura V. 5 - Valores de Dureza obtidos na ZTA e no MS em função da Frequência de rotação. 73

Figura V. 6 - Croqui de uma chapa com rasgo..... 76

LISTA DE TABELAS

Tabela II. 1 - Efeito dos Parâmetros de soldagem nas características do cordão solda (adaptado de GARCIA, 2019)..... 26

Tabela II. 2 - Resultado das medições de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$)..... 36

Tabela II. 3 – Comparativo entre os resultados das soldagens (LOBATO et al, 2015)..... 39

Tabela III. 1 - Composição química dos materiais..... 45

Tabela III. 2 - Parâmetros de Processo usados na Soldagem dos cordões 46

Tabela IV. 1 - Aspectos geométricos dos cordões depositados 50

Tabela IV. 2 – Cálculo da diluição dos cordões depositados..... 52

Tabela IV. 3 – Extensão média da ZTA em função dos parâmetros de processo 54

Tabela IV. 4 - Resultados dos ensaios de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) na ZTA..... 55

Tabela IV. 5 - Detalhamento das posições de maior e menor dureza ($HV_{0,5}$) na ZTA. 55

Tabela IV. 6 - Resultados dos ensaios de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) no MS. 56

Tabela IV. 7 - Detalhamento das posições de maior e menor dureza ($HV_{0,5}$) no MS..... 56

Tabela IV. 8 - Extensão da ZTA nos pontos de maior e menor dureza 57

Tabela V. 1 – Resumo de Fatores considerados para a seleção da amostra..... 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Intensidade de Corrente em Amperes
AM	Constituinte Austenita Martensita
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
B	Bainita
CAA	Contorno de Alto Ângulo
D.R.	Diâmetro médio de Rotação
EBSD	Electron backscatter diffraction
F.R.	Frequência de Rotação
FA	Ferrita Acicular
FCAW	Flux Cored Arc Welding
FP	Ferrita Primária
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GMAW-RE	Gas Metal Arc Welding – Rotating Electrode
HV	Dureza Vickers
J	Joule
M	Martensita
MB	Metal de Base
MCAW	Metal Cored Arc Welding
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
MS	Metal de Solda
ºC	Grau Celsius
Pcm	Parameter Crack Measurement
RGGZTA	Região de Grãos Grosseiros da ZTA
RPM	Rotações por minuto
TGE	Tamanho de Grão Efetivo
V	Tensão em Volts
ZTA	Zona Termicamente Afetada

CAPÍTULO I
INTRODUÇÃO

O principal método de fabricação utilizado nas indústrias para a união e produção de peças metálicas é a soldagem, pois permite a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material (MARQUES et al. 2016; MODENESI et al, 2012).

De maneira geral, a escolha do processo de soldagem dentre os diversos existentes, leva em consideração aspectos tais como a facilidade operacional e versatilidade de aplicação, seja para diferentes materiais, espessuras e/ou adequações ao meio, e, principalmente, a produtividade. Esta é uma forma de buscar uma maior competitividade no mercado, pois está relacionada à maior capacidade de produção e a redução de custos, sendo estas as principais motivações para o desenvolvimento cientifico e tecnológico, tanto por incentivo da indústria quanto para a área acadêmica (SCHWEDERSKY, 2011).

O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) possui destaque na indústria por apresentar diversos dos aspectos citados. Além de apresentar elevada produtividade, também permite a obtenção de juntas soldadas de boa qualidade. É caracterizado por possibilitar a soldagem em todas as posições, proporcionar altas taxas de deposição, altas velocidades de soldagem, baixo índice de respingos, fácil ajuste do perfil de penetração e facilidade de automatização (AWS WELDING HANDBOOK, 2015; KAH et al., 2014). Ademais, o mercado dispõe de um grande portfólio de consumíveis, gases de proteção, tochas e materiais em geral para a aplicação deste processo, o que facilita sua implantação. O GMAW é amplamente utilizado nas indústrias automotiva, naval e ferroviária, bem como na fabricação de equipamentos de médio e grande porte, como pontes rolantes, escavadeiras, tratores, vasos de pressão, entre outros (MARQUES et al. 2016; MODENESI et al., 2012).

Ao longo dos anos desenvolveram-se variações deste processo através de novos recursos tecnológicos, com o objetivo de melhoria de qualidade, produtividade e/ou redução de custos. Dentre eles podemos citar o CMT (*Cold Metal Transfer*) que tem a premissa de maior estabilidade da transferência metálica, a tecnologia *Rapidarc* para alta produtividade e o *Buried Arc* (ou Arco enterrado) para a melhoria da qualidade através de alta penetração e taxa de deposição (SANTOS et al., 2018).

Seguindo esta tendência da indústria metalmecânica, foi desenvolvido o GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE), uma variação ao GMAW convencional, em que uma tocha específica confere ao arame eletrodo um movimento de rotação, permitindo o

ajuste do sentido de giro, frequência e diâmetro médio de rotação, incluídos nos parâmetros de processo (PRASAD et al., 2018; WANG, 2007). Principalmente em virtude da aplicação destinada a chanfros estreitos (“Narrow Gap”), características vantajosas são apresentadas em termos de produtividade e custo. No entanto, a literatura disponível sobre as propriedades mecânicas e metalúrgicas de juntas soldadas pelo GMAW-RE ainda é muito limitada, o que justifica o desenvolvimento de uma pesquisa para seu melhor conhecimento (PRASAD et al., 2018; SANTOS et al., 2018, FILHO et al., 2019; COSTA et al., 2019).

O principal objetivo desta dissertação é investigar o efeito dos parâmetros de processo nas características de cordões de solda depositados pelo GMAW com eletrodo rotativo utilizando um consumível do tipo “*metal cored*” (MCAW-RE). Especificamente, busca-se através da variação do diâmetro e da frequência de rotação compreender a influência nas propriedades mecânicas e metalúrgicas dos cordões. Deste modo, podem-se enumerar os seguintes objetivos:

a) Avaliar a influência da frequência e diâmetro médio de rotação nas características geométricas de cordões de solda depositados pelo GMAW-RE com consumível do tipo *metal cored* (MCAW-RE);
b) Avaliar a influência da frequência e do diâmetro médio de rotação nas propriedades mecânicas e microestruturais da ZTA de soldas obtidas pelo MCAW-RE em aço de alta resistência ASTM A 516 grau 70;
c) Avaliar uma metodologia para seleção dos parâmetros de processo, frequência e do diâmetro médio de rotação, com o objetivo de otimizar seus efeitos nas propriedades dos cordões depositados e;

CAPÍTULO II
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1. O Processo GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE)

O processo GMAW com eletrodo rotativo surgiu como uma variação do GMAW convencional. O GMAW-RE se diferencia do GMAW convencional unicamente pela sua tocha de soldagem, a qual fornece ao arame-eletrodo um movimento de rotação em torno de um diâmetro pré-estabelecido por uma excentricidade, a uma frequência controlada. Esta tocha é projetada para operar nos modos mecanizado ou automatizado. A Figura II.1 mostra o efeito de rotação do eletrodo neste processo (VENKATESH et al., 2018; FUNDERBURK, 2015).

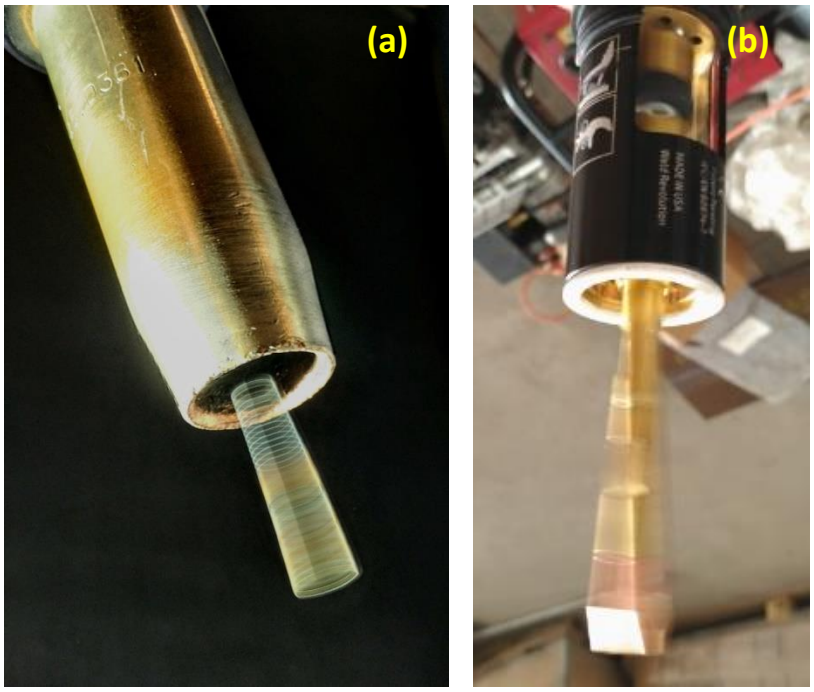


Figura II. 1 - Tocha com efeito de rotação do eletrodo: a) Com bocal / b) Sem bocal (SILVEIRA, 2018).

O sistema da tocha de soldagem é formado por um motor, que proporciona movimento de rotação a um bloco de rolamento excêntrico. Uma haste condutora é conectada ao excêntrico e presa a um flange em forma de anel, resultando em uma rotação cônica. Por fim, o bico de contato é rosqueado na outra extremidade da haste (WANG et al., 2007)

Durante a soldagem, o arame segue o seguinte percurso dentro da tocha: passa pelo interior do motor, em seguida pelo bloco de rolamento excêntrico, pela haste e por

fim pelo bico de contato. Não há movimento relativo entre o bico de contato e o arame, isto é, não há torção do arame (WANG et al., 2007; GUO et al., 2009)

A Figura II.2 mostra os componentes da tocha e o percurso do arame.

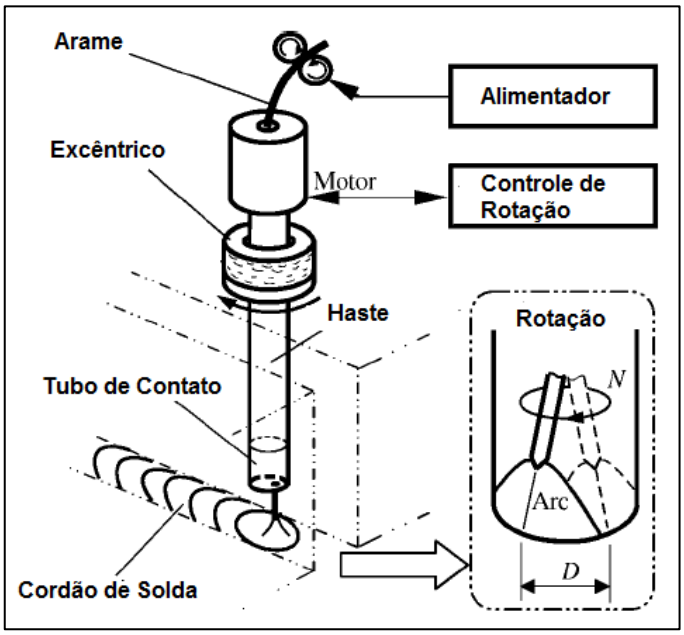
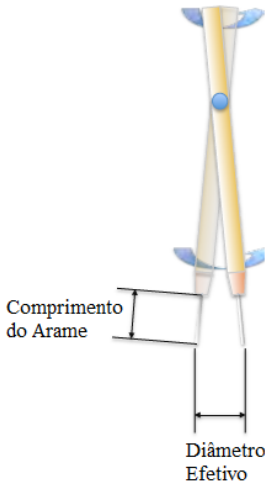


Figura II. 2 - Esquema similar da tocha com eletrodo rotativo (adaptado de WANG et al., 2007)

Quando comparado ao processo GMAW convencional, o GMAW com Eletrodo Rotativo possui três parâmetros reguláveis adicionais (SPINARC OPERATIONAL MANUAL):

- Frequência (ou velocidade) de rotação: 200 a 5500rpm (3,33 a 91,67Hz);
- Sentido de rotação: horário ou anti-horário;
- Diâmetro médio de rotação: 1 a 8.

Os valores do diâmetro médio de rotação, de acordo com o fabricante, representam o diâmetro formado pelo arame, quando este está com 25 mm de comprimento para fora do tubo de contato e a frequência de rotação está regulada a 1.000rpm, conforme mostrado na Figura II.3 (SPINARC OPERATIONAL MANUAL).



Condição de Regulagem: Comprimento do Arame 25 mm. a 1000 rpm

Diâmetro de Giro	Diâmetro Efetivo de Giro em mm
1	0.5 – 1.5
2	1.5 – 2.5
3	2.5 – 3.5
4	3.5 – 4.5
5	4.5 – 5.5
6	5.5 – 6.5
7	6.5 – 7.5
8	7.5 -8.5

Figura II. 3- Relação entre a regulagem do diâmetro médio de giro com o diâmetro de giro efetivo (adaptado do Spinarc operational manual, 2017).

Considerando que este parâmetro é adimensional, será considerado a partir de agora no presente texto, o valor em milímetros da faixa média deste parâmetro, de forma a permitir a avaliação de uma grandeza física mensurável, ou seja, para o diâmetro 1, será considerado o valor médio de 1 mm como o diâmetro efetivo de rotação.

II.1.1. Características do Processo GMAW-RE

As principais premissas deste processo são o aumento de produtividade e redução de custos de soldagem, devido às seguintes características associadas: garante altas taxas de deposição, permite a redução do chanfro e o uso de juntas com chanfro estreito (Narrow Gap) (PRASAD et al., 2018).

As vantagens atreladas ao uso do Narrow Gap são a redução do volume de material depositado, redução do tempo de soldagem e possibilidade de redução de tensões residuais devido ao menor volume de material depositado (WANG et al., 2007; MIN et al., 2011). Suas principais aplicações são na fabricação de navios, vasos de pressão e estruturas metálicas.

Entretanto, o grande desafio da soldagem de juntas com chanfro reto e estreito é garantir adequada penetração nas paredes laterais do chanfro, principalmente quando empregado o GMAW convencional, onde a falta de fusão na raiz e inclusão de escória entre passes são defeitos usuais (DUAN et al., 2018).

De acordo com MURAYAMA et al. (2015), a tolerância deste processo em relação à variação do chanfro é pequena, uma vez que não é possível mudar o diâmetro de

rotação durante a soldagem. Portanto, caso ocorra uma diminuição da abertura do chanfro em alguma região ou se utilize um grande diâmetro médio de rotação, o arco elétrico tenderá a ser desviado para as paredes do chanfro, gerando instabilidade na soldagem e falta de fusão (DUAN et al., 2018; MURAYAMA et al., 2015).

Por outro lado, quando bem empregado, o uso do eletrodo rotativo se mostra o mais prático para este tipo de chanfro. Isso pode ser explicado pelo fato de que neste processo de soldagem, as gotas do metal de adição estão sujeitas a uma força centrífuga, além das forças eletromagnética e gravitacional, comum aos demais processos de soldagem ao arco elétrico. Esta força centrífuga, gerada pela frequência de rotação do arame, direciona de forma radial as gotas de metal fundido para as paredes da junta (FILHO et al., 2019). A Figura II.4 mostra as forças atuantes durante a transferência metálica (SANTOS, 2019).

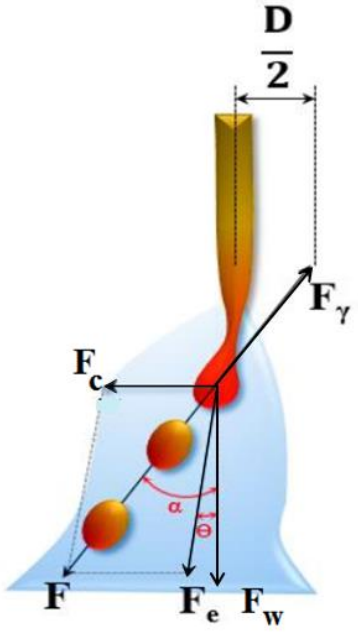


Figura II. 4 – Representação das forças atuantes na transferência metálica da soldagem processo GMAW-RE (adaptado de SANTOS, 2019)

Onde:

F = força resultante; Fw = força peso; Fe = força eletromagnética; Fγ = força devido à tensão superficial; Fc = Força centrífuga devido à rotação do eletrodo.

Outro efeito observado nos estudos de WANG et al (2007) e SANTOS (2019) é a diminuição da gota de metal de adição transferida à peça conforme o aumento da frequência de rotação, na soldagem de aços carbono. O experimento de SANTOS (2019) foi realizado com os seguintes valores de frequência: 0rpm (convencional), 1000rpm, 2000rpm, 3000rpm e 4000rpm. Através da filmagem de alta velocidade, SANTOS (2019) capturou imagens de gotas desprendidas durante a transferência e mediu seus diâmetros, conforme mostram as Figuras II.5 e II.6. No experimento de WANG et al

(2007), os valores de diâmetro foram encontrados pela medição da gota residual que permanece na ponta do eletrodo após a extinção do arco elétrico, e seus resultados podem ser observados nas Figura II.7.

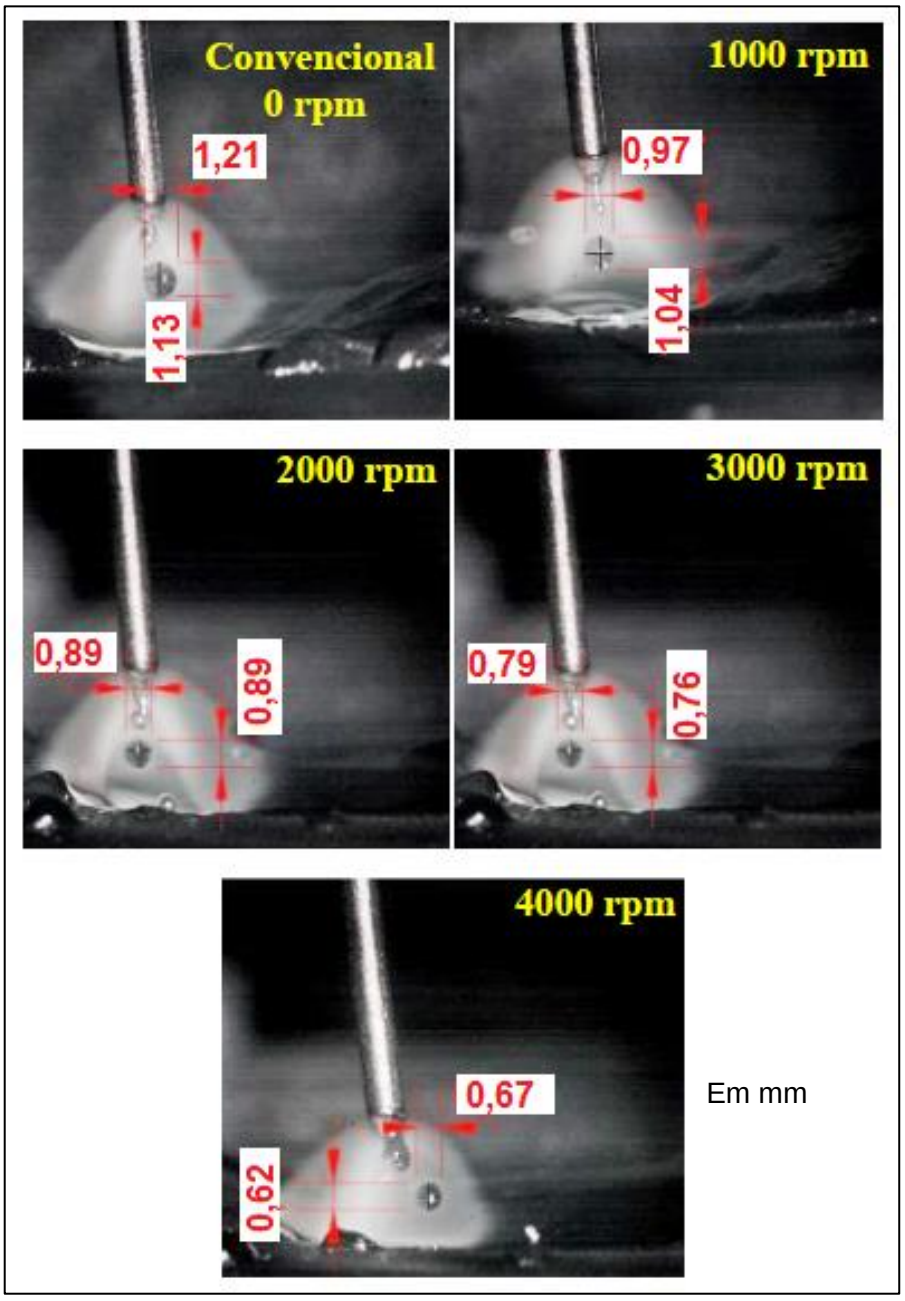


Figura II. 5 - Comparativo entre diâmetro de gota em função da frequência de rotação do eletrodo (adaptado de SANTOS, 2019)

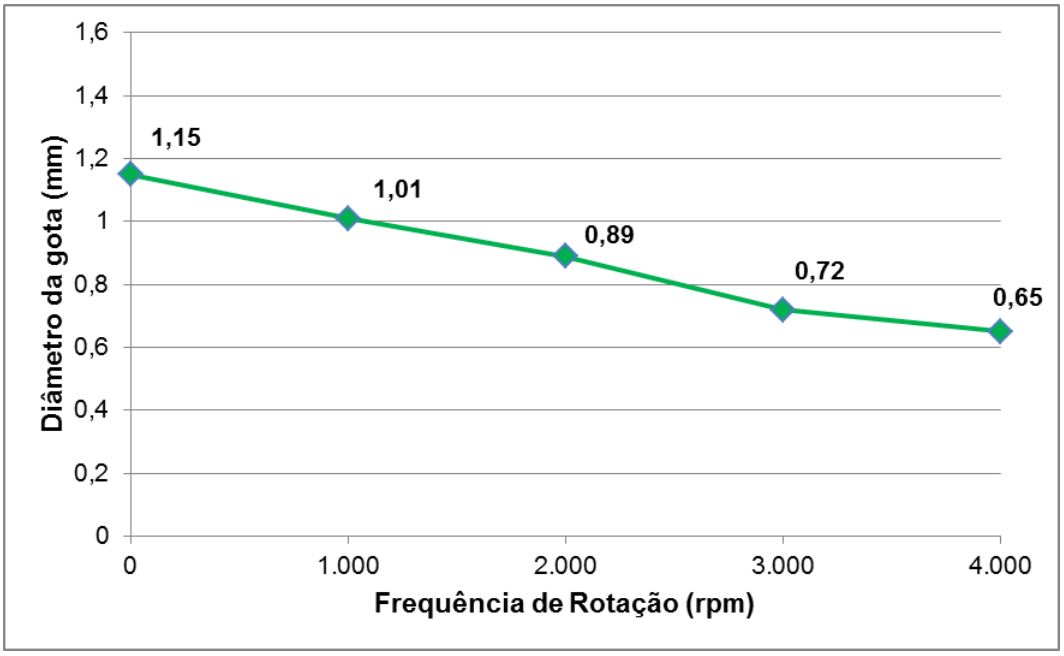


Figura II. 6 - Gráfico exibindo o comportamento do diâmetro da gota em função da frequência de rotação do eletrodo (adaptado de SANTOS, 2019).

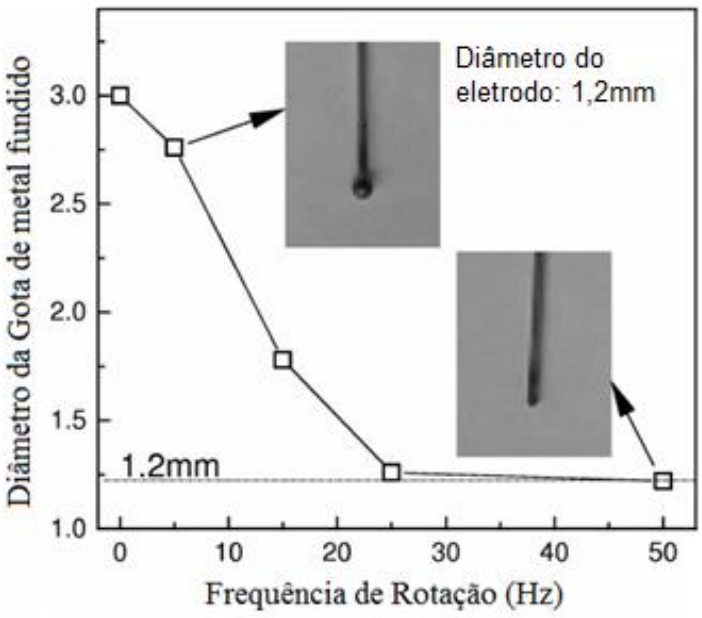


Figura II. 7 - Diâmetro da gota fundida em função da frequência de rotação (adaptado de WANG et al., 2007).

Em um trabalho realizado por SRINIVASA RAO et al.(2004), foi investigado o efeito da frequência de rotação do arco elétrico no perfil geométrico de cordões sobre chapa de aço carbono. O perfil foi caracterizado a partir da medição da largura, penetração e altura (ou reforço), com o diâmetro médio de rotação fixado em 6 mm e com as frequências de 550, 750, 920, 1050, 1300rpm e sem rotação. A Figura II.8 mostra os resultados das medições.

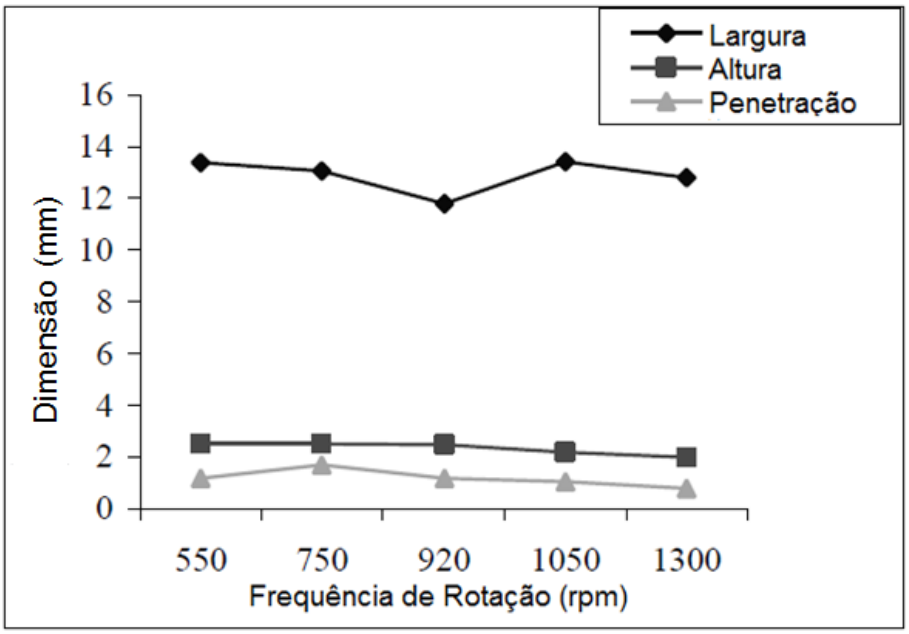


Figura II. 8 - Perfil de penetração em função da frequência de rotação (adaptado de SRINIVASA RAO et al., 2004).

KUMAR et al. (2011) realizaram um estudo semelhante, ao investigar os efeitos do eletrodo rotativo no perfil de cordões solda sobre chapas de alumínio. Foram medidas as larguras, as alturas e as penetrações de 81 cordões de solda. A partir dos dados, criou-se um modelo matemático para descrever a penetração (***P***) e convexidade (***C***) do cordão, com base na frequência de rotação ***N*** (rpm), na excentricidade ***E*** (diâmetro de rotação – mm), na taxa de alimentação de arame ***F*** (m/min) e na razão ***X*** entre a taxa de alimentação e velocidade de soldagem. As equações do modelo matemático são descritas da seguinte forma:

$$P = \frac{0{,}0231X^{0{,}693} \cdot F^{2{,}5005}}{N^{0{,}2219} \cdot E^{0{,}9698}} \quad (1)$$

$$C = \frac{0{,}7168X^{0{,}2030}}{N^{0{,}2219} \cdot E^{0{,}9698} \cdot F^{0{,}1797}} \quad (2)$$

A partir das equações, verifica-se que a excentricidade e a frequência de rotação são inversamente proporcionais à penetração e à convexidade do cordão. Ademais, observou-se que quanto maiores os valores destes parâmetros, a largura do cordão

também ampliará. Na Figura II.9 é representada a influência do Eletrodo Rotativo na geometria do cordão de solda.

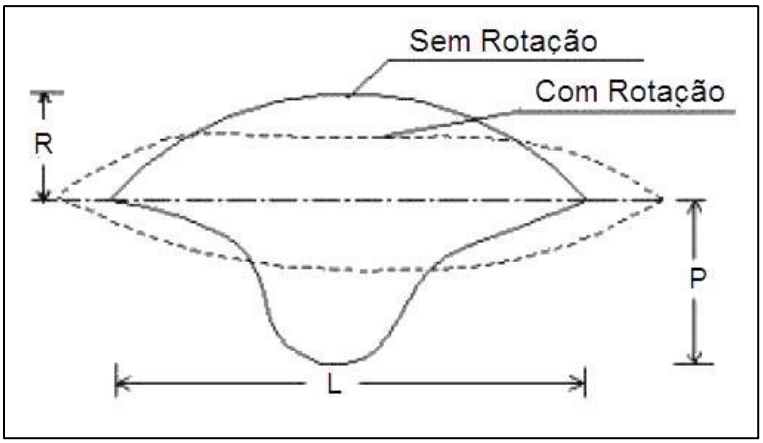


Figura II. 9 - Influência do eletrodo rotativo na geometria do cordão (adaptado de SRINIVASA RAO et al., 2004).

ITAWA et al. (2009) e WANG et al. (2007) realizaram estudos semelhantes, porém avaliando o perfil de penetração lateral em um chanfro reto. Foi observado que, na soldagem sem rotação, a penetração se concentra no centro do chanfro e, como consequência, pode ocorrer falta de fusão lateral. Todavia, conforme a rotação do arame é adicionada, constata-se que a penetração lateral se expande e o cordão apresenta maior concavidade em seu perfil, ideal para a soldagem em chanfro. A Figura II.10 mostra os resultados das macrografias dos testes de ITAWA et al. (2009). Como esperado, verifica-se o perfil de dedo para a soldagem sem rotação.

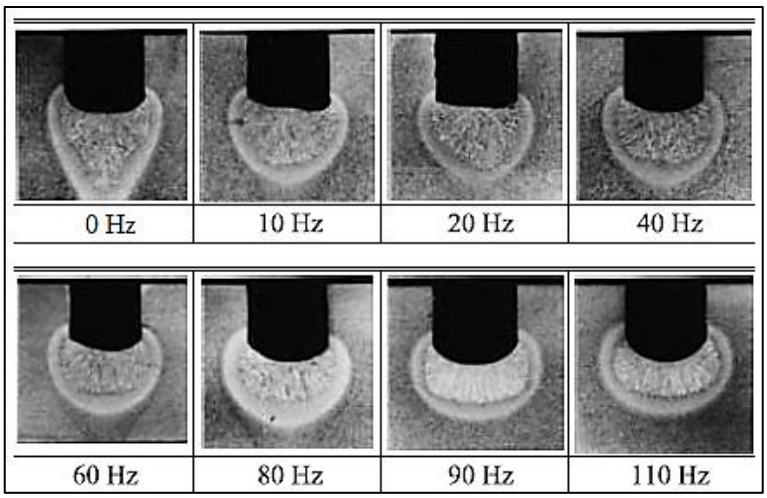


Figura II. 10 - Efeito do eletrodo rotativo na penetração lateral em chanfro reto (ITAWA et al., 2009).

Conhecer o aspecto geométrico dos cordões é fundamental para a soldagem de juntas, principalmente multipasses, pois a partir de suas características pode-se avaliar a propensão do surgimento de defeitos de soldagem, em especial falta de fusão e penetração lateral. XU et al. (2017) realizaram um trabalho comparativo sobre o mecanismo de formação de soldas a partir do GMAW convencional e o processo denominado pelos autores como "*Oscillating Arc Welding",* o qual é similar ao GMAW-RE, de modo que o movimento de rotação do eletrodo é dado por uma curvatura no tubo de contato ao invés de uma excentricidade.

Este processo também é relevante por apresentar características parecidas do GMAW-RE no que diz respeito à formação do cordão de solda. Assim como KUMAR et al. (2011), XU et al. (2017) também analisaram o perfil de convexidade de soldas. O processo GMAW convencional produziu cordões com convexidade excessiva pelo fato da alimentação de metal de adição se concentrar no centro da poça de fusão, em concordância com o estudo de DUAN et al. (2018). Associado a um chanfro estreito, defeitos como falta de penetração e fusão lateral possuem alta predisposição, como mostra a Figura II.11.

Como mostrado nos estudos de WANG et al. (2007), ITAWA et al. (2009) e KUMAR et al. (2011), a partir da aplicação do movimento de rotação do eletrodo, é possível alterar o perfil de convexidade do cordão de solda e, desta forma, reduzir a probabilidade de incidência destes defeitos de falta de penetração e fusão nas paredes laterais (Figura II.12).

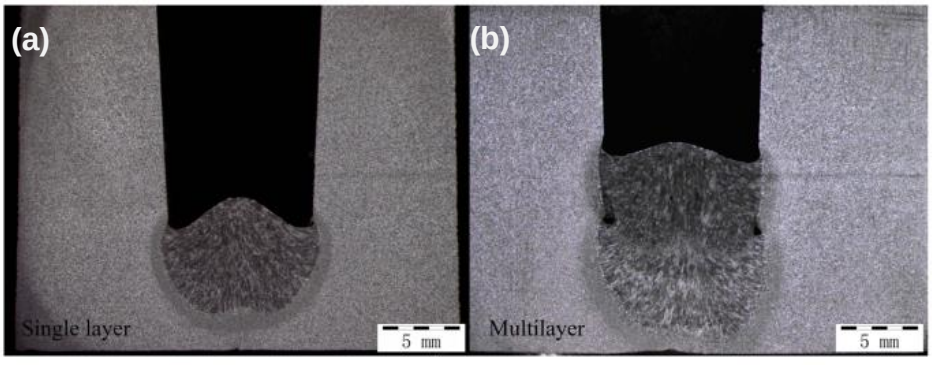


Figura II. 11 – Macrografia de junta soldada em chanfro estreito pelo GMAW convencional – (a) Passe único / (b) Multipasses (XU et al., 2017)

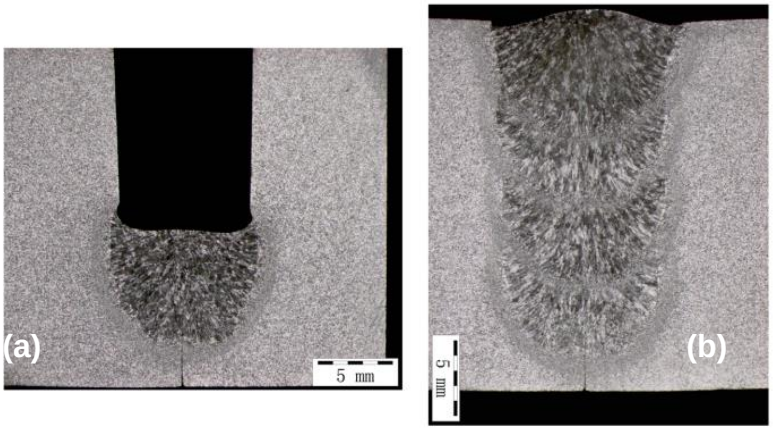


Figura II. 12 – Macrografia de junta soldada após a otimização dos parâmetros – (a) Passe único / (b) Multipasses (XU et al., 2017)

SANTOS et al. (2018) realizaram um estudo com o objetivo investigar os aspectos geométricos de cordões de solda obtidos por diferentes frequências de rotação pelo processo GMAW-RE. Neste estudo, o diâmetro médio de rotação foi fixado em 3 mm e foram realizados cordões com as frequências de 0, 500, 1.000, 1.500 e 2.000rpm. Os resultados mostraram que a frequência de rotação possui uma grande influência na geometria do cordão de solda, pois o aumento deste parâmetro de processo provocou uma diminuição da penetração e do reforço do cordão e um aumento da largura do cordão (Figura II.13).

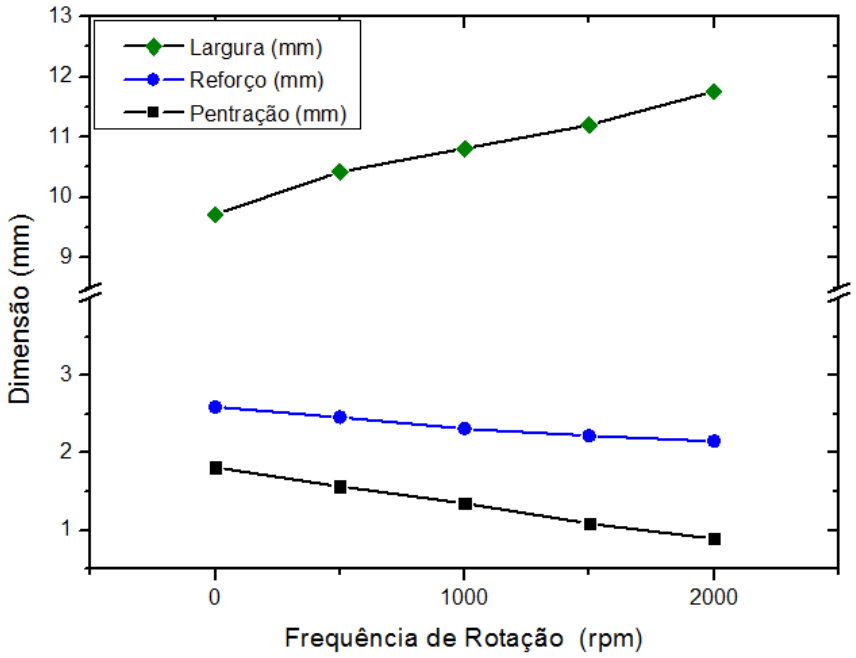


Figura II. 13 – Efeito da frequência na penetração, reforço e largura do cordão de solda, pelo processo GMAW-RE (adaptado de SANTOS et al., 2018).

SILVEIRA (2018) conduziu um estudo similar a este, utilizando frequências de rotação maiores e diferentes de diâmetro médio de rotação. O comportamento visto na Figura II.14 mostra que a tendência do estudo de SANTOS et al. (2018) se mantém.

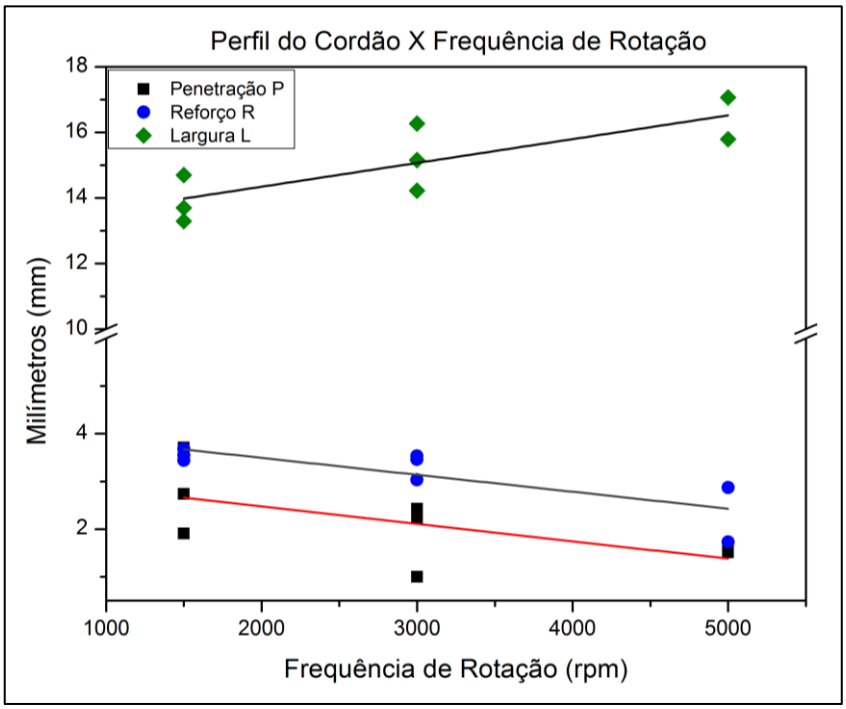


Figura II. 14 - Gráfico comparativo do perfil geométrico pela frequência de rotação (SILVEIRA, 2018)

Em relação ao processo, SANTOS et al. (2018) e SILVEIRA (2018) observaram a presença de porosidades em grande quantidade para frequências de rotação maiores. Isto ocorre devido a uma provável turbulência no gás de proteção gerada por esta alta frequência, gerando uma insuficiência de proteção gasosa. Para evitar este problema, deve-se aumentar a vazão. Outro aspecto observado por SILVEIRA (2018) foi má formação do cordão de solda, quando utilizados parâmetros de processo a partir de 3000rpm de frequência e 6 mm de diâmetro de rotação. Isto foi atribuído ao fato de que quando se tem uma alta frequência de rotação, a intensidade da força centrífuga que atua no desprendimento das gotas de metal de adição se torna maior, observando-se uma maior projeção radial destas gotas, as quais podem ser expelidas para fora da poça de fusão. Nota-se então uma alta taxa de respingos, má formação da poça de fusão e instabilidade do arco elétrico. A Figura II.15 retirada do trabalho de SILVEIRA (2018) ilustra este fato, em que a primeira metade do cordão foi soldado na frequência de 1500rpm e a outra a 3000rpm, onde se observa grande quantidade de respingos.



Figura II. 15 - Transição do aspecto visual do cordão de solda quando soldado a 1.500rpm e 3.000rpm (SILVEIRA, 2018)

É importante destacar também os parâmetros comuns ao processo GMAW convencional que possuem influência no aspecto do cordão de solda. A corrente de soldagem, por exemplo, determina o tipo de transferência metálica, que vai influenciar na penetração, largura e no aspecto visual da solda. A tensão influencia no comprimento e largura do arco, que terá efeito na altura do reforço e na largura do cordão. Tensões muito altas tendem a reduzir a penetração e geram defeitos de soldagem, como mordeduras. A Tabela II.1 mostra de forma simplificada o efeito dos parâmetros essenciais do processo GMAW (GARCIA, 2019).

Tabela II. 1 - Efeito dos Parâmetros de soldagem nas características do cordão solda para o GMAW convencional (adaptado de GARCIA, 2019).

Parâmetros de soldagem	Afeta no cordão	Efeitos
Corrente de soldagem	• Profundidade de penetração. • Taxa de deposição.	Aumento na corrente causa aumento na velocidade de alimentação do eletrodo (vice-versa); Aumento da taxa de fusão e penetração;
Tensão de soldagem	• Efeito na Diluição. • Convexidade do cordão; • Largura do cordão;	Aumentar a tensão do arco aumenta a largura do cordão. Redução da penetração. Importante para a estabilidade do arco elétrico.
Velocidade de soldagem	• Profundidade de penetração; • Largura do cordão;	Aumentar a velocidade reduz a penetração, a largura do cordão e o reforço; aumentando a probabilidade de mordeduras.

II.1.2. Distribuição térmica do Processo GMAW-RE

Embora ainda seja um assunto muito pouco explorado pela literatura, um estudo realizado por GUO et al (2011) e BAI et al (2012) buscou descrever a distribuição de calor na junta pelo processo GMAW-RE através de um modelo transiente tridimensional por elementos finitos. Para isto, foi usado como base o modelo "duplo elipsoide" de GOLDAK (1984), no qual a energia do arco é distribuída em um volume de forma semi-elipsoidal. De acordo com BAI et al. (2012), este modelo é o mais popular para descrever o movimento e a distribuição de uma fonte pontual de calor para processos de soldagem como GMAW, por exemplo. O modelo de Goldak é dado pelas equações abaixo e representado pela Figura II.16.

Para o quadrante dianteiro:

$$q(x,y,\xi) = \frac{6\sqrt{3}\,\eta UIf_1}{abc_1\pi\sqrt{\pi}}\, e^{\frac{-3x^2}{a^2}} . e^{\frac{-3y^2}{b^2}} . e^{\frac{-3[\xi]^2}{{c_1}^2}} \quad (3)$$

Para o quadrante posterior:

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}\,\eta UIf_2}{abc_2\pi\sqrt{\pi}}\, e^{\frac{-3x^2}{a^2}} . e^{\frac{-3y^2}{b^2}} . e^{\frac{-3[\xi]^2}{{c_2}^2}} \quad (4)$$

Onde:

$q(x,y,\xi)$ =densidade de energia ou potência por unidade de volume;
a = largura do elipsoide;
b = profundidade do elipsoide;
η = eficiência térmica;
c_1 = comprimento da fonte de calor referente ao quadrante frontal do elipsoide;
c_2 = comprimento da fonte de calor referente ao quadrante posterior do elipsoide;
f_1= fração de energia depositada no quadrante frontal do elipsoide.
f_2= fração de energia depositada no quadrante posterior do elipsoide.
$\xi = z + v(\tau - t)$. Neste caso, será considerado $\xi = z$

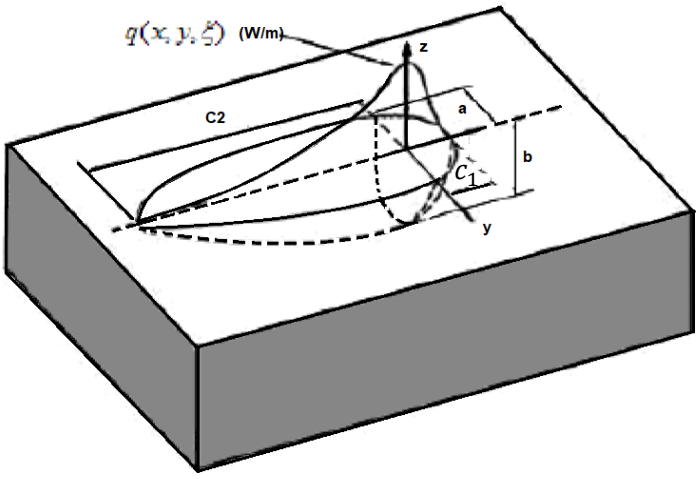


Figura II. 16 - Representação esquemática do modelo de Goldak (1984)

Entretanto, para o processo com eletrodo rotativo é necessário considerar o movimento da fonte de calor (arco elétrico). Desta forma, GUO et al (2011) e BAI et al (2012) propuseram a seguinte parametrização, mostrada na Figura II.17. Em $t = 0$, a fonte se encontra em O, origem dos eixos (x,z). Após um período de tempo t, o arco estará localizado em O' pertencente aos eixos x'z' e cujas coordenadas locais são (x1,z1). Considerando que a posição de O' seja $(x0, y0, z0)$ no sistema original, obtém-se as relações:

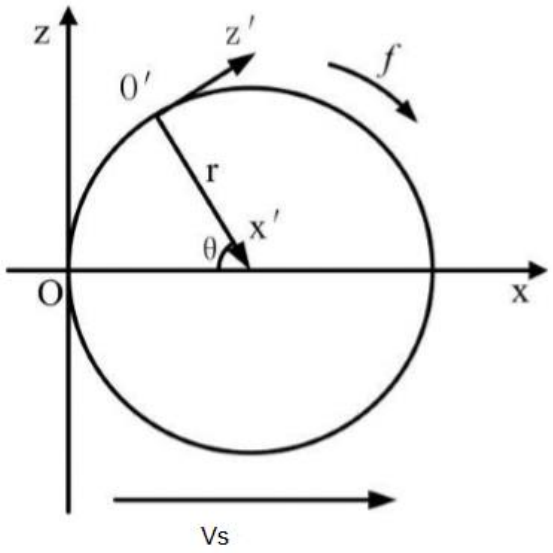


Figura II. 17- Representação do movimento rotativo do arame de soldagem (BAI et al, 2012)

$$\begin{cases} x1 = [\,(x - x0) - (z - z0)tan\theta\,]cos\theta = (x - x0)cos\theta - (z - z0)sen\theta \\ y1 = y \\ z1 = \dfrac{z - z0}{cos\theta} + [\,(x - x0) - (z - z0)tan\theta\,]sen = (x - x0)sen\theta + (z - z0)cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

Onde $\theta = 2\pi ft; f \rightarrow frequencia\ de\ rotação$. A trajetória circular do arco pode ser calculada por:

$$\begin{cases} x0 = r - rcos\theta + V_s t \\ y0 = y \\ z0 = rsen\theta \end{cases} \quad (6)$$

Substituindo os valores de (6) em (5):

$$\begin{cases} x1 = (x - r + rcos\theta - V_s t)\, cos\theta - (z - rsen\theta)\, sen\theta \\ y1 = y \\ z1 = (x - r + rcos\theta - V_s t) sen\theta + (z - rsen\theta)\, sen\theta \end{cases} \quad (7)$$

Usando esta parametrização da equação (7) na equação de Goldak (3) e (4), obtemos:

Para o quadrante dianteiro:

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3} f_1 \eta U i}{\pi^{\frac{3}{2}} abc_1} \exp\left[-3\left(\left[\frac{(x - r + rcos\theta - Vst)cos\theta - (z - rsen\theta)\, sen\theta)}{a}\right]^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{(x - r + rcos\theta - V_s\, t)sen\theta + (z - rsen\theta)cos\theta)}{c_1}\right)^2\right)\right] \quad (8)$$

Para o quadrante posterior:

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3} f_2 \eta U i}{\pi^{\frac{3}{2}} abc_2} \exp\left[-3\left(\left[\frac{((x - r\ + rcos\theta - Vst)cos\theta - (z - rsen\theta)sen\theta)}{a}\right]^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{(x - r\ + rcos\theta - V_s\, t)sen\theta + (z - rsen\theta)cos\theta)}{c_2}\right)^2\right)\right] \quad (9)$$

A partir do modelo para o GMAW-RE descrito acima, foi realizada a simulação numérica por elementos finitos para descrever o comportamento da distribuição térmica da poça de fusão. Foi investigada a variação do diâmetro médio de rotação quando a frequência de rotação é igual a 5 Hz (300rpm), conforme mostra a Figura II.18. Nota-se que na escala de temperaturas, as temperaturas mais altas são representadas pela cor amarela. Esta cor é predominante onde o arco elétrico está mais concentrado e possui uma forma de elipse. Para o quadro (a) 0rpm, esta elipse possui uma forma mais achatada e concentrada, enquanto que conforme o diâmetro de rotação aumenta, esta elipse se torna mais arredondada. Isto mostra que a largura da poça de fusão para o processo convencional é menor e o fornecimento de calor é concentrado no centro da poça de fusão, o que pode ser visto pela pequena área que as temperaturas mais quentes (amarelo e vermelho) representam. Ao submeter o movimento de rotação ao arco elétrico, o calor é distribuído em uma área maior, tendo uma menor concentração no

centro da poça de fusão. Com estes resultados, BAI et al (2012) fizeram um gráfico evidenciando a queda da temperatura média do centro da poça de acordo com o aumento do diâmetro de rotação, chegando a uma diferença de 700ºC quando comparados os casos (a) e (d) (Figura II.19).

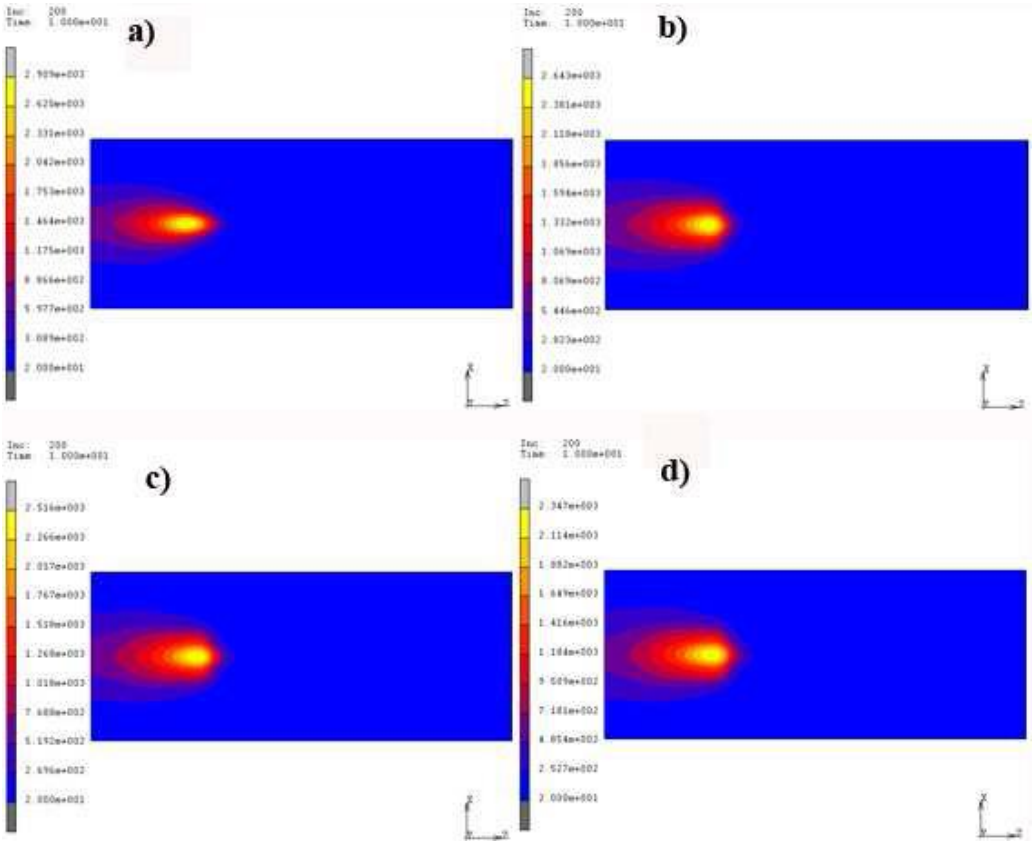


Figura II. 18 – Simulação da Distribuição térmica na poça de fusão pelo processo GMAW-RE a uma frequência de 300rpm e os seguintes diâmetros de rotação: a) 0mm; b) 4mm; c) 6mm e d) 8mm

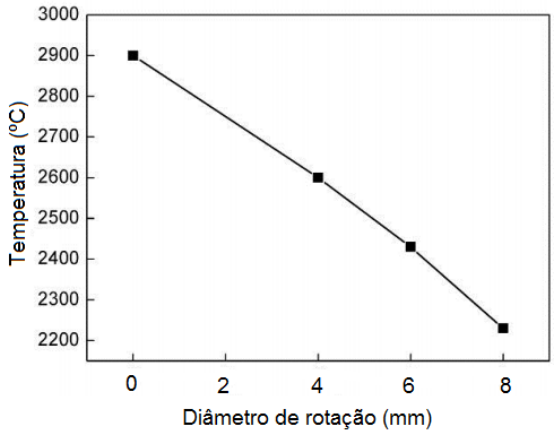


Figura II. 19 – Temperatura média do centro da poça em função do diâmetro de rotação (adaptado de BAI et al, 2012)

SANTOS (2019) também investigou o efeito dos parâmetros de processo na distribuição de calor na poça de fusão. A técnica usada neste experimento foi a filmagem termográfica. Primeiro, manteve-se a frequência de rotação em 1.000rpm e estudou-se a influência da variação do diâmetro médio de rotação para os valores de 0 mm (convencional), 1mm, 2mm e 4mm. Em seguida, foi estudada a influência da frequência de rotação para os valores de 0rpm (convencional), 1.000rpm, 1.500rpm e 2.000rpm; com o diâmetro médio é fixo em 3mm. A partir dos resultados mostrados pela Figura II.20, nota-se que o comportamento em relação à variação do diâmetro médio de rotação segue a mesma tendência do modelo proposto por BAI et al (2012), em que conforme o aumento do diâmetro, há uma menor concentração de calor no centro da poça de fusão e, consequentemente, menor temperatura. A redução de temperatura chega a cerca de 20% quando comparados os casos (d) 4mm para o (a) convencional. Para a variação da frequência de rotação, mostrada na Figura II.21, este comportamento se repete, tendo uma diferença de temperatura de 19% quando comparados os casos (d) 2.000rpm e o (a) 500rpm.

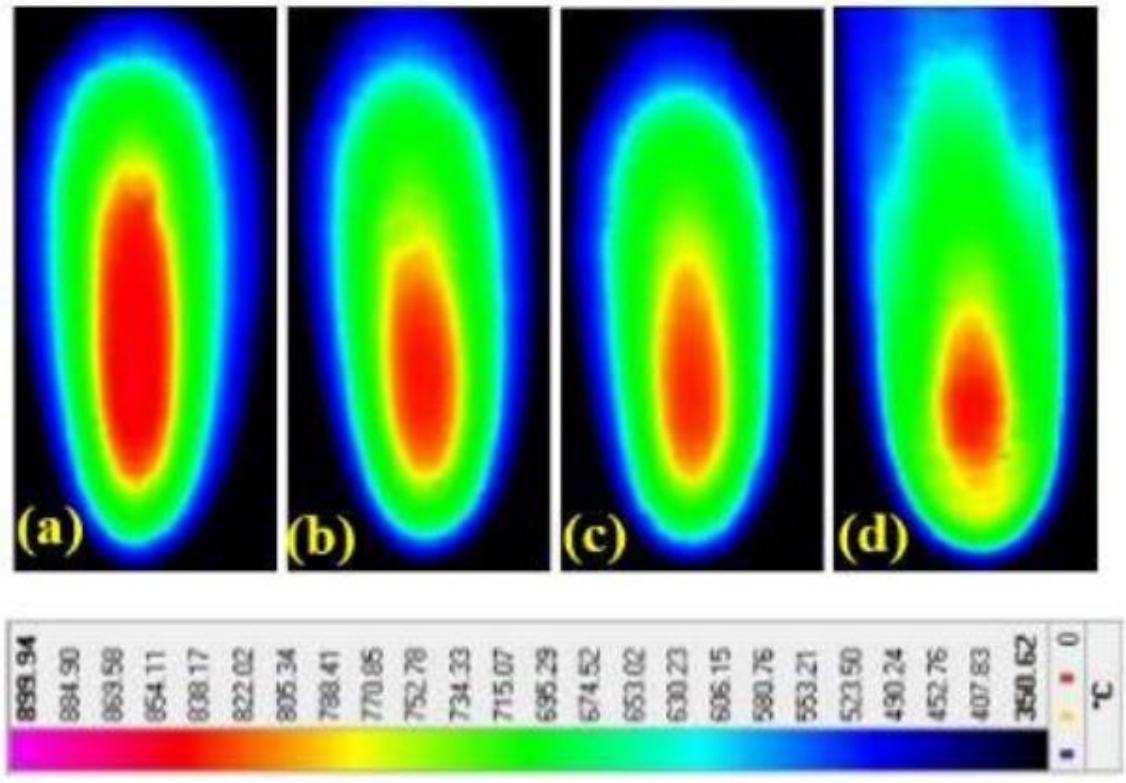


Figura II. 20 – Filmagem termográfica: distribuição da temperatura em função do diâmetro médio de giro. (a) convencional – 869ºC; (b) 1mm – 715ºC; (c) 2mm – 693ºC; (d) 4mm – 686ºC (SANTOS, 2019)

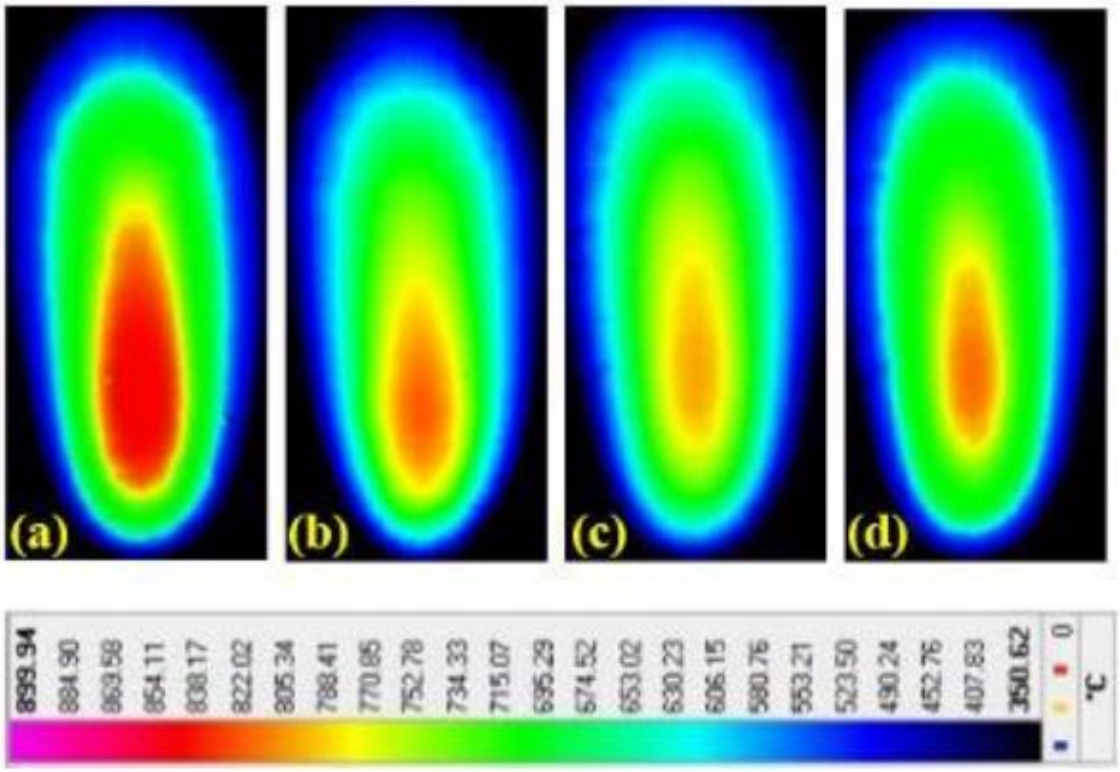
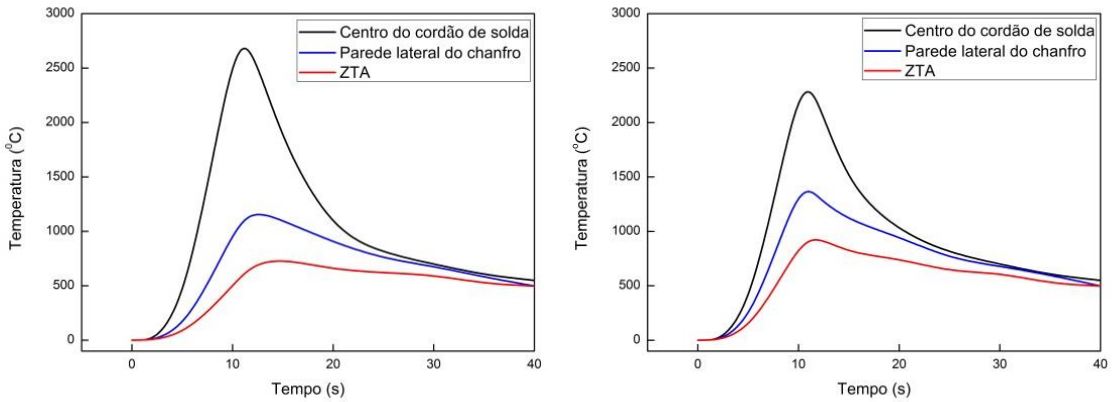


Figura II. 21 - Filmagem termográfica: distribuição da temperatura em função da frequência de rotação. (a) 500rpm – 839ºC; (b) 1.000rpm – 678ºC; (c) 1.500rpm – 636ºC; (d) 2.000rpm – 622ºC (SANTOS, 2019)

II.1.3. Efeito do ciclo térmico do GMAW-RE nas propriedades da ZTA

Como visto no item anterior, a distribuição de calor para o GMAW-RE é menos centralizada e atinge uma área maior. Deste modo, GUO et al. (2011) propuseram uma representação esquemática dos ciclos térmicos nas principais regiões de uma junta para os processos GMAW convencional e GMAW-RE. A Figura II.22 mostra as curvas de ciclo térmico para o centro do cordão, na parede do chanfro e na ZTA; e as curvas de repartição térmica podem ser observadas na Figura II.23.



(a) (b)

Figura II. 22 - Diagrama esquemático do comportamento dos ciclos térmicos para os processos de soldagem. (a) GMAW; (b) GMAW-RE (adaptado de GUO et al., 2011).

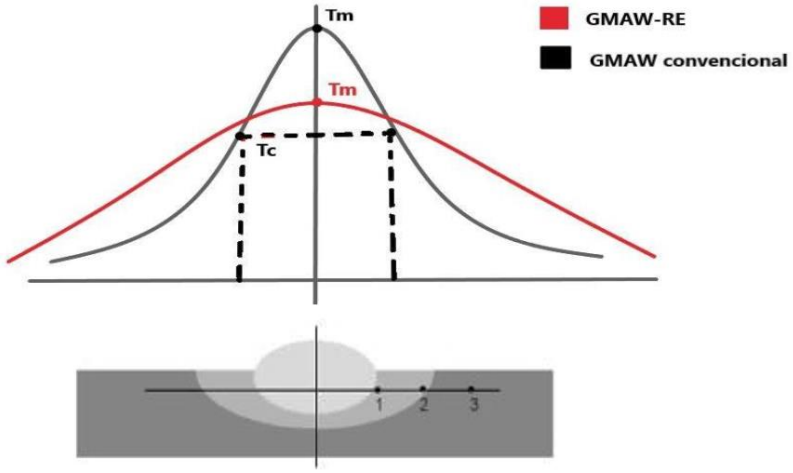


Figura II. 23 - Curvas de Repartição Térmica para os processo GMAW e GMAW-RE (adaptado de GUO et al., 2011)

Estas características tornam necessário estudar a zona termicamente afetada (ZTA), por ser uma região crítica da junta soldada por receber maiores quantidades de calor neste processo (MODENESI, 2012).

COSTA et al. (2019) investigaram as propriedades de juntas soldadas pelos processos GMAW convencional e GMAW-RE. Neste trabalho é mostrada a evolução microestrutural ao longo da ponta do entalhe Charpy-V posicionado na ZTA das juntas soldadas, o que permite observar os diferentes constituintes microestruturais. Na Figura II.24, nota-se uma microestrutura mais grosseira para o GMAW-RE, o que é mais bem

detalhado na Figura II.25. Observou-se também uma maior extensão da ZTA para o GMAW-RE, medindo 4,6 mm contra 3,1 mm para o GMAW convencional.

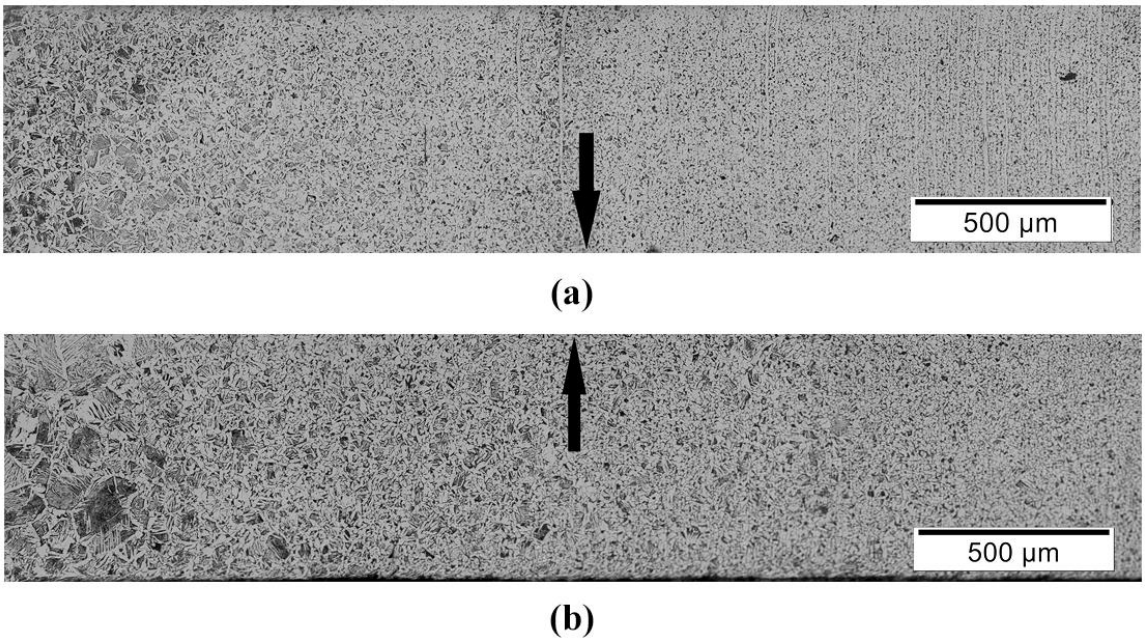


Figura II. 24 - Distribuição microestrutural na ponta do entalhe Charpy-V (indicada pela seta) posicionado na ZTA das juntas soldadas. Ataque: nital 2%. (a) GMAW; (b) GMAW-RE (COSTA et al., 2019)

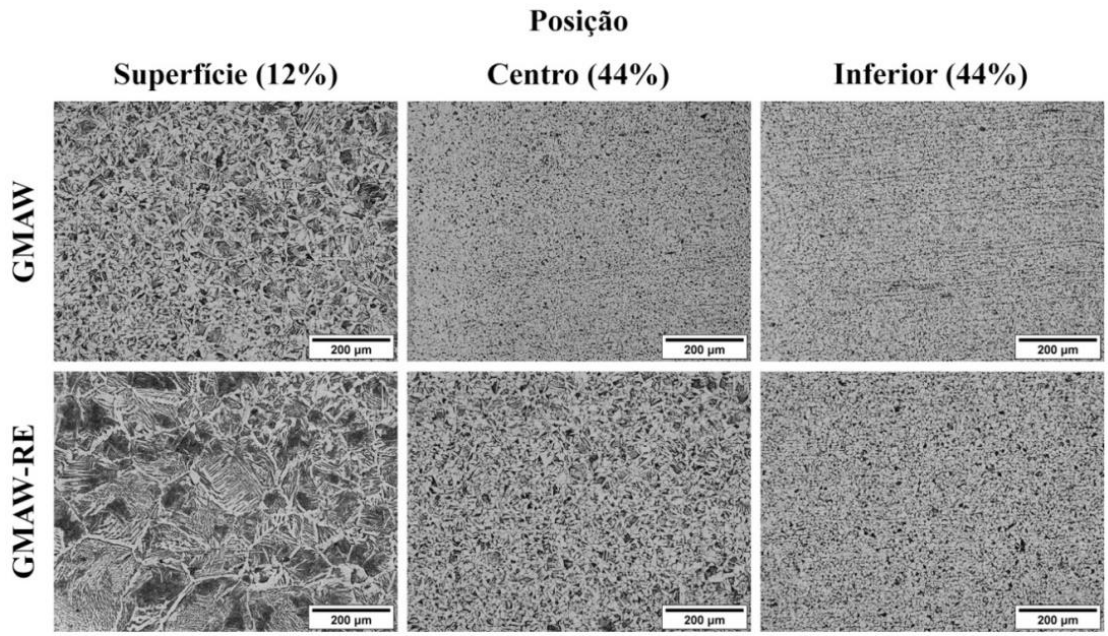


Figura II. 25 - Microestrutura da ZTA na região correspondente à ponta do entalhe do corpo-de-prova Charpy-V (COSTA et al., 2019)

A granulometria mais grosseira e a maior extensão da ZTA para o processo GMAW-RE podem ser explicadas pela distribuição de calor nas juntas. Enquanto no GMAW convencional o arco elétrico se concentra no centro da poça de fusão, no GMAW-RE a rotação faz com que o arco seja direcionado de maneira periódica nas paredes do chanfro, modificando a distribuição de calor na ZTA. Isto aumenta o fluxo térmico na direção transversal da direção de soldagem, isto é, as paredes do chanfro experimentam ciclos térmicos mais intensos, de modo a aumentar a extensão da ZTA e, por conseguinte o tamanho dos grãos (COSTA et al., 2019). Sintetizando, enquanto no GMAW convencional a energia do arco se concentra no centro da poça de fusão, no processo com eletrodo rotativo a energia é mais distribuída por toda a extensão da poça de fusão (BAI et al., 2012; ALMEIDA, 2019; GUO et al., 2011).

Isto pode explicar o motivo pelo qual houve redução na energia absorvida pelos corpos de prova removidos da ZTA na junta soldada pelo GMAW-RE em comparação ao GMAW convencional. Como pode ser observado na Figura II.25, houve uma maior contribuição da microestrutura grosseira no entalhe, o que reduz a tenacidade ao impacto das amostras (COSTA et al., 2019; ALMEIDA; 2019).

Um estudo realizado por GARCIA (2019) investigou a influência da variação dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas da ZTA. Como parte do experimento, foram soldados cordões com os diâmetros de rotação de 3, 6 e 8 mm, com as frequências de 1.500, 3.000 e 5.000rpm. GARCIA (2019) constatou que ao aumentar a frequência de rotação, as extensões da ZTA também aumentam, como pode ser visto na Figura II.26.

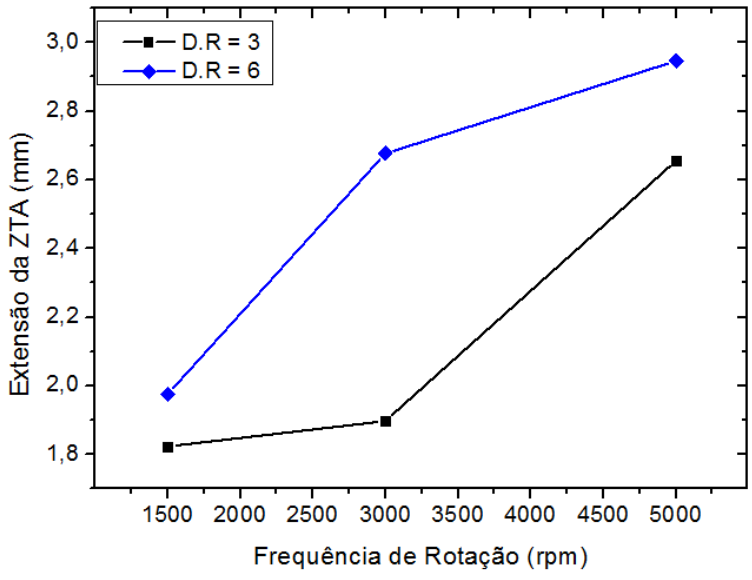


Figura II. 26 - Gráfico relacionando a extensão da ZTA em função da frequência de rotação (adaptado de GARCIA, 2019)

GARCIA (2019) também investigou o comportamento da microdureza ao longo da região de grãos grosseiros da ZTA (RGGZTA), assim como também será feito neste trabalho. As medições de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) foram feitas conforme a Figura II.27 e os resultados são mostrados na Tabela II.2. Percebe-se que os pontos de microdureza não seguem uma linha de tendência para a posição ou para o valor da maior dureza. Segundo GARCIA (2019), isto ocorre pelo fato da distribuição de calor não ser constante para este processo e, portanto, ter um comportamento de acordo com a posição do arco na seção transversal analisada. O objetivo de encontrar a localização e avaliar o ponto de maior dureza ao longo da RGGZTA é obter resultados mais confiáveis das características mecânicas e microestruturais, visto que esta região é a região mais crítica da ZTA (MODENESI et al., 2012).

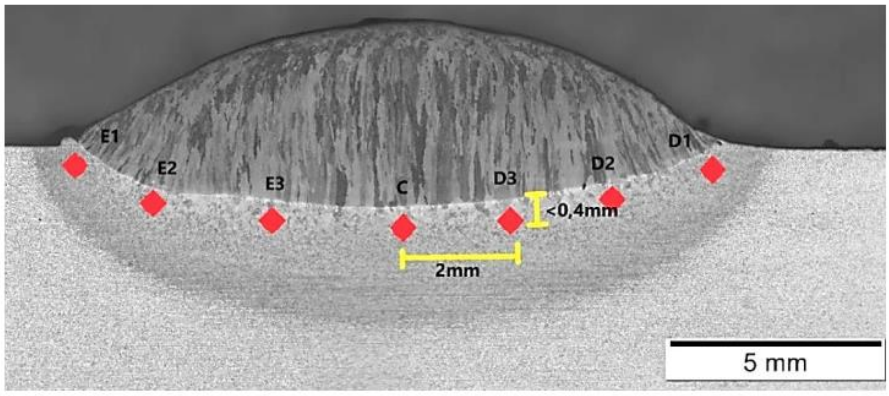


Figura II. 27 - Localização das impressões de microdureza Vickers (GARCIA, 2019)

Tabela II. 2 - Resultado das medições de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$)
(adaptado de GARCIA, 2019)

Amostra	Frequência rpm	Diâmetro (mm)	E1	E2	E3	C	D3	D2	D1
21	1.500	3	260	259	250	**292**	285	279	279
22	3.000	3	**279**	264	268	247	234	264	247
23	5.000	3	251	255	245	**263**	261	262	261
24	1.500	6	267	274	283	**289**	257	263	258
25	3.000	6	262	267	269	269	**302**	298	324
26	5.000	6	275	276	280	282	280	**294**	277

II.2. Processo GMAW com arame tubular de alma metálica (metal cored) (MCAW)

No final da década de 1950, foram desenvolvidos os arames tubulares do tipo *flux cored* com as premissas de melhor estabilidade na soldagem, menor taxa de respingos e produzir soldas de alta qualidade. Ao longo dos anos, os fabricantes ainda buscavam melhorias para o processo. O principal desafio era alcançar a alta produtividade obtida pelo arame tubular *flux cored* aliada à alta eficiência de deposição do arame sólido. Esta necessidade deu origem ao arame de soldagem do tipo *metal cored*, cujo processo é denominado MCAW (MYERS, 2002).

De acordo com BARBEDO (2011), as características geométricas dos cordões de solda produzidos através da soldagem com arame sólido (GMAW) e da soldagem com arame tubular são causadas pelo comportamento do arco e transferência metálica de cada processo. Ainda segundo este autor, soldas realizadas por arames tubulares possuem penetração mais uniforme quando comparadas às realizadas por arames sólidos, que promovem uma penetração acentuada e estreita, em forma de dedo (Figura II.28). Deste modo, a soldagem com arames tubulares permite uma tolerância maior no desalinhamento da junta (ARAUJO, 2004).

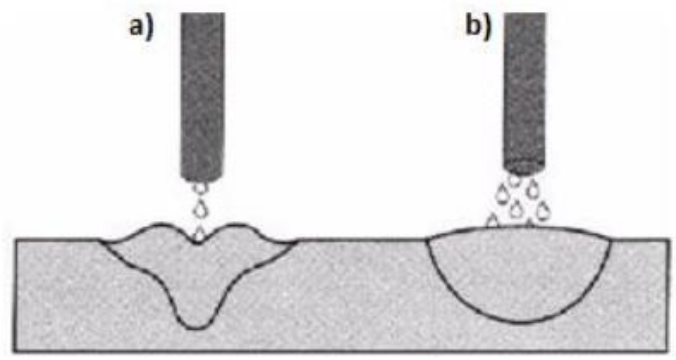


Figura II. 28 – Perfil dos cordões de solda produzidos por: a) GMAW; b) FCAW (ARAUJO, 2004)

A rota de fabricação do arame tubular de alma metálica (*metal cored)* é a mesma do *flux cored,* ilustrada da Figura II.29. A diferença básica destes consumíveis se encontra na composição química do fluxo interno, onde no FCAW é responsável pela formação de uma camada de escória. Uma fita metálica é alimentada continuamente através de roletes que a conformam em um formato de canaleta (“U”). O fluxo é então adicionado por um silo e em seguida a fita passa por roletes de fechamento, dando o formato de tubo. Por fim, o arame tubular é conformado através do processo de laminação ou trefilação, de modo a garantir sua dimensão final (ARAUJO, 2004).

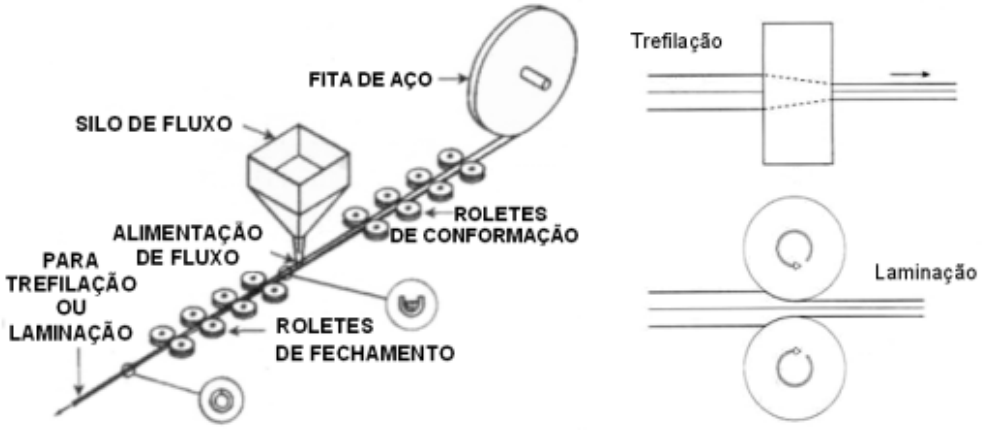


Figura II. 29 - Rota de Fabricação de Arame Tubular (ARAUJO, 2004)

Embora se observe na literatura a classificação da soldagem com *metal cored* como FCAW, é importante salientar que são processos diferentes. Inicialmente os arames *metal cored* eram classificados dentro da norma de arames sólidos, a AWS 5.18 (2005), enquanto os arames tubulares *flux cored* eram classificados na AWS 5.20 (2005). Apenas recentemente, foram inseridas estas classificações na norma AWS 5.36 (2012), porém são especificados como processos distintos, MCAW e FCAW.

O arame *metal cored* é formado por um pó metálico contendo elementos de liga, como o manganês, o silício, o níquel, o cromo e o molibdênio, e alguns elementos estabilizadores de arco, como o potássio e o sódio, no interior de um tubo metálico. Outra diferença entre os arames *flux cored* e *metal cored* está na proteção gasosa necessária. O MCAW requer misturas ricas em argônio (>75%), enquanto o FCAW pode utilizar como gás de proteção 100% dióxido de carbono (MYERS, 2002. PRAJAPATI, 2017).

Como foi citada, a principal vantagem do MCAW sobre o FCAW é a eficiência de deposição. Devido à formação da camada de escória, a soldagem *flux cored* possui eficiência na faixa de 84% a 89%, dependendo do diâmetro do arame. Já na soldagem com *metal cored*, a faixa está entre 92% a 98%. Isso ocorre pela baixa formação de escória e baixa taxa de respingos características do processo aliada a um gás de proteção rico em argônio (MYERS, 2002).

Em relação à soldagem com arame sólido, a principal vantagem da soldagem com *metal cored* é a taxa de deposição, isto é, a quantidade de material depositado por unidade de tempo (kg/h). Neste aspecto, o MCAW se compara ao FCAW, possuindo uma taxa de deposição na faixa de 5,4 a 6,4 kg/h para um arame de 1,2mm de diâmetro, enquanto que o processo GMAW fica na faixa de 3,6 e 4,5 kg/h. Isso pode ser explicado pelo fato dos arames *metal cored* terem formatos de tubos, o que torna a densidade de

corrente maior quando comparados a um arame sólido, permitindo maior deposição de material para um mesmo nível de corrente (MYERS, 2002. PRAJAPATI et al, 2017).

Em contrapartida, o custo inicial para a implantação do *metal cored* é uma desvantagem. Além de o próprio consumível ter um custo maior em relação aos consumíveis *flux cored* e sólido, é necessário o uso de misturas de proteção ricas em argônio, que também possuem preço mais elevado (LOBATO et al, 2015). Outra desvantagem é a recomendação de fontes com recurso sinérgico para correta regulagem dos parâmetros, e pulsado para permitir a soldagem em todas as posições.

No trabalho de LOBATO et al (2015), foram comparados os processos FCAW e MCAW na soldagem de tanques para a estocagem de líquidos criogênicos. Os componentes de custo avaliados foram: metal de adição, mata-junta (backing), mão-de-obra, energia elétrica e gases de proteção. Os resultados são mostrados na Tabela II.3, indicando uma economia de 26%. Como resultado de produtividade, a taxa de deposição efetiva para o MCAW foi de 1,62 kg/h contra 1,16 kg/h para o FCAW, valores estes abaixo do indicado na literatura porque estão sendo considerados os tempos de limpeza entre passes. Vale ressaltar que a maior eficiência obtida pelo processo com *metal cored* está relacionada ao fato de não produzir a camada de escória protetora sobre o cordão de solda.

Tabela II. 3 – Comparativo entre os resultados das soldagens (LOBATO et al, 2015)

Processo	FCAW	MCAW
Número de Passes	2	2
Eficiência de Deposição (%)	85	93
Taxa de Deposição Efetiva (kg/h)	1,16	1,62
Custo Total (R$)	141,72	105,49
Economia	-	-26%

Nesta mesma linha de estudo, PEDROSA (2012) realizou um comparativo econômico entre os processos FCAW e MCAW para diferentes condições e posições de soldagem. As combinações dos processos com gases de proteção utilizadas foram: FCAW com 100% CO_2, FCAW com Ar-15%CO_2 (ArC-15)e MCAW com Ar-10%CO_2 (ArC-10). Os resultados das soldagens, na posição horizontal plana 2F, são mostrados na Figura II.30. Para a posição 3F, foi necessária a utilização do recurso pulsado para a soldagem com o *metal cored*, sendo dois tipos utilizados: o pulsado tradicional e um pulsado modificado que proporciona correção automática do arco elétrico ao longo da soldagem. Os resultados obtidos estão na Figura II.31.

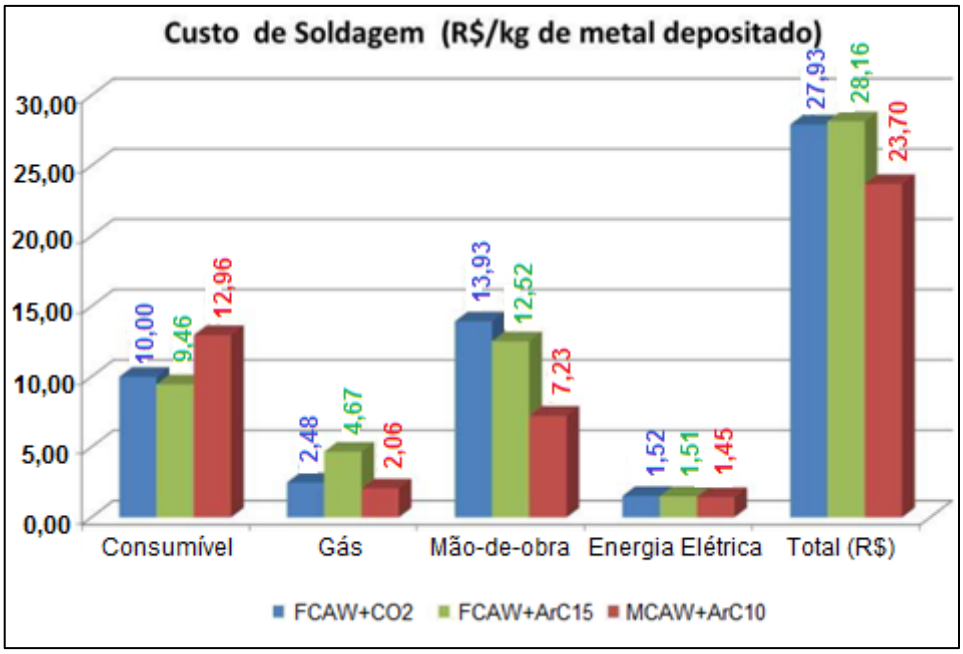


Figura II. 30 – Comparativo de custos para a posição 2F (PEDROSA, 2012)

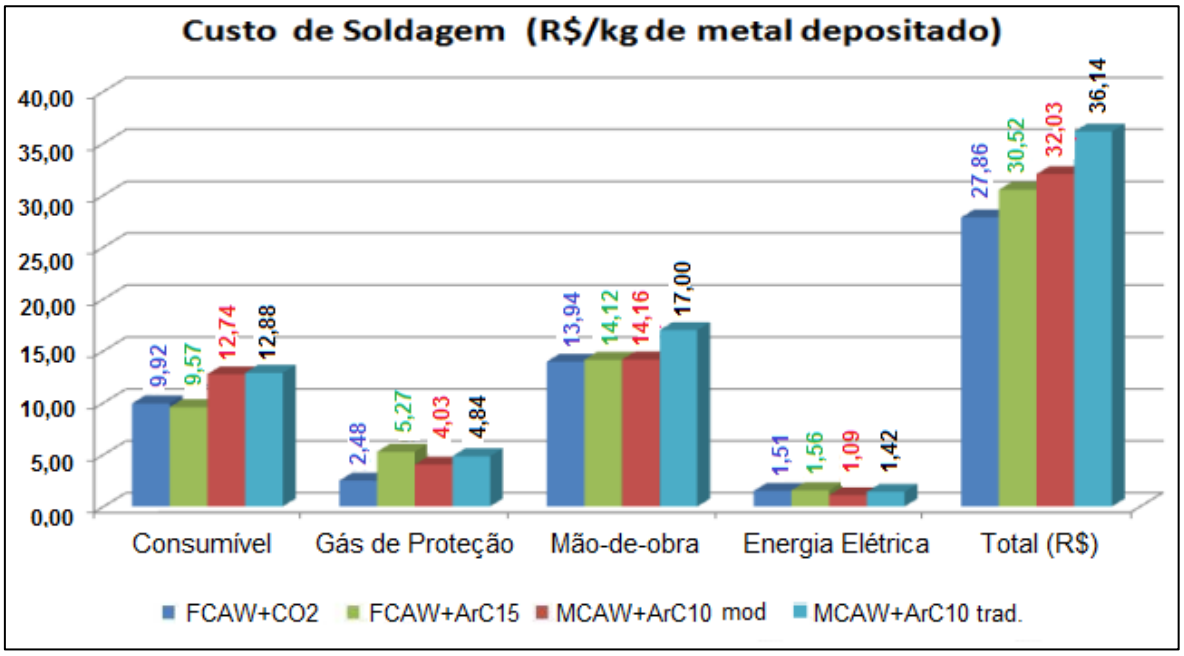


Figura II. 31 – Comparativo de custos para a posição 3F (PEDROSA, 2012)

Portanto, através dos estudos citados, percebe-se a necessidade fundamental em olhar para a produtividade e para todos os componentes que geram o custo total de soldagem para um correto dimensionamento e seleção do processo a ser empregado.

Em relação as propriedades mecânicas de juntas soldadas de aços de alta resistência, um estudo realizado por ZHANG et al. (2016) avaliou as propriedades mecânicas e microestruturais para diferentes tipos de arame *metal cored* de alta resistência. Para isto, foram soldadas juntas com cinco condições distintas: a primeira com consumível de classificação AWS 5.28 E90C-K3, a segunda e a terceira de classe E110C-K4 e a quarta e quinta E120C-K4. Os ensaios mecânicos consistiram em impacto por Charpy-V a -40ºC e tração, com corpos de provas retirados ao longo do cordão na seção longitudinal.

Avaliou-se a susceptibilidade de trincas por soldagem através do cálculo do equivalente em carbono Pcm (*Parameter Crack Measurement*), com base na análise química por espectrometria por emissão óptica, onde os arames de classe E120C-K4 apresentaram os maiores resultados (0,25) e o menor para o arame E90C-K3 (Pcm=0,16). A Tabela II.4 mostra a composição química dos metais de solda e a Figura II.32 mostra os resultados dos ensaios mecânicos.

Para a caracterização microestrutural, foram realizadas análises por microscopia óptica e eletrônica de varredura e uma análise estatística por contagem de pontos no metal de solda do último passe. As porcentagens dos constituintes de cada amostra são mostradas na Tabela II.4. Nota-se que o arame de classe 90 é constituído basicamente por ferrita acicular e ferrita primária. Nos arames E110C-K4, a bainita é a fase predominante, com presença de ferrita acicular. Para os consumíveis de maior resistência (E120C-K4), observa-se a formação de martensita, embora a bainita ainda seja a fase predominante. Esta evolução microestrutural parece estar concordante com a composição química (Tabela II.4). Embora a resistência mecânica aumente com o Pcm, a tenacidade ao impacto apresenta comportamento diferente, o que foi atribuído a presença de microfases nos metais de solda (Zhang et al., 2016). Estes resultados são consistentes com os obtidos por Jorge et al. (2016), que observaram um aumento de resistência mecânica, mas com variação da tenacidade dependendo da relação entre os elementos níquel e manganês, conforme previamente proposto por Zhang e Farrar (1997) para o processo eletrodo revestido.

Tabela II.4 – Composição química e microestrutura dos metais depositados pelo processo MCAW (Zhang et al., 2016).

Solda	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Pcm	Microestrutura (%)
1 (E90C-K3)	0,027	1,64	0,35	0,13	0,32	1,01	0,17	45FA, 45FP,10B
2 (E110C-K4)	0,043	1,78	0,31	0,24	0,42	1,89	0,21	23FA,77B
3 (E110C-K4)	0,029	1,83	0,41	0,26	0,62	1,92	0,22	18FA,82B
4 (E120C-K4)	0,048	1,88	0,40	0,31	0,64	1,87	0,24	5FA,81B,14M
5 (E120C-K4)	0,039	1,92	0,52	0,23	0,78	2,01	0,25	9FA, 77B, 16M

Onde: FA- Ferrita acicular; FP – Ferrita Primária; B – Bainita; M – Martensita.

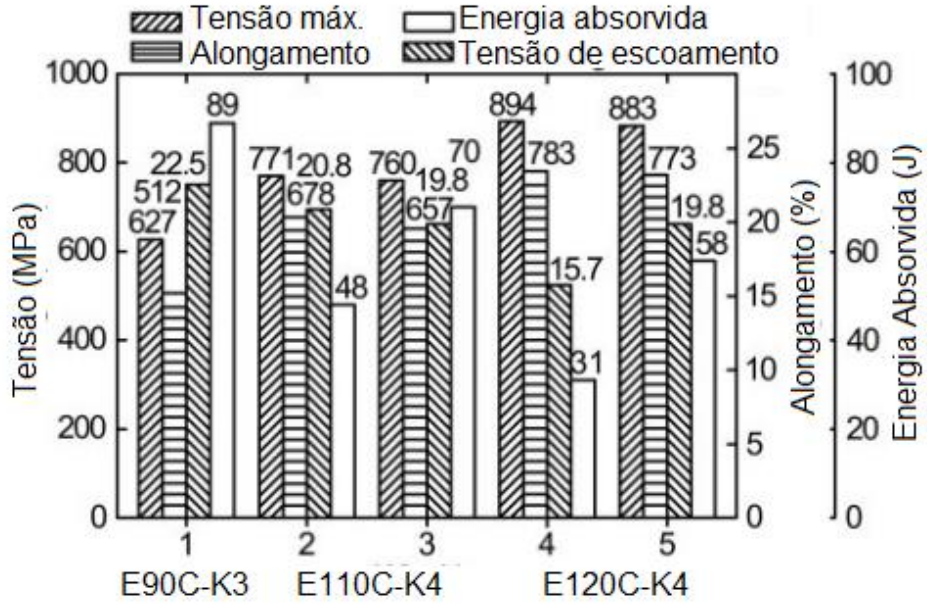


Figura II. 32 - Propriedades Mecânicas de metais de solda produzidos por MCAW (ZHANG et al., 2016)

Na avaliação comparativa com outros processos, FARNEZE et al. (2010) realizaram um estudo abordando as soldagens com eletrodo revestido e *metal cored*, com utilização de consumível de alta resistência, AWS E11018M (ER) e AWS E110C-G (MCAW). Os resultados mostraram que a dureza (HV) de ambos os processos apresentaram resultados similares. Já a energia absorvida obtida pelo MCAW foi inferior (Figura II.33), o que foi atribuído ao fato do metal de solda ter apresentado uma microestrutura mais grosseira e um maior percentual de região colunar devido ao menor número de passes. PRAJAPATI (2017) encontrou um comportamento similar do metal de solda para o ensaio de impacto a -49ºC, onde a menor energia absorvida foi obtida pelo MCAW quando comparada aos metais de solda obtidos pelos processos GMAW e FCAW em seu estudo.

Embora com resultados de tenacidade inferiores, o processo MCAW permite sua adequação a requisitos rígidos de aplicações industriais (Jorge et al., 2016; Jorge et al.,2008), sendo uma alternativa atrativa por sua produtividade.

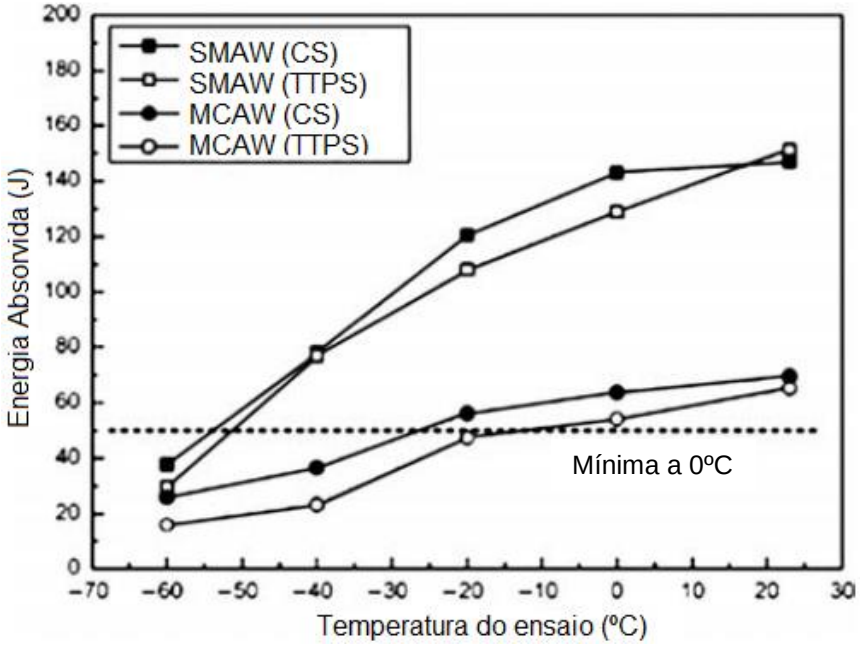


Figura II. 33 - Energia Absorvida no ensaio de impacto Charpy-V (FARNEZE et al., 2010)

CAPÍTULO III
MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será detalhada a metodologia adotada para a realização deste trabalho. No fluxograma mostrado na Figura III.1, pode-se observar a linha de raciocínio da pesquisa e todas as etapas do processo.

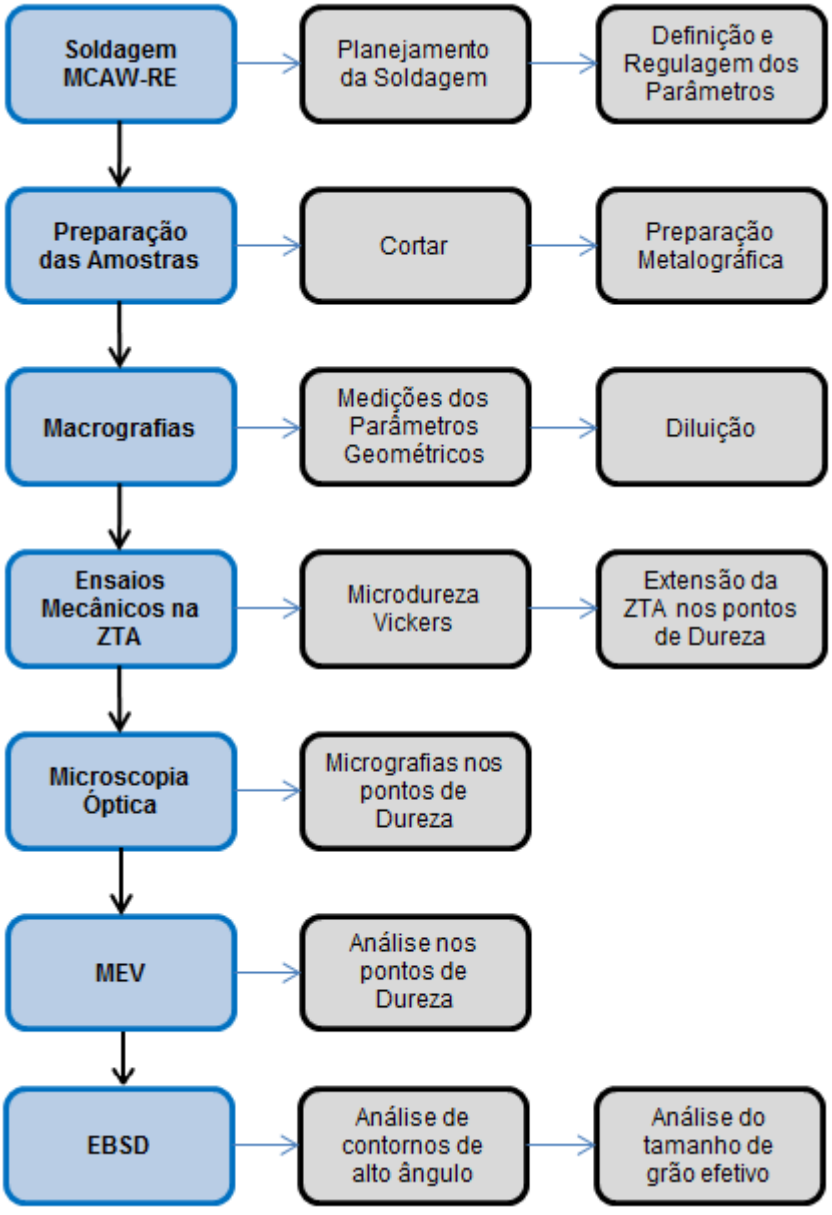


Figura III. 1 – Fluxograma de atividades

III.1. Materiais

O metal de base a ser soldado foi disponibilizado em chapas de dimensões 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 16 mm de espessura do aço ASTM A516 grau 70 e o consumível selecionado é do tipo tubular *"Metal Cored",* de classificação E110C-K4 H4 (AWS A5.28, 2015) e diâmetro de 1,2mm. A Tabela III.1 mostra as composições químicas dos materiais utilizados, obtidas pela técnica de espectrometria por emissão óptica. No metal de solda, buscou-se uma região com influência da diluição, de modo a representar a compatibilidade com os resultados dos ensaios mecânicos e metalográficos.

Tabela III. 1 - Composição química dos materiais.

Elemento (% em peso)	Metal Base	Metal de Solda
C	0,167	0,122
Mn	1,150	1,510
P	0,0131	0,010
S	<0,005	<0,005
Si	0,196	0,465
Cr	0,0211	0,107
Mo	0,0025	0,317
Ni	0,0212	1,120
Cu	0,0259	0,038
Nb	0,020	0,006
Ti	0,0146	0,026
V	0,0048	<0,005

III.2. Procedimento de Soldagem.

As soldagens realizadas são do tipo cordões sobre chapa, utilizando uma mistura Ar-10%CO_2 como gás de proteção. Foram depositados cordões de solda com frequência de rotação de 1.500, 3.000 e 5.000rpm e com diâmetro médio de rotação de 3, 6 e 8 mm, seguindo um planejamento fatorial 3^k, conforme mostra a Tabela III.2, seguindo a metodologia realizada por GARCIA (2019) para o processo GMAW-RE. Em relação aos parâmetros de soldagem, foi utilizada uma tensão média de 28V, intensidade de corrente de cerca de 240A e velocidade de deslocamento de 30 cm/min. A taxa de alimentação de arame foi de 8,4 m/min. Os parâmetros de soldagem citados anteriormente foram obtidos de estudos anteriores de soldagem do GMAW-RE com o arame sólido (SILVEIRA, 2018). Ao mudar para o processo MCAW-RE, fizeram-se ajustes para se obter uma soldagem estável e cordões com bons aspectos visuais.

A soldagem foi mecanizada através de um trator com trilho magnético, conectado ao controlador dos parâmetros da tocha de soldagem e interligado à fonte de soldagem do tipo sinérgica. A Figura III.2 mostra a montagem dos equipamentos.

Tabela III. 2 - Parâmetros de Processo usados na Soldagem dos cordões.

Nº do Cordão	Diâmetro médio de Rotação	Frequência de Rotação rpm
1	3	1.500
2	3	3.000
3	3	5.000
4	6	1.500
5	6	3.000
6	6	5.000
7	8	1.500
8	8	3.000
9	8	5.000

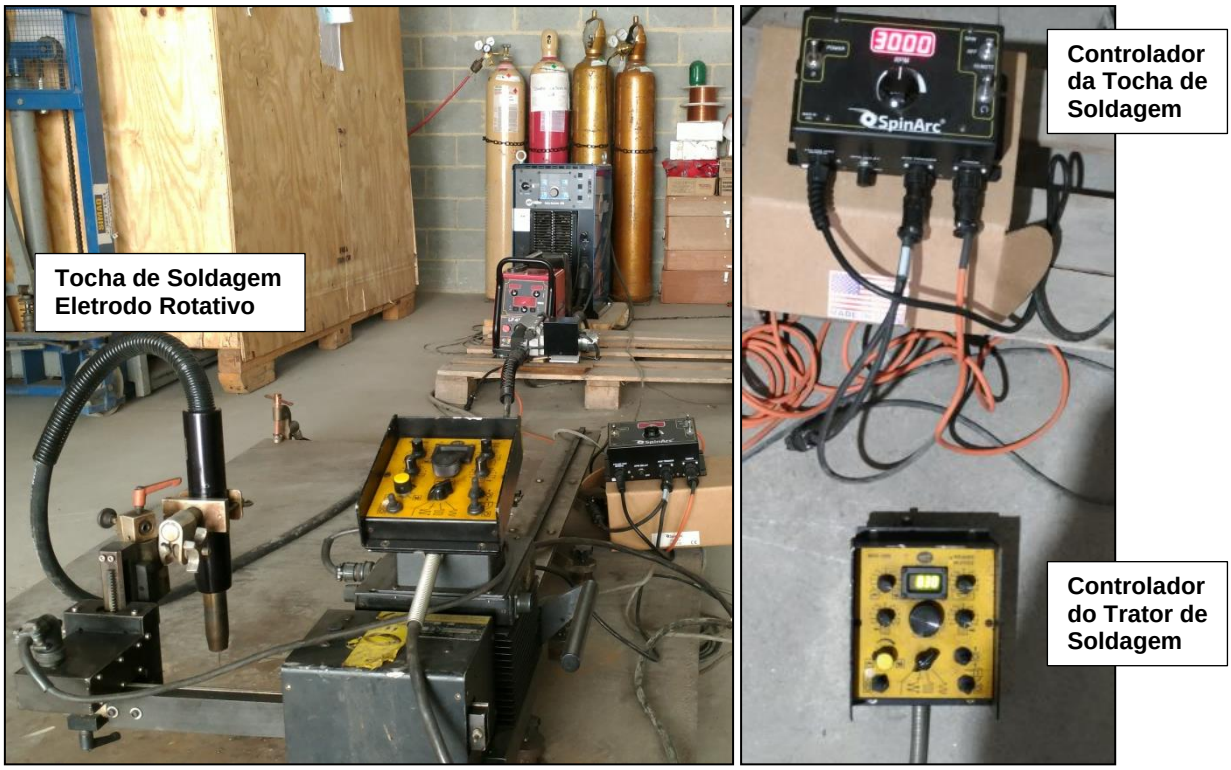


Figura III. 2 – Montagem dos equipamentos

III.3. Ensaios Mecânicos

Foram realizados ensaios de microdureza na escala Vickers ($HV_{0,5}$) conforme a norma ASTM E384 – 17 (2017) em amostras retiradas da seção transversal dos cordões soldados especificados no item anterior, com carga de 500 gf. por 15 segundos a temperatura ambiente. As impressões foram executadas na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de solda a uma distância de 0,25 mm da linha de fusão para as duas regiões. A Figura III.3 mostra a localização das impressões de microdureza. Foi utilizado um microdurômetro da marca Instron-Wilson modelo 402 MVD.

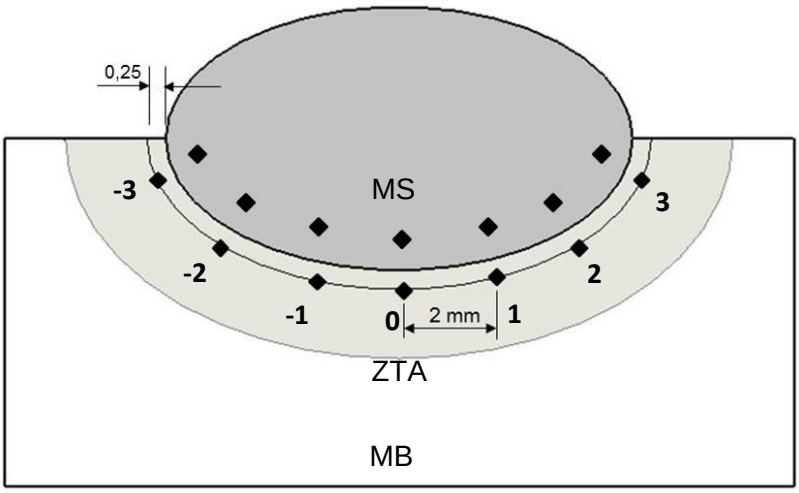


Figura III. 3 - Posicionamento dos pontos de dureza (HV0,5)

III.4. Ensaios Metalográficos

A análise metalográfica foi realizada por microscopia óptica (MO), por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e *Electron Backscatter Diffraction* (EBSD).

A preparação das amostras consistiu das técnicas convencionais de lixamento com lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 500 e 600 seguido de polimento com pasta de diamante de 6, 3, e 1μm. Após o polimento, foi realizado ataque químico com reagente nital 2%. Para análise por EBSD, foi realizado um polimento adicional com sílica coloidal com granulometria de 0,25 μm e a análise foi conduzida em amostra sem ataque químico.

III.4.1 Aspectos Geométricos

Os aspectos geométricos foram avaliados com o objetivo de investigar de que modo a combinação da frequência e do diâmetro médio de rotação influencia no perfil macroestrutural dos cordões de solda. Através da microscopia óptica (MO), foram realizadas medições relativas à penetração, reforço, largura do cordão e à extensão da ZTA de cada amostra. Para cada condição de soldagem, foram obtidos os valores mais representativos das grandezas mencionadas, sendo que no caso da extensão da ZTA, foram avaliadas as dimensões respectivas aos locais onde se detectaram os maiores e menores valores de dureza na região de grãos grosseiros, além da medição média realizada no centro do cordão de solda e nos dois lados relativos às posições -2 e 2 da Figura III.3. As medidas foram executadas aproximadamente na direção normal à curvatura da ZTA, de modo a padroniza-las.

III.4.1.1. Diluição

Foi ainda utilizado o software Image J, onde as áreas foram retiradas com base nas macrografias dos cordões de solda, para realizar os cálculos de diluição das amostras apresentadas na Tabela III.2. A equação matemática que representa a diluição do cordão de solda é dada por:

$$Diluição\ (\%) = \frac{Ap}{(Ap + Ar)} x100 \qquad (10)$$

Onde AP representa a área penetrada e AR, a área do reforço. A Figura III.4 ilustra a metodologia adotada para a diluição (Santos et. al, 2019).

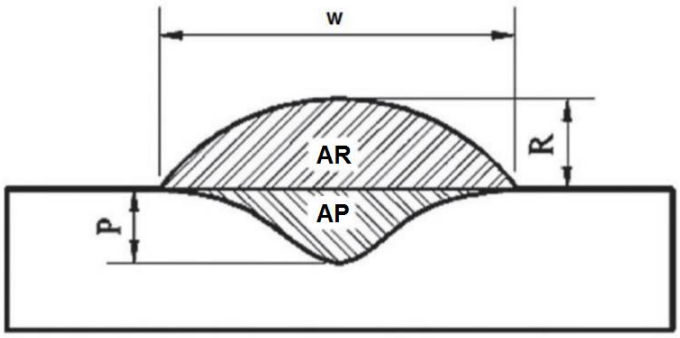


Figura III. 4 - Representação da diluição em cordão de solda (Santos et. al, 2019).

III.4.2. Caracterização Microestrutural

A microscopia óptica (MO) foi utilizada para uma primeira avaliação dos constituintes microestruturais presentes na RGGZTA e no metal de solda, nas posições relativas às impressões onde foram encontrados os maiores e menores valores de dureza (Figura III.3).

A partir de uma seleção preliminar dos parâmetros, as amostras de diâmetro de rotação iguais a 3 foram selecionadas e encaminhadas para o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As análises por MEV também foram realizadas na RGGZTA e no MS, nos mesmos pontos, onde se obteve maior detalhamento dos constituintes.

Por fim, foi realizada a análise por EBSD (*Electron Backscatter Diffraction*) somente nos metais de solda das amostras anteriores, como técnica complementar para a caracterização microestrutural. Para isto, foram avaliadas a frequência dos contornos de grãos de alto ângulo (CGAA) com ângulo de desorientação maior que 15° (DIAZ-FUENTES et al., 2003) e o tamanho de grão efetivo (TGE) de cada região analisada, de forma a contribuir para a seleção da melhor condição de soldagem. As análises foram realizadas com o MEV operando com voltagem de 20 KV, distância de trabalho de 20 mm, ângulo de inclinação da amostra de 70^{o} e step-size de 0,3μm. O pós-processamento dos dados (reconstrução dos mapas) de EBSD foi realizado com auxílio do Software HKL Channel 5. O tamanho de grão efetivo (TGE) foi obtido pelo método de interseção em 2 direções perpendiculares.

Para microscopia óptica, foi utilizado o microscópio óptico da marca Olympus modelo BX60M auxiliado pelo software de aquisição de imagens Olympus Stream Essentials. Para análise por microscopia eletrônica de varredura, foi utilizado o microscópio CamScam 3200 LV da marca Cambridge Instruments.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS

IV1. Aspectos Geométricos

As macrografias das amostras retiradas da seção transversal dos cordões foram dispostas em forma de mosaico como mostra a Figura IV.1. Os resultados das medições seguindo a metodologia exposta no item III.4.1 são mostrados na Tabela IV.1.

Tabela IV. 1 - Aspectos geométricos dos cordões depositados.

Amostra	Diâmetro médio de Rotação (mm)	Frequência de Rotação - rpm	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)
1	3	1.500	13,49	3,51	2,83
2		3.000	13,63	3,46	2,79
3		5.000	14,79	3,02	1,47
4	6	1.500	13,69	3,60	2,69
5		3.000	14,38	3,11	1,58
6		5.000	15,55	2,00	0,75
7	8	1.500	14,32	3,32	1,83
8		3.000	14,54	2,57	1,27

A Figura IV.1 mostra o comportamento da largura, reforço e penetração em função da frequência de rotação, para os diâmetros de 3, 6 e 8 mm.

Cabe observar que a Tabela IV.1 não apresenta resultados para amostra 9. A soldagem com os parâmetros de frequência igual a 5.000rpm e diâmetro médio de rotação igual a 8 não produziu um cordão possível de ser medido, devido à grande instabilidade de arco que impossibilitou a formação da poça de fusão. Assim como encontrado por SANTOS et al. (2018) e SILVEIRA (2018), os resultados mostraram uma tendência no aumento da largura do cordão de solda com o aumento da frequência de rotação. Em relação ao reforço e à penetração, a tendência foi a redução em função da frequência de rotação. Ademais, o comportamento dos aspectos geométricos citados é mais acentuado quanto maior o diâmetro de rotação utilizado.

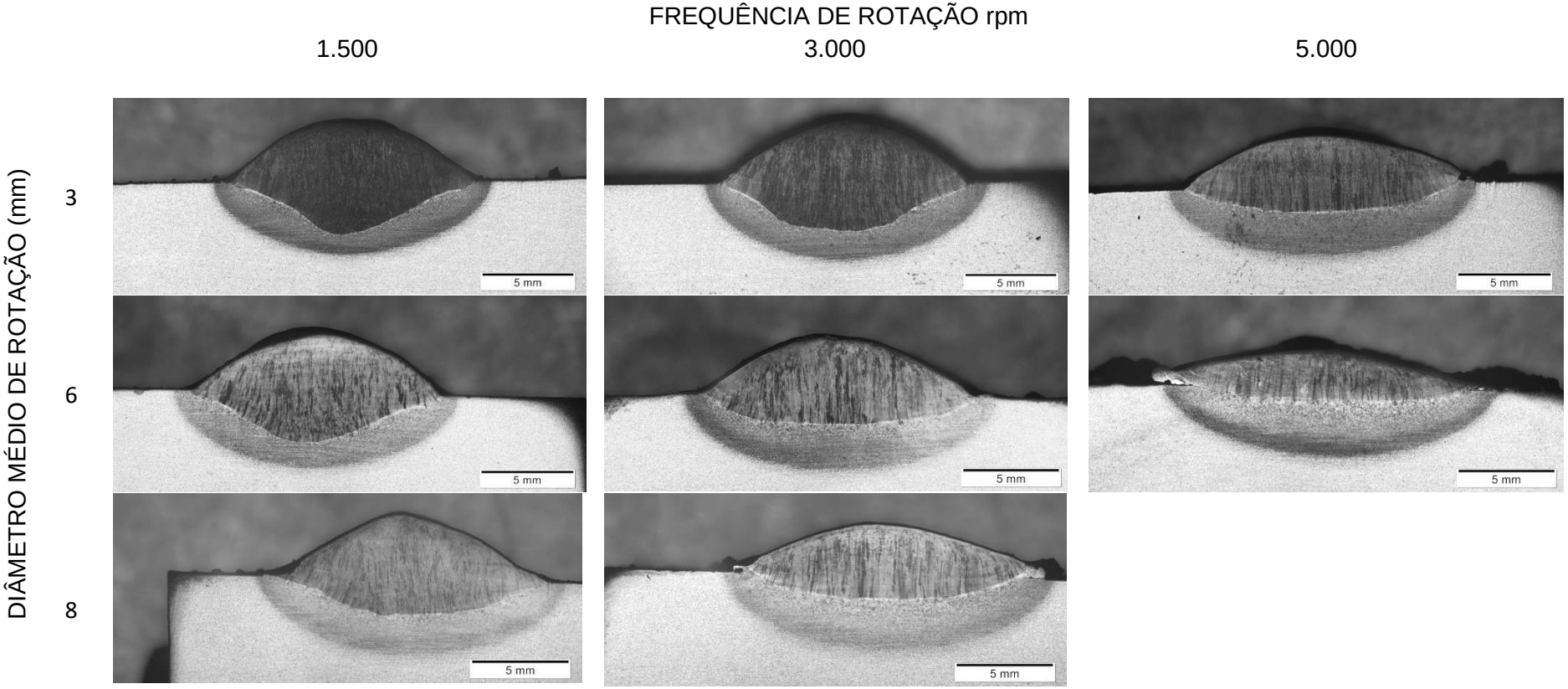


Figura IV. 1 – Macrografia dos cordões depositados. Ataque: nital 2%.

IV.1.1. Diluição

A Tabela IV.2 mostra os resultados de diluição das amostras, calculadas a partir do mosaico de macrografias e seguindo a metodologia da seção III.4.1.

Observa-se que o índice de diluição das amostras soldadas pelo arame *metal cored* se mantém relativamente no mesmo patamar em função dos parâmetros de diâmetro e frequência de rotação. As áreas mostradas representam indiretamente o volume de metal de adição depositado na região por unidade de comprimento. Em relação à área depositada (Ad), observa-se uma tendência de redução para o volume do reforço conforme o aumento da frequência de rotação. Para a área penetrada (Ap), este comportamento é notado para os diâmetros médios de rotação iguais a 6 e 8, principalmente para frequências maiores que 1.500rpm. Considerando apenas a frequência de rotação de 5.000rpm, há redução no volume em todas as amostras, sendo mais acentuado quanto maior o diâmetro de rotação, não formando nem mesmo um cordão para o diâmetro de rotação de 8.

Tabela IV. 2 – Cálculo da diluição dos cordões depositados.

Amostra	Frequência Rotação rpm	Diâmetro médio de Rotação	Área Penetrada (Ap)	Área depositada (Ad)	Área Total	Diluição
1	1.500	3	20,3	31,5	51,8	39%
2	3.000	3	23,1	30,7	53,7	43%
3	5.000	3	15,9	28,2	44,1	36%
4	1.500	6	21,2	31,9	53,0	40%
5	3.000	6	18,2	27,2	45,5	40%
6	5.000	6	7,8	21,4	29,2	27%
7	1.500	8	16,5	27,1	43,6	38%
8	3.000	8	12,9	26,7	39,6	33%

Onde: Ap, Ad e At são medidas em mm².

IV.1.2. Extensão Média da ZTA

A Figura IV.2 mostra cada uma das três medidas realizadas para calcular a extensão média da ZTA, exibida para cada amostra na Tabela IV.3. Nota-se que há uma tendência de aumento da extensão da ZTA em função dos parâmetros de processo. Embora ocorra um aumento nas medições laterais (nas posições -2 e 2), observa-se que a ZTA da região central do cordão é a mais influenciada em sua extensão, principalmente pela atenuação da penetração do tipo “dedo” (*finger type)*.

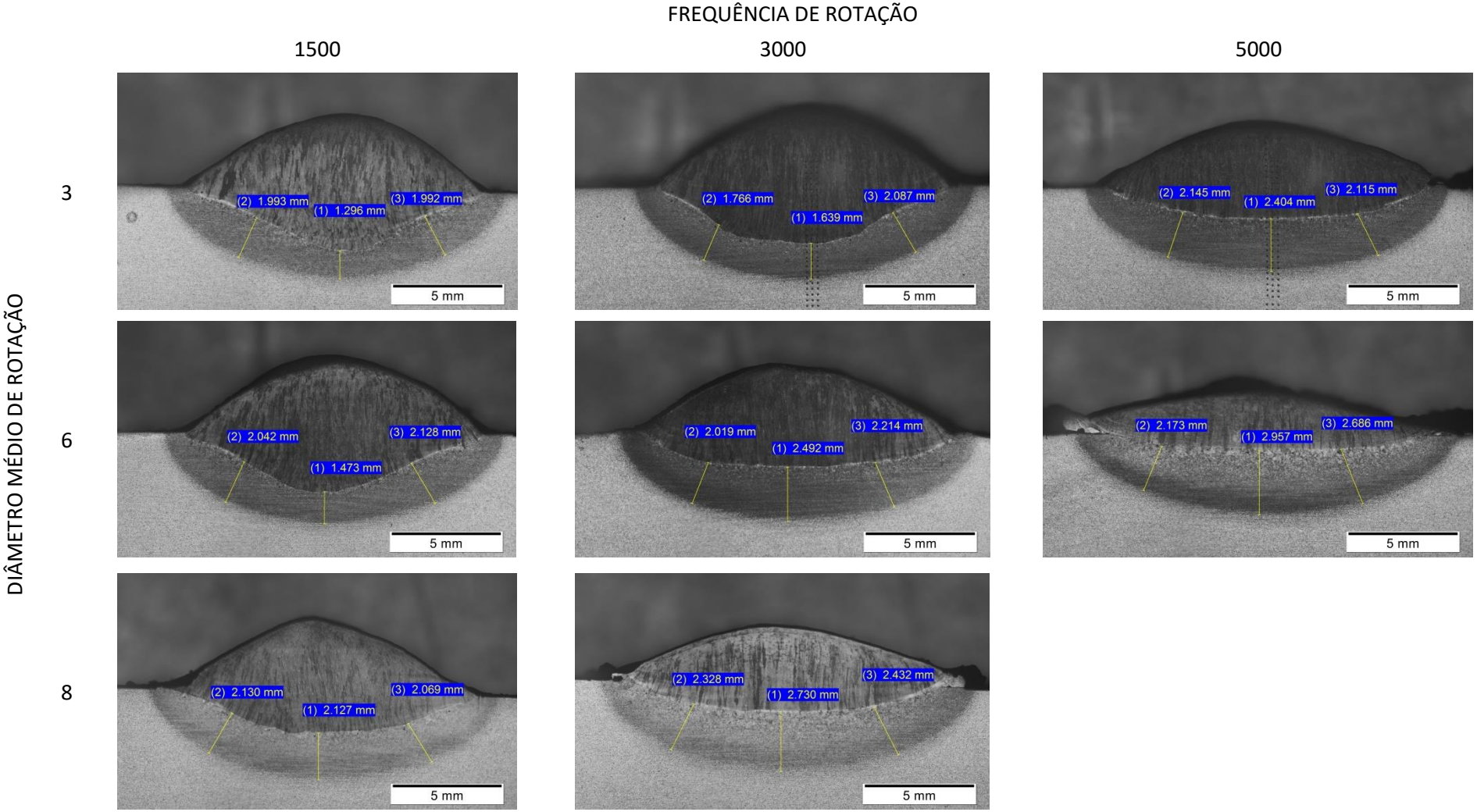


Figura IV. 2 – Medidas da ZTA retiradas das macrografias dos cordões de solda.

Tabela IV. 3 – Extensão média da ZTA em função dos parâmetros de processo.

Amostra	Diâmetro médio de Rotação (mm)	Frequência de Rotação (rpm)	Extensão no centro da ZTA (mm)	Extensão média da ZTA (mm)
1	3	1.500	1,29	1,76
2		3.000	1,64	1,83
3		5.000	2,40	2,22
4	6	1.500	1,47	1,88
5		3.000	2,49	2,24
6		5.000	2,96	2,61
7	8	1.500	2,13	2,11
8		3.000	2,73	2,50

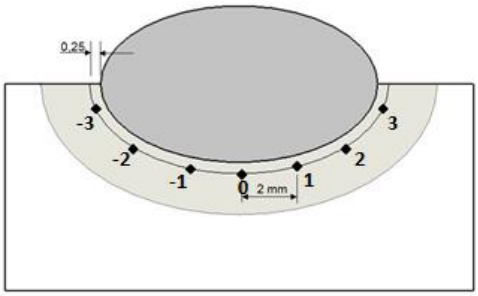
IV.2. Ensaio de Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$)

As Tabelas IV.4 e IV.5 mostram os resultados dos ensaios de microdureza na ZTA conforme o especificado no item III.3, seguindo a mesma metodologia de GARCIA (2019). A partir destes resultados, nota-se que:

a) Os valores de dureza variam significativamente ao longo da região de grãos grosseiros de uma mesma amostra, não possuindo uma lei de formação;
b) Os resultados da Tabela IV.5 mostraram que os maiores valores de dureza foram encontrados nas amostras com maiores frequências de rotação;
c) Os resultados mais homogêneos foram obtidos para a amostra 1 e;
d) As localizações dos pontos de maior dureza em cada amostra estão em pontos diferentes e até então aleatórios, em concordância com GARCIA (2019).

As Tabelas IV.6 e IV.7 mostram os resultados dos ensaios de microdureza no metal de solda, conforme o especificado no item II.3. Assim como na ZTA, percebe-se que as posições onde foram encontradas as maiores durezas não seguem uma lei de formação. Por outro lado, todos os pontos de menor dureza estão localizados nas regiões mais externas dos cordões, isto é, nas posições 3 e -3. Além disso, quando comparadas as Tabelas IV.5 e IV.7, não se observa uma relação entre as posições de maior dureza da ZTA e do MS de uma mesma amostra.

Tabela IV. 4 - Resultados dos ensaios de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) na ZTA.



			Localização e Microdureza						
Amostra	D.R	F.R. rpm	-3	-2	-1	0	1	2	3
1	3	1.500	291	299	286	283	290	291	267
2		3.000	254	247	241	250	264	303	246
3		5.000	311	311	369	339	306	297	335
4	6	1.500	249	274	267	252	249	310	291
5		3.000	351	359	349	349	357	335	308
6		5.000	340	384	385	376	372	342	363
7	8	1.500	299	323	257	262	290	323	274
8		3.000	287	277	299	309	299	264	280

Onde: D.R. – Diâmetro Médio de rotação; F.R. – Frequência de rotação.

Tabela IV. 5 - Detalhamento das posições de maior e menor dureza ($HV_{0,5}$) na ZTA.

Amostra	D.R	F.R. rpm	Maior dureza	Menor dureza	Média	Desvio Padrão	Posição Maior dureza	Posição Menor Dureza
1	3	1.500	299	267	287	9	-2	3
2		3.000	303	241	258	20	2	-1
3		5.000	369	297	324	23	-1	2
4	6	1.500	310	249	270	22	2	-3
5		3.000	359	308	344	16	-2	3
6		5.000	385	340	366	17	-1	-3
7	8	1.500	323	264	294	21	-2	0
8		3.000	346	276	295	23	0	2

Onde: Média de dureza representa a média das medições na RGG mostradas Tabela IV.4, isto é, dos pontos -3 ao 3.

Tabela IV. 6 - Resultados dos ensaios de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) no MS.

			Localização e Microdureza						
Amostra	D.R	F.R. rpm	-3	-2	-1	0	1	2	3
1	3	1.500	258	279	262	273	271	279	276
2		3.000	267	266	250	271	253	269	249
3		5.000	267	304	315	307	308	281	312
4	6	1.500	275	283	268	267	276	277	262
5		3.000	338	366	374	352	370	345	316
6		5.000	433	412	431	433	425	414	398
7	8	1.500	292	291	283	283	280	282	250
8		3.000	253	276	275	278	271	261	253

Tabela IV. 7 - Detalhamento das posições de maior e menor dureza ($HV_{0,5}$) no MS.

Amostra	D.R	F.R. rpm	Maior dureza	Menor dureza	Média	Desvio Padrão	Posição Maior dureza	Posição Menor Dureza
1	3	1.500	279	258	271	8	2	-3
2		3.000	271	249	261	9	0	3
3		5.000	315	267	299	17	-1	-3
4	6	1.500	283	262	273	7	-2	3
5		3.000	374	316	351	19	-1	3
6		5.000	433	398	421	12	-3	3
7	8	1.500	292	250	280	13	-3	3
8		3.000	278	253	267	10	0	-3

IV.2.1. Extensão da ZTA nos pontos de maior e menor dureza

A Tabela IV.8 mostra a extensão da ZTA nos pontos de maior e menor dureza da RGGZTA por amostra. Os resultados apontam que os pontos de maior dureza se localizam em uma região de ZTA mais extensa quando comparados com os de menor dureza. Na Figura IV.3 é mostrado o mosaico com as medições de cada amostra.

Tabela IV. 8 - Extensão da ZTA nos pontos de maior e menor dureza

Posição			Maior dureza	Menor dureza
Amostra	Diâmetro médio de Rotação	Frequência de Rotação rpm	Extensão da ZTA (mm)	
1	3	1.500	2,06	1,44
2		3.000	2,07	1,68
3		5.000	2,32	2,13
4	6	1.500	2,07	1,46
5		3.000	1,93	1,71
6		5.000	2,72	1,65
7	8	1.500	2,11	2,08
8		3.000	2,67	2,14

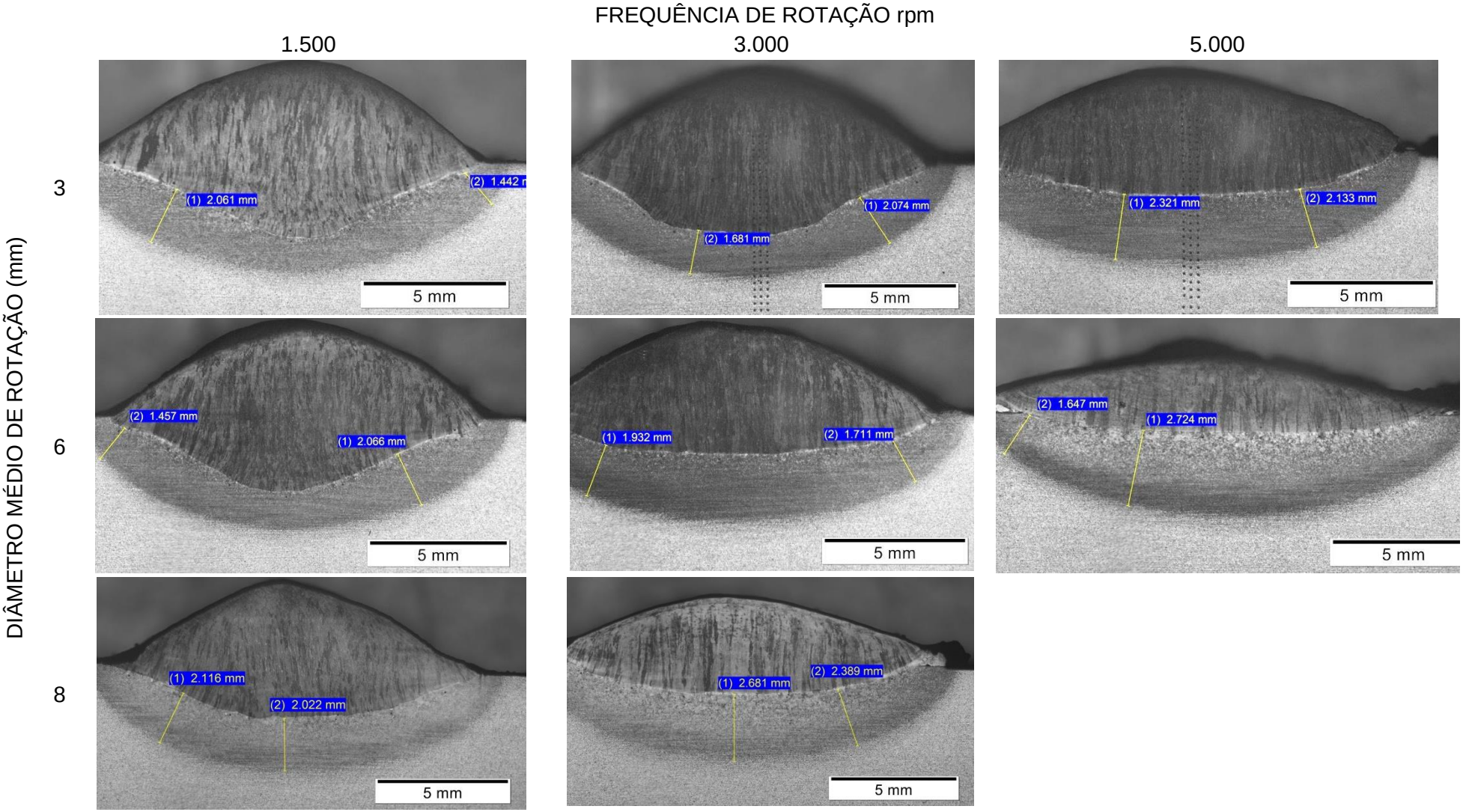


Figura IV. 3 - Mosaico da Extensão da ZTA nos pontos de maior e menos dureza.

IV.3. Caracterização Microestrutural

IV.3.1. Microscopia Óptica

As Figuras IV.4 e IV.5 mostram os aspectos microestruturais das amostras nos pontos de maior e menor dureza da região de grãos grosseiros da ZTA (RGGZTA), respectivamente. Percebe-se que, embora a microestrutura seja, presumivelmente, constituída de martensita pelo seu aspecto morfológico e valor de dureza obtido, nota-se que a microscopia óptica não é uma ferramenta eficaz na clarificação dos constituintes microestruturais presentes. Essa dificuldade na intepretação das microestruturas pelo MO ocorre em maior escala no metal de solda que apresenta uma microestrutura mais refinada, mostrada na Figura IV.6.

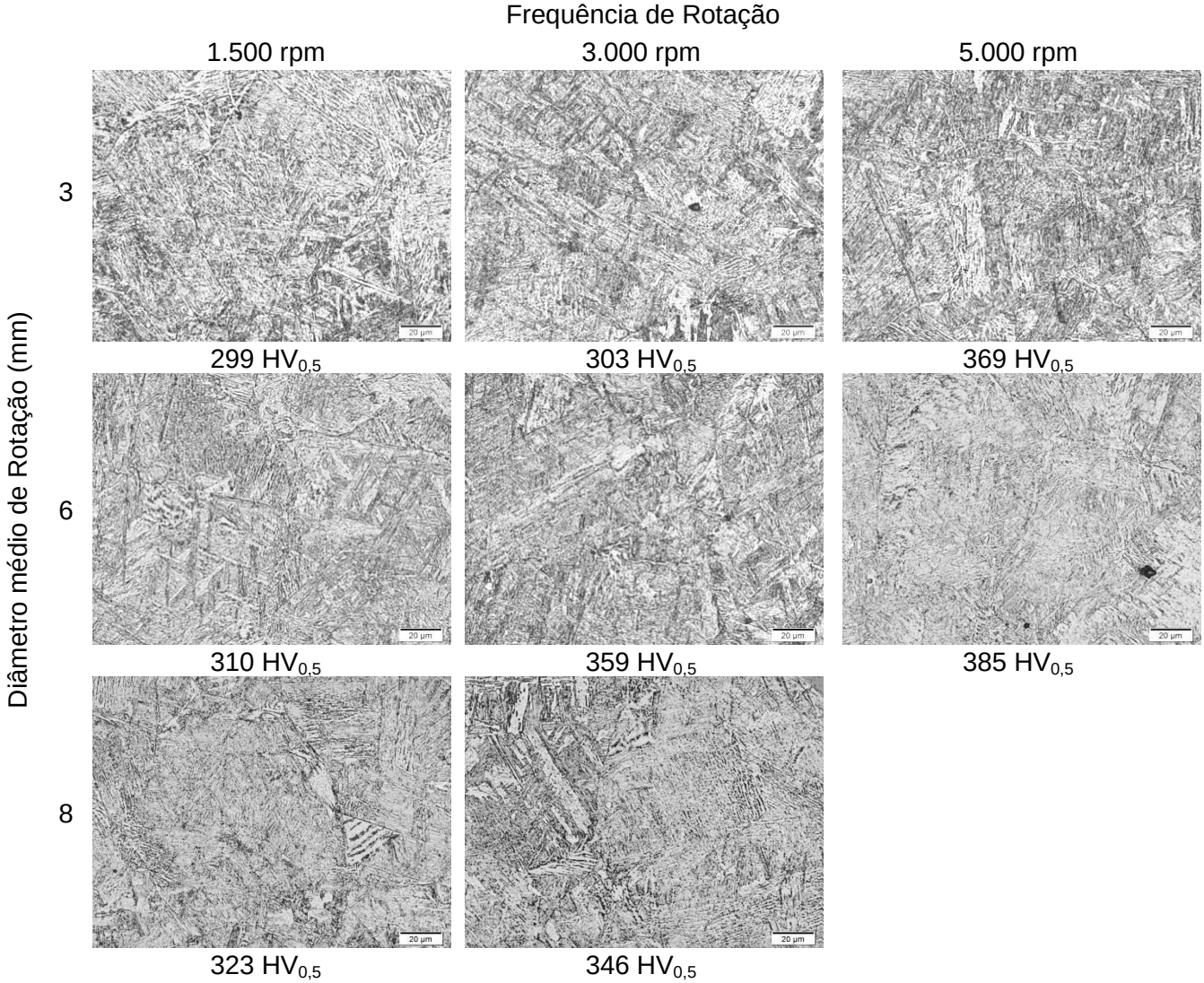


Figura IV. 4 – Microestrutura das amostras na região de maior dureza na RGGZTA (MO). Aumento: 1.000x. Ataque: nital 2%.

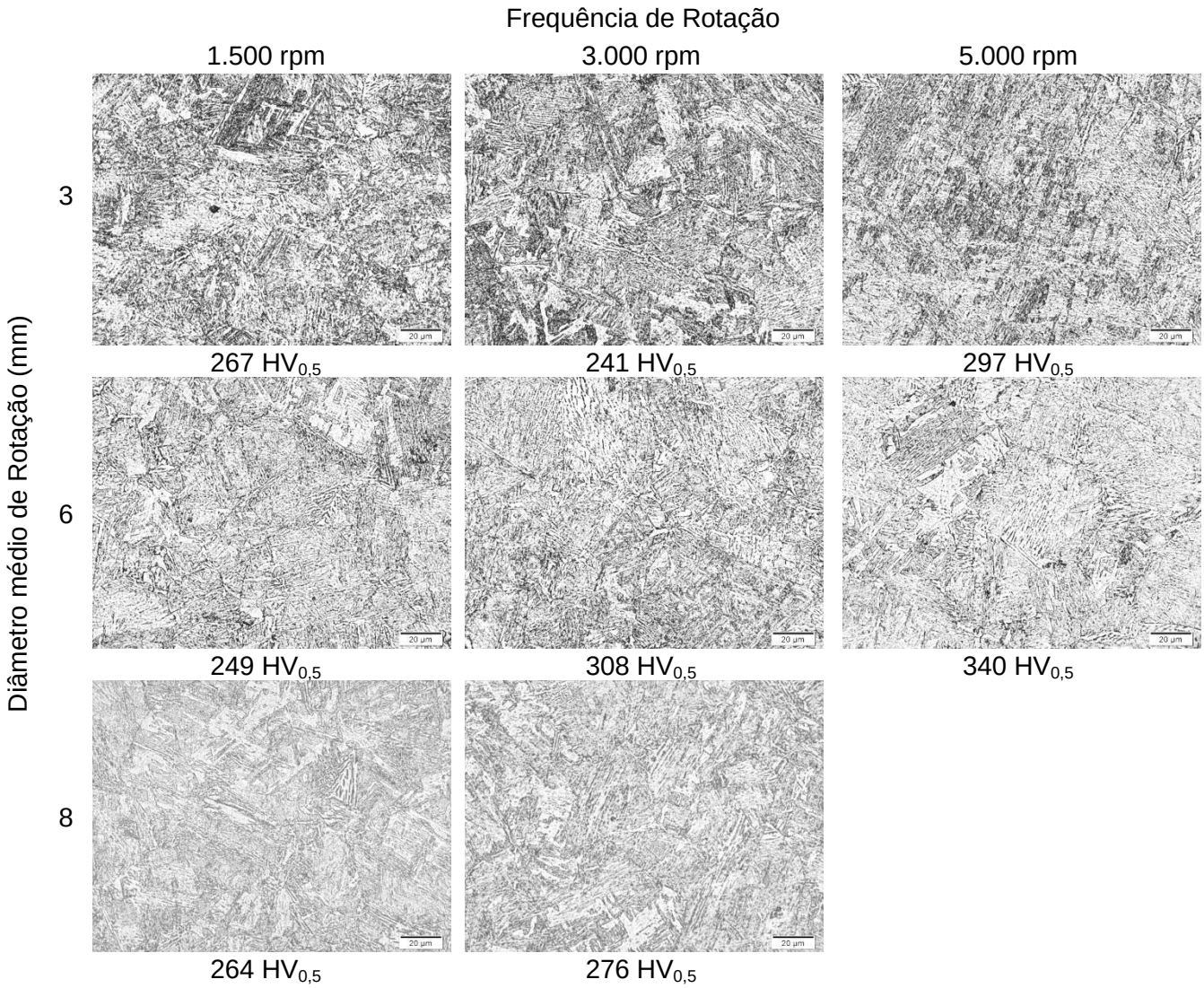


Figura IV. 5 – Microestrutura das amostras na região de menor dureza na RGGZTA (MO). Aumento: 1.000x. Ataque: nital 2%.

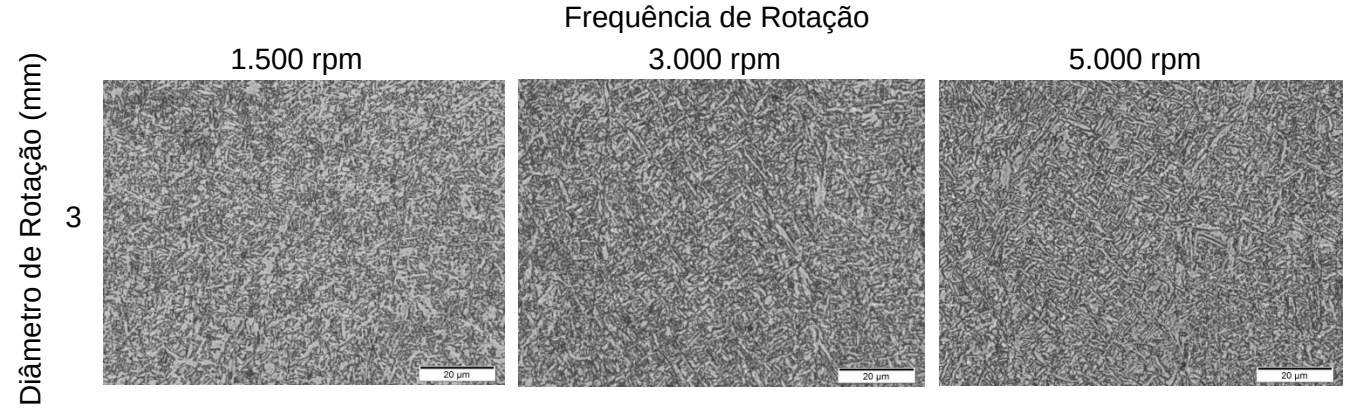


Figura IV. 6 - Microestruturas no metal de solda (MO). Aumento: 1.000x. Ataque: nital 2%.

IV.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para análise por MEV, foram selecionadas as amostras 1, 2 e 3, soldadas com o diâmetro de rotação igual a 3, por serem as que apresentaram os melhores resultados na avaliação dos parâmetros geométricos, como será abordado posteriormente.

As Figuras IV.7 e IV.8 mostram as microestruturas referentes a RGGZTA e metal de solda, respectivamente, nos pontos de maior e menor dureza.

Na RGGZTA, observa-se uma microestrutura constituída de martensita (M) e bainita (B), aparentemente, com maior predominância do primeiro constituinte para as regiões de maior dureza, como também observado em trabalho de GARCIA (2019).

Já no metal de solda, observa-se uma microestrutura refinada com presença de ferrita acicular (FA), ferrita primária (FP) e ferrita com segunda fase (FS), com predominância deste último constituinte. Na amostra 3 com frequência de 5.000rpm, onde se verificou o maior valor de dureza, observa-se, adicionalmente, a presença de algumas áreas martensíticas (M).

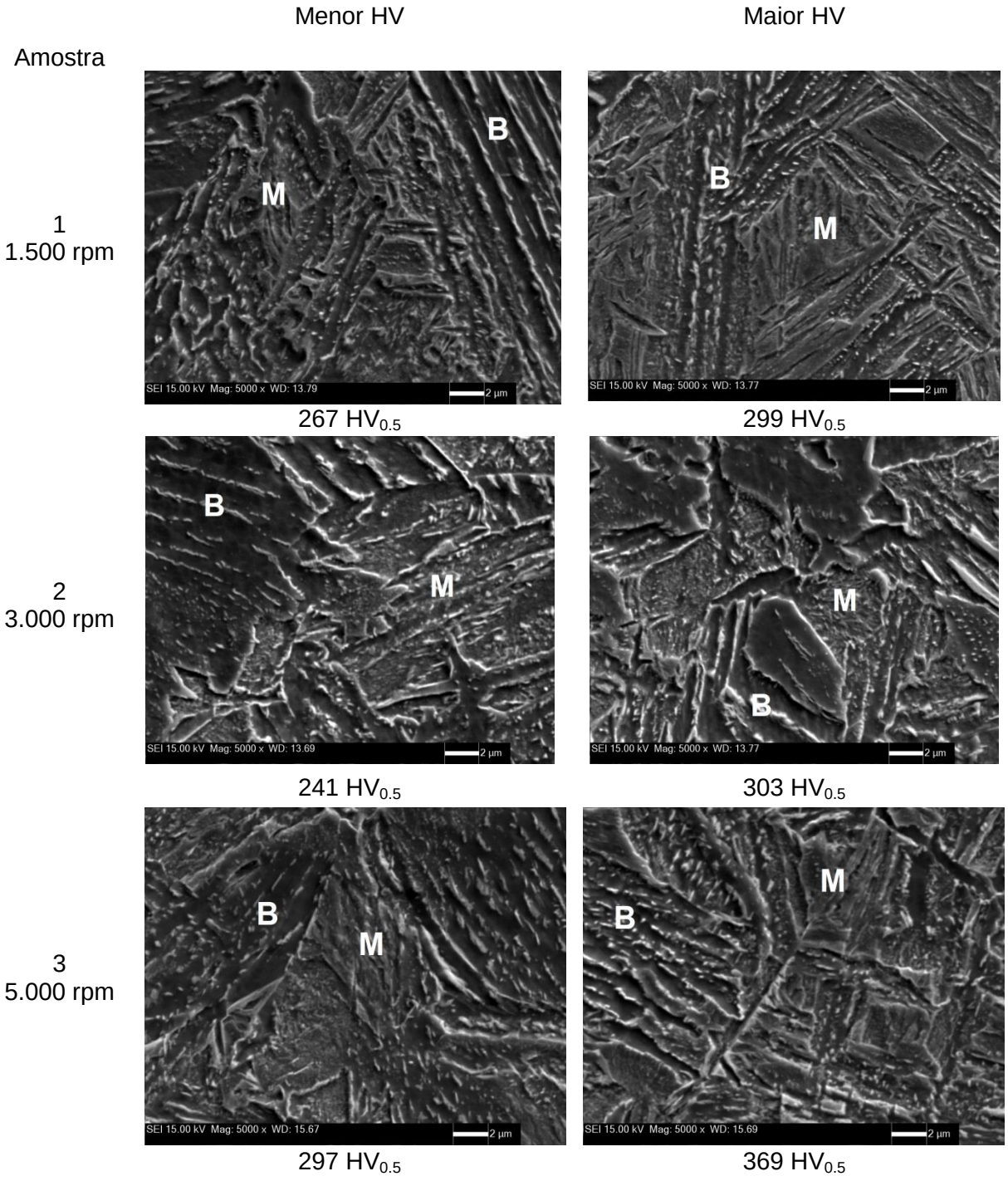


Figura IV. 7 - Microestruturas RGGZTA nos pontos de menor e maior dureza obtidas por MEV. Aumento: 5000x. Ataque: nital 2%

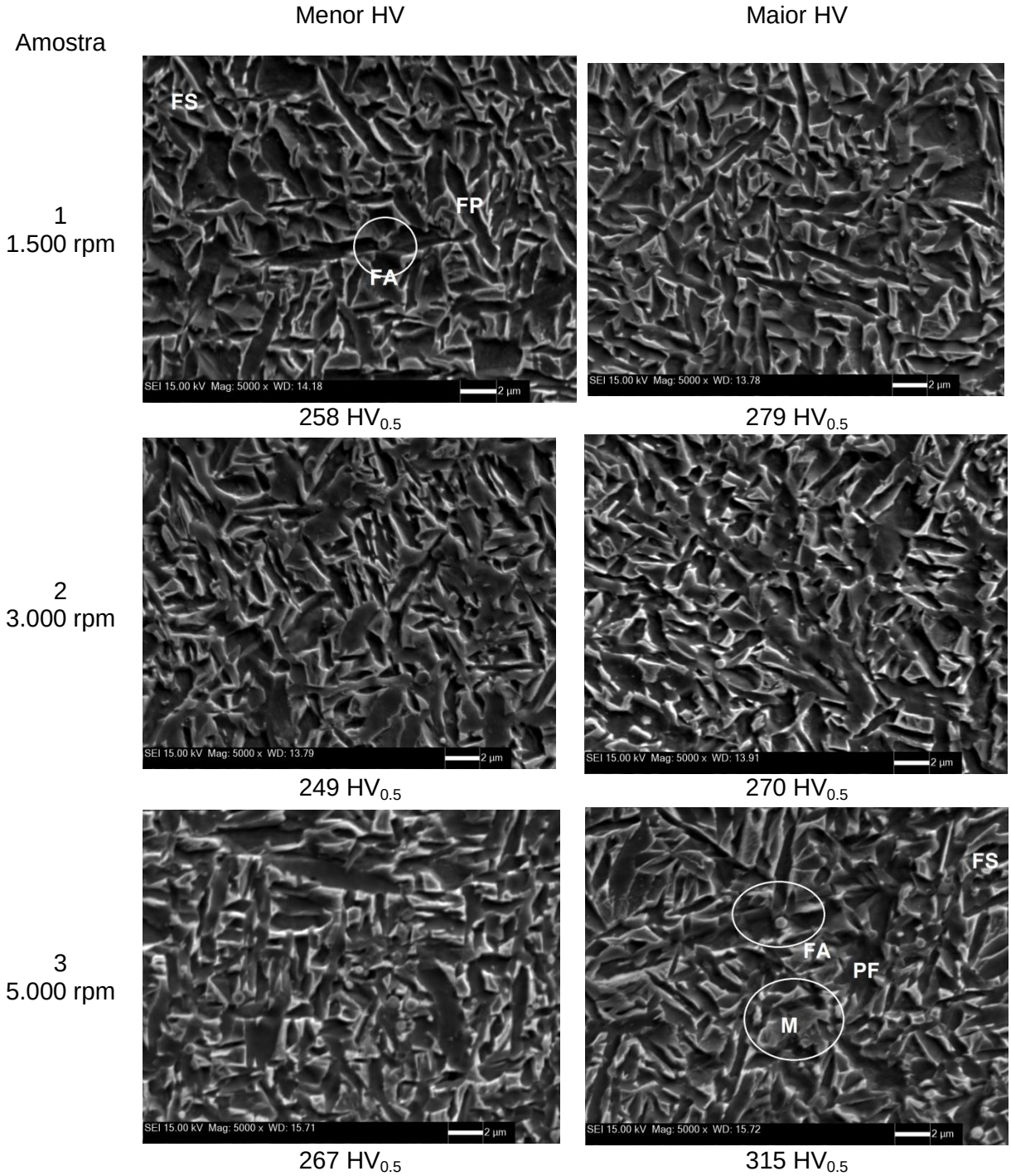


Figura IV. 8 - Microestruturas do metal de solda nos pontos de menor e maior dureza obtidas por MEV. Aumento: 5.000x. Ataque: nital 2%.

IV.3.3. Electron BackScattering Diffraction (EBSD)

Os resultados obtidos na análise por EBSD são mostrados nas Figuras IV.9 e IV.10, onde se percebem as seguintes características principais:

a) As figuras de polo invertida mostram as orientações cristalográficas para cores diferentes;
b) O aumento da frequência mostra um ligeiro refino do tamanho de grão efetivo, indicando a presença de maior percentual de microestruturas com menor temperatura de transformação;
c) Apesar das regiões de maior dureza apresentar um tamanho de grão efetivo ligeiramente menor que as regiões de menor dureza, estas regiões mostram uma menor frequência de contornos de alto ângulo (CAA), o que indica ser uma região mais crítica do metal de solda;
d) A amostra 3 na região de maior dureza mostra um perfil de distribuição de contornos de alto ângulo característico de presença de martensita (Zhou et al., 2016);
e) A amostra 1 apresentou os resultados mais homogêneos, com menores diferenças entre as condições de maior e menor dureza e;
f) A Figura IV.10 indica que a homogeneidade ocorre para toda a amostra 1, sendo que a região central do cordão de solda é a região mais refinada.

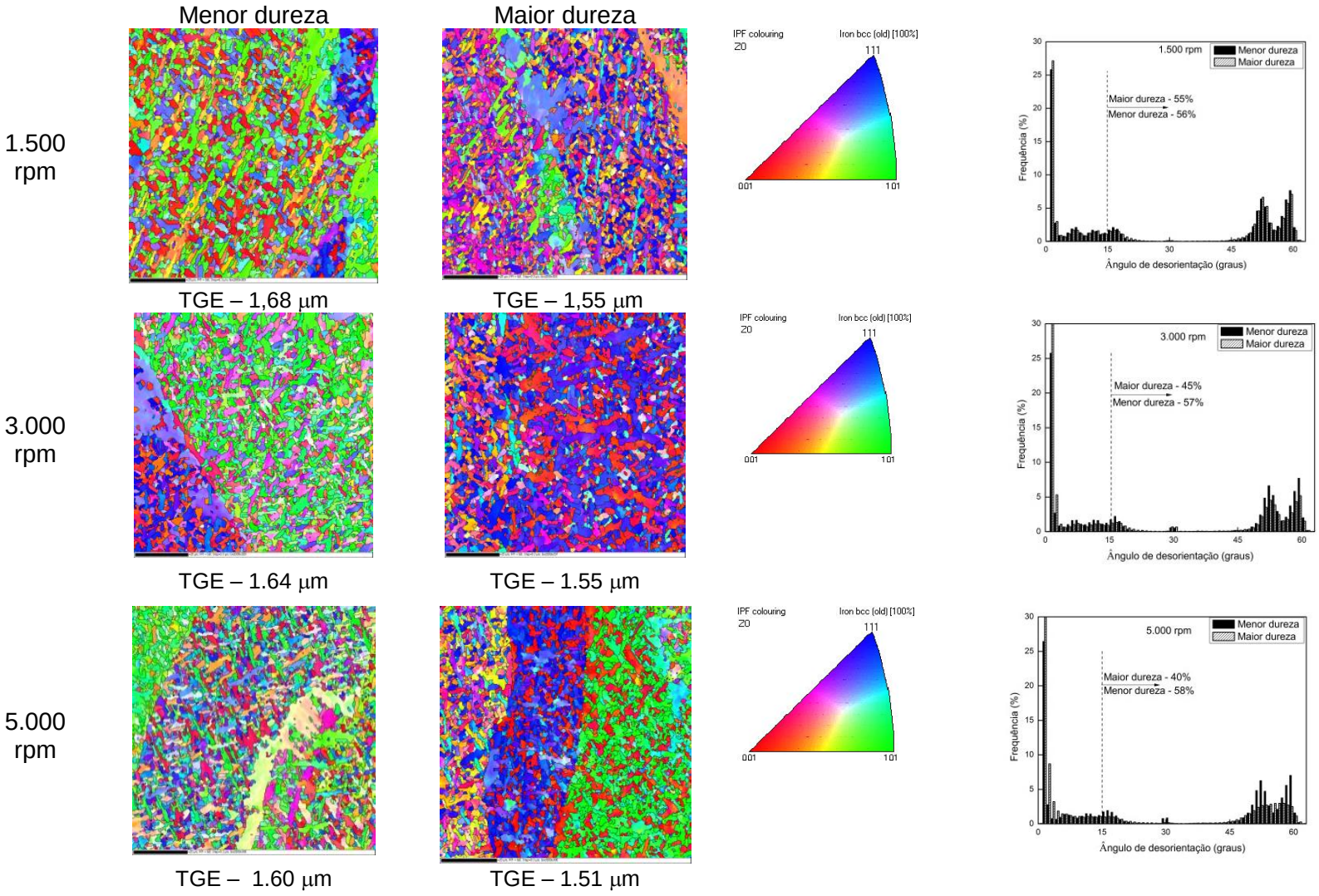


Figura IV. 9 - Resultados da análise por EBSD das amostras do metal de solda com D=3.

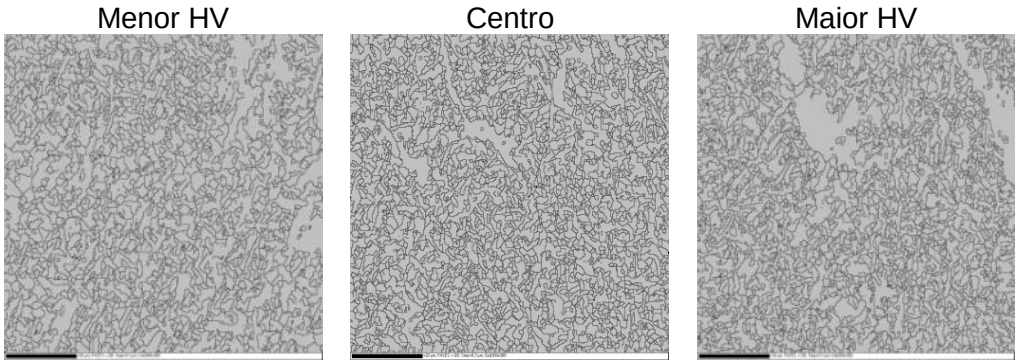


Figura IV. 10 - Resultados comparativos de diferentes regiões da amostra 1 por EBSD.

CAPÍTULO V
DISCUSSÃO

V.1. Aspectos Geométricos

Os resultados das medições feitas a partir das macrografias mostraram uma tendência de comportamento para os parâmetros de processo. No GMAW convencional, o perfil de penetração característico é em forma de dedo (*finger type*), em que há uma concentração da penetração no centro da seção do cordão de solda aspecto também verificado por ARAUJO, 2004. Já no processo com eletrodo rotativo, tanto o aumento da frequência de rotação quanto o aumento do diâmetro médio de giro acarretam uma penetração mais uniforme por toda a seção transversal do cordão e uma curvatura mais tênue (Figura IV.1). Este comportamento vai ao encontro com o trabalho de RAO (2004), ilustrado na Figura II.10.

Na Figura V.1, pode-se observar melhor a influência de cada um dos parâmetros de processo. No Capítulo II, foram mostrados os resultados de SANTOS (2018) e SILVEIRA (2018) que relacionaram a frequência de rotação nos aspectos geométricos dos cordões, quando fixado o diâmetro médio de rotação. A coluna da esquerda da Figura V.1 mostra os resultados deste trabalho para a variação deste parâmetro. Assim como nas referências citadas anteriormente (SANTOS, 2018; SILVEIRA, 2018), percebe-se um aumento na largura do cordão e uma diminuição na profundidade de penetração e altura do reforço em função do aumento da frequência de rotação. Além disso, o experimento neste trabalho foi realizado para 3 diferentes diâmetros fixados. Deste modo, observa-se que o comportamento dos aspectos geométricos se torna mais acentuado quanto maior for o diâmetro médio fixado. Por exemplo, no gráfico que relaciona penetração e frequência de rotação (Figura V.1), percebe-se que a inclinação da curva para o diâmetro 6 (marcador em forma de triângulo) é mais acentuada que a inclinação para o diâmetro 3 (marcador quadrado).

A coluna da direita da Figura V.1 mostra os resultados para a variação do diâmetro médio de rotação, quando fixada a frequência de rotação. Nota-se que o comportamento é o mesmo citado acima. Para um aumento no diâmetro, há um aumento na largura em detrimento da profundidade de penetração e altura do reforço. Ademais, quanto maior a frequência de rotação, mais acentuada se torna a influência do diâmetro médio de rotação na largura, reforço e penetração.

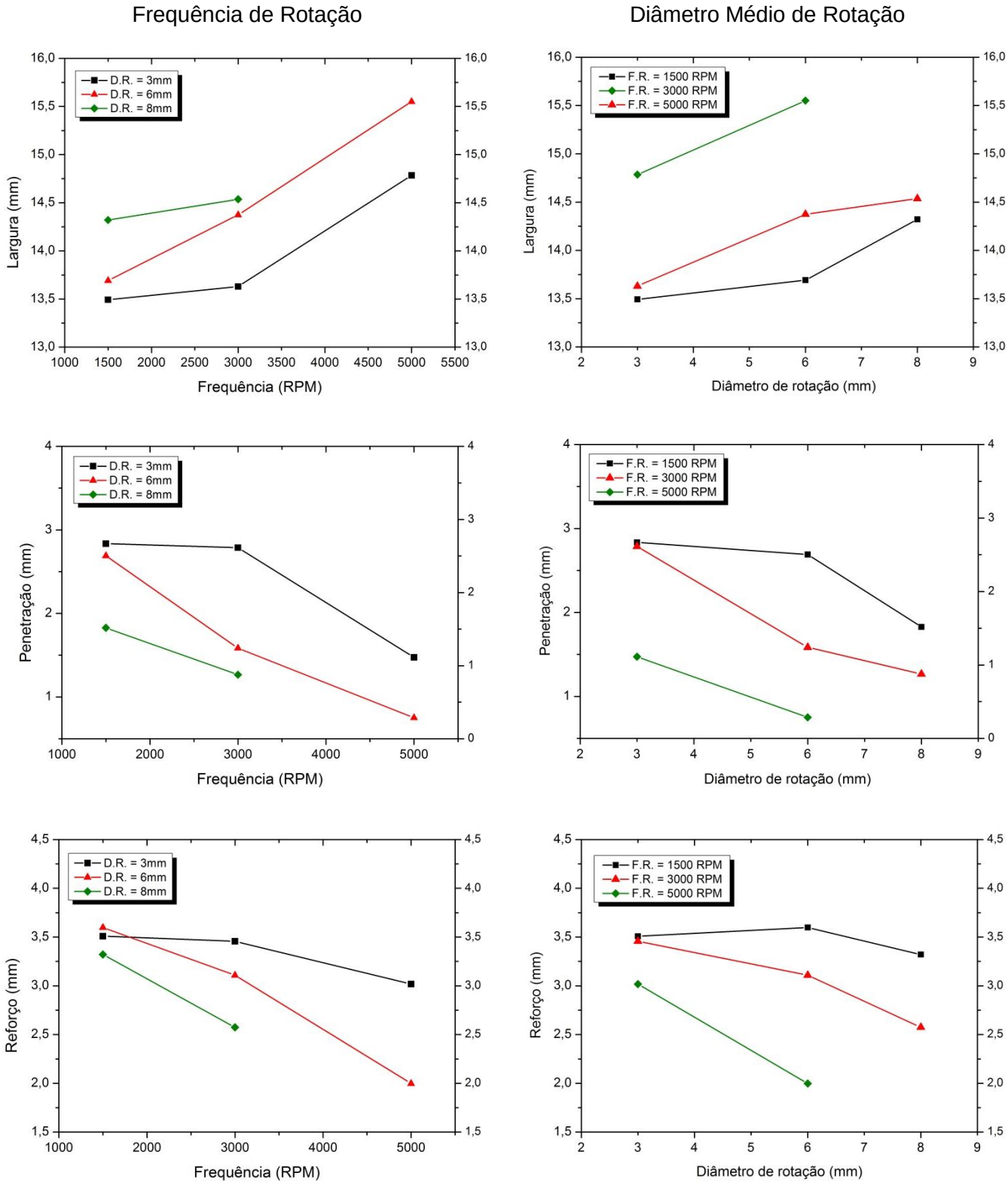


Figura V. 1 - Influência dos parâmetros de processo nos aspectos geométricos dos cordões (largura, penetração e reforço).

O aumento da largura do cordão pode ser explicado a partir da formação da poça de fusão. No Capítulo II, é apresentado o trabalho de BAI (2012) que modela a poça de fusão para o processo com eletrodo rotativo. De acordo esse trabalho, a incidência de calor se torna maior nas regiões mais externas conforme o aumento do diâmetro médio de giro. Isto porque o arco elétrico se movimenta em torno de uma trajetória mais ampla. Este fenômeno foi corroborado no trabalho de SANTOS (2019), onde foi realizada uma filmagem termográfica da poça de fusão em função do diâmetro médio de rotação (Figura II.21).

V.1.1. Diluição

Outro fator que é importante citar é o aspecto visual do cordão de solda, uma vez que um dos principais objetivos deste trabalho é contribuir para uma seleção adequada dos parâmetros de processo. A combinação de parâmetros altos, isto é, diâmetro médio acima de 6 e frequência de rotação acima de 3.000rpm, pode resultar em má formação do cordão de solda. De acordo com SILVEIRA (2018), quando se tem uma alta frequência de rotação, a intensidade da força centrífuga que atua no desprendimento das gotas de metal de adição se torna maior, observando-se uma maior projeção radial destas gotas, as quais podem ser expelidas para fora da poça de fusão. Nota-se então uma alta taxa de respingos, má formação da poça de fusão e instabilidade do arco elétrico, como mostra a Figura II.16. Isto afeta diretamente o volume de material depositado, o que explica a queda dos volumes expostos na Tabela IV.2. Segundo mostra a Figura V.2, este efeito se torna mais evidente quanto maior for a combinação do diâmetro médio de giro e da frequência de rotação. Isso ocorre pelo fato de o arco elétrico estar girando a uma amplitude maior e associada, ainda, a uma maior intensidade da força centrífuga. Além disso, o aumento dos respingos também reduz o reforço do cordão, o que influencia diretamente a diluição.

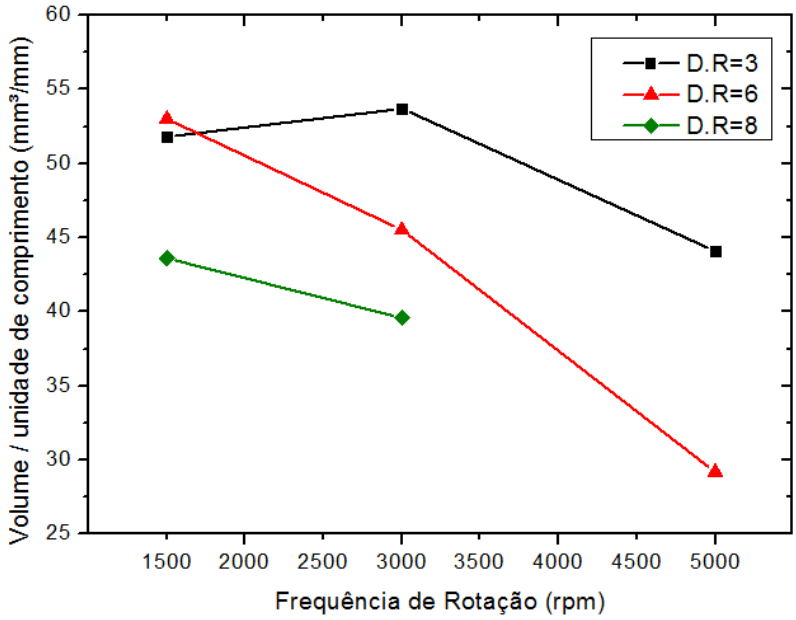
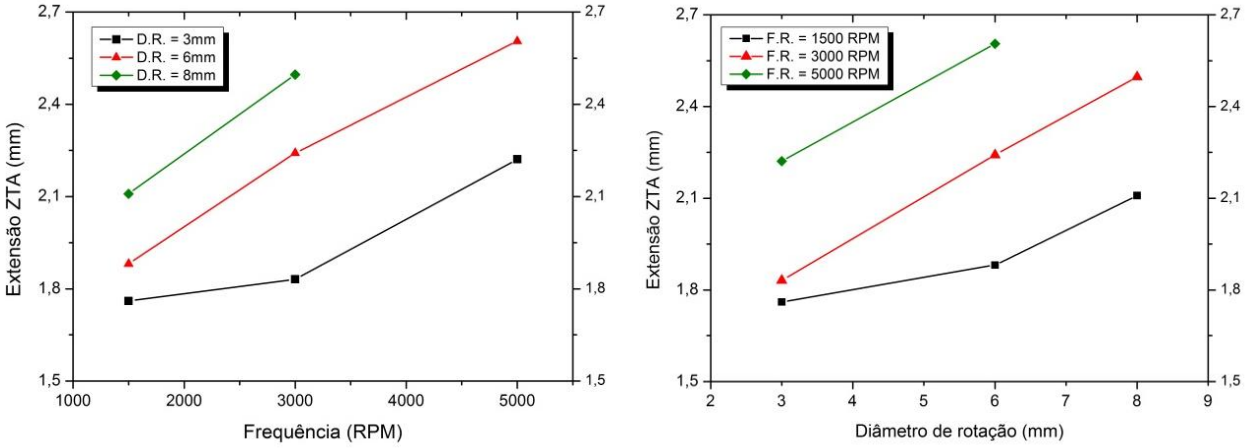


Figura V. 2 – Relação do volume de metal de solda em função dos parâmetros de processo (frequência e diâmetro médio de rotação).

V.1.2. Extensão média da ZTA

A partir da Tabela IV.3 foram criados gráficos (Figura V.3) para visualizar o comportamento da extensão da ZTA em função da frequência de rotação e do diâmetro médio de giro. Observa-se que há uma relação crescente entre o comprimento médio da ZTA e os parâmetros de processo.

Como citado no Capítulo II, COSTA et al. (2019) realizaram soldagens de juntas pelos processos GMAW convencional e GMAW com eletrodo rotativo. Seus resultados mostraram que a ZTA da junta produzida pelo GMAW-RE foi significativamente superior à da junta produzida pelo GMAW convencional, além de apresentar uma microestrutura mais grosseira, como mostrado nas Figuras II.25 e II.26. Os autores (Costa et al., 2019) atribuem estes fatos à distribuição térmica mais intensa nas paredes do chanfro devido ao movimento de rotação do arco elétrico, esquematizados nas Figuras II.23 e II.24. Portanto, para soldagens em chanfro, a constatação deste trabalho vai ao encontro com a literatura, pois quanto maior for a amplitude do movimento de rotação, maior será a incidência de calor nas paredes do chanfro, provocando o aumento da extensão da ZTA.



(a) (b)

Figura V. 3 - Extensão média da ZTA em função da: (a) Frequência de Rotação; (b) Diâmetro médio de rotação.

V.2. Propriedades Mecânicas e Microestruturais

Com base nos resultados mostrados nas Tabelas IV.4 e IV.5, elaborou-se os gráficos da Figura V.4, de modo a permitir uma melhor visualização do comportamento da dureza nas amostras. Assim como o encontrado por GARCIA (2019) para o GMAW-RE, a localização dos maiores valores de dureza ao longo da RGGZTA de cada amostra soldada pelo processo MCAW-RE não segue uma tendência ou lei de formação (Figura V.4(a)). Pode-se atribuir esta aleatoriedade ao movimento de rotação do arco elétrico durante a soldagem, que, de acordo com a seção transversal retirada do cordão, poderia estar localizado em uma determinada posição e, consequentemente, correspondendo a uma determinada concentração de calor. Isto confirma a necessidade de analisar a microdureza por toda a seção da ZTA. Outro aspecto, observado na Tabela IV.8, é que a extensão da ZTA é sempre maior nos pontos de maior dureza em relação aos de menor dureza, o que também foi constatado por GARCIA (2019) para o GMAW-RE. Atribui-se, com base na explicação anterior, o aumento de dureza às variações microestruturais ao longo da ZTA de acordo com a concentração de calor na seção transversal analisada (uma maior proporção de martensita em um ponto em relação a outro, devido à maior temperabilidade provocada pelo aumento do tamanho de grão da austenita prévia). A dificuldade de uma comparação e constatação precisa entre as microestruturas resultantes por microscopia óptica, como mostram as figuras do item IV.3.1, indica que a velocidade de resfriamento das soldagens se encontrou na fronteira entre as transformações de fase martensita e bainita, considerando, ainda, o fato de o aço ASTM

A516 grau 70 possuir carbono equivalente no limiar entre a temperabilidade baixa e intermediária (%Ceq = 0,37). Com as análises por MEV (Figura IV.7), pode ser visto, com maior precisão, que as microestruturas são basicamente constituídas por bainita e martensita, apesar de os microconstituintes não terem sido quantificados.

O ciclo térmico do processo com eletrodo rotativo, visto no Item II.1.3., mostra que a distribuição de calor se torna mais acentuada na ZTA (Figuras II.23 e II.24) em comparação ao convencional. Os resultados deste trabalho, especificamente o aumento das maiores durezas de cada amostra (Figura V.4b) e o aumento da extensão da ZTA (Figura V.3), indicam que este efeito se intensifica com o aumento da frequência de rotação. Para confirmar este comportamento, é interessante um estudo específico sobre a distribuição de calor em função da variação dos parâmetros de processo, com o uso de termopares e/ou técnicas alternativas de medição, associados à utilização de um metal de base com elevada temperabilidade, como o SAE 4340.

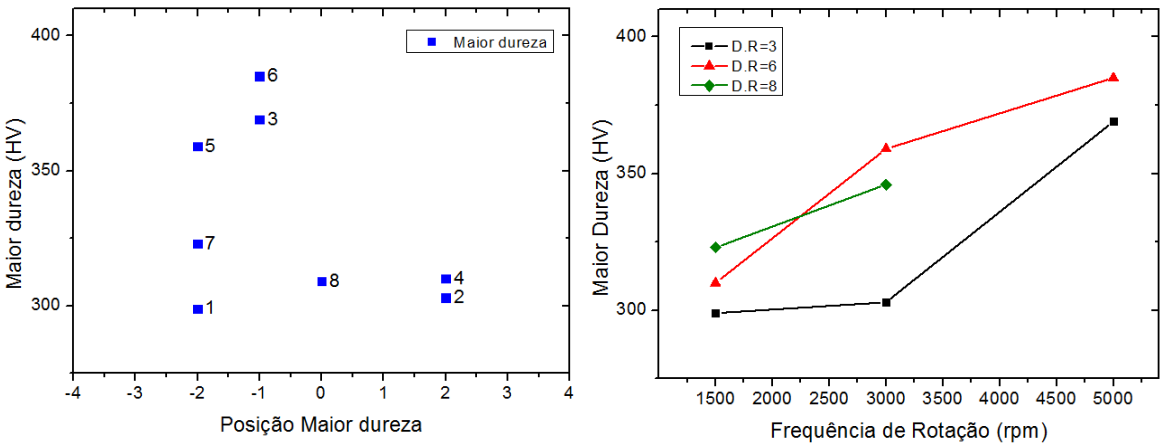
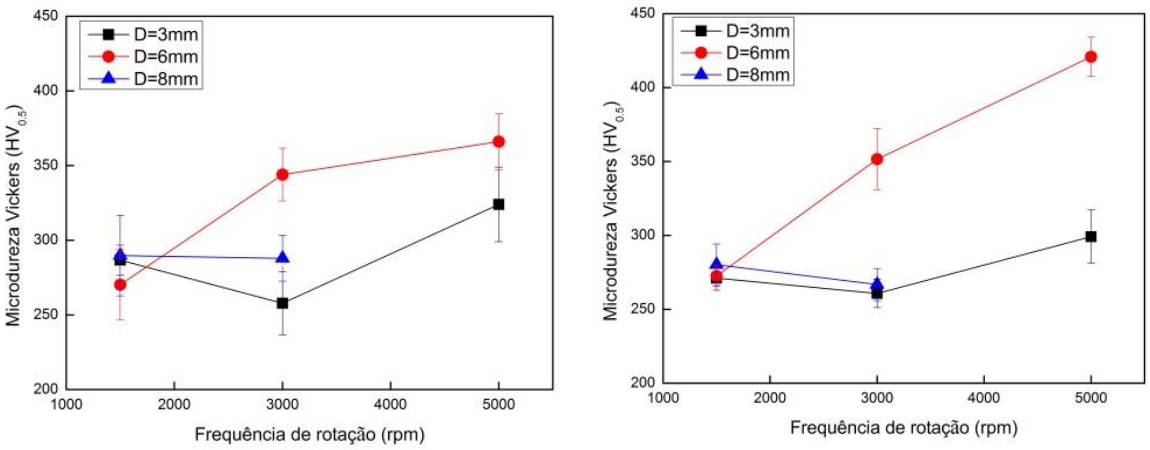


Figura V. 4 – Maiores durezas obtidas na ZTA das amostras de acordo com: (a) A posição do ponto de medição da dureza; (b) Frequência de rotação.

Em relação aos valores de dureza dos metais de solda, mostrados nas Tabelas IV.6 e IV.7 e na Figura V.5b, nota-se também que não há uma tendência ordenada para os valores encontrados. Para relacionar com as propriedades microestruturais, a técnica de EBSD foi utilizada como complemento ao MO e MEV, pois alguns estudos (JORGE et al, 2019; GOMES et al; 2019) apontam que a combinação destas técnicas é a metodologia mais indicada para estudar metais de solda de aços C-Mn com microestruturas refinadas. De fato, mesmo com a utilização do MEV (Figure IV.8), não foi possível definir precisamente as diferenças microestruturais que indicassem o comportamento mecânico observado. Assim, a análise por EBSD permitiu revelar alguns parâmetros fundamentais para uma discussão mais detalhada.

Como mostrado no item IV.3.3, a amostra 1 (frequência de 1.500rpm) apresentou os melhores resultados dentre as analisadas. Nas Figuras IV.9 e IV.10, nota-se que esta amostra apresentou valores mais homogêneos da frequência de contornos de alto ângulo e do tamanho de grão efetivo quando analisados os pontos de menor e maior dureza e no centro do cordão. Já a amostra 3 (frequência de 5.000rpm) foi a que apresentou resultados mais discrepantes entre os pontos de maior e menor dureza. Esta amostra, embora com um ligeiro refino, mostrou um perfil de distribuição de contornos de alto ângulo característico de presença de áreas martensíticas (Di SCHINO et al., 2010; SUIKKANEN et al., 2011; BACK et al., 2017; PARK et al., 2013; ZHOU et al., 2016). Em contraste, a amostra 1 apresentou uma elevada frequência de contornos de alto ângulo mesmo na região de maior dureza, com elevado percentual superior a 45º (>47%), o que de acordo com a literatura (SHRESTA et al., 2014; GOURGUES et al., 2000; JORGE et al., 2019) está relacionado a um maior percentual de ferrita acicular.



ZTA MS

Figura V. 5 - Valores de Dureza obtidos na ZTA e no MS em função da Frequência de rotação.

V.3. Seleção Preliminar dos Parâmetros de Processo

A partir das evidências apresentadas, entende-se ser possível propor alguns critérios para uma seleção preliminar da combinação dos parâmetros de frequência e diâmetro médio de rotação que podem possibilitar uma soldagem mais adequada.

Pelos aspectos geométricos, apresentados nos itens IV.1 e V.1, pode-se inferir alguns resultados não satisfatórios. Parâmetros que resultam em cordões muito largos em detrimento da penetração e reforço não são tão desejados para a soldagem em chanfro reto, uma vez que seria necessária uma abertura grande da junta para confinar

de maneira adequada o arco elétrico. Isso vai contra a principal premissa do processo com eletrodo rotativo, que é a redução do volume necessário de metal de adição para preencher o chanfro, conforme explicado no Capítulo II. SILVEIRA (2018) realizou um estudo comparativo de produtividade e custo entre os processos GMAW convencional e GMAW-RE, a partir de um procedimento de soldagem empregado na indústria. Os resultados do experimento mostraram uma redução de custos total na ordem de 30%, onde a maior parcela do custo da soldagem foi justamente o metal de adição (63% do total para o GMAW-RE), por se tratar de um consumível de alta resistência. A redução do volume do chanfro promoveu uma redução de 27% no volume de solda depositada entre o GMAW e o GMAW-RE.

Desta forma, as amostras 3 e 6, com frequência de rotação iguais a 5.000rpm, e as amostras 7 e 8, com diâmetro médio de giro igual a 8, não atendem de modo satisfatório este critério. Além disso, no item Diluição, foi discutida a instabilidade que frequências junto a diâmetros muito altos provocam no arco elétrico, resultando em grande quantidade de respingos e cordão com mau aspecto visual (inclui-se então, como discutido anteriormente, a amostra 5 neste conjunto).

Outra característica do processo, explicitada no Capítulo II, é a necessidade de maiores vazões do gás de proteção conforme o aumento da frequência de rotação, a fim de estabilizar a soldagem e evitar defeitos como porosidade. Esta característica foi observada por Santos et al. (2018) em frequências a partir de 2.000rpm. Como consequência, o consumo de gás de proteção será maior e implicará no aumento do custo de soldagem. Então, dentro das frequências utilizadas neste trabalho, torna-se mais indicado o uso de 1.500rpm. Ademais, como visto na Figura V.5 do item anterior, os resultados se mostraram mais homogêneos para esta frequência, tanto na zona termicamente afetada quanto no metal de solda.

Um resumo dos resultados obtidos, mostrado na Tabela V.1, parece indicar a condição de D.R = 3 e F.R = 1.500rpm, como o mais adequada para soldagem pelo processo MCAW-RE, pelas seguintes razões:

(a) Maior penetração.
(b) Menor extensão unitária e média da ZTA.
(c) Diluição similar para todas as condições, exceto nos casos citados acima.
(d) Maior homogeneidade de dureza tanto para o MS quanto para a ZTA.
(e) Maior homogeneidade microestrutural tanto para o MS quanto para a ZTA.
(f) Estabilidade na soldagem.

Tabela V. 1 – Resumo de Fatores considerados para a seleção da amostra.

Amostra	D.R (mm)	F.R (rpm)	Extensão ZTA (mm)					Diluição	Desvio Padrão Dureza (HV)	
			Média	Centro (Fig. IV.2)	Maior HV	Menor HV	Penetração		ZTA	MS
1	3	1.500	**1,76**	**1,29**	2,06	1,44	**2,83**	39%	**9**	**8**
2		3.000	1,83	1,64	2,07	1,68	2,79	43%	20	9
3		5.000	2,22	2,40	2,32	2,13	1,47	36%	23	17
4	6	1.500	1,88	1,47	2,07	1,46	2,69	40%	22	7
5		3.000	2,24	2,49	1,93	1,71	1,58	40%	16	19
6		5.000	2,61	2,96	2,72	1,65	0,75	27%	17	12
7	8	1.500	2,11	2,13	2,12	2,02	1,83	38%	21	13
8		3.000	2,50	2,73	2,68	2,39	1,27	33%	23	10

V.4. Procedimento de Análise e Seleção dos Parâmetros.

Os resultados apresentados neste trabalho possibilitam uma indicação mais precisa de como analisar e, principalmente, de quais procedimentos adotar para a seleção dos parâmetros de processo.

A primeira etapa adotada foi avaliação macroestrutural que consiste primeiramente em uma inspeção visual, para identificação de defeitos e parâmetros mais estáveis, e avaliação dos aspectos geométricos dos cordões, de modo a identificar as condições mais adequadas para a aplicação desejada. Em seguida, foram realizados ensaios de dureza ao longo da seção transversal. Nota-se que o procedimento padrão de medição de dureza convencional, apenas no centro do cordão, não é o mais indicado para encontrar a região critica da junta soldada. Isto porque neste trabalho foram identificados diferentes valores de dureza tanto no metal de solda quanto na RGGZTA ao longo da seção, o que pode ser efeito do movimento rotativo do eletrodo. A partir destes resultados, verificou-se a necessidade de uma análise microestrutural nos pontos críticos, sendo estes os pontos de maior e menor dureza, com o objetivo de justificar as diferenças de dureza. No caso do metal de solda, foi necessária a inclusão da técnica de EBSD para apontar as características que identificaram a melhor condição. A seleção dos parâmetros teve como base a convergência dos melhores resultados constatados pelas técnicas de análise empregadas.

Com base na discussão por EBSD do metal de solda acima comentada, talvez seja oportuno citar que o procedimento envolve a medição da dureza em vários pontos, mas a decisão do ponto crítico parece levar sempre para o ponto de maior dureza. Isto

poderia evitar a necessidade de ensaios metalográficos detalhados no futuro para seleção de parâmetros.

Percebe-se, então, que o procedimento proposto neste trabalho contribui para um avanço na análise de juntas soldadas pelo processo MCAW com Eletrodo Rotativo. Não obstante os resultados obtidos tenham propiciado tal progresso, entende-se que a distribuição de calor em juntas em chanfro reto possa ser diferente, uma vez que o arco elétrico se encontra confinado neste caso e, portanto, a variação do diâmetro médio de rotação e da frequência de rotação podem ter efeitos diferentes dos observados neste trabalho. Desta forma, sugere-se a continuidade do estudo aqui realizado através da deposição de cordões de solda em chapas com um rasgo, como mostrado na Figura V.6. Neste caso, seria possível não só avaliar o que aqui foi comentado, como também estudar a influência da deposição de passes múltiplos nas características das juntas soldadas.

Ainda assim, a metodologia adotada permitiu analisar as características dos parâmetros de processo e, dentre as condições de soldagem das amostras apresentadas, a combinação com os melhores resultados foi a da amostra 1 (D.R.= 3; F.R = 1.500rpm), condição a qual também optada por GARCIA (2019) por apresentar os melhores resultados para o GMAW-RE, baseado na caracterização macroestrutural.

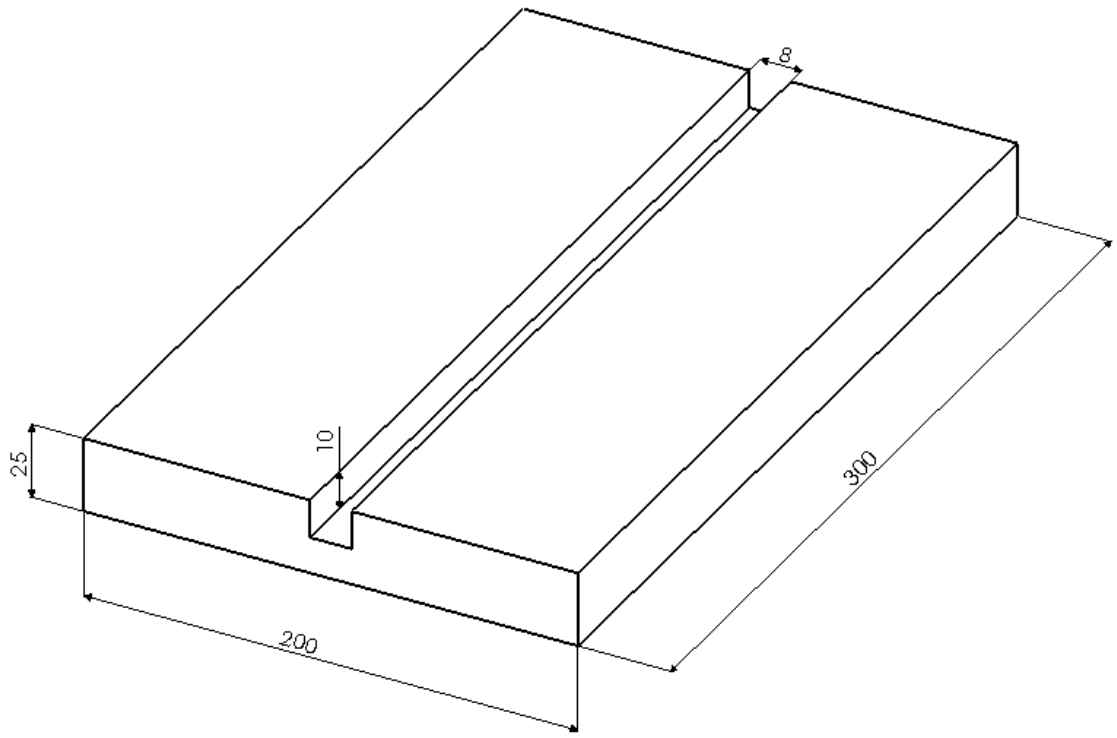


Figura V. 6 - Croqui de uma chapa com rasgo (Cotas em mm).

CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permitiu indicar uma combinação dos parâmetros frequência e diâmetro médio de rotação para a soldagem pelo processo com eletrodo rotativo com arame do *metal cored*, com destaque para as seguintes conclusões:

a) Em relação aos aspectos geométricos, tanto a frequência quanto o diâmetro médio de rotação promovem um aumento da largura do cordão de solda e redução da penetração e altura do reforço;
b) A utilização de parâmetros altos (leia-se frequência de 5.000rpm ou frequências acima de 3.000rpm para diâmetros a partir de 6 mm) promove instabilidade na soldagem e alta taxa de respingos. Recomenda-se evitar trabalhar nesta faixa de parâmetros;
c) A análise ao longo de toda a extensão da ZTA e do MS é fundamental para definir a região mais crítica da junta soldada, não devendo se limitar ao procedimento convencional;
d) Tanto a dureza, a microestrutura e a extensão da ZTA variam de acordo com a posição de medição para uma mesma amostra soldada pelo processo com eletrodo rotativo;
e) Para o metal de solda, a amostra 1 apresentou os resultados mais homogêneos ao longo de sua seção, quando observados os valores de dureza e as características microestruturais obtidas por EBSD;
f) A combinação de parâmetros de processo que apresentou os melhores resultados foi da amostra 1 (D.R=3, F.R=1.500rpm).

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nessa dissertação, tornam-se interessantes as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

a) Investigar o efeito dos parâmetros de processo nas propriedades de aços com maior temperabilidade;
b) Investigar o comportamento da distribuição de calor na junta soldada com a variação dos parâmetros de processo;
c) Realizar estudos em cordões depositados em chapas com rasgo;
d) Realizar experimentos com frequências de rotação mais baixas. Sugere-se 200rpm, limite inferior da tocha de soldagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.A.C., “Análise Microestrutural E Mecânica Da Zona Termicamente Afetada De Juntas Soldadas De Aço C-Mn Obtidas Pelo Processo Gmaw Com Eletrodo Rotativo”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, 2019

ARAÚJO, W.R.; Comparação entre soldagem robotizada com arame sólido e “metal cored” - a ocorrência do “finger”; Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica; Universidade Federal de Minas Gerais; Belo Horizonte, 2004.

ASTM E384 – 17, “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”, 2017

American Welding Society, AWS A5.18/5.18M:2005, “Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding”, 2005

American Welding Society, AWS A5.20/A5.20M:2005, “Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding”, 2005

American Welding Society, AWS A5.28/A5.28M, “Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding”, 2015

American Welding Society, AWS A5.36/A5.36M:2012, “Specification for Carbon and Low-Alloy Steel Flux Cored Electrodes for Flux Cored Arc Welding and Metal Cored Electrodes for Gas Metal Arc Welding”, 2012

American Welding Society, AWS Welding Handbook – 9 Edition, Vol. 2; Welding Processes, American Welding Society, 2015

BACK JG, Engberg G. Investigation of parent austenite grains from martensite structure using EBSD in a wear resistant steel. Materials 2017, 10, 453; doi:10.3390/ma10050453

BAI, Q.; GUO N.; HAN, Y.; ZHANG, J.; WANG, M., Analysis of temperature distribution in rotating arc welding, Advanced Materials Research, v. 472-475, p. 1346-1352, 2012.

BARBEDO, N. D.; “Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica”; Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Outubro de 2011

COSTA, J.F.M., FILHO W.A.S., SILVEIRA, G.M.S., ALMEIDA, F.A.C., LOBATO, M.M., CHUVAS T.C., MENDES, M.C., SOUZA, L.F.G., JORGE, J.C.F. “Comportamento de juntas soldadas de aço C-Mn obtidas pelo processo GMAW-RE com eletrodo rotativo”. Revista Soldagem & Inspeção, 2019;24:e2411. https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.11

Di Schino A, Guarnaschelli C. Microstructure and cleavage resistance of high strength steels. Materials Science Forum Vols. 638-642 (2010) pp 3188-3193

DIAS-FUENTES, M., IZA-MENDIA, A., GUTIÉRREZ, I. Analysis of different acicular ferrite microstructures in low-carbon steels by electron backscattered diffraction. Study of their toughness behavior, Met. Mat. Trans. A, v. 34A, p.2505-2516, 2003.

DUAN, B.; WANG, J.C.; LU, Z.H.; ZHANG, G.X.; ZHANG, C.H.; “Parameter Analysis and Optimization of the Rotating Arc NG-GMAW Welding Process”; International Journal of Simulation Modelling; vol.17, p. 170-179; 2018

FARNEZE, H.N.; JORGE, J.C.F.; SOUZA, L.F.G.; BOTT, I.S.; “Comparative study of high-strength steel weld metals obtained by the SMAW and FCAW processes for offshore applications and mooring chains”; Welding International, 24:12, 903-910, Janeiro, 2010

FILHO, W.A.S., COSTA, J.F.M., SILVEIRA, G.M.S.; ALMEIDA, F.A.C., LOBATO, M.M., CHUVAS, T.C., MENDES, M.C., SOUZA, L.F.G., JORGE, J.C.F., “MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH STEEL WELD METALS OBTAINED BY GMAW PROCESS WITH ROTATING ELECTRODE”, Rio Pipeline Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, 2019

FUNDERBURK, S.; “A New Spin on Welding”; World Pipelines, p. 67, Jan 2015

GARCIA, V. F., Avaliação da ZTA de uma junta soldada de um aço ARBL obtida pela técnica GMAW-RE, Projeto de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2019

GOLDAK, J.; CHAKRAVARTI, A.; BIBBY, M., “A New Finite Element Model for Welding Heat Sources”, Metallurgical Transactions B, v. 15B, pp. 299-305, 1984.

GOMES, A.J.C.; JORGE, J.C.F.; BOTT, I.S.; SOUZA, L.F.G.; MENDES, M.C.; ARAUJO, L.S.; “Influence of Chemical Composition on the Mechanical and Microstructural Properties of High Strength Steel Weld Metals Submitted to PWHT”; Metallography, Microstructure, and Analysis, Novembro, 2019

Gourgues AF, Flower HM, Lindley TC. Electron backscattering diffraction study of acicular ferrite, bainite, and martensite steel microstructures. Mater Sci Tech 2000;16:26–40.

GUO, N., HAN, Y., ZHANG, L, YAN, Z., ““A modified heat source model for rotating arc welding”. China welding, vol 20. No 3; Setembro 2011

GUO. N; LIN, S. B.; GAO, C.; FAN, C. L.; YANG, C. L.; “Study on Elimination of Interlayer Defects in Horizontal Joints Made by Rotating Arc Narrow Gap Welding”; Science and Technology of Welding and Joining; vol. 14:6, p. 584-588, 2009

ITAWA, S.; MURAYAMA, M.; KOJIMA, Y.; “Application of Narrow Gap Welding Process with High Speed Rotating Arc to Box Column Joints of Heavy Thick Plates”; JFE Technical Report; n. 14, Dez. 2009.

JORGE, J.C.F.; BOTT, I.S.; SOUZA, L.F.G.; MENDES, M.C.; ARAUJO, L.S.; EVANS, G.M.; “Mechanical and microstructural behavior of C-Mn steel weld deposits with varying titanium contents”; Journal of Materials Research and Technology, v. 8, p. 4659-4671, 2019

JORGE, J.C.F., SOUZA, L.F.G., COUTO, J.L.S, BOTT, I.S., Influence of Chemical Composition on the Mechanical Properties of High Strength Steel Weld Metals for Application in Mooring Components, International Journal of Engineering and Technical Research, v. 4, n. 2, p. 71-76, 2016.

JORGE, J.C.F., SOUZA, L.F.G., PACHECO, P.M.C.L., SANTOS FILHO, A.M.F., SANTOS FILHO, O.R., DINIZ, J.L.C., BOTT, I.S., Evaluation of the mechanical properties of welded links of high strength steel mooring chains after fatigue testing, Anais do 34o CONSOLDA- National Welding Congress, São Paulo, Brazil, 18-21 May, 2008.

KAH, P.; LATIFI, H.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J.; PIRINEN, M.; "Usability of Arc Types in Industrial Welding"; International Journal of Mechanical and Materials Engineering, vol. 9:15; 2014

KUMAR, S.; RAO, P.S; RAMAKRISHNA, A; "Effects of eccentricity and arc rotational speed on weld bead geometry in pulsed GMA welding of 5083 aluminum alloy"; Journal of Mechanical Engineering Research; Vol. 3. (6); p. 186-196; Junho 2011

LOBATO, M.M.; FERNANDES, K.C.; "Soldagem de tanques de estocagem de líquidos criogênicos com arame tubular com pó metálico (GMAW-C)"; XLI CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem; Salvador, Bahia, Outubro de 2015

MA-400 AIR COOLED SPINARC WELDING TORCH; Operational Manual; Revision 19; 2017

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q.; "Soldagem: Fundamentos e Tecnologia"; 4. ed.; Editora Elsevier, 2016

MIN, D.; XIN-HUA T.; FENF-GUI L.; SHUN, Y.; "Welding of quenched and tempered steels with high-spin arc narrow gap MAG system"; Springer-Verlag London Limited; vol. 55, p, 527-533, 2011

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

MURAYAMA, M.; OAZAMOTO, D.; OOE K.; "Narrow Gap Gas Metal Arc (GMA) Welding Technologies"; JFE Technical Report, No. 20, Mar. 2015

MYERS, D.; "Metal Cored Wires: Advantages & Disadvantages"; Welding Journal, v. 81, n. 9, pp.39-42, 2002

PARK S, LEE K, Min K, Kim M, Lee B. Characterization of phase fractions and misorientations on tempered bainitic/martensitic Ni-Cr-Mo low alloy RPV steel with various Ni content. Met Mater Int 2013;19(1):49-54.

PEDROSA, M.F.; Comparativo do Desempenho de Soldagem para o Processo GMAW Metal Cored com Fonte Pulsada e Gás de Proteção Rico em Argônio Versus o Processo FCAW Convencional com Proteção Gasosa de CO2 e Gás de Proteção Rico em Argônio; Monografia apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia da Soldagem; FIRJAN/SENAI - Instituto SENAI de Educação Superior, Rio de Janeiro, 2012

PRAJAPATI, P.; BADHEKA, V.; “Investigation on various welding consumables on properties of carbon steel material in gas metal arc welding under constant voltage mode”; Indian Academy of sciences; vol.42, p. 1751-1761, Outubro, 2017

PRASAD, V.; BABU, M.; AJAY, P.; “A Review on Rotating Arc Welding Process”; Materials Today: Proceedings vol. 5, p. 3551-3555, 2018

SANTOS, A.G.M.; “Análise da influência da rotação do eletrodo no processo MIG/MAG e estudo para aplicação em soldagem Narrow Gap”; Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis, 2019

SANTOS, A.G.M., BRITO, H.O., DI,RENE H.F., OKUYAMA, M.P., SCHWEDERSKY, M.B., SILVA, R.H.G, “Soldagem MIG/MAG com eletrodo rotativo destinado a tubulações”, Anais da Rio Oil & Gas Expo and Conference 2018, 24-27 setembro, Rio de Janeiro, Brasil, 1-10.

SANTOS, A.X; MACIEL, T.M.; COSTA, J.D.; SOUSA, M.B.; PRASAD, S.; CAMPOS, A.R.N.; SANTANA, R.A.C.; “Study on influence of the PTA-P welding process parameters on corrosion behavior of Inconel 625 coatings”; Revista Matéria, v. 24, n. 01, 2019

SCHWEDERSKY, M.B.; “Um Estudo da Eficiência e Produtividade dos Principais Processos de Soldagem a Arco”; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011

Shrestha SL, Breen AJ, Trimby P, Proust G, Ringer SP, Cairney JM. An automated method of quantifying ferrite microstructures using electron backscatter diffraction (EBSD) data. Ultramicroscopy 2014;137:40–7.

SILVEIRA, G.M.S.; “Estudo Comparativo de Juntas Soldadas obtidas pelos Processos GMAW Convencional e GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE)”; Projeto Final de Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2018

SRINIVASA RAO, P.; GUPTA, O.P.; MURTY, S.S.N.; “A Study On The Weld Bead Characteristics In Pulsed Gas Metal Arc Welding With Rotating Arc”; 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada, p. 20-25, Junho, 2004

SUIKKANEN PP, Cayron C, DeArdo AJ, Karjalainen. Crystallographic analysis of martensite in 0.2C-2.0Mn-1.5Si-0.6Cr steel using EBSD. J. Mater. Sci. Technol., 2011, 27(10), 920-930.

VENKATESH, G.; SUNDARARAJ, P.; VERMA, D. K.; ARULKUMAR, J.; “COMPARISON OF MECHANICAL AND METALLURGICAL PROPERTIES OF CONVENTIONAL GMAW WITH SPIN ARC GMAW PROCESS FOR CARBON STEEL SA 515”; International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 5, p. 2716-2721, Maio de 2018

WANG, J.Y.; REN, Y.S.; YANG, F.; GUO, H.B.; “Novel Rotation Arc System for Narrow Gap MAG Welding”; Science and Technology of Welding and Joining, vo. 12:6. P, 505-507, 2007

WANG. Y.; KANNAN, R.; ZHANG, L.; LI, L.; “Microstructural Analysis of the As Welded Heat Affected Zone of a Grade 91 Steel Heavy Section Weldment”; Welding Journal, v. 96, p. 203-219, 2017

XU, G.; LI, L.; WANG, J.; ZHU, J.; LI, P.; “Study of weld formation in swing arc narrow gap vertical GMA welding by numerical modeling and experiment”; The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; vol. 96, p. 1905-1917, Fevereiro, 2018

XU, W.H., DONG, C.L., ZHANG, Y.P., YI, Y.Y., “Characteristics and mechanisms of weld formation during oscillating arc narrow gap vertical up GMA welding”, Welding in the World, v.61, p. 241–248, 2017

ZHANG, T.; LI, Z.; MA, S.; KOU, S.; JING, H.; “High strength steel (600–900 MPa) deposited metals: microstructure and mechanical properties”; Science and Technology of Welding and Joining; v.21, nr, 3, p.186-193, 2016.

ZHANG, Z. e FARRAR, R.A., Influence of Mn and Ni on the Microstructure and Toughness of C-Mn-Ni Weld Metals, Welding Journal, 76(5):183-196s, 1997.