CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL SUPER AUSTENÍTICO DEPOSITADO PELO PROCESSO GMAW-RE

Rogério Oliveira de Azevedo Júnior

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 Ciências em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores: Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.
Matheus Campolina Mendes, D.Sc.

Rio de Janeiro
Junho de 2025

APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL SUPER AUSTENÍTICO DEPOSITADO PELO PROCESSO GMAW-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.

Rogério Oliveira de Azevedo Júnior

Banca Examinadora:

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

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

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

Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc. (CEFET/RJ)

Prof. Leonardo Sales Araújo, D.Sc. (UFRJ)

Rio de Janeiro
Junho de 2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A994 Azevedo Júnior, Rogério Oliveira de
Aplicação de revestimento por soldagem de aço inoxidável super austenítico depositado pelo processo GMAW-RE / Rogério Oliveira de Azevedo Júnior. — 2025.
vii, 76f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia : f. 70-76
Orientador: Luís Felipe Guimarães de Souza
Coorientador: Matheus Campolina Mendes

1. Aço inoxidável - Soldagem. 2. Processo GMAW - Avaliação. 3. Revestimentos. 4. Solda e soldagem. I. Souza, Luís Felipe Guimarães de. (Orient.). II. Mendes, Matheus Campolina. (Coorient.). III. Título.

CDD 620.17

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

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre está iluminando meu caminho e concedendo a força necessária para superar os obstáculos da vida, motivando-me a continuar persistindo na luta à vitória aos desafios.

Aos Professores Jorge Carlos Ferreira Jorge (D.Sc.), Luís Felipe Guimarães de Souza (D.Sc.), e Matheus Campolina Mendes (D.Sc.), agradeço pela compreensão e apoio nos momentos difíceis, por todo o conhecimento passado, pela disponibilidade, atenção e orientação, imprescindíveis à realização deste trabalho.

Aos amigos, Engenheiros Jeferson Frederico Monteiro Costa (D.Sc.) e Hiron Akira (M.Sc.), agradeço a experiência transmitida por auxiliar na realização das diversas etapas deste projeto;

A minha amada esposa, parceira de luta e persistência, melhor amiga, Fabiana Brites Lira, agradeço por estar sempre ao meu lado, motivando-me, demonstrando um companheirismo incondicional;

Aos meus pais, Rogério Oliveira de Azevedo e Rosangela dos Santos Azevedo, que não mediram esforços e se dedicaram de forma incondicional, abrindo mão de muitas coisas para me educar da melhor forma possível;

Aos meus sogros, Álvaro Lira e Eliane Brites Lira, assim como meu cunhado, Alexandre Lira, que sempre estiveram dispostos a ajudar no que fosse necessário.

Por fim, mas não que seja menos importante, dedico esta conquista ao meu filho, Daniel Brites Azevedo, pela influência positiva a qual exerce sobre todos os momentos da minha vida, sendo dessa forma mais um integrante do grupo de grandes responsáveis pela minha persistência e dedicação à conclusão deste desafio.

RESUMO

APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL SUPER AUSTENÍTICO DEPOSITADO PELO PROCESSO GMAW-RE

Rogério Oliveira de Azevedo Júnior

Orientadores:

Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

Matheus Campolina Mendes, D.Sc.

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida 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.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as possíveis vantagens do processo GMAW-RE (*Gas Metal Arc Welding – Rotating Electrode*) sobre o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) no revestimento por soldagem com aço inoxidável super austenítico (AISA). Para tal, efetuou-se uma análise da influência que os parâmetros do GMAW-RE podem exercer na soldagem de revestimento com AISA, com atenção especial ao aspecto geométrico e ao controle da diluição. O GMAW-RE é uma variante do GMAW, caracterizado por um mecanismo que confere à tocha de soldagem um movimento de rotação do arame eletrodo, podendo-se ajustar a frequência de rotação, o diâmetro de rotação e o sentido de giro. Foram feitos revestimentos com um consumível de AISA (6% Mo) sobre chapas de aço C-Mn. Os resultados obtidos demonstraram que o GMAW-RE, com maiores frequências ou maiores diâmetros de rotação, promove uma redução da altura e da penetração do cordão concomitantemente com melhor homogeneidade, pequeno aumento da largura e menores níveis de diluição. Neste trabalho, as frequências de 300 rpm e 500 rpm combinadas com o diâmetro de rotação de 3 mm apresentaram os melhores resultados, indicando que o GMAW-RE pode ser uma alternativa vantajosa sobre o GMAW.

Palavras-chave: GMAW-RE, Revestimento, AISA.

ABSTRACT

SUPER AUSTENITIC STAINLESS STEEL WELDING OVERLAY APPLICATION DEPOSITED BY GMAW-RE PROCESS

Rogério Oliveira de Azevedo Júnior

Supervisors:

Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

Matheus Campolina Mendes, D.Sc.

Abstract of dissertation submitted to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais of Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering and Materials Technology.

The present work aims to evaluate the possible advantages of the GMAW-RE (Gas Metal Arc Welding-Rotating Electrode) over the GMAW (Gas Metal Arc Welding) in weld cladding overlay with superaustenitic stainless steel (SASS). For this purpose, an analysis of the effects of parameters of the GMAW-RE process on weld overlay was evaluated, taking into account geometric aspects of the weld bead and the dilution control. The GMAW-RE is a variant of the GMAW process, which is characterized by a special mechanism that gives the welding torch a rotating movement of the wire electrode, where the rotation frequency, rotation diameter, and rotation sense can be adjusted. Weld cladding overlays were performed with a 6% Mo SASS consumable over carbon steel plates. The results have shown that the GMAW-RE process with higher frequencies or rotation diameters results in the reduction of the height and bead penetration in combination with better homogeneity, a small increase in width, and lower dilution levels. In this work, the 300 rpm and 500 rpm rotation frequencies in association with a 3mm rotation diameter have shown the best results, indicating that the GMAW-RE process can be an advantageous alternative.

Keywords: GMAW-RE, Welding Overlay, SASS.

SUMÁRIO

Pág.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....1

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....4

2.1- Aços Inoxidáveis Super Austeníticos (AISA).....4

2.1.1- Soldabilidade.....7

2.1.2- Revestimento Depositado por Soldagem.....8

2.2- Processo GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE).....20

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E METODOS.....42

3.1- Materiais.....42

3.2- Soldagem.....43

3.3- Ensaios Metalográficos.....44

3.4- Ensaios de Microdureza.....45

3.5- Análise de Diluição.....46

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS 47

4.1- Aspectos Geométrico e Superficial - Soldas de Passe Único.....47

4.2- Diluição - Soldas de Passe Único.....51

4.3- Extensão da ZTA - Soldas de Passe Único.....52

4.4- Ensaios de Microdureza.....54

4.5- Soldas de Revestimento.....55

4.6- Avaliação da Composição Química do Metal Depositado.....56

4.7- Microestrutura do Metal de Solda.....56

CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO.....59

5.1 Aspectos Geométrico e Superficial.....59

5.2- Diluição.....61

5.3- Extensão da ZTA.....62

5.4- Ensaio de Microdureza.....63

5.5- Soldagem de Revestimento.....64

5.6- Composição Química do Metal de Solda de Revestimento..... 66

5.7- Microestrutura do Metal de Solda de Revestimento.....67

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO.....68

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....70

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

Nas aplicações industriais existe uma constante demanda de equipamentos e componentes que suportem elevados níveis de solicitações mecânicas e condições severas de operações como temperaturas e pressões elevadas, desgaste e ambientes corrosivos, condições estas que levam a degradação dos materiais, elevando assim o custo de fabricação e de manutenção (KOVACH, 2000; MADALENA, 2013; MATIAS, 2021). A fabricação de equipamentos e componentes integralmente com ligas nobres resistentes à corrosão é um investimento de alto custo. Uma das alternativas, por exemplo, consiste na fabricação da estrutura base em aço carbono, a qual posteriormente é revestida com uma liga mais nobre, gerando uma redução de custos significativa. Dessa forma, a técnica de aplicação de revestimentos por soldagem se apresenta como uma solução que permite obter uma relação de compromisso entre o desempenho adequado em serviço e o custo de fabricação, em particular o emprego em revestimentos de equipamentos e componentes, com ligas resistentes à corrosão comumente denominadas de CRAs (*Corrosion Resistant Alloys*) (MADALENA, 2013; MEIRA, 2015; SAHA e DAS, 2018; BUNAZIV *et al*., 2019). Nesse contexto, o aço inoxidável super austenítico (AISA) que já é amplamente difundido na indústria de forma geral, se apresenta como uma opção interessante devido a sua boa soldabilidade, a alta resistência à corrosão, ao percentual reduzido de carbono e, principalmente, pelo seu custo relativamente reduzido quando comparado com os seus concorrentes, como por exemplo, os aços inoxidáveis duplex, os aços inoxidáveis super duplex e as super ligas de níquel.

Quando o AISA é aplicado como revestimento por soldagem sobre um aço C-Mn ou baixa liga, o metal depositado absorve carbono do metal de base, devido à diluição, contribuindo para a formação das fases secundárias Sigma e Chi, que podem levar a uma perda de resistência mecânica e de resistência à corrosão (KOVACH, 2000; IMOA, 2010; ANBURAJ, 2012). Com o objetivo de se evitar ou minimizar os efeitos decorrentes da segregação e da precipitação de fases secundárias indesejadas nos AISA, pode-se utilizar consumíveis contendo maiores teores de molibdênio a fim de compensar a perda deste elemento dissolvido na matriz austenítica. Com isso, é possível que o metal depositado consiga manter o teor de molibdênio dissolvido na matriz, mesmo que ocorra a segregação e a precipitação, contribuindo dessa forma para a manutenção das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão tanto do metal

de solda, quanto do substrato (GUEDES, 2012). Em face ao exposto, para o presente trabalho, foi escolhido o consumível ER-385, que se trata de um AISA com maior teor de Mo (6% Mo), o que se reflete em ótimo desempenho em corrosão e na indicação para aplicação em ambientes offshore por apresentar valores de PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) igual ou superior a 40 (KOVACH, 2000; MADALENA, 2013).

O processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) é bem consolidado na indústria sendo caracterizado pela sua versatilidade, confiabilidade, alta produtividade e custo relativamente reduzido, em comparação com outros processos e se mostra como um dos mais interessantes pelo seu elevado potencial, quando aplicado à soldagem de revestimento (RAO, 2004; BAI *et al*., 2012; ZHANG *et al*., 2014; SANTOS *et al.,* 2019*;* COSTA *et al*, 2019; SANKAR, 2021, 2022). O GMAW é um processo que tem grande aplicabilidade em equipamentos de médio e grande porte como pontes rolantes, escavadeiras, vasos de pressão e tubulações de óleo e gás (SILVEIRA, 2018; SILVEIRA *et al*., 2020; SANKAR *et al*., 2021).O processo *Gas Metal Arc Welding – Rotating Electrode* (GMAW-RE), que é uma variante do processo GMAW, consiste na utilização de uma tocha de soldagem que contém um mecanismo especial que confere ao arame eletrodo um movimento de rotação, podendo-se ajustar: o sentido de rotação, o diâmetro médio de rotação, e a frequência de rotação (PRASAD et al., 2018; WANG, 2007). A motivação para o desenvolvimento do GMAW-RE tem como origem o aperfeiçoamento da técnica de soldagem em chanfro estreito (*narrow gap*), onde a utilização do então GMAW com uma tocha convencional, tende a apresentar defeitos de soldagem como a falta de fusão nas paredes laterais do chanfro e raiz. Considerando que a rotação do arame eletrodo produz um efeito similar a uma oscilação do arco, espera-se que os defeitos de soldagem mencionados sejam eliminados pela melhor distribuição do calor nas paredes do chanfro. Desta forma, espera-se que o processo com eletrodo rotativo (GMAW-RE) também tenha sua aplicação estendida a outras aplicações industriais que estão relacionados à alta produtividade e ao baixo custo, com qualidade assegurada. Assim, a realização de estudos que possibilitem uma melhor compreensão do processo GMAW-RE de desenvolvimento relativamente recente se torna fundamental, sendo a soldagem de revestimentos anti-corrosivos de particular destaque na aplicação em equipamentos da indústria de petróleo e gás (JORGE *et al*.,2017).

Cumpre destacar que esta dissertação é uma parte inicial de um projeto de pesquisa sistemático, o qual tem como objetivo avaliar como os parâmetros relacionados a rotação do eletrodo podem influenciar no comportamento do revestimento com aço inoxidável super austenítico aplicado pelo processo GMAW-RE,

além de identificar possíveis vantagens sobre o processo GMAW. Para alcance desses objetivos, esse trabalho foi dividido em três etapas, sendo elas:

a) Etapa 1 - Foram efetuados testes preliminares com soldas do tipo cordões sobre chapa de passe único para obtenção de um conjunto de parâmetros de soldagem adequados (tensão, corrente e velocidade de soldagem) considerando os aspectos de qualidade em geral do depósito.
b) Etapa 2 - Foram efetuadas soldas do tipo cordão sobre chapa de passe único com parâmetros específicos do processo GMAW-RE para fins de avaliação das características geométricas do revestimento depositado, com base nos parâmetros definidos na primeira etapa.

c) Etapa 3 - Foram efetuadas soldas do tipo revestimento, consistindo na deposição de cordões com sobreposição de 50%, em camada única utilizando as condições de melhor resultado obtidos na segunda etapa.

CAPÍTULO 2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Aços Inoxidáveis Super Austeníticos (AISA)

A denominação “super austenítico” é aplicada ao Aço Inoxidável Austenítico (AIA) quando este apresenta maiores teores de Mo (4 – 8% em peso), Cr (19 – 26% em peso), Ni (17 – 28% em peso) e N (0,06 – 0,55% em peso), com um teor de C limitado a aproximadamente 0,01 a 0,03% em peso. São ligas baseadas no sistema ternário Fe-Cr-Ni, com extra baixo carbono (~0,02%), que apresentam um teor de ferro próximo a 50% em peso, uma microestrutura totalmente austenítica (γ), boa soldabilidade, trabalhabilidade, e excelente resistência à corrosão, além de boas propriedades mecânicas como resistência e tenacidade, mesmo em baixas temperaturas (KOVACH, 2000; ANBURAJ *et al.*, 2012; PAREDES, 2020; PICCHI, 2021; MATIAS, 2021). A Tabela 2.1 apresenta a composição química de alguns aços inoxidáveis e possibilita observar os teores mais elevados de elementos de liga como cromo, molibdênio, níquel e nitrogênio nos AISA, assim como um menor teor de carbono em comparação com os aços inoxidáveis austeníticos (AIA), aços inoxidáveis duplex (AID) e aços inoxidáveis super duplex (AISD).

Tabela 2.1- Composição química de alguns aços inoxidáveis (IMOA, 2010).

Designação	Elementos (% em peso)						
	C	Mn	N	Cr	Ni	Mo	Outro
Aços Inoxidáveis Austeníticos (AIA)							
304	0,08	1,5 – 2	0,10	18 – 20	08 – 12	-	-
304L	0,03	1,5 – 2	0,10	18 – 20	08 – 12	-	-
316L	0,03	1,5 – 2	0,10	16 – 18	10 – 14	2 – 3	-
317	0,03	1,5 – 2	0,10	18 – 20	11 – 15	3 – 4	-
Aços Inoxidáveis Super Austeníticos (AISA)							
904L	0,02	1,5 – 2	0,06	19 – 21	23 – 28	4 – 5	Cu
254 SMO	0,02	1	0,18 – 0,22	19,5 –	17,5 –	6 – 6,5	Cu
654 SMO	0,02	2 – 4	0,45 – 0,55	24 – 26	21 – 23	7 – 8	Cu
Aços Inoxidáveis Duplex (AID) e Super-Duplex (AISD)							
Alloy 24	0,03	3,5 –	0,4 – 0,6	23 – 26	16 – 19	3 – 5	Cu
Alloy 28	0,02	2	0,10	26 – 28	30 – 32	3 – 4	Cu
SAF 2304	0,011	1,45	0,1	22 – 23	4 – 4,5	2,75	-
SAF 2205	0,03	2	0,14 – 0,2	22 – 23	4,5 – 6,5	3 – 3,5	-
SAF 2507	0,03	1,2	0,24 – 0,32	24 – 26	6 – 8	3 – 5	Cu

A Tabela 2.2 apresenta valores típicos do PREN para diferentes graus de aços inoxidáveis.

Tabela 2.2- Valores do PREN para aços inoxidáveis (LEFFLER, 2005)

Grau	304L[(1)]	316L[(1)]	SAF 2304[(3)]	317L(1)	SAF 2205[(3)]	904L[(2)]	SAF 2507[(4)]	254 SMO[(2)]	654 SMO[(2)]
PREN	19	26	26	30	35	36	43	43	56

Nota: (1) Austenítico; (2) Super Austenítico; (3) Duplex; (4) Super Duplex

O PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) é um índice utilizado para estimar a resistência equivalente à corrosão por pites que pode ser calculado conforme a Equação 2.1. Portanto, a resistência à corrosão do aço é diretamente proporcional ao valor do PREN, sendo este derivado de uma relação empírica definida por meio da concentração dos elementos de liga presentes (GUNN, 2003; LEFFLER, 2005; KIM *et al*., 2017; MATIAS, 2021).

$$PREN = \% Cr + 3{,}3\ (\% Mo) + 16\ (\% N) \quad (2.1)$$

É importante destacar que o AISA utilizado no presente trabalho se trata de um AISA com maior teor de Mo (6% Mo). Observando-se a Tabela 2.2, pode-se sugerir que o AISA da liga 254 SMO que contém 6% de Mo possa ser considerada como uma referência, pois é o metal de adição com composição química mais próxima ao que foi utilizado como revestimento para este estudo, possuindo um PREN com o valor igual a 43, característico para aplicação em ambientes contendo cloreto como é o caso da aplicação offshore. Ainda utilizando a Tabela 2.2, é possível observar que o AISA (904L), que normalmente possui um PREN variando de 32 a 40 em função da variação da composição química para cada faixa especificada, já apresenta um PREN superior (36) tanto em comparação com os austeníticos convencionais, quanto em comparação com o *lean* duplex 2304 e o duplex 2205. Porém, ele é inferior ao super duplex 2507 e outros super austeníticos como SMO 254 e SMO 654, em função da variação do teor de Mo (KOVACH, 2000; BARBOSA et al., 2012; MATIAS, 2021).

A composição química dos AISA apresentada na Tabela 2.1, associado ao controle de impurezas, fornece propriedades como alta resistência à corrosão e boa soldabilidade, mesmo em meios severos (IMOA, 2010; PAREDES, 2020; MATIAS, 2021). O alto teor de Ni e adição de N proporcionam a estabilização da matriz do AISA aumentando a resistência à corrosão em meios ácidos e à corrosão sob tensão (CST). Além disso, o nitrogênio em solução sólida tem grande influência nos limites de resistência mecânica, em especial ao escoamento, sem perda de tenacidade e ductilidade, sendo maiores que os dos AIA convencionais. Estes limites de resistência podem ser maiores por meio do trabalho a frio, com a formação de martensita induzida por deformação, podendo até mesmo ser maior do que os valores de alguns aços

inoxidáveis ferríticos e duplex. Entretanto, este aumento excessivo nos valores destas resistências pode provocar a redução de tenacidade e ductilidade em função da fragilidade e da alta dureza da fase martensita (LEFFLER, 2005; IMOA, 2010; MATIAS; 2021).

Em relação aos AISA de designação 254 SMO e 654 SMO (6% a 8% Mo), eles possuem PREN mais elevado que o 904L (4% a 5% de Mo) em função dos teores mais altos de elementos como Cr, N e principalmente Mo, o que se reflete no ótimo desempenho em corrosão. Embora com custo bastante superior, os AISA com teores de molibdênio acima de 6%, são indicados para aplicação offshore por apresentar valores de PREN igual ou superior a 40 visando a imunidade à formação de pites em ambientes contendo cloreto (KOVACH, 2000; MADALENA *et al*, 2013; TCINOX, 2022). Todavia, esse tipo de liga (AISA), normalmente, sofre com o fenômeno de micro segregação de elementos quando são submetidas a ciclos térmicos, em particular na soldagem. Com a ocorrência desse fenômeno, podem surgir zonas com maior concentração de elementos como Cr, N e, principalmente, Mo, o que pode acarretar em zonas mais pobres desses elementos com uma redução local do valor do PREN, originando uma zona mais crítica propícia para a formação de pites em ambiente agressivo. Para minimizar este problema, em casos especiais, muitas vezes são utilizados metais de adição com teores de molibdênio um pouco acima da composição nominal da liga, como na designação 254 SMO e 654 SMO (6% a 8% Mo), aumentando a quantidade deste elemento no interior das dendritas em busca da restauração do seu teor dissolvido na matriz (BANOVIC *et al*., 2002). Entretanto, os teores mais elevados de elementos como Cr, Mo, Ni e N, que podem resultar no PREN entre 40 e 60, favorecem a formação de fases intermetálicas que podem impactar negativamente nas propriedades mecânicas e na resistência a corrosão, pela segregação com maior intensidade em comparação aos AIA (PICCHI, 2021). Com isso, a resistência à corrosão pode ser reduzida em função do aumento de temperatura de trabalho (KOVACH, 2000). O valor de PREN entre 40 e 60, requerido para operação offshore, em ambientes contendo cloreto, pode ser obtido por meio de adição de maior teor de Mo (6% a 8%) e do controle da diluição (JORGE *et al.,* 2017).

Os AISA são considerados materiais de ampla aplicação onde é necessária uma boa resistência mecânica e resistência à corrosão em ambientes agressivos como encontrado na indústria de petróleo, assim como na indústria farmacêutica, na indústria alimentícia e na indústria de fertilizantes. Eles têm sido utilizados como substitutos aos aços inoxidáveis convencionais pelo seu desempenho superior aliado a uma excelente relação custo/benefício, boa soldabilidade e excelente resistência à corrosão localizada,

além de apresentar um valor bastante inferior em comparação às superligas de níquel, surgindo como alternativos dos Aços Inoxidáveis convencionais, assim como dos Aços Inoxidáveis Duplex (AID), dos Aços Inoxidáveis Super Duplex (AISD) e das superligas de níquel, em especial o Inconel 625 o qual é bastante utilizado como revestimento anti-corrosivo para equipamentos mecânicos, estáticos e dinâmicos, assim como para componentes mecânicos, na indústria petroquímica (Onshore e Offshore) (KOVACH, 2000; MADALENA *et al*, 2013; JORGE *et al.,* 2017; BUNAZIV *et al.,* 2019).

Recomenda-se certa atenção na aplicação dos AISA, pois se ele for submetido a temperaturas acima de 500ºC pode ocorrer a precipitação de fases secundárias indesejáveis, que comprometem suas propriedades e favorece a ocorrência de trincas a quente as quais este tipo de material é mais propenso como, por exemplo, no caso de uma soldagem, quando ocorre a exposição aos ciclos térmicos. Tais problemas podem ser evitados ou mitigados por meio do ajuste na composição química, microestrutura, temperatura e tempo de exposição, e nas variáveis do procedimento de soldagem. Normalmente, as trincas a quente, caracterizadas como trincas de solidificação no Metal de Solda (MS), ou trincas de liquação favorecidas pelo crescimento de grão na Zona Termicamente Afetada (ZTA) estão diretamente relacionadas ao controle de impurezas e por possuírem elementos como Cr, Ni, Mo em maiores quantidades, sendo que os aços super austeníticos são os que apresentam uma cinética de precipitação mais acelerada desses compostos deletérios em comparação com os austeníticos comuns, menos ligados. Assim, a formação de fases secundárias nos aços AISA ocorre em tempos menores e faixas de temperatura mais amplas, com picos em temperaturas maiores (KOVACH, 2000; IMOA, 2010; MATIAS, 2021).

2.1.1- Soldabilidade

Embora os aços AIA e AISA estejam baseados no sistema ternário Ferro-Cromo-Níquel (Fe-Cr-Ni) com matriz austenítica (γ), dependendo da composição química e da rota de fabricação ou soldagem, que promovem diferentes temperaturas e taxas de resfriamento, é possível que estes apresentem, também, ferrita, nitretos, carbonetos e fases secundárias em sua estrutura, sendo que as fases mais comuns são chi (χ), sigma (σ) e laves (η) (KOVACH, 2000; MADALENA; 2013; MATIAS, 2021; PICCHI, 2021). Estas fases podem provocar grande redução na ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão destes aços (KOVACH, 2000; IMOA, 2010). O equilíbrio entre os elementos de liga que promove a formação da ferrita (δ ou α) e da austenita (γ), ou seja, alfagênico e gamagênico, respectivamente, interfere diretamente no comportamento da liga

durante o processo de solidificação e no tipo de estrutura que ele apresentará após o resfriamento completo, podendo ocorrer na fundição ou em soldagem.

Na soldagem de ligas totalmente austeníticas, como no caso do AISA com 6% de molibdênio, algumas precauções como a utilização de baixo aporte térmico são recomendadas, e devem ser tomadas, quando possíveis, em função da variação de composição química, que pode influenciar positivamente para uma boa temperabilidade. Com o intuito de diminuir a rigidez dos componentes soldados, deve-se evitar a superposição de cordões e mudanças de espessura que favorecem o aumento das tensões e, consequentemente, a suscetibilidade de fissuração a quente por meio de trinca de solidificação ou de liquação (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; PAREDES, 2011). O uso de baixo aporte térmico como precaução no procedimento de soldagem das ligas totalmente austeníticas pode aliviar, tanto a precipitação de fases secundárias, quanto o crescimento de grão na região da ZTA, promovendo a solidificação de grãos austeníticos primários pequenos, o que diminui a tendência de formação de fases líquidas e segregações. Todos estes efeitos benéficos podem ser fortalecidos pelo uso de baixas temperaturas de interpasses em espessuras maiores, alteração na sequência de soldagem e preaquecimento do metal de base ou substrato (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; PAREDES, 2020). A suscetibilidade à trinca de solidificação dessas ligas também pode ser reduzida por meio do uso do metal de solda com adição de alto teor de Mn (>4%) (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; MATIAS, 2021). Entretanto, o Mn é adicionado, normalmente, com um percentual máximo de 2% nos consumíveis de aço AISI 904L (ASTM A240, 2019; PPICCHI, 2021; MATIAS, 2021).

2.1.2- Revestimento Depositado por Soldagem

A indústria petroquímica perde em produtividade com a redução da vida útil dos componentes e equipamentos no setor de produção. Devido ao ambiente em que atua, com alta concentração de íon cloreto, existe a exigência de substituição destes componentes e equipamentos em um tempo mais curto do que o normal. Muitas das vezes essa substituição se torna indesejável devido ao alto custo provocado pela necessidade de parada da linha de produção e do custo do próprio equipamento ou componente. Alguns componentes como tubulações e vasos de pressão, que podem ser fabricados com ligas menos nobres como aços baixa liga e aços C-Mn, são revestidos com ligas resistentes à corrosão (CRA) visando uma maior proteção da superfície em ambientes agressivos. A prática deste recurso; que pode ser aplicado por soldagem, por laminação a quente, por explosão, por extrusão, entre outros; possibilita

a redução do custo dos componentes e equipamentos, quando comparados com os seus equivalentes fabricados integralmente com material mais nobre como aços inoxidáveis duplex, super duplex e ligas de níquel; mantendo uma boa resistência mecânica em função do substrato estrutural (MADALENA, 2013; SAHA e DAS, 2018; VOLPI e SERRA, 2018; BUNAZIV *et. al*., 2019; ALVARÃES, 2020).

Nesse contexto, com a necessidade de aprimoramento tecnológico associado à boa relação custo/benefício, há uma enorme demanda dos setores industriais pela aplicação de revestimento anticorrosivo com o objetivo de proporcionar essa redução de custo associado a um revestimento com material mais nobre. O processo de revestimento depositado por soldagem pode proporcionar uma forte união metalúrgica entre as partes, sendo este processo utilizado, normalmente, em função de sua versatilidade, confiabilidade, boa produtividade e custo relativamente reduzido. Este processo pode ser caracterizado pela formação de múltiplos cordões depositados em paralelo, produzindo uma ou mais camadas com as propriedades de resistência à corrosão superior sobre o substrato de material menos nobre, formando assim uma solda dissimilar, que tem como objetivo garantir um desempenho superior à determinada superfície. A escolha do processo de soldagem e do material a ser depositado, assim como a seleção dos parâmetros de soldagem, são os responsáveis pela variação da espessura e das propriedades microestruturais, mecânicas e de corrosão destes revestimentos, também chamados de *cladding* (GÓRNIKOWSKA *et al*., 2014; SAHA e DAS, 2018; VOLPI e SERRA, 2018; BUNAZIV *et al*., 2019; QUEIROZ, 2021). Na soldagem de revestimento (*weld overlay*), quando efetuada com materiais diferentes (soldagem dissimilar); em condições de resfriamento fora do equilíbrio; a diferença existente entre as composições químicas pode levar a formação de trincas, micro segregação, precipitação de fases secundárias, precipitação de carbonetos e formação de Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD), comprometendo as desejáveis propriedades dos componentes revestidos, diminuindo sua vida útil. Normalmente, a região mais sensível à falha está localizada próxima à linha de fusão (LF) (SILVA *et al*., 2010; MADALENA, 2013; GÓRNIKOWSKA *et al*., 2014; JORGE *et al*., 2017). Na soldagem de revestimento o controle da diluição é fundamental para evitar alterações indesejáveis na microestrutura, na composição química, na geometria do cordão de solda, tanto no revestimento, quanto no substrato (SATHIYA *et al*., 2010; SAHA e DAS, 2018; VOLPI e SERRA, 2018). Nesse sentido, alguns trabalhos como os de SANTOS (2019), COSTA (2023) e JUNIOR *et. al.* (2023) apresentam indícios do grande potencial do processo GMAW-RE para aplicação de soldagem de revestimento. Todavia, foi encontrado como disponível apenas o trabalho de JUNIOR *et al.* (2023) apresentando uma abordagem

preliminar para soldagem de revestimento com aço inoxidável super austenítico com o processo GMAW-RE.

Para se manter as características distintas tanto do metal de solda, quanto do metal de base ou substrato, como resistência à corrosão e resistência mecânica, o controle das variáveis de soldagem e, consequentemente, da diluição e da microestrutura final é fundamental. É desejável a união metalúrgica das ligas e a deposição de revestimento com boa produtividade (taxa de deposição), com boa qualidade e com o mínimo de diluição, o que pode evitar o surgimento de uma microestrutura sensível à corrosão localizada (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; MADALENA, 2013; SAHA e DAS, 2018).

A diferença de composição química existente entre materiais dissimilares, como em um revestimento austenítico depositado em um substrato ferrítico de aço baixo carbono, promove um aumento na energia entre os materiais, no ângulo de contato e na barreira de energia livre à formação de um núcleo sólido. Dessa forma, o típico crescimento epitaxial observado em soldas homogêneas pode deixar de ocorrer, pois será necessário um maior sub-resfriamento para que ocorra uma nucleação homogênea. Em vista disso, com o início da solidificação, outros mecanismos de solidificação são esperados na linha de fusão (LF). É possível que ocorra, ao longo dos grãos parcialmente fundidos, na Zona Termicamente Afetada (ZTA), a formação de núcleos sólidos por nucleação heterogênea na Zona Fundida (ZF), formando uma zona coquilhada similar à fundição (NELSON *et al.,* 1999; MADALENA, 2013; ALVARÃES, 2020). Na soldagem de metais dissimilares o principal problema metalúrgico é a formação de regiões frágeis que podem atingir dureza superior a 400 HV, ao longo da interface da linha de fusão (LF) do lado austenítico (metal de solda), indicando a presença de martensita. Estas regiões frágeis, onde não ocorreu uma correta mistura entre o metal de base (MB) e o metal de solda (MS) fundido, são chamadas pela literatura de Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD), não podendo ser previstas por meio de cálculos usuais de diluição (BAESLACK *et al.*, 1979; NELSON *et al*., 1999; MADALENA, 2013).

As ZPDs podem ser caracterizadas com três tipos de morfologia:

i) Baía ou Península – área parcialmente circundada pelo metal de base;

ii) Ilha – regiões totalmente envolvidas pelo metal de solda, soltas, grandes e abauladas;

iii) Praia – faixas estreitas ao longo da linha de fusão.

A Figura 2.1 apresenta as micrografias de ZPD do tipo baía em solda dissimilar, sendo que a Figura 2.1 (a) apresenta um revestimento depositado com uma superliga de níquel, evidenciando sua elevada dureza (386 HV) em comparação com o MB e o MS. Já a Figura 2.1 (b) apresenta uma ZPD, também, de alta dureza (~370 HV) em um revestimento depositado com o AISA 904L (MEIRA, 2015). Desta forma, tanto o processo de soldagem, quanto o metal de adição são escolhidos buscando a união metalúrgica das ligas com alta taxa de deposição (produtividade) por meio do controle dos parâmetros do processo (especialmente do aporte térmico), provocando o mínimo de diluição possível e evitando a formação de uma microestrutura sensível a trincas e/ou à corrosão localizada (BAESLACK *et al.,* 1979; LIPPOLD e KOTECKI, 2005; SAHA e DAS, 2018).

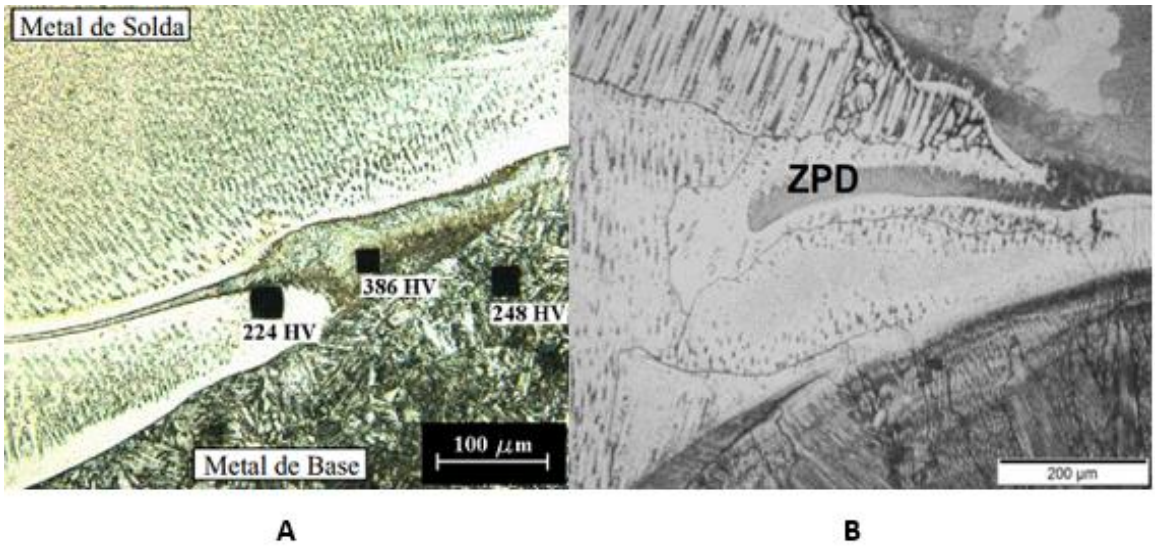


Figura 2.1- ZPD em soldagens dissimilares (a) Superliga de níquel, dureza (386HV) (KEJELIN, 2006); (b) Liga 904L, 370HV (MEIRA, 2015).

Segundo BAESLACK *et al*. (1979), os movimentos convectivos na poça de fusão não são fortes o suficiente para misturar uma estreita camada fundida estagnada de metal de base. Entretanto, são responsáveis por enriquecer esta região com elementos de liga, podendo aumentar localmente a sua temperabilidade e assim favorecer uma transformação martensítica, levando a formação das Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD). Estas regiões, também conhecidas como Zonas Parcialmente Misturadas (ZPM), são vulneráveis à formação de pites em ambientes corrosivos, podendo também servir como sítios para a nucleação de trincas de corrosão sob tensão, especialmente em condições de serviço ácido (*sour servisse*), ou de fadiga, facilitando a falha prematura do componente.

MADALENA *et al*. (2013) realizaram um estudo sobre revestimento depositado com liga AISI 904L pelo processo de eletroescória sobre aço carbono ASTM-A-516,

grau 70. Os resultados mostraram aspectos complexos na composição química ao longo da zona de interface, entre as zonas parcialmente diluídas, principalmente próximo da LF, que resultam na incorporação de quantidades muito pequenas de elementos como Cr, Mo e Ni, cujos teores são insuficientes para estabilizar a estrutura austenítica, mas é o suficiente para promover o aumento da temperabilidade, podendo favorecer a formação da fase martensita. A Figura 2.2 apresenta a análise por EDS, realizada por MADALENA *et al*. (2013), da composição química da zona de transição do revestimento, depositado pelo processo de eletroescória com a liga 904Lem uma região com uma ZPD do tipo praia.

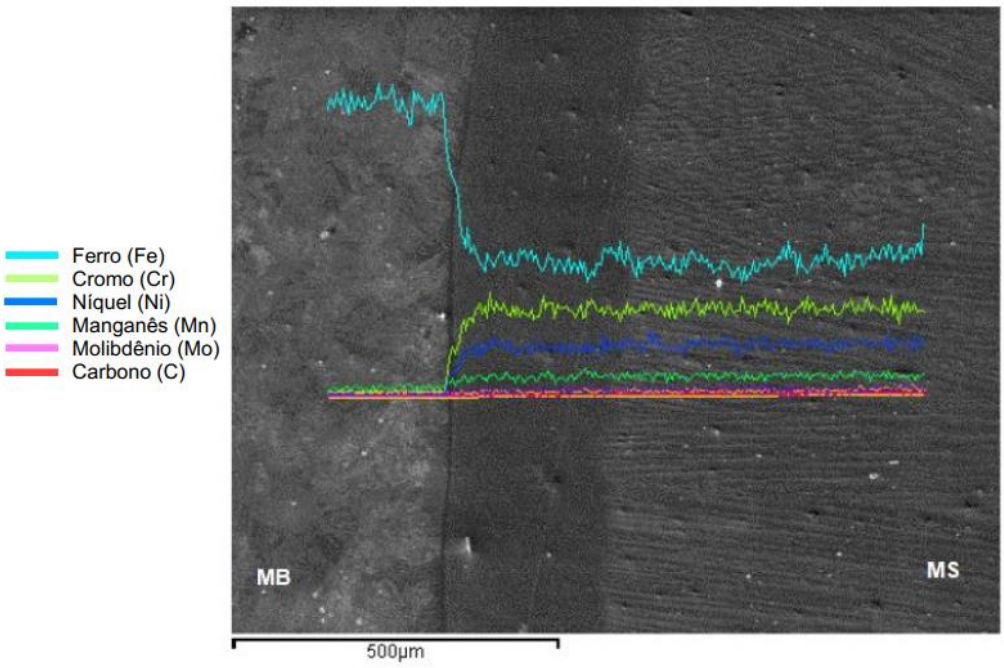


Figura 2.2- Análise de composição química da zona de interface em revestimento depositado com a liga 904L, efetuada por EDS na condição de TTPS, com aumento de 20x (MADALENA, 2013).

De um modo geral, as soldas dissimilares entre as ligas estudadas possuem uma região de interface que pode conter uma grande quantidade de martensita e/ou carbonetos de cromo, visto que o substrato possui quantidades muito elevadas de carbono podendo se difundir da ZTA para a zona fundida, devido à sua afinidade com o Cr e à alta solubilidade na fase austenítica, podendo isso ocorrer durante a soldagem ou tratamento térmico pós soldagem (TTPS) (GÓRNIKOWSKA *et al*., BUNAZIV *et al*., 2019).

A Figura 2.3 apresenta a região de interface do revestimento com o aço inoxidável super austenítico (AISI 904L) depositado pelo processo de eletroescória sobre um substrato de aço carbono estrutural e permite observar várias regiões de

interesse: o metal de solda com a sua microestrutura dendrítica; a linha de fusão (LF) caracterizada pela sua faixa estreita e contínua; e a ZTA do metal de base apresentando grãos mais grosseiros conforme vai se aproximando da LF devido ao seu maior tempo de exposição ao calor. Observa-se que a região de interface é caracterizada por uma baixa penetração e baixa diluição, com uma característica homogênea, delimitada por uma faixa estreita e contínua ao logo da linha de fusão. Não se observa a presença de ZPD nesta amostra. A região de grãos grosseiros da ZTA (RGGZTA), mais próxima à LF, é consequência do alto aporte térmico, o que é característico deste processo de soldagem, o qual acaba por promover uma taxa de resfriamento mais lenta (MEIRA, 2015).

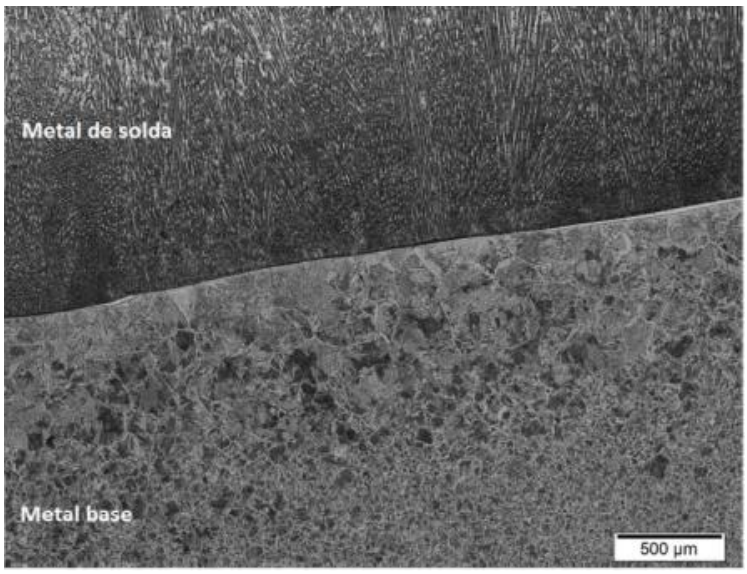


Figura 2.3- Micrografia da região de interface do revestimento depositado por eletroescória com a liga 904L, via MO (MEIRA, 2015).

A soldagem de revestimento com qualidade, mantendo as características do substrato e do revestimento como resistência mecânica e resistência à corrosão é um objetivo amplamente desejado por vários setores industriais como óleo & gás, e que está associada à escolha tanto do tipo de processo quanto do metal de adição, com uma boa taxa de deposição e um mínimo de diluição. Para tanto, é necessária uma atenção especial ao controle dos parâmetros de soldagem, principalmente ao aporte térmico, que pode produzir alterações indesejáveis nas características mecânicas, assim como provocar a formação de uma microestrutura suscetível à trinca e à corrosão localizada (GÓRNIKOWASKA *et al*., 2014; LIPPOLD e KOTECKI, 2005; SAHA e DAS, 2018; MATIAS, 2021). Portanto, a recomendação para uma boa qualidade da soldagem de revestimento (*weld overlay*) é que o cordão apresente uma boa largura e que sua

penetração seja mínima o suficiente para adequada ancoragem ao substrato e também com a menor diluição, promovendo assim uma boa qualidade e possibilitando a maior durabilidade dos componentes ou equipamentos (MADALENA, 2013; SAHA e DAS, 2018; MATIAS, 2021). Nas soldagens de metais dissimilares, por exemplo, as composições químicas do metal de solda (MS) será o resultado de uma relação intermediária entre as composições químicas do metal de base e o metal de adição, que pode ser estimado utilizando o conhecimento da diluição. O valor da diluição pode sofrer significativa variação, não só em função da composição química e do tipo de processo de soldagem que está sendo utilizado, mas também em um mesmo processo, dependendo dos parâmetros de soldagem empregados como a tensão de arco, a intensidade de corrente e a velocidade de soldagem, que definem o aporte térmico. Além disso, as temperaturas de preaquecimento e de interpasse, além das técnicas como sobreposição e oscilação também podem influenciar nesse resultado (RIBEIRO, 2012; EDMUR e SOUZA, 2016; SAHA e DAS, 2018).

O controle da diluição é primordial para a garantia das propriedades do revestimento, especialmente de resistência à corrosão, e pode ser definida como a contribuição do metal de base, ou substrato, para a formação da zona fundida. Vale ressaltar que um dos fatores que também pode afetar, indiretamente, a diluição é a velocidade de soldagem. Ao aumentar a velocidade de movimentação da fonte de calor ocorre uma melhor eficiência de fusão, assim como um aumento da diluição, que pode provocar o aumento do teor de ferro no metal de solda ocasionando a redução do coeficiente de partição do molibdênio, pois a adição de ferro no metal de solda reduz a capacidade do molibdênio em se dissolver na austenita. Nos metais de solda de ligas super austeníticas, a elevação do teor de ferro provoca a elevação da faixa de temperatura de solidificação devido à precipitação de fases deletérias de baixo ponto de fusão, favorecendo o surgimento de trincas de solidificação (MADALENA, 2013; PICCHI, 2021). Além disso, outros fatores ainda podem afetar no valor da diluição como é o caso da soldagem com múltiplos passes, visto que a elevação do grau de sobreposição entre passes adjacentes contribui para uma redução da diluição, pois reduz a contribuição do metal de base (MB). Entretanto, com uma elevação da temperatura de preaquecimento, ou de interpasses, haverá um aumento da diluição, devido à redução da quantidade de energia necessária para fundir o MB (LIPPOLD e KOTECKI, 2005). A Figura 2.4 apresenta o aspecto esquemático da seção transversal de um cordão sobre chapa aplicado a soldagem de revestimentos. A diluição é calculada conforme a equação 2.2, quando a área transversal do metal de base fundido (A) é

dividida pela área transversal total do cordão de solda (A + B) depositado (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; VOLPI e SERRA, 2018; SAHA e DAS, 2018).

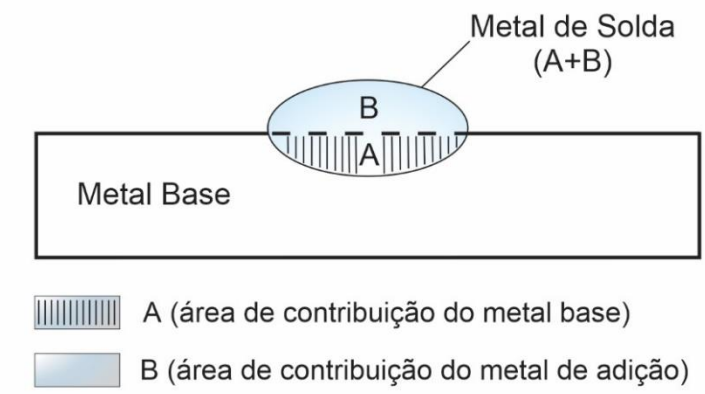


Figura 2.4- Desenho esquemático da seção transversal do cordão de solda.

$$\text{Diluição} = \frac{A}{A+B} \times 100\% \qquad \text{Equação 2.2}$$

A geometria do cordão de solda (largura, altura e profundidade) irá depender dos parâmetros específicos relativos ao processo empregado (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; SAHA e DAS, 2018; MATIAS, 2021). A microestrutura, a geometria do cordão de solda e a composição química são os parâmetros mais influentes na qualidade do revestimento depositado por soldagem, que pode ser avaliado por meio das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Esses parâmetros podem ser fortemente influenciados pela diluição e pelo aporte térmico aplicado, pela corrente, pela tensão e pela velocidade de soldagem (SATHIYA *et al*., 2010; SAHA e DAS, 2018; VOLPI e SERRA, 2018). Em processos de soldagem a arco, como o GMAW, por exemplo, o ângulo de inclinação da tocha, a taxa de alimentação do arame e, principalmente, a vazão e composição do gás de proteção também influenciam nos resultados desejáveis, porém com menor intensidade (SAHA e DAS, 2018; MATIAS, 2021). O gás de proteção pode afetar o formato do cordão e as propriedades da solda. No processo GMAW com aço inoxidável o gás de proteção recomendado é o argônio puro (Ar) ou a sua mistura com pequeno percentual de oxigênio ou dióxido de carbono (LYTTLE *et al*., 1990). Tal mistura pode influenciar na quantidade de respingos, na formação do perfil do cordão, na penetração, no conteúdo de liga adicionado e na aparência superficial do cordão de solda. Um percentual adequado de oxigênio ao argônio pode suavizar o perfil do cordão de solda, melhorando a molhabilidade da poça de fusão (LYTTLE *et al*., 1990; JONSSON *et al*., 1995). A adição de até 5% de oxigênio ao argônio apresenta influência sobre a coluna do arco reduzindo a corrente de

transição globular/spray. Para maiores teores de oxigênio na mistura gasosa, pode ocorrer uma pequena deterioração nas propriedades mecânicas (LYTTLE *et al*., 1990). De acordo com Dillenbeck e Castagno (1987), o argônio proporciona a retenção de elementos de liga no cordão de solda, promovendo um cordão de solda livre de inclusões, melhorando assim as propriedades mecânicas, além de facilitar a abertura do arco, melhorar a estabilidade em baixas correntes e permitir transferência spray.

NOURI *et al.* (2007) estudaram a diluição e a geometria do cordão de solda com revestimento de aço inoxidável 316L pelo processo GMAW em dutos de aço X65, quando verificaram que a largura, a altura e a penetração do metal de adição são diretamente proporcionais à taxa de alimentação do arame. Entretanto, são inversamente proporcionais à velocidade de soldagem. Adicionalmente, de acordo com a literatura (NOURI *et al.*, 2007; KUMAR *et al*., 2010), considerando o revestimento depositado por soldagem a arco elétrico com materiais dissimilares, em geral, a magnitude da diluição aumenta proporcionalmente com o aumento da corrente, da velocidade de soldagem e da taxa de alimentação do arame, mas diminui ao aumentar o ângulo de inclinação da tocha e a distância do bico de contato da tocha à peça de trabalho (stick-out).

KUMAR *et al.* (2010) estudaram a influência dos processos de soldagem (TIG e MIG), assim como seus parâmetros na geometria do cordão de solda, na diluição e na resistência à corrosão de revestimento com a superliga de níquel inconel 625 em substrato de aço C-Mn. Em ambos os processos, variando-se a corrente e a velocidade de soldagem, foi possível observar que o aumento da corrente provocou o aumento do aporte térmico e, consequentemente, provocou o aumento da diluição. Com isso, o cordão de solda apresentou maior largura, assim como maior profundidade e uma eventual redução na altura do reforço. Tais resultados tendem para um aumento na fusão do substrato, sendo assim, uma maior diluição. Entretanto, o aumento do aporte térmico quando provocado pela diminuição da velocidade de soldagem promove a redução da diluição. Dessa forma, foi possível observar que embora a velocidade de soldagem seja inversamente proporcional ao aporte térmico, ela é diretamente proporcional à diluição, conforme encontrado, também, em outros trabalhos (NOURI *et al.*, 2007; LIPPOLD e KOTECKI, 2005). A diluição atingiu as condições de estado estacionário, aproximadamente, na terceira camada de sobreposições dos cordões de solda. Já em relação a velocidade de soldagem, quando esta é elevada mantendo-se os demais parâmetros constantes, a profundidade do cordão apresenta pouca variação e se mantém constante com pequena redução na altura de reforço e uma redução mais intensa na largura. Enfim, os procedimentos para ambos os processos apresentaram

tendência semelhante. Os autores também observaram uma redução na resistência à corrosão do revestimento analisado pelo potencial de pites (Ep), em função da elevação do teor de Fe decorrente do substrato, devido ao aumento da diluição em distâncias mais próximas à LF.

MADALENA *et al.* (2013) em um outro estudo, agora sobre revestimento depositado com liga AISI 904L sobre aço carbono ASTM-A-516 de grau 70 por meio do processo GMAW realizaram uma análise sobre o comportamento mecânico, microestrutural e de composição química ao longo da linha de fusão (zona de transição) para avaliação da diluição e para cálculo do PREN. Por meio da técnica de EDS foi avaliada a composição química local das regiões dendríticas e interdendríticas e a presença de fases secundárias. Verificou-se, também, a presença de regiões de grãos grosseiros (RGG) com possível presença de ZPD e formação de martensita próximo da região de interface. A presença de ZPD pode estar associada à diferença de composição química entre os materiais. O resultado de análise química na interface apresenta uma variação contínua de composição química na região de grãos grosseiros. A Figura 2.5 demonstra com maior clareza a zona do AISI 904L separada do substrato de aço carbono ASTM-A-516 por uma região de interface (linha de fusão), caracterizada por (RGG).

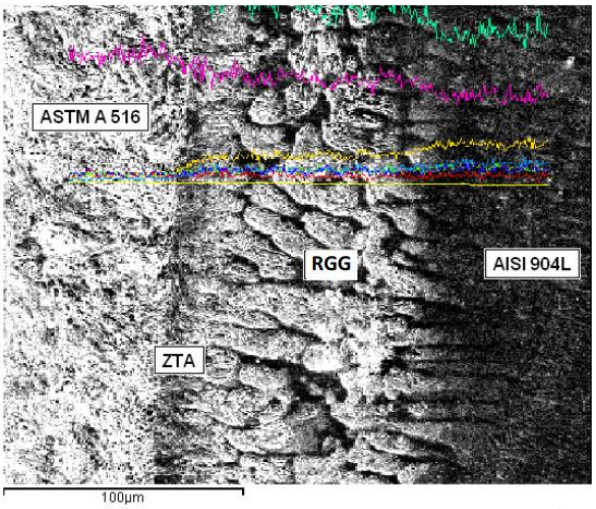


Figura 2.5- Microestrutura mostrando a análise de linha da amostra de revestimento com AISI 904 em 500x (MADALENA et al., 2013).

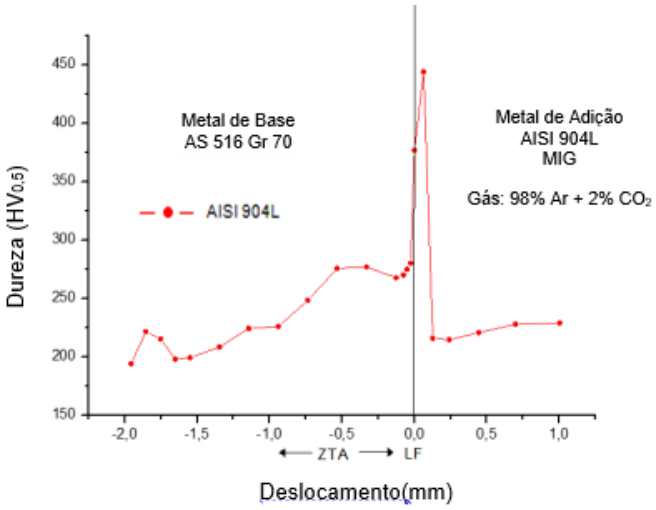


Figura 2.6- Variação dos valores de microdureza Vickers, tomando como base a linha de fusão (MADALENA *et. al.*, 2013).

Foi realizado um perfil de microdureza através da interface contemplando o revestimento, a ZTA, a ZPD e o substrato. Verificou-se que os valores de micro dureza variam de 200 HV a 444 HV na direção do revestimento para o substrato conforme apresentado na Figura 2.6. Com base na análise química do revestimento, os autores também observam um valor de PREN de 41,2, comprovando sua elevada resistência à corrosão localizada, desejada para aplicações no setor de offshore.

JORGE *et al.* (2017) estudaram a soldagem de revestimento com a liga 904L depositados pelo processo GMAW, quando foi possível observar um aspecto de boa geometria e sem defeitos. O cordão de solda, por exemplo, apresentou uma largura aproximada de 5 mm, com uma relação entre cromo equivalente e níquel equivalente inferior a 1,35 (Cr_{eq}/Ni_{eq}< 1,35), a qual representa um metal de adição austenítico com uma quantidade de fases secundárias, sigma e chi, muito pequena, aproximadamente 0,6%, encontradas nas regiões interdendríticas, justamente onde ocorre a maior concentração de Mo. Também foi observado que a alta taxa de resfriamento, em função do baixo aporte térmico, característico desse processo, resultou em uma microestrutura refinada na ZF e na ZTA com a presença de martensita. Os múltiplos passes de deposição do MS, que resultam no revenimento da martensita, geraram regiões de grãos grosseiros na ZTA e uma ZPD com valores elevados de dureza, em torno de 270 HV e 370 HV, respectivamente. Entretanto, a ZPD resultante da soldagem não provocou modificações significativas nas propriedades mecânicas da amostra revestida. Observou-se ainda, que a composição química do revestimento apresentou estabilidade a partir de 3 mm da LF, cuja distância é considerada como crítica para os revestimentos depositados por esse processo, conforme normas atuais (API 6ª, 2004; DNV-OS-F101,

2012). Dessa forma, fica evidente o desempenho favorável da amostra em meio corrosivo.

MOTA *et al.* (2019) efetuaram uma avaliação do efeito da energia de soldagem sobre as características geométricas (reforço e largura), diluição, microestrutura e microdureza, com soldas de revestimento por meio do processo MIG e MIGAF (MIG com arame frio) aplicadas com superliga de níquel em substrato de AISI 1020. Inicialmente, com os resultados obtidos, os autores puderam observar uma variação de aproximadamente 10% na tensão (queda) e na corrente (elevação), que pode ser vista como uma compensação da fonte de energia à possível perturbação do arco voltaico (inserção do arame frio à poça de fusão) na tentativa de manutenção de seu comprimento. Este auto ajuste é uma compensação nativa dos sistemas GMAW que mantém o equilíbrio entre a taxa de alimentação e a taxa de fusão do eletrodo (SANTOS, 2019). Os autores também puderam observar uma elevação da razão entre a altura do reforço e a largura do cordão nas soldas MIGAF em função da elevação da energia, que provocou o aumento da taxa de alimentação por unidade de comprimento (até 60%) e consequente aumento da altura do reforço e redução da diluição. Os autores atribuíram tal ocorrência ao fato de que à medida que o arame frio é introduzido na poça de fusão ocorre o consumo de parte do calor necessário para fundir e misturar a massa adicional, ou seja, o aumento percentual de adição do arame frio pode reduzir a diluição. Ao analisarem o aspecto microestrutural foi possível observar a formação de Zonas Parcialmente Misturadas (ZPM) ao longo da interface, no lado do metal de solda, com dureza elevada, provavelmente devido à precipitação de carbonetos causada pelo enriquecimento de carbono, migrado do substrato na direção do metal de solda.

SILVA et al. (2022) efetuaram um estudo comparativo entre o modo pulsado e o modo curto-circuito controlado (CCC) do processo GMAW com o objetivo de avaliar os efeitos da restrição dos principais parâmetros de soldagem, como corrente e velocidade de soldagem, principalmente, no aspecto qualitativo e econômico. A velocidade de soldagem foi o único parâmetro utilizado com valor diferente, devido à necessidade de manter a estabilidade do processo. Com os resultados obtidos, os autores observaram que embora o número de cordões de solda necessário para o revestimento de uma mesma área produzida pelo processo GMAW no modo pulsado seja inferior ao realizado pelo processo GMAW no modo de curto-circuito controlado, este último foi capaz de proporcionar vantagens econômicas sobre o modo pulsado, como menor consumo de energia e uma leve tendência a maior taxa de deposição (em torno de 7%) com menor aporte térmico, melhor acabamento do revestimento, menor área fundida do metal de base e, consequentemente, menores índices de diluição, com 8% a menos de metal

base diluído. Porém, uma elevação significativa da taxa de deposição (maior energia aplicada ao processo) pode provocar danos à qualidade do revestimento, como alterações na penetração, diluição e propriedades mecânicas (JORGE et al., 2017).

2.2- Processo GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE)

O processo GMAW-RE (*Gas Metal Arc Welding Rotating Electrode*) ou GMAW com eletrodo rotativo é uma inovação do processo GMAW convencional e consiste na utilização de uma tocha de soldagem contendo um mecanismo especial que confere um movimento de rotação ao arame eletrodo, podendo-se ajustar: o sentido de rotação, o diâmetro médio de rotação e a frequência de rotação (Figura 2.7). Esse conjunto de parâmetros fornece algumas vantagens sobre o processo convencional nas condições de soldagem em chanfro estreito (Narrow Gap), onde existe uma significativa limitação do processo convencional. As vantagens são: a melhor fusão da parede lateral, o aumento da produtividade quando se elimina a preparação de bordas, possibilitar a redução do número de passes sem comprometer as propriedades de resistência das uniões soldadas. Dessa forma, as principais vantagens do processo GMAW-RE, em grande parte, estão relacionadas com a alta produtividade e o baixo custo (SANKAR *et al.,* 2021; FUNDERBURK, 2015). A alta taxa de deposição, a sua versatilidade, a facilidade de adaptação à automação e baixo custo, em comparação com outros processos como soldagem por eletroescória (Electro Slag Welding – ESW) e soldagem híbrida de arco/laser (Laser Arc Hybrid Welding – LAHW), torna o processo GMAW-RE como um candidato para aplicação nas mais diversas áreas do setor industrial, como em offshore, estruturas metálicas, indústria química, etc (SAHA e DAS, 2018).



(a) (b)

Figura 2.7- Processo GMAW-RE. (a) Eletrodo com frequência de 3000 rpm; (b) Aspecto do destacamento em spray com filmagem em alta velocidade. (LABSOLDA, 2022).

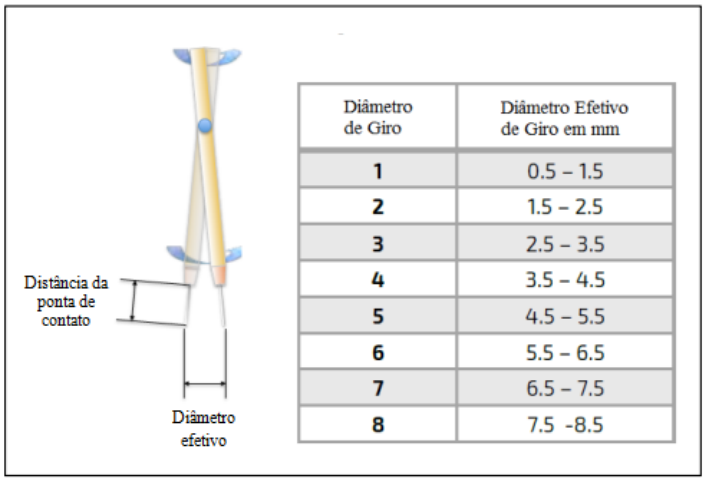
Os parâmetros específicos e ajustáveis do processo GMAW-RE são: a velocidade de rotação (frequência), o diâmetro de rotação e o sentido de rotação conforme o manual do fabricante do equipamento utilizado no presente trabalho (SPINARC OPERATIONAL MANUAL, 2017). A faixa de valores de ajuste é:

- Velocidade de rotação (frequência): 200 a 5500 rpm

- Diâmetro médio de rotação: 1 a 8 mm

- Sentido de rotação: horário e anti-horário

O diâmetro de rotação efetivo é considerado como o diâmetro descrito pela rotação da ponta do eletrodo (ponto de maior proximidade com a peça). Este diâmetro é dependente da distância entre a ponta do eletrodo e a superfície da peça, da extensão livre do eletrodo ("stick-out"), da rigidez do fio do eletrodo e da velocidade de rotação. A Figura 2.8 apresenta exemplos de diâmetros de rotação efetivos usando uma extensão livre do eletrodo de 25 mm, girando a 1.000 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 2.8- Relação entre a regulagem do diâmetro de giro com o diâmetro de giro efetivo. (Spinarc Operational Manual, 2017).

É importante destacar que o processo GMAW-RE foi desenvolvido inicialmente com o objetivo de atender a soldagem do tipo chanfro estreito (*Narrow Gap*), onde a ocorrência de defeitos como a falta de fusão na parede lateral e porosidade são recorrentes com o processo GMAW convencional. O uso da soldagem em chanfro estreito se justifica pela redução do tempo necessário para a preparação de soldagem das juntas e pelo menor número de passes que tende a reduzir o tempo de soldagem (menor tempo de arco aberto), assim como o preaquecimento e o consumo de gás de proteção. Considera-se ainda, o menor volume de metal depositado que contribui para a redução de custos. Para aplicação do GMAW-RE em soldas de revestimento observa-

se que há uma limitação de informações sobre as propriedades mecânicas e microestruturais (SANTOS, 2019). Enquanto a literatura destaca o elevado potencial do processo GMAW-RE para soldagem em chanfro estreito (Silveira *et al*., 2020; Sankar *et al*., 2022; Silveira *et al*., 2021; Santos, 2019), observou-se que existem poucos trabalhos com abordagem sobre revestimento anticorrosivo, justamente porque esse processo é considerado relativamente novo para esse tipo de aplicação, o que demonstra o caráter inovador desse estudo. Como exemplo, cabe destacar o recente trabalho realizado por COSTA *et al*. (2023), no qual o processo GMAW-RE se confirma como uma alternativa vantajosa para a aplicação de soldagem de revestimento, quando comparado com o processo GMAW (convencional).

RAO *et al.* (2004) estudaram os efeitos dos parâmetros de rotação utilizando um diâmetro de rotação de 6 mm e frequências de rotação variando entre 550 e 1.300 rpm, aplicados em metal de base e metal de adição, ambos de baixo carbono, com o objetivo de analisar a possibilidade de se evitar a penetração do tipo convexa. Este tipo de penetração é uma característica do processo GMAW convencional e se deve a aplicação da força do arco sobre uma área específica, que pode tornar a concentração de calor no centro do cordão mais intensa. Os autores puderam observar que, como as gotas do metal são depositadas sobre uma área mais extensa em comparação com o processo GMAW convencional, a largura da poça de fusão aumenta. Como resultado, tanto a convexidade quanto o reforço do cordão de solda sofrem uma redução em sua dimensão, conforme é apresentado na Figura 2.9.

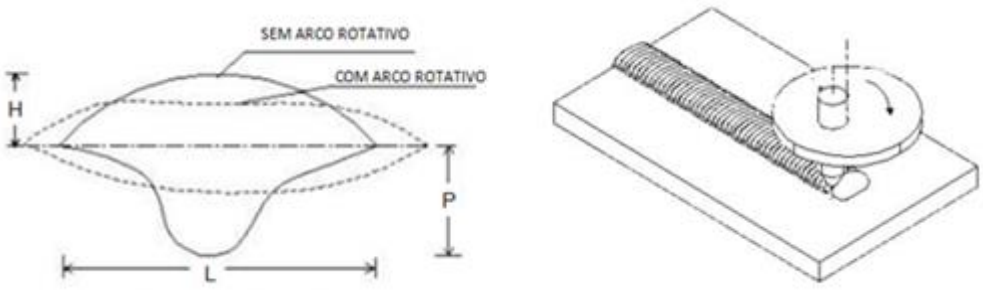


Figura 2.9- Influência do eletrodo rotativo na geometria do cordão de solda. (RAO *et al.,* 2004).

BAI *et al.* (2012) efetuaram uma análise da distribuição de temperatura no processo de soldagem GMAW-RE por meio simulação numérica, por elementos finitos, com o intuito de descrever a influência do raio de rotação na distribuição de temperatura. A análise foi efetuada com diferentes raios de rotação (0, 2, 3 e 4 mm) e frequência de rotação igual a 5 Hz (300 rpm), conforme apresentado na Figura 2.10, com as

respectivas temperaturas apresentadas na Figura 2.11. Na Figura 2.10 é possível observar que as temperaturas mais altas são representadas pela cor amarela. A soldagem sem rotação (0 rpm) apresenta uma forma de elipse mais achatada e concentrada, enquanto que aumentando o diâmetro de rotação (processo GMAW-RE) esta elipse se apresenta de forma mais arredondada. Com isso é possível concluir que a largura da poça de fusão para o processo GMAW convencional é menor, quando comparado ao processo GMAW-RE, pois o fornecimento de calor é concentrado no centro da poça de fusão. No processo GMAW-RE, devido ao movimento de rotação do eletrodo, o calor distribuído abrange uma área maior, provocando assim uma menor concentração de calor no centro do cordão. Adicionalmente, os autores puderam observar que a extensão da ZTA no processo GMAW-RE tende a ser maior e mais homogênea.

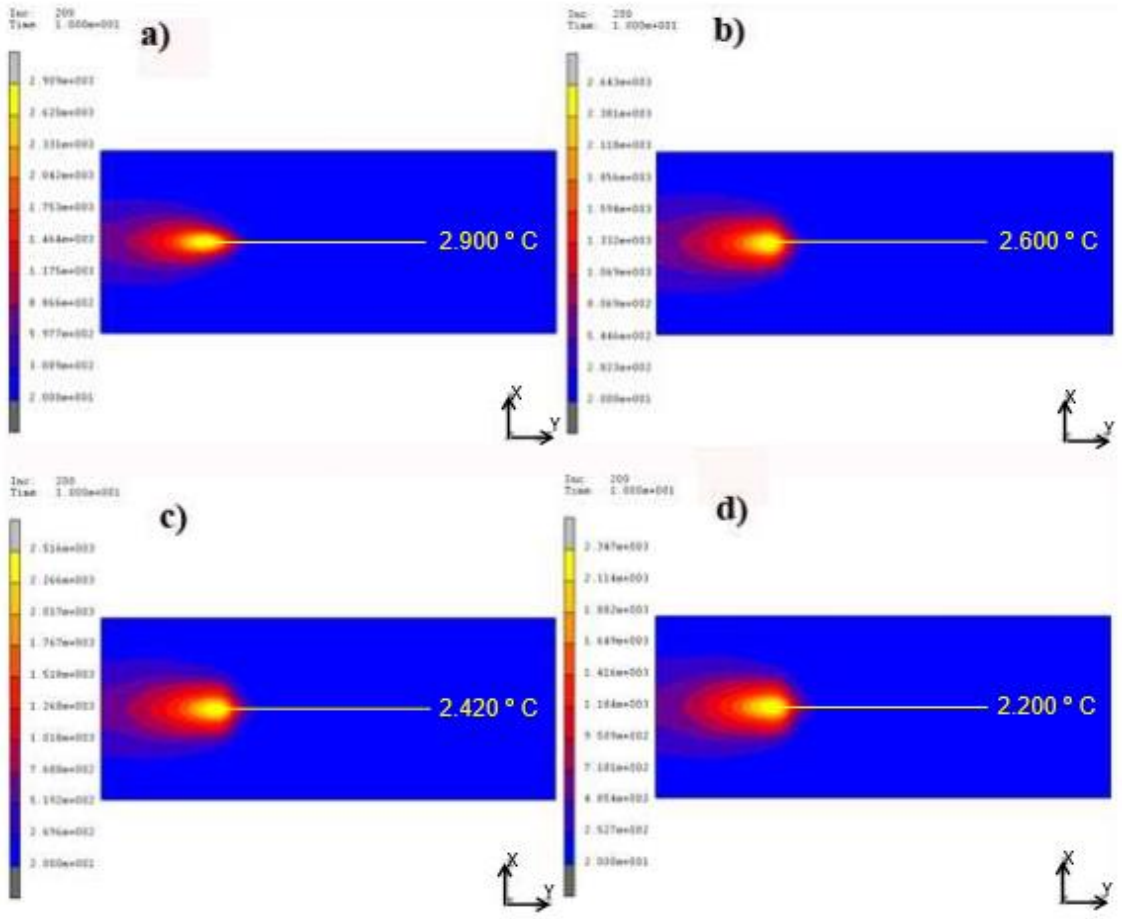


Figura 2.10- Simulação numérica da distribuição térmica na poça de fusão para o processo GMAW-RE. Frequência de 300 rpm. Diâmetros de rotação: a) 0 mm; b)2 mm; c) 3 mm e d) 4 mm. (BAI *et al,* 2012).

Através de simulação numérica da distribuição térmica na poça de fusão pelo processo GMAW-RE, BAI *et al.* (2012) apresentaram conforme a Figura 2.11, um gráfico com a relação entre a temperatura média no centro da poça de fusão e diferentes

diâmetros de rotação (0, 2, 3 e 4 mm). Pode-se observar que ocorre uma redução da temperatura média do centro da poça de fusão com o aumento do diâmetro de rotação.

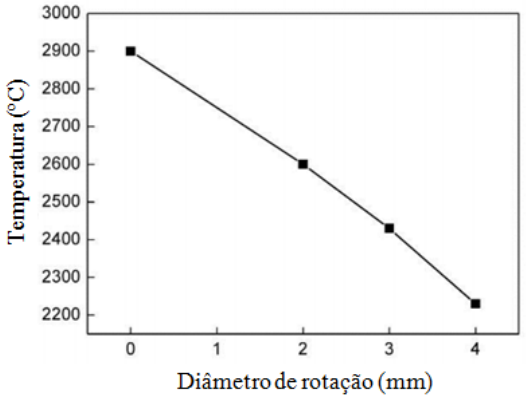


Figura 2.11- Temperatura média do centro da poça em função do diâmetro de rotação. (BAI *et al,* 2012).

ZHANG *et al.* (2014) estudaram a influência do movimento de rotação do arame no formato da zona de fusão (geometria do cordão) e na microestrutura, em aço carbono, em cordão sobre chapa. O estudo, que teve a frequência de rotação como único parâmetro a sofrer variação, entre 0 rpm e 500 rpm, permitiu observar uma redução da penetração na medida em que a frequência sofre um aumento. Isso pode ser explicado com a redução do fluxo na direção vertical do metal líquido da poça de fusão, em função da força centrífuga. Dessa forma, foi possível concluir que o processo de soldagem GMAW-RE pode controlar a diluição da solda, parâmetro importante para o depósito de revestimento por soldagem que exige uma diluição mínima, e pode ser uma técnica promissora.

DUAN *et al.* (2018) efetuaram uma análise de parâmetros e otimização do processo de soldagem GMAW-RE em chanfro estreito (*Narrow Gap*). Para tal, inicialmente, foi utilizado um programa de modelagem matemática (MATLAB) para simulação, quando foram gerados os dados iniciais utilizados como parâmetros. Com os resultados de simulação e análise, os autores observaram que o aumento da frequência de rotação contribui para evitar a sobreposição e má formação da solda. Adicionalmente, observaram que uma alta velocidade de soldagem pode promover a baixa penetração e falta de fusão.

SANTOS (2019) analisou a influência da frequência de rotação do eletrodo no processo GMAW-RE e sua aplicação em soldagem em chanfro estreito (*Narrow Gap*). A análise foi efetuada com diâmetro de rotação de 3 mm e frequências de rotação variando com valores de 500 rpm, 1.000 rpm, 1.500 rpm e 2.000 rpm, além da forma convencional, quando não possui rotação. Como materiais e parâmetros de soldagem

foram utilizados o aço carbono SAE 1020 (6,35 mm de espessura), o gás de proteção com 92% Ar e 8% CO_2 sob uma vazão de 25 L/min, a velocidade de soldagem de 28 cm/min, a velocidade de alimentação de arame 4,5 metros/min, a tensão de 21,5V, a corrente de soldagem de 160 A. O autor observou resultados similares aos obtidos por BAI *et al.* (2012) e ZHANG *et al.* (2014). Por exemplo, no que tange aos aspectos geométricos foi observado que o aumento da frequência de rotação do eletrodo é diretamente proporcional a largura do cordão e inversamente proporcional ao reforço e a penetração. A Figura 2.12 apresenta uma comparação da seção transversal da geometria do cordão de solda realizada pelo processo GMAW convencional e pelo processo GMAW-RE sob frequência de 2.000 rpm.

Em soldagens do tipo cordão sobre chapa, SANTOS (2019) relata a ocorrência de respingos e porosidade a partir de 1.500 rpm, sendo que a partir de 3.000 rpm foi observada uma quantidade excessiva de respingos (Figura 2.13), a qual pode ser consequência de uma perturbação do fluxo de gás de proteção, provocada pela ação da força centrífuga.

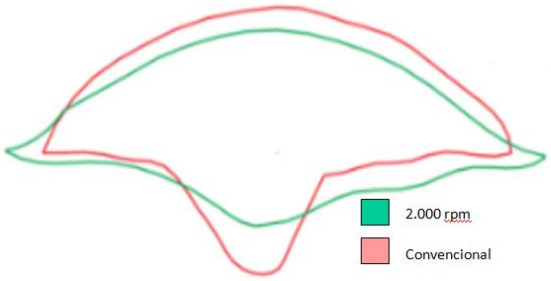


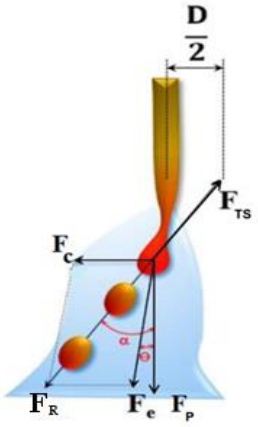
Figura 2.12- Sobreposição das seções transversais entre os processos GMAW convencional e com frequência de rotação de 2000 rpm. (SANTOS, 2019).



Figura 2.13- Porosidade e excesso de respingos em cordão sobre chapa com frequência de rotação igual ou superior a 3.000 rpm; Ø = 3 mm. (Adaptado de SANTOS, 2019).

A força centrífuga, que é resultante do movimento de rotação, pode influenciar no modo de transferência metálica (SANTOS, 2019). A Figura 2.14 apresenta um

desenho da forma esquemática da atuação das principais forças na gota metálica em um processo GMAW-RE.



Onde:

D/2 – Diâmetro médio de rotação

F_{TS} – Força de Tensão Superficial;

F_P – Força Peso;

F_e – Força Eletromagnética;

F_R – Força Resultante; e

F_C – Força Centrífuga.

Figura 2.14- Representação esquemática da ação da força centrífuga no destacamento da gota metálica. (SANTOS, 2019).

Através da técnica de filmagem em alta velocidade, foi possível observar e confirmar o destacamento da gota toda vez que ocorre um vale de tensão, ou seja, quando a tensão apresenta um valor mínimo, conforme apresentado na Figura 2.15.

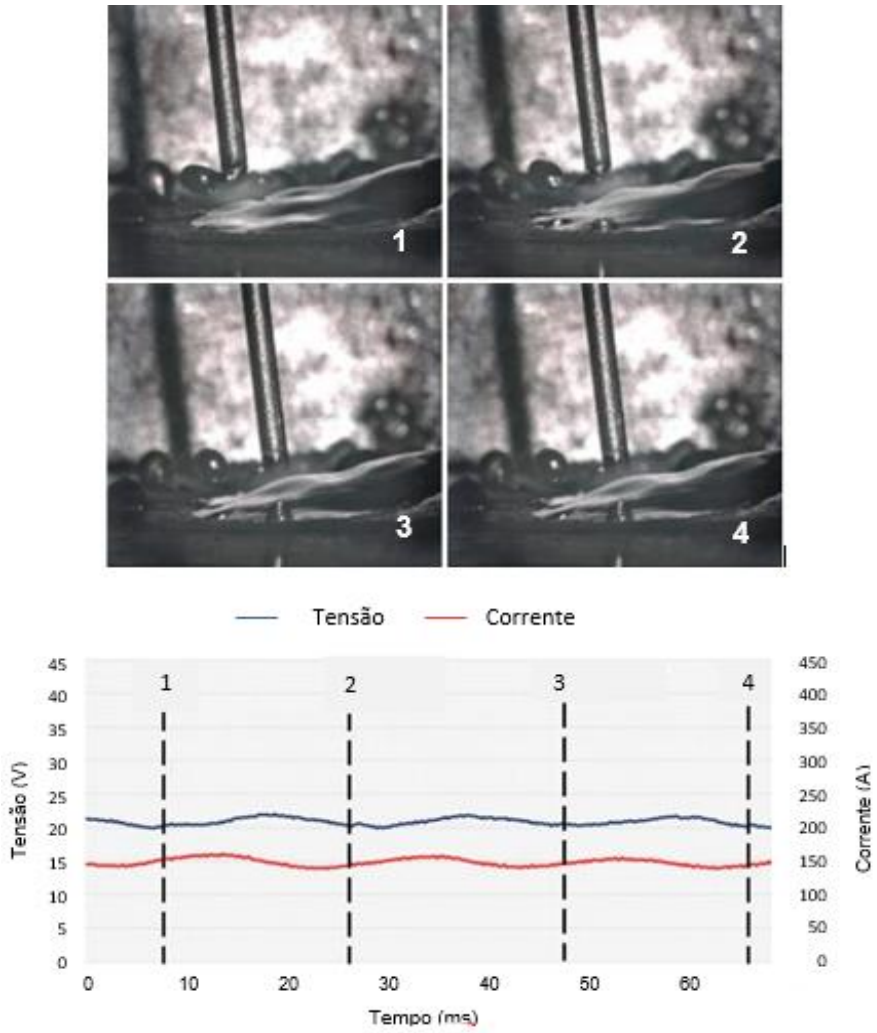


Figura 2.15- Filmagem de alta velocidade demonstrando momento de destacamento da gota sincronizado aos sinais elétricos. Frequência = 3000 rpm; Diâmetro de rotação = 3 mm; Tensão = 20,5V, Velocidade de Arame = 4,5 m/min. (SANTOS, 2019)

Ao se observar o oscilograma da Figura 2.15 não se verifica a ocorrência de curto-circuito, uma vez que a tensão não se anula. Isto permite inferir que a transferência do tipo curto-circuito passa a não ocorrer, mesmo se utilizando níveis de tensão e de intensidade de corrente onde este mecanismo de transferência é favorecido. A força centrífuga acaba por favorecer o destacamento da gota metálica, antes que esta cresça o suficiente para produzir o curto-circuito.

Foi possível observar, também, conforme Figura 2.16, que o comprimento do arco elétrico é diretamente proporcional à frequência de rotação, ratificando assim a hipótese da maior eficiência de fusão do eletrodo, culminando na capacidade do processo em fundir maior massa de metal para um mesmo valor médio de corrente. Isso levou a evidência de que, o fato das gotas serem destacadas antes do momento o qual

seria em uma condição sem a atuação da força centrífuga, provoca o aumento da eficiência de fusão do eletrodo.

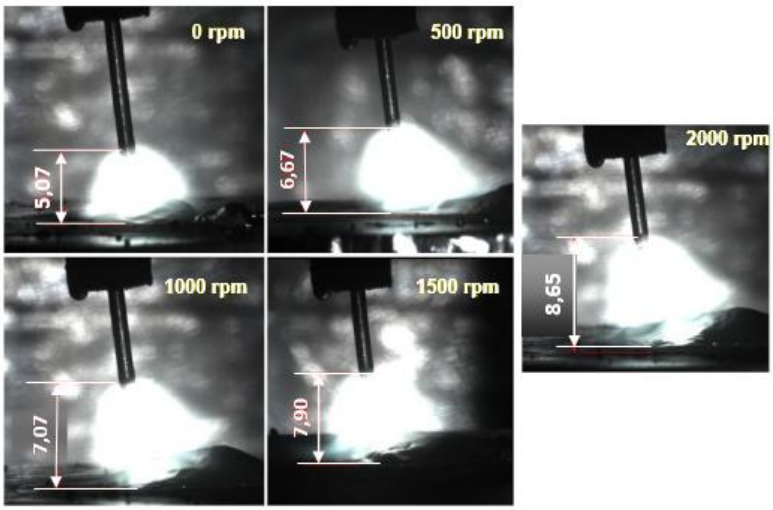


Figura 2.16- Variação do comprimento do arco em função da frequência de rotação, onde a 0 rpm = 5,07 mm; 500 rpm = 6,67 mm; 1.000 rpm = 7,07 mm; 1.500 rpm = 7,9 mm; 2.000 rpm = 8,65 mm. (SANTOS, 2019).

Por meio de filmagem termográfica apresentada na Figura 2.17, SANTOS (2019) demonstrou que o aumento do diâmetro de rotação do eletrodo provoca a redução da temperatura no centro da poça de fusão, devido a energia de soldagem estar sendo dissipada em uma área mais extensa, diferente do processo GMAW convencional, onde a fonte de calor permanece estática, como já visto por outros autores (RAO *et al.,* 2004; BAI *et al.,* 2012; ZHANG *et al.,* 2014).

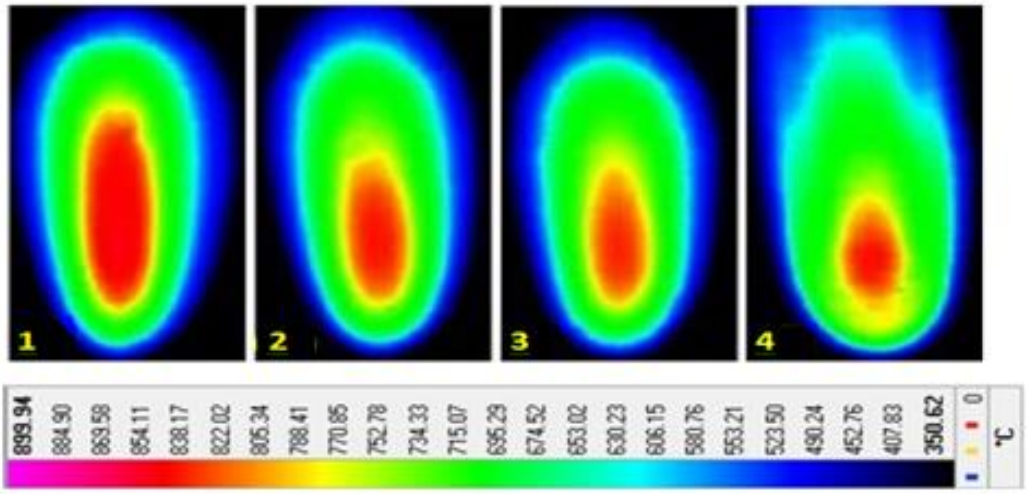


Figura 2.17- Temperatura média em função de diferentes diâmetros de rotação: (1) Processo convencional; (2) Posição 1; (3) Posição 2 e (4) Posição 4. (SANTOS, 2019).

Dessa forma, verificou-se que o aumento do diâmetro de rotação do eletrodo pode promover uma redução na temperatura de até 20,85%. Os resultados obtidos foram similares aos resultados observados por BAI *et al.* (2012).

Dando continuidade ao estudo, SANTOS (2019) observou, ainda, que a frequência de rotação do eletrodo entre 500 rpm a 2.000 rpm pode promover uma redução na temperatura no centro da poça de fusão de até 19,06%. Entretanto, existirá um momento em que a frequência de rotação do eletrodo não resultará em redução no gradiente térmico da poça de fusão, pois a fusão ocorre com maior quantidade em um mesmo ponto provocando uma situação similar ao de um processo convencional, onde o arco elétrico permanece estático fornecendo maior concentração de calor no centro da poça de fusão.

Devido à influência da frequência de rotação do eletrodo na temperatura da poça de fusão, o autor realizou a análise dessa influência tanto na temperatura da gota metálica, quanto no seu diâmetro. Com base nos resultados foi possível observar que a frequência de rotação do eletrodo é inversamente proporcional ao tamanho e à temperatura da gota metálica, fato também observado por WANG *et al.* (2007). Em relação à temperatura da gota metálica, utilizando como comparação o processo GMAW (convencional), quando a temperatura da gota metálica foi de 2.231 ºC, assim como o processo GMAW-RE com frequência de rotação de 2.000 rpm, quando a temperatura da gota metálica foi de 2.079 ºC, observou-se uma redução de aproximadamente 7,3% na temperatura da gota, conforme apresentado na Figura 2.18.

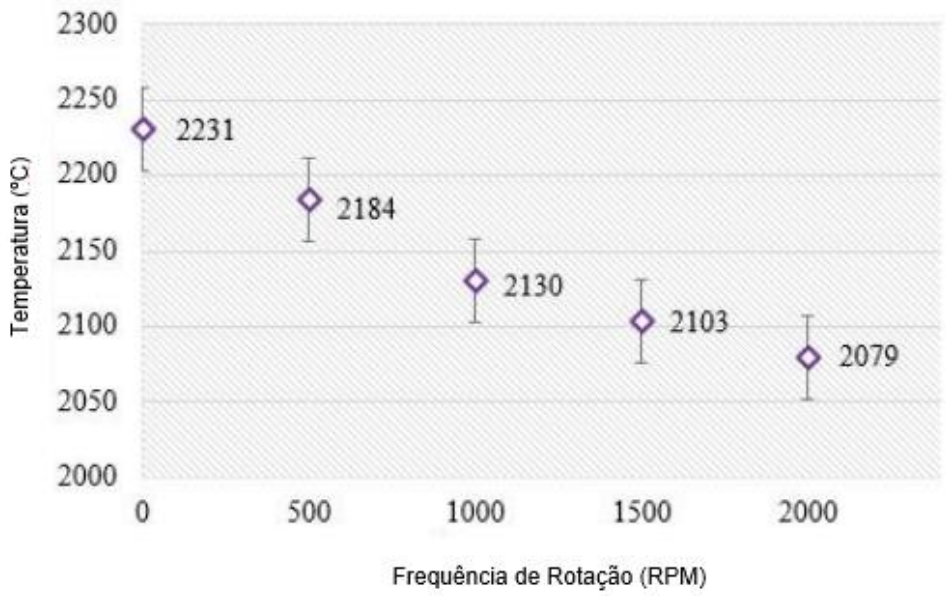


Figura 2.18- Comportamento da temperatura das gotas metálicas em função da frequência de rotação do eletrodo. (SANTOS, 2019).

Em relação ao diâmetro da gota metálica, cujo experimento foi realizado com o processo convencional (0 rpm), e com frequências de 1.000 rpm, 2.000 rpm, 3.000 rpm e 4.000 rpm, conforme apresentado nas Figuras 2.19, 2.20, 2.21, que apresentam valores médios, é possível observar a tendência para uma redução do diâmetro da gota a partir do aumento da frequência de rotação do eletrodo.

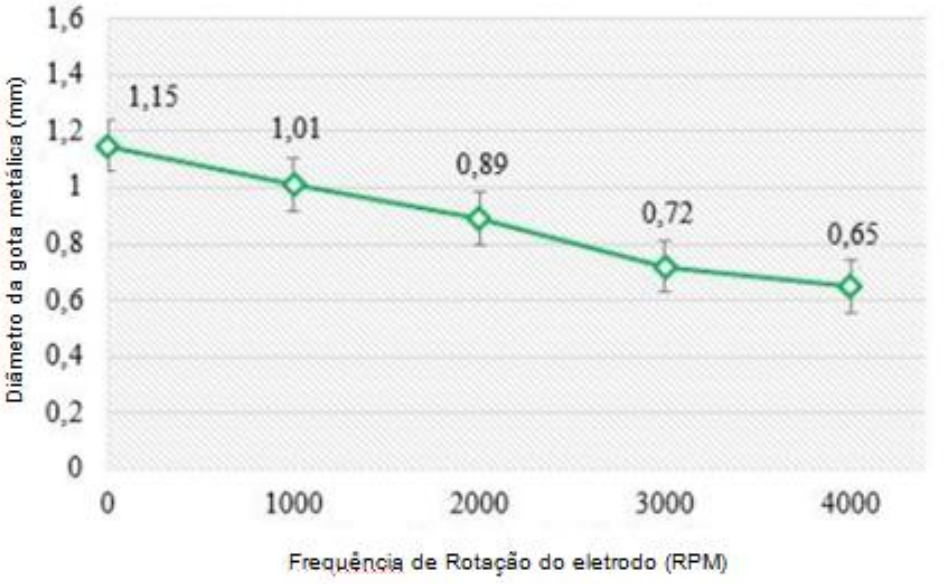


Figura 2.19- Comportamento do diâmetro da gota em função da frequência de rotação do eletrodo. (SANTOS, 2019).

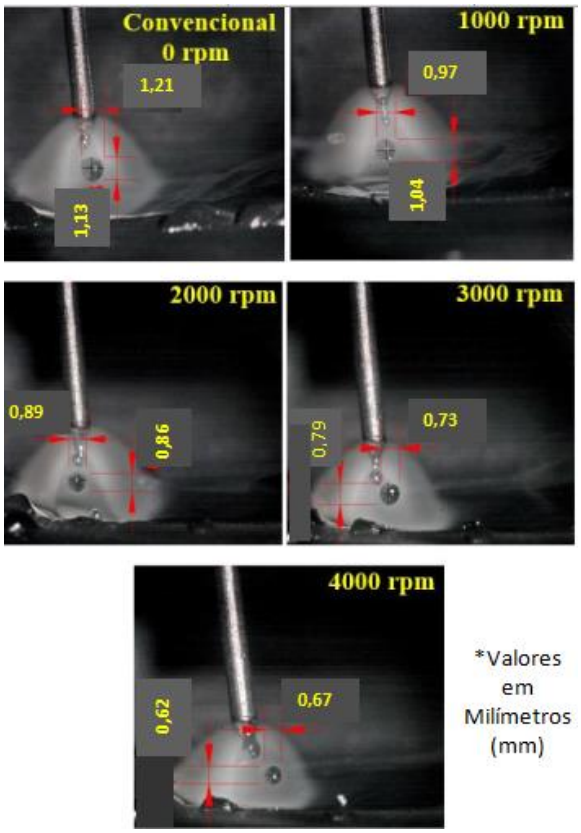


Figura 2.20- Valores médios do diâmetro da gota metálica em função da frequência de rotação do eletrodo capturados com auxílio de câmera de alta velocidade. (SANTOS, 2019).

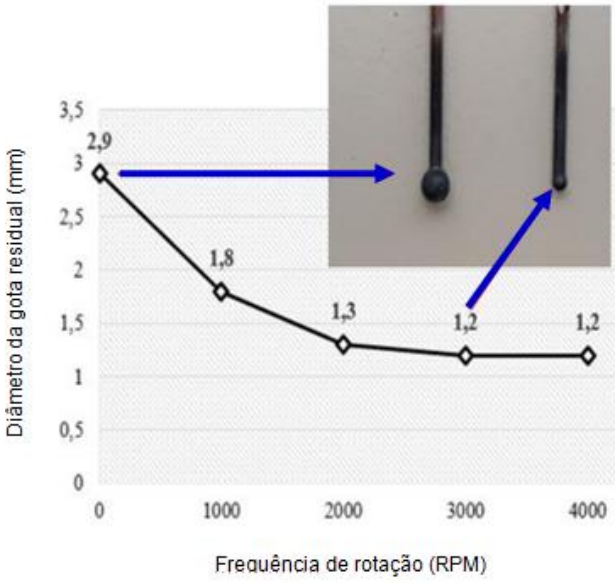


Figura 2.21- A influência da frequência de rotação na gota residual capturados com auxílio de câmera de alta velocidade. (SANTOS, 2019).

O destacamento em modo *spray* com uma gota residual de menor diâmetro, exatamente na ponta do eletrodo, pode ser de grande auxílio para a próxima abertura do arco, pois pode resultar em uma abertura menos abrupta, diferente do que seria com

o processo GMAW (convencional), quando a abertura do arco elétrico ocorre mediante o contato físico entre o eletrodo e a peça a ser soldada.

SANTOS *et al.* (2018) avaliaram as variações geométricas e físicas em soldagem do tipo cordão sobre chapa com a técnica do eletrodo rotativo. Foram utilizados o diâmetro de rotação de 3 mm e frequências variando entre 0 rpm e 2000 rpm. Como materiais e parâmetros foram utilizados aço carbono SAE 1020 (¼" de espessura), gás de proteção com 98% Ar e 2% CO_2 sob uma vazão de 25 L/min, distância do bico de contato da tocha à peça de trabalho (stick-out) de 15 mm, velocidade de soldagem de 33 cm/min e velocidade de alimentação do arame de 4,5 m/min.. Os autores observaram que a medida que se aumenta a frequência de rotação ocorre o aumento da largura e uma redução tanto da penetração, quanto do reforço do cordão. Este comportamento foi observado, também, por BAI *et al.* (2012), ZHANG *et al.* (2014) e SILVEIRA (2018), por estudos similares. Isso pode contribuir positivamente para a soldagem multipasses, pois pode ser obtido um cordão com formato de menor convexidade, que tende a auxiliar no passe subsequente, evitando uma possível falta de fusão. Foi possível observar, também, que a alta frequência de rotação (2.000 rpm) promoveu um regime turbulento no gás de proteção resultando em um cordão indesejável, com porosidades, que foram eliminadas com acréscimo de 1/5 na vazão de gás, melhorando a proteção do arco.

A ocorrência de porosidade é induzida por gases e são vistas na superfície do cordão de solda devido a sua menor densidade em relação ao metal fundido (POONGUZHALI *et al.*, 2019). Adicionalmente, foi observado que a elevação da frequência de rotação do arame eletrodo tende a aumentar o valor médio de tensão e, consequentemente, aumentar o comprimento do arco, resultando desta forma em um cordão indesejável. Os autores puderam perceber que o comportamento da tensão é reflexo da constante alteração da distância entre a ponta do eletrodo e a peça, no processo onde o eletrodo sofre rotação continuamente. Para sanar este problema foi efetuado um acréscimo na velocidade de alimentação de modo a se estabelecer um valor próximo ao valor médio de tensão de um processo sem rotação, conforme apresentado na Figura 2.22, permitindo dessa forma a produção de um cordão aceitável. É importante frisar que este aumento de tensão tende a elevar o consumo de material aportado, que pode ser verificado pelo maior comprimento do arco, fato que também foi observado por SILVA *et al*. (2020). Com isso, os autores puderam deduzir que, com a elevação da frequência de rotação, o processo pode fundir uma maior massa de metal para um mesmo valor médio de corrente, conforme apresentado na Figura 2.23.

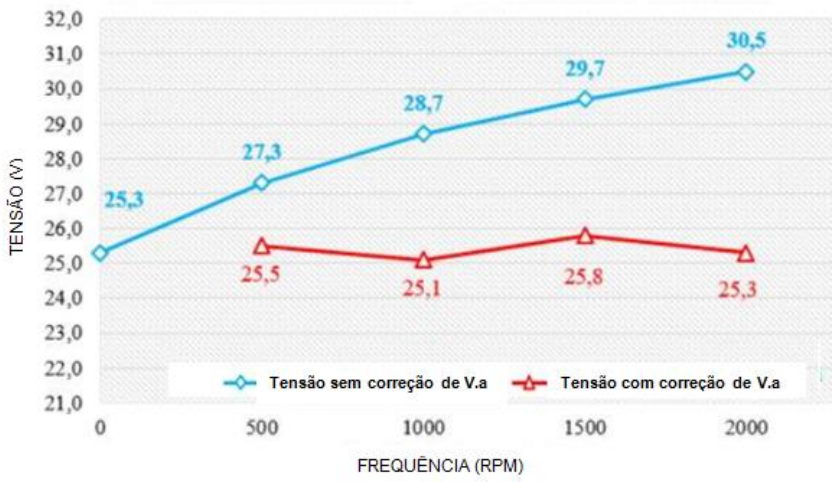


Figura 2.22- Influência da frequência de rotação sobre o comportamento da tensão. (SANTOS *et al*., 2018).

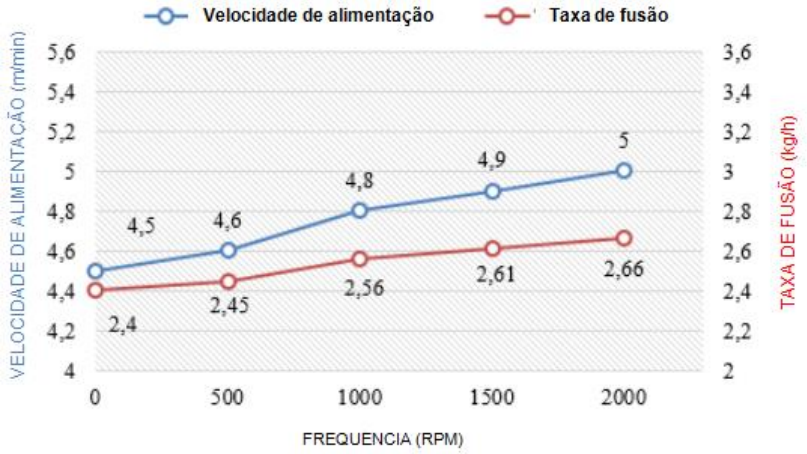


Figura 2.23- Influência da frequência de rotação na variação da velocidade de alimentação e da taxa de fusão. (SANTOS *et al*., 2018).

SILVA *et al.* (2020) estudaram a influência da frequência de rotação do arame-eletrodo sobre o modo de transferência do metal e sobre a geometria do cordão. Para tal foi utilizado um aço AISI 1020 como metal de base, arame eletrodo AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro e uma mistura de 92% Ar com 8% CO_2 sob uma vazão de 25 L/min. Foi utilizado um diâmetro de rotação de 3 mm e frequências de 0; 1.000; 2.000; 3.000; e 4.000 rpm. Os autores observaram que à medida que a frequência de rotação do arame eletrodo aumenta, ocorre uma redução na frequência de curto-circuito indicando assim uma alteração do modo de transferência do metal, ou seja, de curto-circuito para *spray*. Vale ressaltar que a redução da frequência de curto-circuito provoca uma redução do número de momentos em que a corrente permanece em valores altos (picos de corrente), resultando assim em um menor valor médio de corrente e uma

alteração no comprimento do arco e consequentemente da tensão, o que por sua vez reduz a energia de soldagem. Observou-se, ainda, que para restaurar o comprimento do arco, os autores aumentaram a velocidade de alimentação do arame, assim como foi efetuado por SANTOS *et al.* (2018). Com isso, os autores entenderam que o aumento da frequência de rotação (do arame eletrodo) permite fundir uma mesma quantidade de arame eletrodo com menor potência elétrica que a resultante para frequências menores (Figura 2.24), indicando assim um aumento da eficiência do processo.

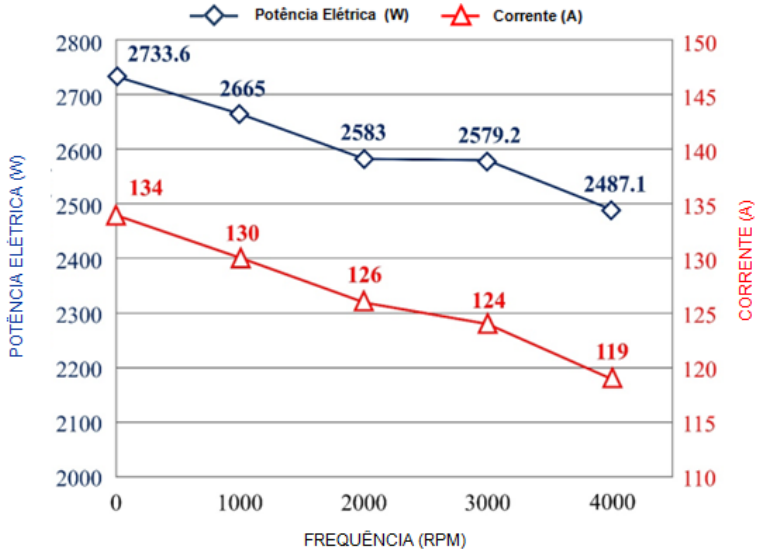


Figura 2.24- Comportamento dos parâmetros elétricos em função da frequência de rotação do eletrodo. (SILVA *et al*., 2020).

SANKAR *et al.* (2021) estudaram a influência da rotação do eletrodo nas propriedades mecânicas e características microestruturais de juntas soldadas com aço carbono pelo processo GMAW-RE utilizando uma frequência de rotação de 1.500 rpm e um diâmetro de rotação de 3 mm, em comparação com o processo SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Foi observado uma eficiência 15% maior no ensaio de tração da junta soldada pelo processo GMAW-RE em comparação com a junta soldada pelo processo SMAW. Porém, foi registrada uma redução de 10% na resistência ao impacto e na ductilidade da junta soldada pelo processo GMAW-RE em comparação com a junta soldada pelo processo SMAW. O calor gerado no centro do cordão de solda pelo processo de soldagem GMAW-RE é inferior quando comparado com o processo SMAW, aumentando a taxa de resfriamento da junta da solda e, consequentemente, influenciando na microestrutura da região. Outra observação muito importante foi a redução do volume de deposição do metal de solda (48%), quando foi necessário somente três passes pelo processo GMAW-RE e seis passes pelo processo SMAW.

Isso resulta na redução do tempo de arco aberto, assim como na redução dos ciclos de aquecimento e resfriamento.

Em outro estudo SANKAR *et al.* (2022) realizaram a comparação entre o processo GMAW-RE e o processo GMAW, onde estudaram a influência da rotação do eletrodo nas propriedades mecânicas e características microestruturais de juntas soldadas. Foi utilizada uma frequência de rotação de 1.500 rpm e um diâmetro de rotação de 3 mm para fins de comparação com o processo GMAW (sem rotação), com a técnica de multipasses. Com base nos resultados obtidos foi possível observar que a junta efetuada pelo processo GMAW-RE apresentou uma largura mínima de ZTA 45% menor em comparação com a junta efetuada pelo processo GMAW (convencional), o que foi atribuído à menor densidade de calor produzida durante a soldagem com o processo GMAW-RE. Foi observado, também, uma eficiência 20% maior de resistência à tração na junta soldada pelo processo GMAW-RE em comparação com a junta soldada pelo processo GMAW. Além disso, o número de passes no processo GMAW-RE foi reduzido de 6 para 3, quando comparado com o processo GMAW (convencional).

Como verificado em trabalhos anteriores (WANG *et al*., 2007; BAI *et al*., 2007; SANTOS, 2019; SILVEIRA, 2020), a distribuição de calor na poça de fusão para o processo GMAW-RE é menos centralizada e atinge uma área maior.

GUO *et al*. (2011) estudaram um modelo de fonte de calor modificado para soldagem de arco com proteção gasosa com eletrodo rotativo (GMAW-RE) e apresentaram uma proposta de representação esquemática dos ciclos térmicos nas regiões de maior interesse, ou principais regiões, de uma junta soldada pelos processos GMAW e GMAW-RE. O comportamento dos ciclos térmicos para os respectivos processos de soldagem podem ser observados por meio das Figura 2.25 e Figura 2.26, respectivamente, que apresentam as curvas de ciclo térmico para o centro do cordão de solda, na parede do chanfro e na ZTA. A Figura 2.27 apresenta as curvas de repartição térmica.

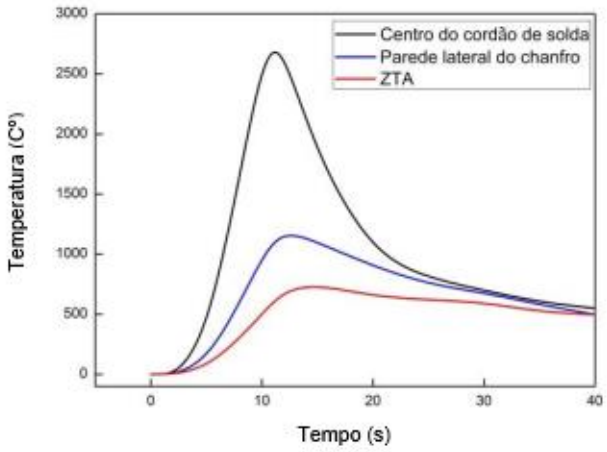


Figura 2.25- Comportamento dos ciclos térmicos para o processo de soldagem GMAW (GUO *et al.,* 2011).

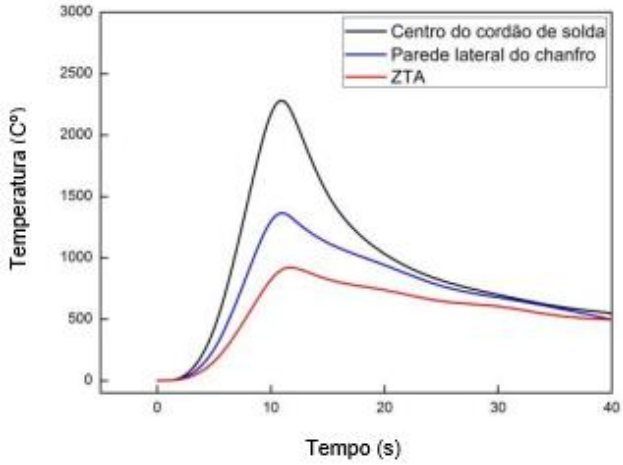


Figura 2.26- Comportamento dos ciclos térmicos para o processo GMAW-RE. (GUO *et al.,* 2011).

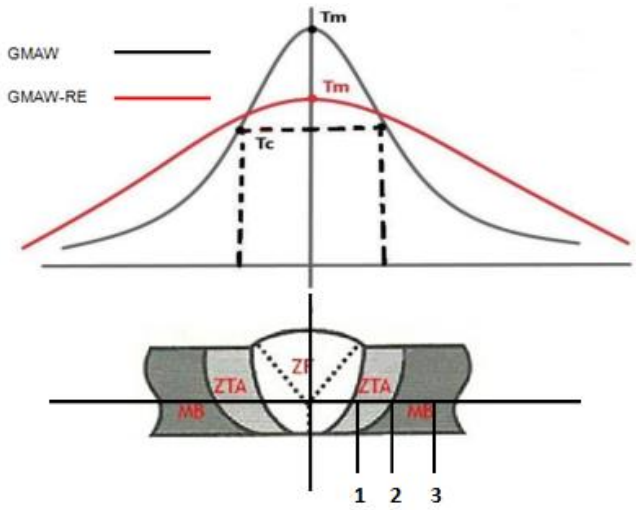


Figura 2.27- Curvas de repartição térmica para os processos GMAW e GMAW-RE. Tm- temperatura máxima; Tc- temperatura crítica; ZF- zona fundida; ZTA- zona termicamente afetada e MB- metal base. (GUO *et al.,* 2011).

De acordo GUO *et al*. (2011), quando ocorre uma elevação da frequência de rotação do eletrodo, mantendo-se o valor médio de corrente, o processo GMAW-RE é capaz de fundir uma maior massa de metal (maior taxa de fusão), onde o aumento de frequência contribui para a redução do gradiente térmico da gota metálica.

Cabe ressaltar que a ação do ciclo térmico de soldagem; que pode ser influenciado pela alta velocidade de resfriamento e de solidificação da soldagem; pode provocar alterações microestruturais bem diferentes, tanto no metal de solda, quanto no metal de base, resultando em uma microestrutura localmente heterogênea. Estas alterações microestruturais – que podem ser observadas nas regiões da Zona Termicamente Afetada (região do metal de base que sofre alterações microestruturais em função do calor de soldagem), da Zona Fundida (constituída pelo metal fundido) e da Zona de Ligação (constituída por uma pequena região onde ocorre uma fusão parcial do metal de base junto à Zona Fundida) – quando se tratar de solda com um passe só, elas podem ser mitigadas por meio do tratamento térmico pós-soldagem, ou também podem ser submetidas a ciclos térmicos múltiplos quando é utilizada a técnica de soldagem multipasses, onde o calor gerado pelo ciclo térmico de cada passe é aproveitado para efetuar um tratamento térmico no passe anterior; uma redução da taxa de resfriamento do metal de base; evitando assim o tratamento térmico pós-soldagem (AGUIAR, 2001; AZEVEDO, 2002).

PARTHIBAN *et al.* (2019) estudaram a influência da técnica GMAW-RE, denominada em seu trabalho de técnica *Spin Arc*, sobre o aspecto mecânico e metalúrgico em juntas de chanfro estreito com chapas de aço de baixo carbono (AISI 1018) de 10 mm de espessura. Os parâmetros utilizados no estudo; corrente de soldagem de 300 A, tensão de 35 V, diâmetro de rotação de 3 mm e velocidade de rotação de 3000 rpm; promoveram um cordão sem defeitos. Com os resultados obtidos das amostras produzidas por cordões de passes múltiplos (três passes), foi possível observar que a região do metal de solda, em comparação com o metal de base, apresentou maior resistência à tração.

COSTA *et al.* (2019) estudaram o comportamento de juntas soldadas pelos processos GMAW e GMAW-RE com o objetivo de efetuar uma análise comparativa de produtividade e propriedades mecânicas. Embora os resultados obtidos indiquem que o processo GMAW-RE possa proporcionar um aumento de produtividade e redução de custos significativos, foi observada uma redução na tenacidade ao impacto, quando comparado com o processo GMAW, conforme apresentado na Figura 2.28.

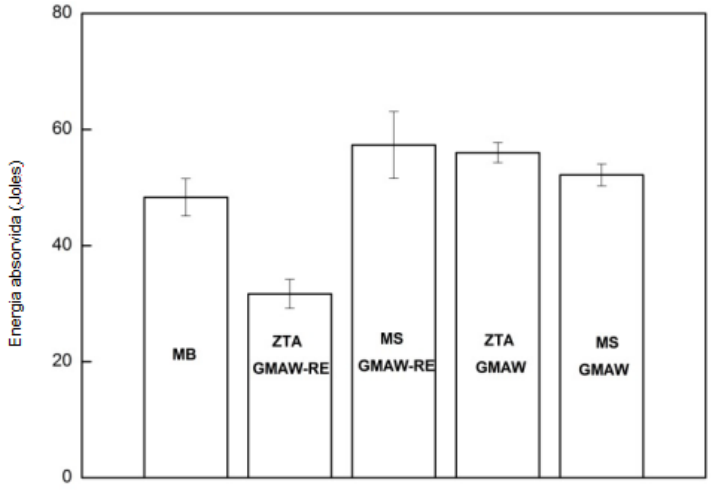


Figura 2.28- Resultados dos ensaios de impacto Charpy-V realizados a 23°C. MB-metal base; MS- metal de solda e; ZTA-zona termicamente afetada.(COSTA *et al.* 2019)

A Figura 2.29 apresenta uma comparação entre as ZTAs das juntas soldadas, analisadas na ponta do entalhe dos corpos de prova de impacto Charpy-V (COSTA *et. al.*, 2019). Os corpos de prova foram produzidos por meio de cortes na posição transversal ao cordão de solda e o entalhe foi posicionado no plano da espessura, nas posições relativas à ZTA a 1 mm da linha de fusão (LF), assim como no metal de base, conforme detalhado na Figura 2.30. Pode-se observar na Figura 2.29 (2) a ocorrência de uma microestrutura mais grosseira para o processo GMAW-RE. Essa granulação mais grosseira é atribuída a uma distribuição de calor que atinge uma área maior na junta soldada pelo processo GMAW-RE. A Figura 2.31 apresenta o percentual de cada região correspondente à ponta do entalhe do corpo de prova de impacto Charpy-V, onde pode ser observada a granulação mais grosseira, mais bem detalhada. Os autores observaram um aumento da extensão da ZTA promovido pelo processo GMAW-RE em comparação ao processo GMAW na ordem de aproximadamente 49%. A maior contribuição da microestrutura grosseira no entalhe reduz a tenacidade ao impacto (COSTA *et al.,* 2019; ALMEIDA, 2019).

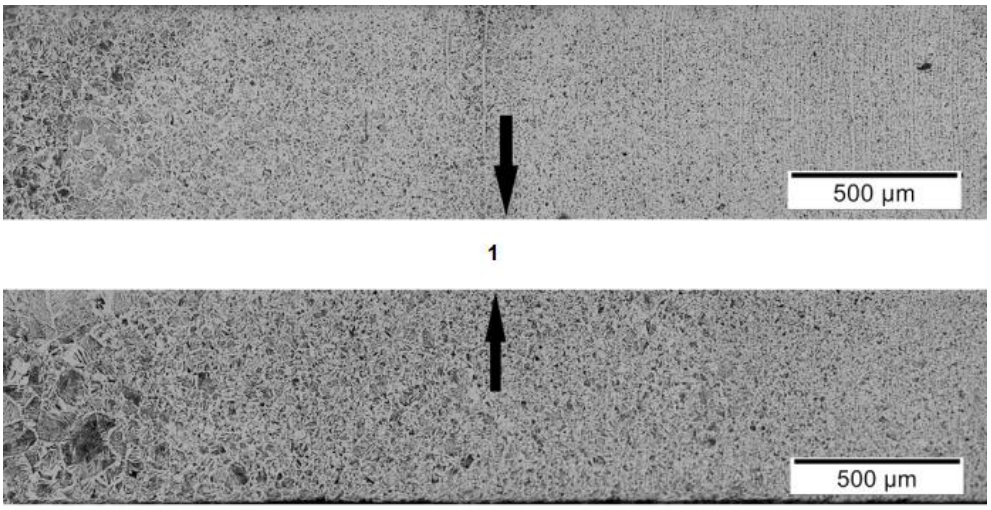


Figura 2.29- Distribuição microestrutural na ponta do entalhe de corpos de prova de impacto Charpy-V (indicada pela seta) posicionado na ZTA das juntas soldadas. Ataque: nital 2%. (1) GMAW; (2) GMAW-RE. (COSTA *et. al*, 2019).

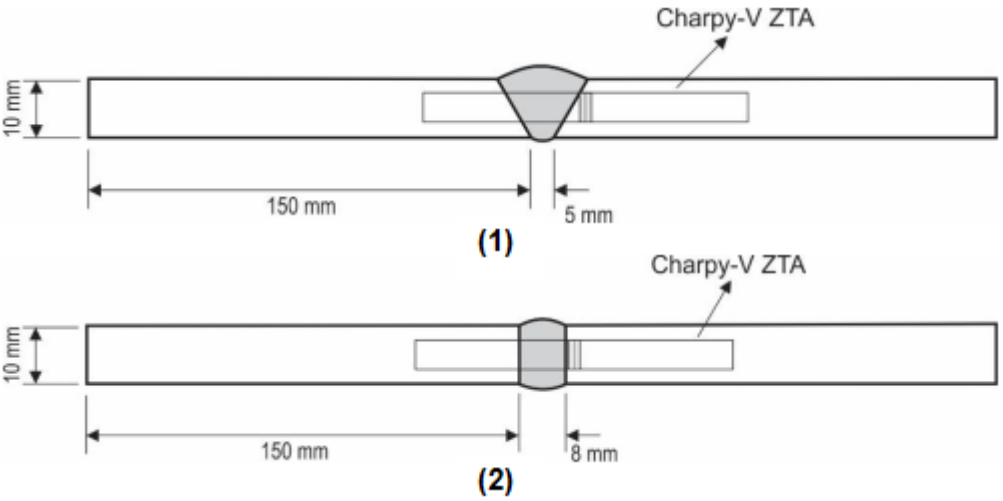


Figura 2.30- Esquema de retirada do corpo de prova Charpy-V das juntas soldadas. (1) GMAW, (2) GMAW-RE. (COSTA *et. al*, 2019).

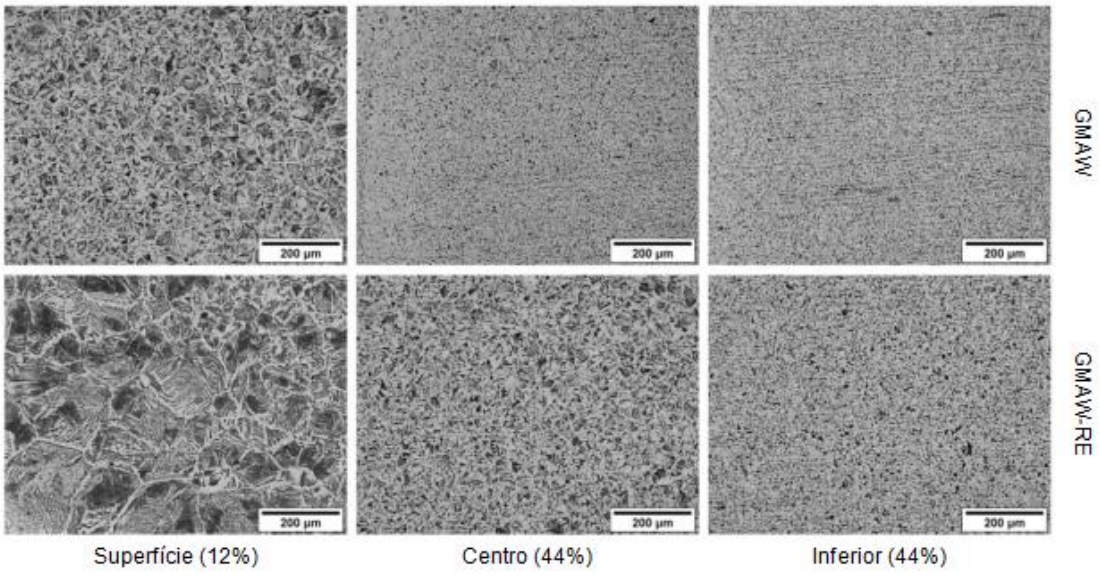


Figura 2.31- Microestrutura da ZTA na região correspondente à ponta do entalhe do corpo-de-prova Charpy-V. Os percentuais apresentados na legenda inferior referem-se à participação de cada região no entalhe Charpy-V. Ataque utilizado: nital 2%. (COSTA *et. al*, 2019).

Cabe destacar, conforme o exposto até aqui, que a maior parte da literatura disponível sobre o tema (BAI *et al.,* 2012; DUAN *et al.,* 2018; ALMEIDA *et al.,* 2019; COSTA *et al.,* 2019*;* SANTOS *et al.,* 2020; SILVA *et al.,* 2020; SILVEIRA *et al.,* 2020 e SANKAR *et al*. 2021, 2022), atua na análise do processo GMAW-RE aplicado a soldagem do tipo chanfro estreito (*Narrow Gap*) avaliando a geometria do cordão de solda por métodos analíticos e experimentais. Desta forma, observa-se que a literatura ainda é muito limitada de evidências experimentais que permitam uma conclusão efetiva sobre o potencial do processo GMAW-RE na produção de revestimento depositado por soldagem, com qualidade assegurada. Fica evidente a necessidade de estudos mais detalhados que permitam uma decisão sobre a utilização do processo GMAW-RE em substituição ao processo GMAW convencional, nas mais variadas aplicações industriais e com diferentes materiais de base e consumíveis. Por fim, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de revestimentos com aço inoxidável super austenítico depositados pelo processo GMAW-RE, com o intuito de avaliar possíveis vantagens sobre o processo GMAW convencional.

COSTA *et al.* (2023) estudaram a aplicabilidade do processo GMAW-RE na soldagem de revestimento com a superliga de níquel 625 sobre substrato de aço estrutural API X80 com camada única e dupla, utilizando como parâmetros específicos desse processo as frequências de 500 rpm, 1.000 rpm e 1.500 rpm, assim como os diâmetros de rotação de 3 mm, 6 mm e 8 mm, visando avaliar as possíveis vantagens

do GMAW-RE sobre o processo GMAW no modo Pulsado. Com os resultados obtidos, os autores puderam concluir que os maiores valores de frequência de rotação associados aos maiores valores de diâmetros de rotação (parâmetros específicos do processo GMAW-RE) maior será a quantidade de respingos produzidos. Entretanto, puderam observar, também, que o processo GMAW-RE apresenta uma tendência para a deposição de cordões com a penetração menor e mais homogênea, tendo sido observado um melhor resultado, para a condição com o diâmetro de rotação de 3 mm e frequência de 500 rpm, quando comparado com o perfil produzido pelo processo GMAW-P. A soldagem de dupla camada apresentou um cordão mais liso e um pouco mais largo, quando comparado com a soldagem de camada única.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma de atividades seguido para a realização do presente trabalho.

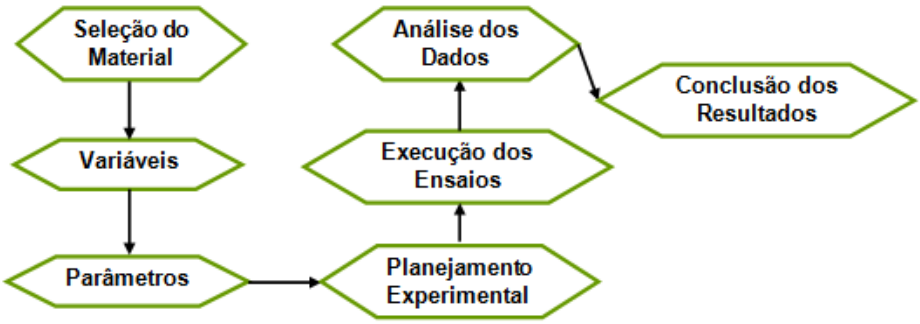


Figura 3.1: Fluxograma para a metodologia experimental.

3.1- Materiais

Como metal de base, foram uitlizadas chapas de aço carbono de classificação SAE 1020, nas dimensões de: 250 mm X 125 mm X 12,5 mm (comprimento, largura e espessura, respectivamente). Como metal de adição foi utilizado o arame de classificação AWS A5.9 ER385 (AWS, 2006). A Tabela 3.1 apresenta a composição química do metal de base e do metal de adição (consumível), conforme disponibilizadas pelos fornecedores.

Tabela 3.1: Composição química do metal de base e do metal de adição.

Material	Elementos (% em peso)										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Bal.
Metal Base Aço SAE 1020	0,18 – 0,23	0,3 – 0,6		0,04	0,05	-	-	-		-	Fe
Consumível AWS A5.9 ER385	0,02	4,70	0,70	-	-	20	25,4	6,2	1,5	0,12	Fe

O consumível selecionado para aplicação como revestimento se justifica pela sua boa soldabilidade aliada com uma elevada resistência à corrosão. Estas características se devem aos teores mais elevados de Mo e Mn e a adição de N. O alto teor de Mn (>4%) reduz a suscetibilidade à trinca de solidificação da liga utilizada como

consumível (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; MATIAS, 2021). Entretanto, o Mn é adicionado, normalmente, com um percentual máximo de 2% nos consumíveis de AISI (ASTM A240, 2019; PPICCHI, 2021; MATIAS, 2021).

3.2- Soldagem

Para a realização da soldagem foi utilizada uma fonte de energia da Marca Miller modelo Millermatic 350P operando com corrente contínua. Foi utilizada uma tocha de soldagem da marca Binzel, modelo Spin-Arc, com sistema de controle para os parâmetros específicos do processo GMAW-RE que são: a frequência de rotação, o diâmetro de rotação e o sentido de rotação. A soldagem foi realizada de modo mecanizado com a tocha montada em um carro trator da marca Soldas Brasil modelo CG_1-30 para controle da velocidade de soldagem. A Figura 3.1 apresenta a montagem do conjunto utilizado para realização da soldagem.



Figura 3.1- Montagem do sistema utilizado para realização da soldagem.
1- Fonte de Energia; 2- Controlador de Rotação; 3-Tocha GMAW-RE; 4- Carro Trator e 5- Corpo de prova.

A soldagem se desenvolveu em 3 etapas:

1ª Etapa: Consistiu em testes preliminares para obtenção dos parâmetros de soldagem adequados (tensão, corrente e velocidade de soldagem) considerando os aspectos de qualidade em geral do depósito.

2ª Etapa: Foram realizadas soldas do tipo cordão sobre chapa, com a deposição de apenas 1 cordão (passe único), com parâmetros específicos do sistema de eletrodo rotativo, para fins de avaliação das características geométricas do depósito com base nos parâmetros definidos na primeira etapa.

3ª Etapa: Foram realizadas soldas do tipo revestimento, consistindo na deposição de 4 cordões com sobreposição de 50%, utilizando as condições de melhor resultado da segunda etapa.

As Tabela 3.2 e Tabela 3.3 apresentam o conjunto de parâmetros utilizados (os quais foram definidos a partir do melhor resultado nos testes preliminares) tanto para as soldas de cordão único quanto para as soldas de revestimento. Para fins de comparação entre o processo GMAW-RE e o processo GMAW (convencional), a mesma tocha utilizada para o processo GMAW-RE (tocha Spin-Arc), foi ajustada com frequência de rotação igual a zero.

Tabela 3.2- Parâmetros de Soldagem comuns entre GMAW-RE e GMAW.

Tensão Nominal	25 (volts)
Intensidade de Corrente (CC+)	200 - 210 (ampères)
Velocidade de Soldagem	6,7 mm/s (40 cm/min)
Velocidade de alimentação de arame	5,71 m/min (225 in/min)
Vazão do gás de proteção (Ar + 2%O_2)	25L/min
Distância tocha- peça	25 mm
Aporte Térmico	0,69 KJ/mm (eficiência = 0,9)*

* Fator de eficiência para o processo GMAW conforme LINNERT, G.E. (1994)

A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados que são específicos do processo GMAW-RE.

Tabela 3.3- Parâmetros específicos do processo GMAW-RE.

Frequência de rotação (rpm)	300; 500; 1.000; 1.500; 2.000 e 2.500
Diâmetro Médio de Rotação (mm)	3 e 5

3.3- Ensaios Metalográficos

Após a soldagem, as peças foram cortadas por meio de disco abrasivo refrigerado, em seções transversais aos cordões de solda com a finalidade de possibilitar as análises macrográfica e micrográfica. A preparação metalográfica consistiu em lixamento e polimento convencional. Para o ataque metalográfico do metal de base foi utilizado o reagente nital 2%. Para o ataque metalográfico do metal depositado foram utilizados o ataque eletrolítico com solução de ácido oxálico (10g de ácido oxálico com 90 ml de H_2O deionizada) e água régia.

Após a preparação, foram realizadas as análises macrográfica e micrográfica utilizando-se um microscópio óptico da marca Olympus modelo BX-60M com o suporte do software Olympus Stream Essentials para geração das imagens. Foram avaliados os aspectos geométricos e microestruturais dos cordões depositados como: largura; altura; penetração e extensão da ZTA, para a qual foram realizadas 3 medidas para cada condição de soldagem.

Adicionalmente, foi realizada uma análise por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com auxílio da técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), para uma análise química semi-quantitativa e comparativa (local) do metal de solda depositado, das regiões dendrítica (D) e interdendrítica (ID), assim como a identificação das possíveis fases secundárias, tais como chi (χ), sigma (σ) e/ou Laves (η), por meio dos seus espectros pontuais de elementos químicos. O equipamento utilizado (MEV) foi o microscópio eletrônico da marca Cambridge Instruments modelo 3200LV.

3.4- Ensaio de Microdureza

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers com carga de 500gf ($HV_{0,5}$) em amostras retiradas da seção transversal dos cordões de solda. O equipamento utilizado foi um microdurômetro da marca Instron-Wilson modelo 402-MVD. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente (25°C), com um tempo de aplicação da carga de 15 segundos, conforme a norma ASTM E384 – 17 (2017). Foram realizados perfis de dureza contemplando as regiões do MS, ZTA e MB para cada condição de deposição. As impressões foram efetuadas a partir de 1 mm da superfície do cordão ao longo de uma linha vertical com distâncias de 0,5 mm, conforme ilustrado na Figura 3.2.

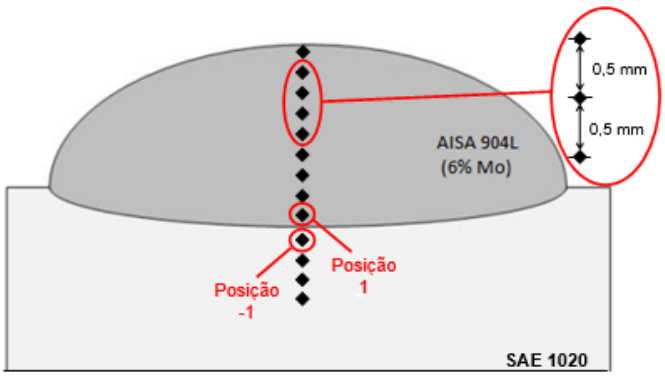


Figura 3.2: Detalhe esquemático do perfil de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$).

3.5- Análise de Diluição

Foi realizado o cálculo da diluição global (DG) com base nas macrografias obtidas, de modo a avaliar os efeitos dos parâmetros específicos do processo GMAW-RE (frequência e diâmetro de rotação), na diluição, em comparação com o processo GMAW. A diluição global (DG) foi determinada com base na equação 2.2 e na Figura 2.4, apresentados anteriormente. Para efetuar o cálculo da diluição global, inicialmente, após a preparação das amostras, foram obtidas imagens da seção transversal dos cordões com o auxílio de um microscópio óptico da marca Olympus modelo BX-60M e o suporte do software Olympus Stream Essentials (equipamento disponível no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ). Em seguida, foi utilizado o software Image J para se realizar a medição das dimensões para calcular as áreas conforme a equação 2.2 e a Figura 2.4.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1- Aspectos Geométrico e Superficial - Soldas de Passe Único

A Figura 4.1 apresenta o aspecto macrográfico da seção transversal das soldas, com depósito em passe único, juntamente com as imagens do aspecto superficial dos depósitos para as condições de diâmetro médio de rotação de 3mm e frequências de rotação de 300; 500; 1000; 1500; 2000 e 2500 rpm. Pode-se observar a mudança do perfil do cordão depositado com o aumento da frequência de rotação e uma incidência significativa de respingos para frequências de 2.000 rpm e 2.500 rpm. Na Figura 4.2, com diâmetro médio de rotação de 5 mm, uma significativa incidência de respingos já é verificada a partir de 1000 rpm. Devido a elevadíssima incidência de respingos observada para a frequência de 2000 rpm (Figura 4.2), optou-se por não realizar a soldagem com a frequência de 2500 rpm e 5 mm de diâmetro médio de rotação. Na Figura 4.3 pode-se observar a deposição com o processo GMAW (convencional). Nota-se o perfil típico, denominado de *finger type*, característico quando gases de proteção ricos em argônio são utilizados.

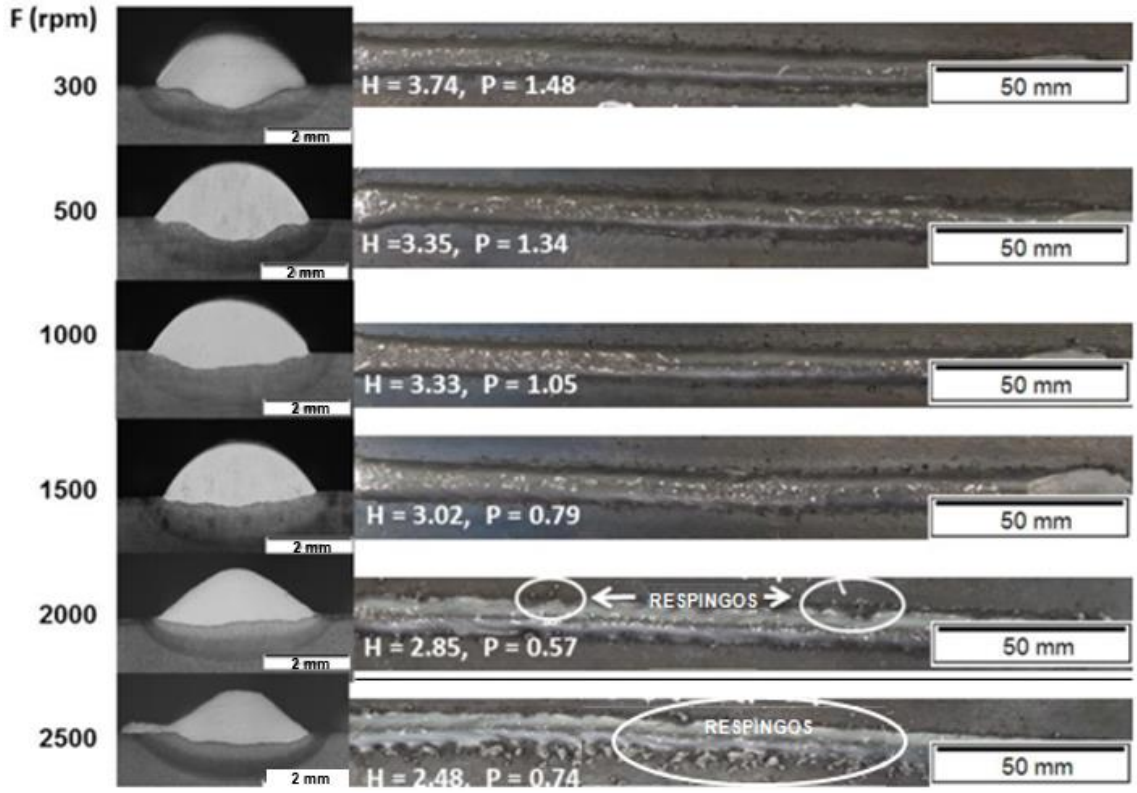


Figura 4.1- Macrografia dos cordões de solda. Processo GMAW-RE com diâmetro médio de rotação igual a 3 mm. H – Altura do cordão e P – Penetração.

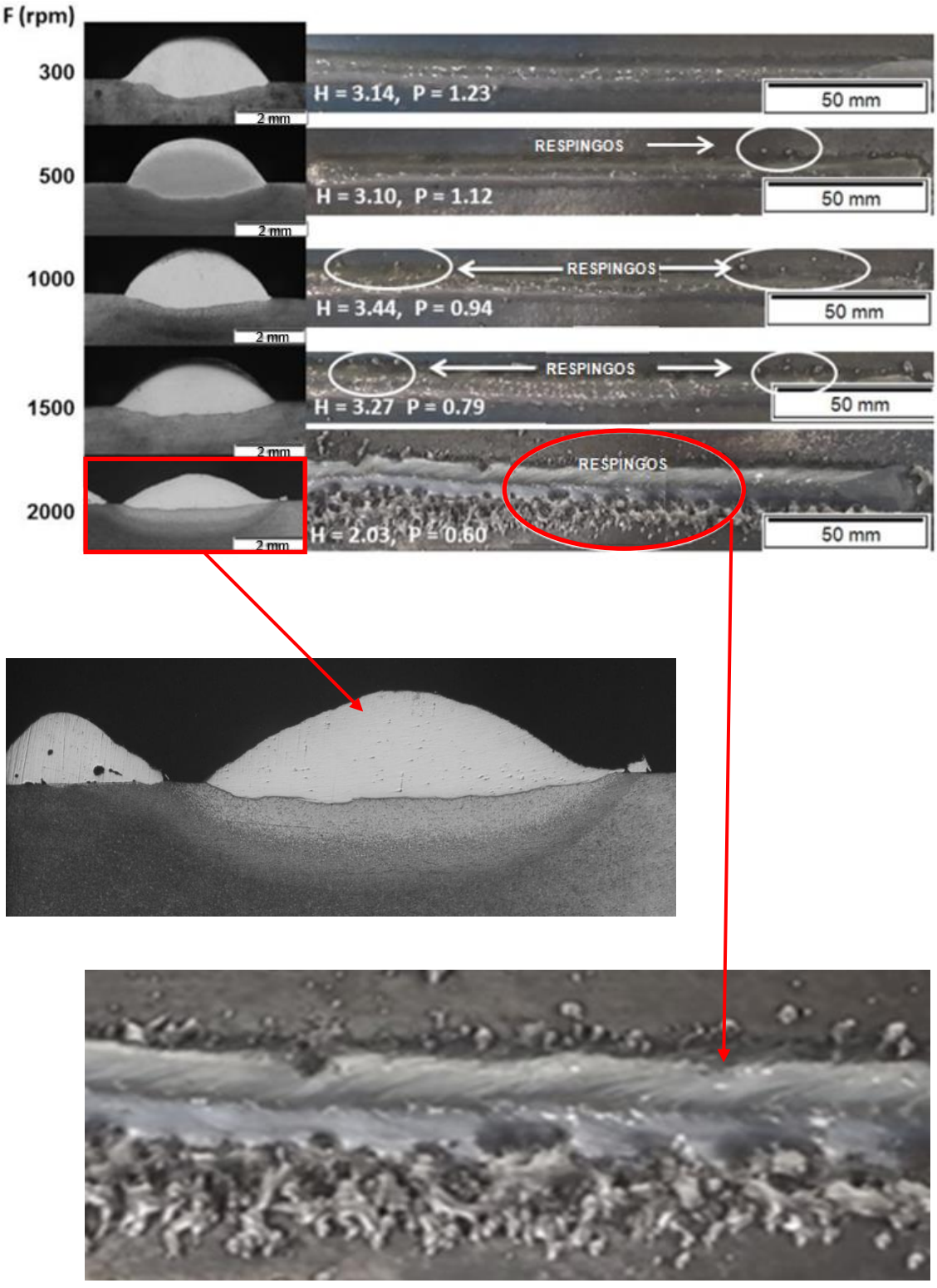


Figura 4.2- Macrografia dos cordões de solda. Processo GMAW-RE com diâmetro médio de rotação igual a 5 mm. H – Altura do cordão; P – Penetração.

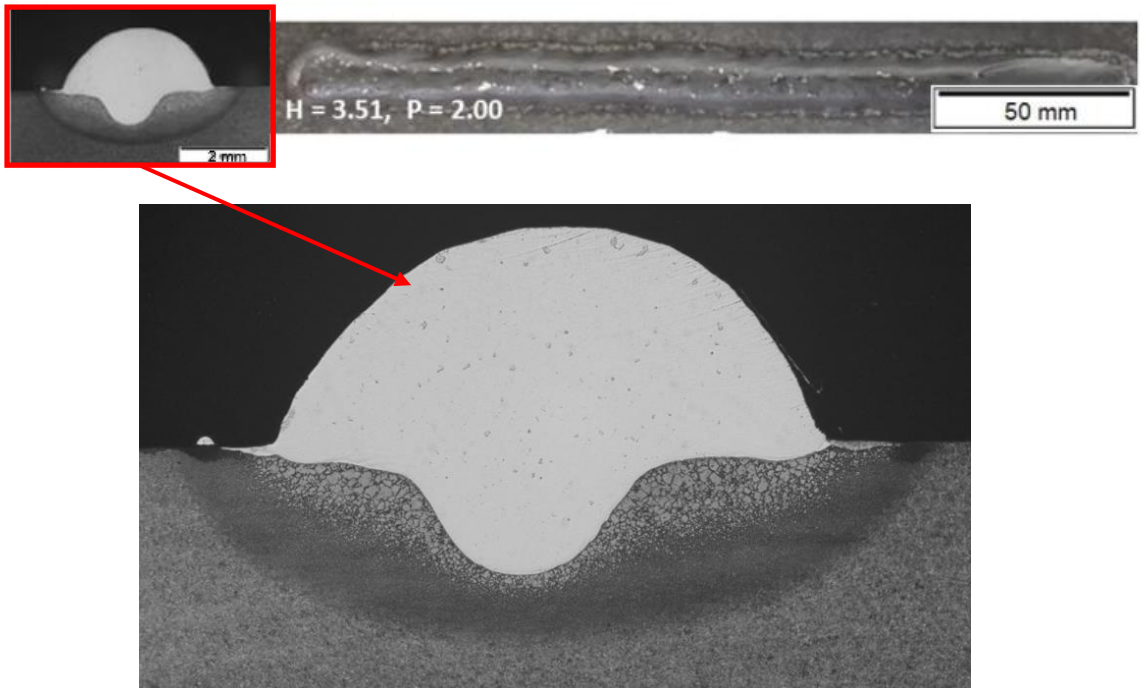


Figura 4.3- Macrografia do cordão de solda. Processo GMAW (convencional). H – altura do cordão; P – penetração.

A Tabela 4.1 apresenta o resultado dos aspectos geométricos dos cordões considerando: altura, largura e penetração.

Tabela 4.1- Dimensões das amostras obtidas com auxílio do software Image J.

Amostras	Diâmetro de Rotação (mm)	Frequência (rpm)	Altura (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)
GMAW	0	0	3,51	2,00	9,01
GMAW-RE 303	3	300	3,74	1,48	8,93
GMAW-RE 305	3	500	3,35	1,13	10,48
GMAW-RE 310	3	1.000	3,33	1,05	9,90
GMAW-RE 315	3	1.500	3,02	0,79	10,30
GMAW-RE 320	3	2.000	2,85	0,57	10,47
GMAW-RE 325	3	2.500	2,48	0,74	9,62
GMAW-RE 503	5	300	3,14	1,23	10,65
GMAW-RE 505	5	500	3,10	1,12	9,81
GMAW-RE 510	5	1.000	3,44	0,94	9,92
GMAW-RE 515	5	1.500	3,27	0,79	11,26
GMAW-RE 520	5	2.000	2,03	0,60	10,93

GMAW= Gas Metal Arc Welding; GMAW-RE = Gas Metal Arc Welding Rotating Electrode.

As Figuras 4.4 e 4.5, apresentam em forma de gráfico os resultados da Tabela 4.1.

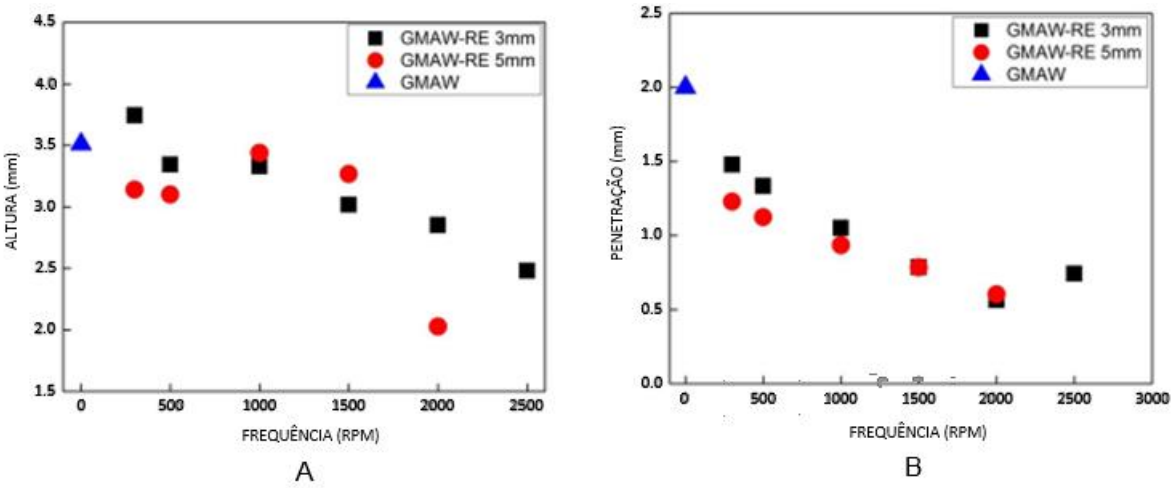


Figura 4.4- (A) - Altura do cordão em função da frequência de rotação e (B) - Penetração do cordão em função da frequência de rotação.

Observa-se que, com o aumento da frequência de rotação há uma tendência para a redução da altura do cordão e da penetração. Para a largura do cordão, observa-se um ligeiro aumento em relação ao processo GMAW (sem rotação) ocorrendo um máximo em 1500 rpm para 5 mm de diâmetro médio de rotação. Contudo, não se observa uma variação significativa, tanto em função da frequência de rotação quanto do diâmetro médio de rotação, conforme mostrado na Figura 4.5, ou seja, o processo GMAW-RE tende a produzir cordões mais largos, mas com pouca variação em função dos parâmetros de rotação.

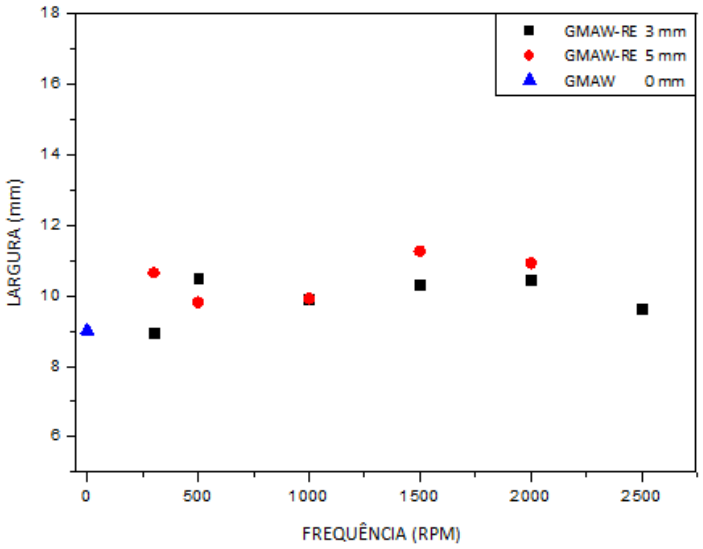


Figura 4.5- Largura do cordão em função da frequência de rotação.

4.2- Diluição - Soldas de Passe Único

A Tabela 4.2 apresenta os resultados referentes à diluição. As dimensões foram obtidas conforme já descrito no Item 3.5. A diluição foi calculada conforme a Figura 2.4 e equação 2.2. Pode-se observar que o menor valor de diluição (19,46%) é obtido para a condição de frequência de rotação de 1.500 rpm e diâmetro médio de rotação de 3mm.

Tabela 4.2- Cálculo da Diluição. Dimensões obtidas com auxílio do software Image J.

Amostras	Frequência.(rpm)	Diâmetro de Rotação (mm)	A	B	A+B	Diluição
GMAW	0	0	27,648	8,716	36,364	23,97
GMAW-RE 303	300	3	23,564	6,531	30,100	21,70
GMAW-RE 305	500	3	21,229	7,640	28,870	26,46
GMAW-RE 310	1.000	3	20,866	6,756	27,622	24,46
GMAW-RE 315	1.500	3	21,768	5,261	27,030	19,46
GMAW-RE 503	300	5	22,503	7,661	30,164	25,40
GMAW-RE 505	500	5	21,446	7,169	28,615	25,05

A Figura 4.7 apresenta os resultados da Tabela 4.2 em forma de gráfico.

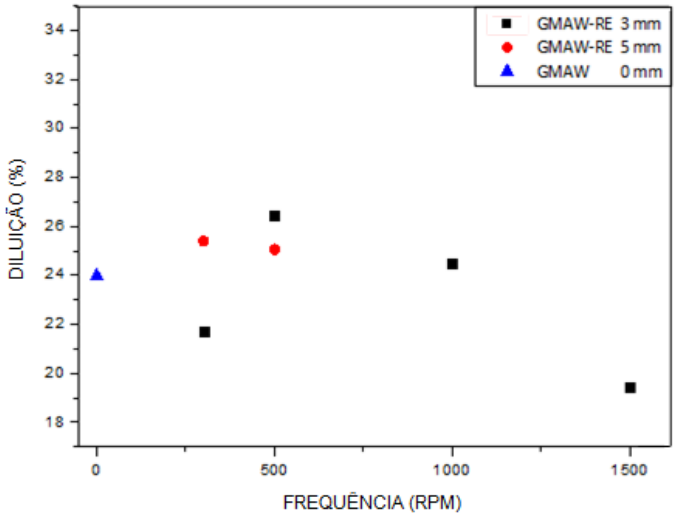


Figura 4.7- Valores da diluição em função da frequência de rotação.

4.3- Extensão da ZTA - Soldas de Passe Único

A Figura 4.8 apresenta as macrografias com as medições para determinar a extensão média da ZTA. Estes valores são apresentados na Tabela 4.3 e na Figura 4.9.

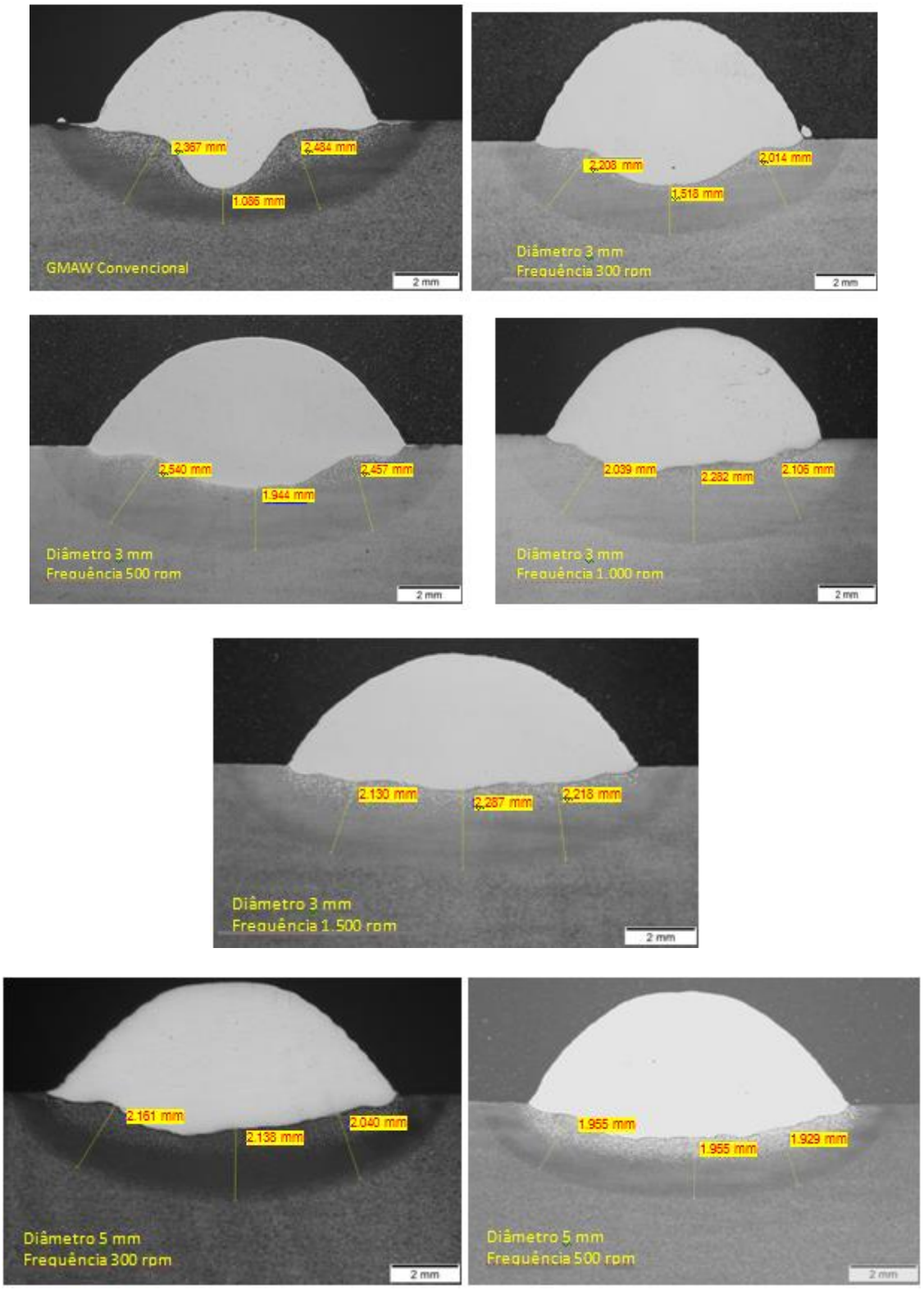


Figura 4.8- Medidas da ZTA produzidas por meio das macrografias dos cordões de solda, sob frequências variando entre 0 rpm e 1.500 rpm.

Pode-se observar que não há uma variação significativa para a dimensão da ZTA com o aumento da frequência de rotação.

Tabela 4.3- Extensão central (EC) e média (EM) da ZTA em função dos parâmetros de processo.

Amostra	FR (rpm)	DR (mm)	EC (mm)	EM (mm)
GMAW	0	0	1,09	1,98
GMAW-RE 303	300	3	1,52	1,91
GMAW-RE 305	500	3	1,95	2,31
GMAW-RE 310	1.000	3	2,28	2,14
GMAW-RE 315	1.500	3	2,29	2,21
GMAW-RE 503	300	5	2,14	2,11
GMAW-RE 505	500	5	1,96	1,95

FR - Frequência de Rotação; DR - Diâmetro de Rotação; EC - Extensão no centro da ZTA; EM - Extensão Média da ZTA.

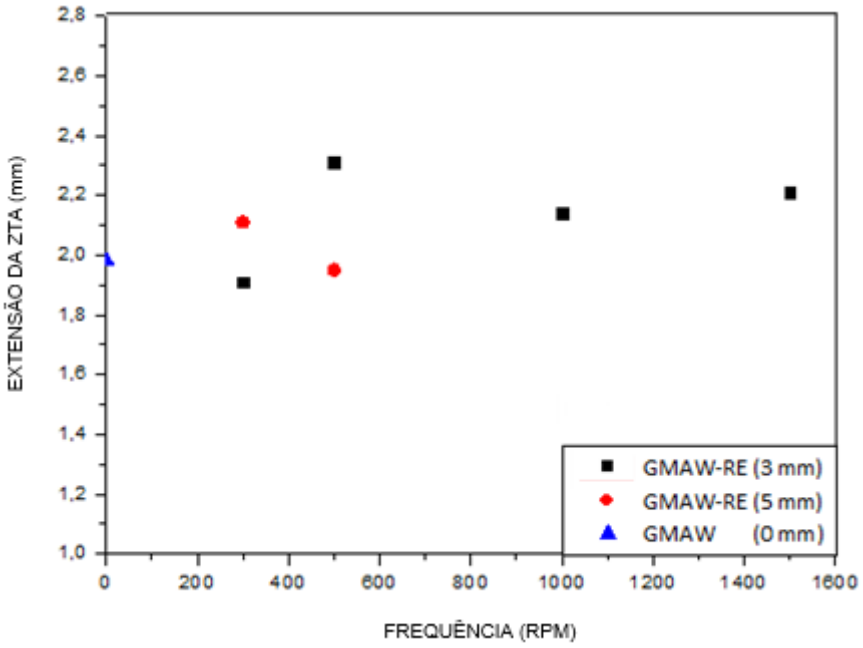


Figura 4.9- Extensão média da ZTA em função dos parâmetros de processo.

4.4- Ensaio de Microdureza

Foram realizados ensaios de microdureza, conforme a metodologia descrita no item 3.4. Os resultados são apresentados na Figura 4.10 e na Tabela 4.4. Pode-se observar um valor de dureza significativamente elevado na ZTA próximo à linha de fusão (posição -1), decorrente da presença de martensita, sendo discutida no item 5.4.

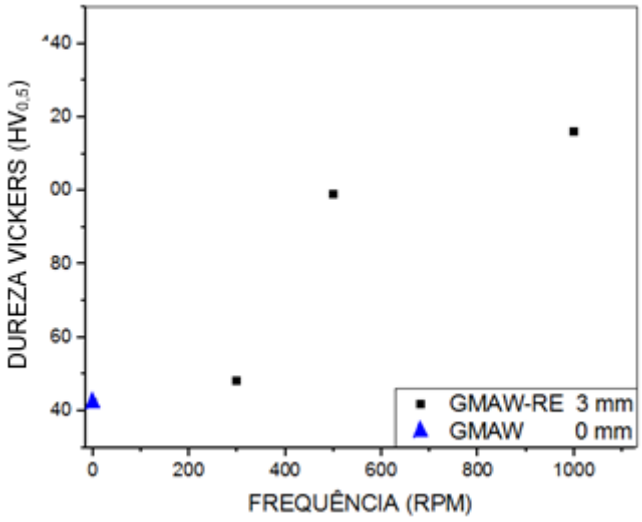


Figura 4.10- Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) localizada na posição -1 das amostras produzidas pelo processo GMAW e GMAW-RE.

Tabela 4.4- Valores de microdureza $HV_{0,5}$ das amostras com GMAW e GMAW-RE com diâmetro médio de rotação de 3 mm.

MATERIAL	POSIÇÕES	CONVENCIONAL	Diâmetro 3 mm			
			300 RPM	500 RPM	1.000 RPM	1.500 RPM
MS	10	202	210	205	-	-
	9	210	219	217	194	-
	8	205	225	215	213	220
	7	200	214	210	209	219
	6	190	214	210	210	216
	5	213	208	208	208	213
	4	205	218	224	208	216
	3	205	220	223	204	217
	2	203	213	210	202	210
	1	214	280	254	236	223
MB	-1	342	348	399	416	435
	-2	276	321	342	354	356
	-3	237	233	303	332	324
	-4	238	224	236	295	295
	-5	234	231	238	228	220
	-6	237	210	234	240	229
	-7	-	224	-	237	239

4.5- Soldas de Revestimento

Conforme descrito no Item 3.2, foi realizada uma terceira etapa com a soldagem do tipo revestimento, consistindo na deposição de cordões com sobreposição de 50%, em camada única, utilizando as condições de melhor resultado da segunda etapa. A soldagem foi realizada utilizando o diâmetro de rotação de 3 mm e frequências de 300, 500 e 1000 rpm, quando foi possível obter cordões com regularidade dimensional, penetração com pequena faixa de dispersão (descontinuidade) e ausência de respingos, porosidade e trincas, conforme apresentado na Figura 4.12.

Na Figura 4.12 são também apresentadas as medidas de espessura do revestimento e profundidade de penetração medidos em microscópio óptico, com auxílio do software *Stream Essentials*, conforme já descrito no Item 3.3.

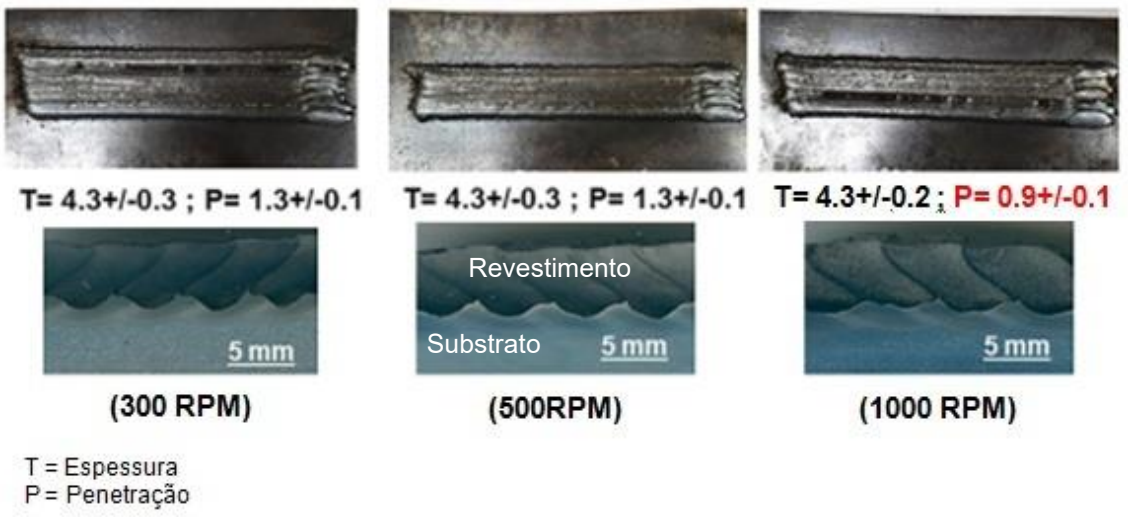


Figura 4.12- Aspecto superficial e macrografia da seção transversal da soldagem de revestimento com camada única. Ataque: Água régia.

A Figura 4.13 apresenta em maior detalhe o aspecto macrográfico da soldagem de revestimento com frequência de rotação de 1000 rpm onde foi observado uma descontinuidade na sobreposição entre o 2º e o 3º passe. Esta descontinuidade pode estar relacionada com a menor penetração obtida para a frequência de 1000 rpm, a qual foi inferior a 1 mm (Figura 4.12).

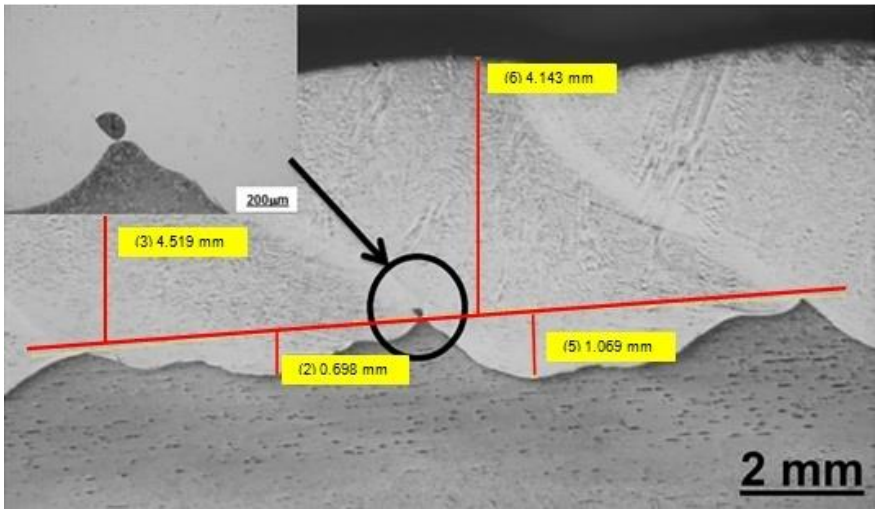


Figura 4.13- Descontinuidade na Linha de Fusão entre o 2º e o 3º passe da soldagem com frequência de 1000 rpm. Ataque: Água régia.

4.6- Avaliação da Composição Química do Metal Depositado

A Tabela 4.5 apresenta o resultado da análise efetuada pela técnica de EDS, por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme descrito no item 3.3, do metal de solda depositado para as condições de 300 e 500 rpm juntamente com os valores estimados de PREN. Não são observadas variações de composição química importantes dos metais de solda depositados nas condições analisadas.

Tabela 4.5: Composição química dos metais de solda da soldagem de revestimento obtidos por microanálise EDS.

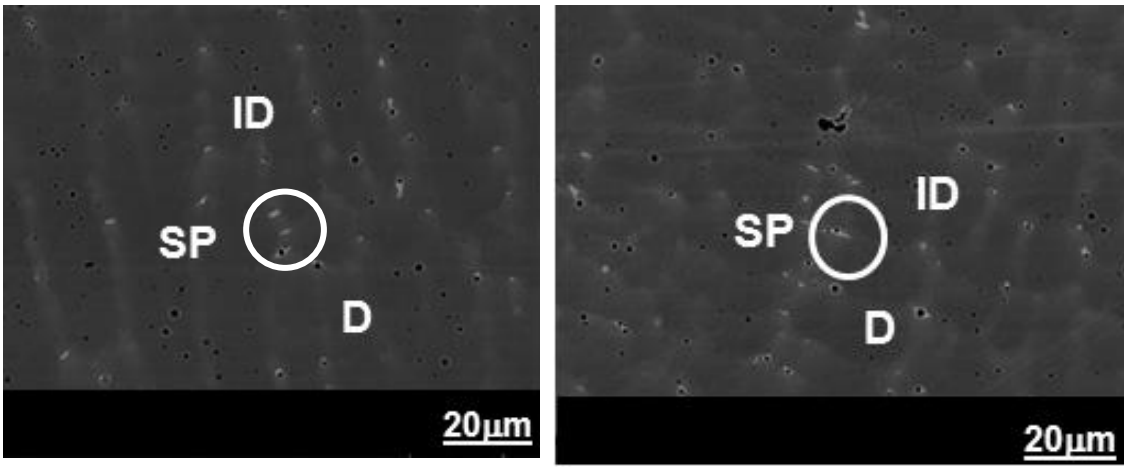
Condição	**Elemento (% peso)**					
	Cr	**Ni**	**Mo**	**N**	**Fe**	**PREN**
300 rpm	18	21,3	6,4	0,08	Bal.	41,7
500 rpm	18,3	21,8	6,3	0,08	Bal.	41,7
Metal de Adição (*)	20	25,4	6,2	0,12	Bal.	>45

(*) Dados do fornecedor

4.7- Microestrutura do Metal de Solda

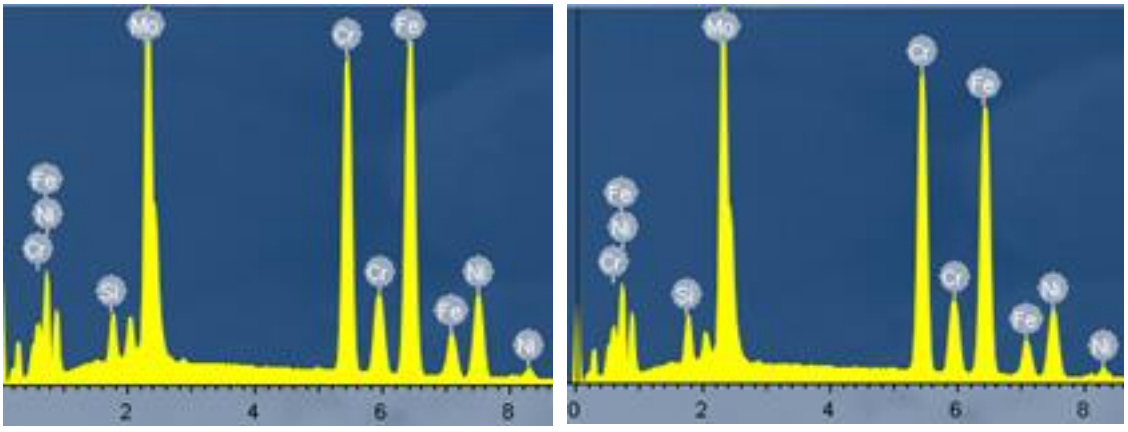
A Figura 4.14 apresenta imagens do aspecto geral da microestrutura obtidas dos metais de solda por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no modo de elétrons retroespalhados, onde é possível observar a matriz austenítica (região mais escura), as regiões dendrítica e interdendrítica, que apresentou baixa fração de fases secundárias (< 1,0) na região interdendritica.

Dependendo da composição química e processo de soldagem, que podem provocar diferentes temperaturas de pico e taxas de resfriamento, as fases secundárias mais comuns presentes na estrutura são chi (χ), sigma (σ) e laves (η) (KOVACH, 2000; MADALENA; 2013; MATIAS, 2021; PICCHI, 2021). Entretanto, as principais fases secundárias observadas em metais de solda de AISA são Chi e Sigma (ANBURAJ, 2012). A Figura 4.15 apresenta imagens obtidas pela técnica de EDS gerada por MEV, nas frequências de 300 rpm e 500 rpm, contendo o resultado da análise das fases secundárias mostradas na Figura 4.14, onde o espectro apresentado indica a fase Chi como predominante.



(a) **(b)**

Figura 4.14 - Aspecto microestrutural dos metais de solda observados por MEV no modo de elétrons retroespalhados mostrando a matriz austenítica (região escura), região dendrítica (D), interdendrítica (ID) e fases secundárias (SP). (a) 300 rpm; (b) 500 rpm.



(a) **(b)**

Figura 4.15- Imagem do espectro da análise de EDS, das fases secundárias, indicadas pelos círculos na Figura 4.15. (a) 300 rpm e (b) 500 rpm, obtidas por MEV.

A fase Chi pode surgir quando são aplicadas altas taxas de resfriamento, particularmente para o processo GMAW (MATIAS *et al*., 2021; JORGE *et al*., 2017; JORGE *et al*., 2023), enquanto a sigma é observada preferencialmente quando são aplicadas baixas taxas de resfriamento ou após tratamento térmico pós-soldagem (MATIAS *et al*., 2021; MATIAS *et al*., 2023).

Uma metodologia já bem consolidada para estudar a influência do processo de soldagem nas características dos metais de solda está associada à composição química, pois quanto menor for a diluição menor será a diferença nos teores dos principais elementos de liga. A esse respeito, a Tabela 4.5 fornece indícios de que o processo GMAW-RE é capaz de fornecer depósitos de solda adequados visto que as diferenças na composição química, mesmo para depósitos de camada única, são baixas. Portanto, como o espectro obtido com a técnica de EDS mostra uma fase secundária mais rica de Mo em comparação ao Cr, isso pode ser característica de uma fase Chi.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO

5.1 Aspectos Geométrico e Superficial

Conforme as Figuras 4.1 e 4.2, pode-se observar que o aumento da frequência de rotação leva a mudanças do perfil do cordão depositado. Observa-se uma tendência para o alargamento da poça de fusão com o aumento da frequência de rotação e uma incidência significativa de respingos para frequências de rotação de 2.000 e 2.500 rpm para o diâmetro de rotação de 3 mm. Para diâmetros de 5 mm, uma elevada incidência de respingos já pode ser verificada a partir de 1.000 rpm. Estas condições foram consideradas insatisfatórias por gerarem um perfil de soldagem inadequado e perda de metal depositado. Este comportamento pode ser atribuído a uma combinação dos parâmetros: diâmetro de rotação e frequência de rotação, onde, para maiores diâmetros de rotação, o maior deslocamento na ponta do arame eletrodo tende a arremessar as gotas metálicas para fora da poça de fusão. Pode-se associar tal ocorrência com a ação da força centrífuga, favorecida em altas frequências, contribuindo de forma significativa para destacamento da gota metálica da ponta do eletrodo para fora da poça de fusão.

Considera-se ainda, que elevadas frequências de rotação combinadas com grandes diâmetros de rotação, tendem a propiciar um regime turbulento no fluxo de gás de proteção, o que pode levar a uma instabilidade na transferência metálica, perda da proteção contra a contaminação atmosférica e consequentemente um aumento na incidência de respingos.

Embora o sistema de controle de rotação utilizado no presente trabalho possibilite o uso frequências da ordem de 5.500 rpm, observa-se do ponto de vista prático que, para aplicações em soldagem de revestimento, o uso de frequências acima de 2.000 rpm combinadas com um diâmetro médio de rotação de 3 mm são inviáveis. Nas condições aqui estudadas, observou-se uma grande intensidade da projeção das gotas metálicas e distúrbio do fluxo de gás de proteção no uso de alta frequência de rotação resultando em alta taxa de respingos, má formação da poça de fusão e instabilidade do arco elétrico. Estes fatores também foram observados por SANTOS *et al.* (2018) SANTOS (2019) e SILVEIRA (2018), quando realizaram estudo similar a este.

Na Figura 4.3 pode-se observar a deposição com o processo GMAW (convencional) realizado para fins de comparação com o GMAW-RE. Nota-se o perfil típico, denominado de *finger type*, característico quando gases de proteção ricos em argônio são utilizados, gerando um perfil de penetração profundo e estreito. O arco elétrico tende a fornecer maior concentração de calor e pressão dinâmica no centro da

poça de fusão (NORRISH, 2006). Este aspecto também foi observado por SANTOS (2019) e SILVEIRA (2020). Essa maior concentração de calor pode influenciar diretamente na extensão da ZTA, assim como na sua microestrutura (MODENESI, 2012).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.1 e na Figura 4.5 é possível observar uma tendência para redução da altura e da penetração do cordão de solda com o aumento da frequência de rotação. Isso pode ocorrer devido à dispersão da força do arco sobre uma área específica maior, o que pode reduzir a concentração de calor no centro do cordão. Em resumo, como as gotas metálicas são depositadas sobre uma área mais ampla, em comparação com o processo GMAW convencional, tanto a penetração, quanto o reforço do cordão de solda sofrem uma redução em sua dimensão, comportamento que já foi observado em trabalhos anteriores (RAO *et al.* 2004; BAI *et al.,* 2012; ZHANG *et al.,* 2014; SANTOS, 2019; SILVEIRA, 2020).

Utilizando como referência a amostra GMAW-RE 315 (Tabela 4.1); que é a amostra de maior frequência de rotação dentre as que não foram eliminadas em função da quantidade excessiva de respingos é possível perceber uma redução aproximada de 14% na altura do cordão e uma redução de 60% na penetração, quando comparada com a amostra GMAW. O cordão com formato menos convexo também pode favorecer a técnica de soldagem multipasse, reduzindo a possibilidade da ocorrência de falta de fusão na aplicação dos passes subsequentes, conforme observado por SANTOS *et al.,* 2018. Essa redução, tanto da penetração, quanto do reforço do cordão se torna interessante, visto que pode favorecer a redução da diluição, um fator importante na soldagem de revestimento (ZHANG *et al.,* 2014). Quanto a largura da poça de fusão, não foram observadas variações significativas ou tendências, nas soldas obtidas neste trabalho, tanto em função da frequência de rotação quanto do diâmetro médio de rotação, conforme apresentado na Tabela 4.1 e na Figura 4.5.

É possível observar por meio da Tabela 4.2 que o processo GMAW (convencional) promove a maior área de reforço e de penetração. Já em relação ao processo GMAW-RE, pode ser observada uma tendência de redução da área do reforço e da penetração do cordão, conforme ocorre o aumento da frequência de rotação. A propósito, a menor razão da área de penetração com a área de reforço pode ser interessante para este tipo de processo, pois além de influenciar positivamente na diluição, ainda pode contribuir para a redução do volume de material depositado, para a redução do número de passes e, consequentemente, para a redução do nível de tensões residuais, resultando em menor custo e maior produtividade, tornando-se interessante para este tipo de aplicação. Entretanto, embora uma menor penetração

possa contribuir positivamente para a diluição, o aumento da frequência também contribui para a redução da espessura do depósito podendo provocar a ocorrência de falta de adesão (MOTA *et al.*, 2019). Normalmente, a espessura mínima para garantir um desempenho aceitável para o revestimento é de 3 mm, principalmente frente à corrosão, sendo promovido por meio da estabilização da composição química decorrente do controle da diluição.

Em relação à largura do cordão de solda produzido pelo processo GMAW-RE, observa-se pela Tabela 4.1 e pela Figura 4.6, um aumento de aproximadamente 16,3% quando comparado com o processo GMAW, o que pode ser atribuído a atuação da força centrífuga sobre o destacamento da gota metálica e na capacidade de preenchimento de uma área maior como já observado por outros autores (RAO *et al.*, 2004; SILVEIRA, 2018, 2019).

5.2- Diluição

Para a obtenção do valor da diluição foi utilizado o método das áreas, conforme o Item 4.2, que é a participação do metal de base na formação do revestimento. Pode-se observar que o valor da diluição para o processo GMAW (convencional) é bem próximo da média dos valores de diluição das amostras produzidas com o processo GMAW-RE; sob os parâmetros aqui estudados; que são apresentados na Tabela 4.2, vistos também por meio da Figura 4.7, sendo o menor valor de diluição, igual a 19,46%, obtido para a condição de frequência de rotação de 1.500 rpm e diâmetro médio de rotação de 3 mm.

É importante lembrar que a avaliação da diluição realizada nesta etapa foi realizada nas soldas de passe único e, por esta razão, mesmo sem apresentar variação significativa, o valor da diluição pode estar sendo influenciado pela largura e pode ser considerado como alto, porém, ainda está dentro da faixa esperada para cordões simples (MODENESI, 2001; ZHANG *et al.*, 2014; MOTA *et al.,* 2019). Segundo MODENESI (2001), os valores de diluição esperados para o processo GMAW podem variar entre 10% e 50%.

Adicionalmente, foi possível observar que o índice de diluição das amostras soldadas pelo processo GMAW-RE com diâmetro de rotação de 3 mm tende a diminuir com o aumento da frequência de rotação. O controle do nível de diluição é importante, pois pode influenciar diretamente na microestrutura e composição química final do revestimento, assim como no seu desempenho em serviço. Sendo assim, o controle da diluição em níveis mínimos resulta em menor probabilidade de formação de

microestruturas frágeis e suscetíveis a trincas, assim como na menor probabilidade de corrosão localizada (BAESLACK *et al*., 1979; NELSON *et al*., 1999; LIPPOLD e KOTECKI, 2005; VOLPI e SERRA, 2018; SAHA e DAS, 2018; SINGHAL e JAIN, 2020; SENTHILKUMAR *et al*., 2014). Dessa forma, priorizando a obtenção de menores níveis de diluição, as condições com diâmetro médio de rotação igual a 5 mm não seriam recomendadas, quando comparados com os resultados obtidos com diâmetro de rotação de 3 mm.

Embora a combinação do diâmetro de rotação de 3 mm com a frequência de rotação de 300 e 1500 rpm tenham promovido os menores níveis de diluição (21,7% e 19,46% respectivamente), os cordões de solda com as frequências de 500 e 1000 rpm apresentaram os melhores resultados gerais (Figura 4.7).

A diluição obtida nos depósitos de solda de revestimento de camada única (Figura 4.12) que foi de 14% está próximo aos obtidos pelo processo GMAW para depósitos com mais camadas observados em trabalhos anteriores (JORGE *et al*., 2017; MOTA *et al*., 2019; MOUGO *et al*., 2020; NAJAFI *et al*., 2021; MATIAS *et al*., 2023). No estudo realizado por Najafi *et al.* (2021), por exemplo, com revestimento de Ni-Cr-Mo de três camadas depositado pelo processo GMAW com baixo aporte térmico, foi possível confirmar que uma razão de diluição de 13% é um valor aceitável para propriedades favoráveis. Dessa forma, com base nesse resultado de 14%, acredita-se que o revestimento de dupla camada pode ser adequado para um desempenho aceitável devido à redução esperada na diluição associada ao aumento da espessura (MOTA *et al*., 2019; MATIAS *et al*., 2023).

5.3- Extensão da ZTA

A extensão da ZTA pode ser influenciada pela espessura do MB, pelas propriedades de condutibilidade térmica do material, pelo aporte térmico e pela temperatura de preaquecimento, entre outros. A partir das medições apresentadas na Figura 4.8, dos resultados apresentados na Tabela 4.3 e na Figura 4.9, pode-se observar que não há uma variação significativa da extensão da ZTA com o aumento da frequência de rotação. A maior variação observada para a ZTA, que foi de1,2 mm, ocorre quando se comparam as condições: sem rotação (GMAW convencional) e GMAW-RE com 1500 rpm e diâmetro médio de rotação de 3 mm.

Como efeito da rotação observa-se uma mudança no perfil de penetração do tipo “finger type”; típico da soldagem com gases inertes. O aumento da frequência de rotação produz uma mudança no perfil da ZTA que tende para uma distribuição mais

homogênea. Esta maior homogeneidade pode ser atribuída a distribuição de calor que se faz em uma área maior pelo giro do arco elétrico.

Outros autores como WANG *et al.*, 2007; GUO *et al.*, 2011; BAI *et al.*, 2012; ZHANG *et al*., 2014; SANTOS, 2019; ALMEIDA, 2019, também observaram essa maior homogeneidade da ZTA a qual foi atribuída a frequência de rotação. Considera-se ainda, que a frequência de rotação possa contribuir para a redução do gradiente térmico da gota metálica e para uma melhor distribuição de calor na poça de fusão.

É importante destacar que uma maior extensão da ZTA pode contribuir negativamente para este tipo de aplicação, com possíveis alterações nos valores de dureza da região, sendo que esta última pode estar associada a uma possível formação de Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD) que se localizam ao longo da LF, e na região de grãos grosseiros, contribuindo para a formação de uma zona fragilizada ou pela formação de martensita; o que não é desejável para a soldagem de revestimento (MADALENA *et al.*, 2013; SILVEIRA, 2020).

Embora outros estudos como os de COSTA *et al.* (2019), GUO *et al*. (2011) ALMEIDA (2019) e GMAW. BAI *et al.* (2012) reportem a ocorrência do aumento da extensão da ZTA com o aumento da frequência de rotação, é importante lembrar que estes trabalhos foram realizados considerando a união de chapas, onde a dissipação de calor é diferente das condições de deposição sobre chapa como no caso da aplicação de revestimento por soldagem. E, neste caso, o que se observa é uma distribuição mais homogênea da ZTA, a qual pode ser atribuída ao movimento de rotação do eletrodo, que possibilita a distribuição do calor por uma área maior ao invés de ser concentrada no centro da poça de fusão.

5.4- Ensaio de Microdureza

A Figura 4.10 e a Tabela 4.4 apresentam os valores de microdureza ($HV_{0,5}$) medidos nas amostras produzidas pelos processos, GMAW e GMAW-RE com diâmetro de 3 mm e diferentes frequências de rotação. Observa-se que, para o metal de solda, os valores de dureza na região próxima da LF, situam-se entre 280HV e 223HV (GMAW-RE) tendendo a diminuir com o aumento da frequência de rotação. Para outras posições no metal de solda, os resultados não indicam uma tendência para uma redução ou elevação do valor de dureza, em função da frequência de rotação. Segundo GARCIA (2019), isto ocorre porque a distribuição de calor não se mantém constante para este processo, sendo assim, cada ponto pode ter um comportamento diferente, de acordo

com a posição do arco na seção transversal que foi analisada, fato este também observado por ALMEIDA (2019) e SILVEIRA (2020).

Dessa forma, os resultados obtidos corroboram a hipótese de que dependendo da seção transversal em que o corpo de prova seja retirado, o arco pode estar localizado em qualquer posição; a frequência de rotação faz com que o arco seja direcionado de forma periódica; gerando, dessa forma, uma concentração de calor em determinado ponto, promovendo a formação de microconstituintes diferentes na área da seção estudada.

A soldagem de metais dissimilares pode resultar na formação de regiões frágeis, as quais, podem atingir níveis de dureza superiores a 400 HV ao longo da interface da linha de fusão (LF) do lado austenítico (metal de solda), indicando a presença de martensita. Estas regiões frágeis são formadas quando não ocorre a correta mistura entre o metal de base e o metal de solda fundido, sendo então denominadas de Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD), não podendo ser previstas por meio de cálculos usuais de diluição (BAESLACK *et al.*, 1979; NELSON *et al*., 1999; MADALENA, 2013).

A Tabela 4.4 permite observar que ao aumentar a frequência de rotação existe uma tendência de elevação dos valores de microdureza na região próxima da linha de fusão (posição -1), com um valor máximo medido de 416 $HV_{0,5}$ a 1.000 rpm, decorrente da formação de martensita no metal de base, conforme a Figura 4.10. Observa-se, ainda, que os valores de microdureza tendem para uma redução para maiores distâncias da LF, mantendo-se dentro de valores considerados aceitáveis, aspecto também observado em estudos similares (MADALENA et *al.*, 2013; JORGE et *al.*, 2017).

5.5- Soldagem de Revestimento

A soldagem de múltiplos passes pode provocar diferenças significativas na diluição a partir da LF, entre o primeiro cordão e os cordões subsequentes, pois no primeiro cordão o arco atinge o metal de base diretamente resultando em uma fusão de maior gradiente em comparação com o cordão adjacente. Quando é efetuado o passe subsequente, sobreposto, um percentual do primeiro cordão de solda é refundido e misturado, reduzindo parte da fusão do metal de base. Com isso, um estado estacionário seria alcançado a partir de determinada distância da linha de fusão (LF) do primeiro passe, ou após determinado número de passes. Dessa forma, existe a possibilidade de buscar a homogeneidade da composição química do revestimento com as propriedades desejáveis, conforme já observado em literaturas anteriores (KUMAR *et al.*, 2010; MADALENA *et al.* 2013). Além disso, a soldagem com múltiplos passes

também pode contribuir positivamente para a diluição - quanto menor for a diluição, menor será a diferença nos teores dos principais elementos de liga - em função da elevação do grau de sobreposição entre passes adjacentes.

As soldas de camada única apresentadas na Figura 4.12 resultaram em um valor de diluição de 14%, valor próximo aos obtidos pelo processo GMAW, quando são efetuados depósitos com maior número de camadas (JORGE *et al.*, 2017; MOTA *et al.*, 2019; MOUGO *et al.*, 2020; NAJAFI *et al.*, 2021; MATIAS *et al.*, 2023). Este resultado vai de encontro com o resultado obtido por NAJAFI *et al.* (2021) que estudaram um revestimento de Ni-Cr-Mo com a técnica de multicamadas pelo processo GMAW com baixo aporte térmico e obtiveram uma razão de diluição no valor de 13% como aceitável para propriedades favoráveis. Embora, normalmente seja necessário aplicar três camadas para se obter uma diluição adequada, com propriedades mecânicas, de fadiga e de resistência à corrosão aceitáveis para revestimentos depositados pelo processo GMAW é possível considerar que um revestimento de dupla camada possa ser adequado para um desempenho aceitável em função da redução que é esperada na diluição, associada ao aumento da espessura (KUMAR *et al.*, 2010; MOTA *et al.*, 2019; MATIAS *et al.*, 2023). A técnica da dupla camada, ou soldagem multipasses, apresenta algumas vantagens sobre a soldagem de passe único, que podem ser observadas da seguinte forma (AZEVEDO, 2001):

- Em função dos ciclos térmicos de reaquecimento, cada passe subsequente provoca a normalização e refino dos grãos da camada anterior;
- O ciclo térmico provoca o revenimento do metal de solda, diminuindo as tensões residuais do passe anterior;
- Em função do calor gerado pelos ciclos térmicos do passe anterior ocorre uma redução da taxa de resfriamento do metal de base.

Apesar da regularidade dimensional observada ao longo do comprimento das soldas (Figura 4.12) com penetração apresentando pequena faixa de dispersão, ausência de respingos, assim como ausência de porosidade e trincas para as frequências de 300 rpm e 500 rpm, foram observadas descontinuidades na linha de fusão para a frequência de 1.000 rpm, como pode ser observado na Figura 4.13.

Dessa forma, foi considerado o valor de 1 mm como penetração mínima para manter a ligação com o metal de base, como garantia para um desempenho aceitável,

pois se reconhece que tanto a penetração, quanto a diluição sofrem redução na soldagem com aplicação de múltiplos passes. Além disso, a menor penetração não é suficiente para indicar o melhor desempenho, uma vez que normas internacionais (API 6A, 2004; NORSOK M-001, 2004; DNV-OS-F101, 2012) especificam uma espessura mínima de 3 mm para aplicação na indústria de óleo e gás o que se torna imperativo.

Como já comentado, quanto menor a diluição, menor poderá ser a diferença nos teores dos principais elementos de liga responsáveis pelo desempenho da liga aplicada como revestimento. Com os resultados favoráveis obtidos anteriormente associados aos resultados de composição química obtidos dos revestimentos de camada única apresentados na Tabela 4.5 - as frequências de 300 rpm e 500 rpm foram os melhores resultados - pode-se sugerir que o processo GMAW-RE tem potencial, principalmente pela técnica da dupla camada, para produzir depósitos de soldas adequados com propriedades satisfatórias, devido a pequena diferença de composição química apresentada (Tabela 4.5). Embora os resultados aqui obtidos possam ser considerados promissores, onde uma indicação de que a técnica de dupla camada produzida pelo processo GMAW-RE seja capaz de fornecer revestimentos adequados com propriedades mecânicas, de fadiga e resistência à corrosão aceitáveis e tenha potencial para se apresentar como uma alternativa vantajosa, com aumento significativo de produtividade e redução de custos, devido a menor quantidade de metal depositado, outros resultados experimentais são necessários para confirmar essa capacidade.

A técnica de dupla camada, ou multicamadas, tem como consequência o refino e revenimento da região de grãos grosseiros da zona termicamente afetada (RGGZTA) da primeira camada que é resultado de uma adequada sobreposição dos ciclos térmicos da segunda camada. Vale ressaltar que para efetuar esse refino de grão na RGGZTA da primeira camada, a energia da segunda camada deve ser maior que a energia da primeira camada. Essa relação deve ser estabelecida em função da velocidade de soldagem, do tipo de eletrodo e dos parâmetros do processo de soldagem adotado (AZEVEDO, 2001).

5.6 Composição Química do Metal de Solda de Revestimento

A Tabela 4.5 permite observar que não há variações significativas de composição química dos metais de solda depositados nas condições analisadas. A redução da diluição contribui para a diminuição da presença do elemento ferro no revestimento, resultando em menor probabilidade de formação de microestruturas frágeis e suscetíveis à corrosão, pois a elevação do teor de ferro leva ao aumento da

faixa de temperatura de solidificação devido à precipitação de fases deletérias de baixo ponto de fusão, favorecendo o surgimento de trincas de solidificação (MADALENA, 2013; PICCHI, 2021). Esse resultado (pouca variação de composição química) evidencia a capacidade do processo GMAW-RE em fornecer cordões com menor diluição, favorecendo a melhoria das propriedades mecânicas, de fadiga e resistência à corrosão.

5.7 Microestrutura do Metal de Solda de Revestimento

As principais fases secundárias observadas em metais de solda de aço inoxidável superaustenítico são Chi e Sigma (ANBURAJ, 2012). A fase sigma é formada preferencialmente após tratamento térmico pós-soldagem ou quando são aplicadas taxas de resfriamento muito baixas (MATIAS *et al.*, 2021; MATIAS *et al.* 2023), enquanto altas taxas de resfriamento induzem a predominância da fase Chi, particularmente para o processo GMAW (JORGE *et al.*, 2017; JORGE *et al.*, 2023; MATIAS *et al.* 2023). Considerando-se os melhores resultados aqui obtidos com a combinação das frequências de rotação de 300 rpm e 500 rpm com o diâmetro de rotação de 3 mm, onde se verifica uma pequena diferença de composição química, com valores de PREN acima de 40, com aspecto geométrico satisfatório do cordão de solda, além da baixa fração de fases secundárias, pode-se esperar que o revestimento de soldagem produzido possa apresentar um desempenho mais aceitável quando for utilizada a técnica da dupla camada, como também foi observado por BARBOSA *et al.*, (2012) e MATIAS *et al.*, (2023). Ainda assim, embora os resultados obtidos nesse trabalho sejam promissores é esperado que modificações em alguns parâmetros como o aporte térmico, tipo de gás de proteção e a utilização de corrente pulsada, possam melhorar ainda mais o desempenho, promovendo resultados que possibilitem ampliar a faixa de frequências capaz obter desempenhos ainda mais satisfatórios, assim como a identificação de zonas seguras de uso.

Por fim, levando em consideração o caráter inovador desse trabalho e que a redução de custos seja indispensável em qualquer projeto é esperado que o processo GMAW-RE seja capaz de substituir o processo GMAW convencional em aplicações de revestimento, pois a menor penetração e menor taxa de diluição podem induzir ao menor número de passes com diluição satisfatória, que resulta em menor custo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

No presente trabalho, buscou-se avaliar de forma comparativa o desempenho dos processos GMAW e GMAW-RE para aplicação de revestimentos soldados de aço inoxidável super austenítico em aço carbono. Com base nos resultados experimentais aqui obtidos pode-se concluir:

a) A frequência de rotação de 300 rpm e 500 rpm combinadas com o diâmetro de rotação de 3 mm foram os parâmetros que apresentaram os melhores resultados para este trabalho;

b) No processo GMAW-RE o aumento da frequência de rotação permitiu obter cordões mais homogêneos e com aumento da largura, concomitantemente com redução tanto da penetração, quanto da altura do reforço do cordão de solda;

c) Os resultados indicam que processo GMAW-RE permite produzir revestimentos com níveis de diluição inferiores ao GMAW convencional, perfil de deposição adequado e baixo percentual de fases secundárias, indicando seu potencial para esta aplicação;

d) Os resultados relacionados à baixa variação na composição química somada a diluição próxima de 14%, ao PREN superior a 40 e aspecto geométrico satisfatório, mostraram-se promissores, tendo em vista o caráter inovador do tema dessa dissertação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados adquiridos no presente estudo, recomendam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

1- Realizar ensaios mecânicos e metalográficos mais detalhados para avaliar a influência da frequência de rotação e do diâmetro de rotação na microestrutura do metal de solda e da ZTA;

2- Realizar uma varredura de dureza por toda a região de grãos grosseiros da ZTA e da região do metal de solda próximo à linha de fusão, a fim de buscar por pontos onde os valores de dureza sejam elevados com objetivo de identificar a zona crítica;

3- Realizar experimentos com alteração no aporte térmico, no gás de proteção e uso de corrente pulsada para uma avaliação do comportamento microestrutural buscando amplificar a faixa de frequências capaz de obter desempenho mais aceitável e identificação de zonas seguras de uso;

4- Realizar experimentos com a técnica de multipasses buscando possíveis melhorias no cordão de solda de uma forma geral, em especial na diluição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, W. M. Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico posterior. Dissertação de mestrado-Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

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.

ANBURAJ J, NazirudeenSSM, Narayanan R, Anandavel B. e Chandrasekar A. Ageing of forged superaustenitic stainless steel: precipitate phases and mechanical properties, Materials Science and Engineering A, 2012; 535:99– 107, 2012a. doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.048

ANBURAJ, J.; CHANDRASEKAR, A.; MOHAMED NAZIRUDEEN, S. S.; NARAYANAN, R.; KUMARAVEL, M.; ANANDAVEL, B. Effect of solution annealing on structure and properties of high Mo superaustenitic stainless steel castings. International Journal of Cast Metals Research, v. 25, n. 5, p. 287-295, 2012b. doi:10.1179/1743133612Y.0000000006

ASTM E384-17 - Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

AWS (American Welding Society). Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods. AWS A5.9/A5.9M:2006, 2006.

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

AZEVEDO, A. G. L. Avaliação da Técnica da Dupla Camada na Recuperação de Peças de Aço ABNT 1045. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, Brasil, 2002.

BAESLACK, W. A.; LIPPOLD, J. C.; SAVAGE, W. F. Unmixed Zones Formation in Austenitic Stainless Steel. Welding Journal, June 1979.

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. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.1346

BANOVIC, S. W.; DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. Dilution and microsegregation in dissimilar metal welds between super austenitic stainless steel and nickel base alloys. Science and Technology of Welding and Joining, v. 7, n. 6, p. 374-383, 2002.

BARBOSA, B. A. R. S.; TAVARES, S. S. M.; COBUCI, A.; MACÊDO, M. C. S. Influence of Microstructure on Pitting Corrosion Resistance of Alloy 904L Superaustenitic Stainless Steel. Corrosion, v. 68, n. 8, p. 739-746, 2012. doi:10.5006/0534

BUNAZIV, I.; OLDEN, V.; AKSELSEN, O. M. Metallurgical Aspects in theWelding of Clad Pipelines – A Global Outlook. Applied Sciences, v. 9, 2019.doi:10.3390/app9153118.

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. doi:10.1590/0104-9224/SI24.11

COSTA, J. F. M. "Comportamento Mecânico, Microestrutural e de Resistência à Corrosão de Revestimentos Soldados com Superliga de Niquel 625 pelo Processo GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE)". Tese de Doutorado, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2023.

DILLENBECK, V. R. and CASTAGNO, L. The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel, Welding Journal, set. 1987, pp 45 – 49.

DUAN, B.; WANG, J. C.; LU, Z. H.; ZHANG, G. X. E ZHANG, C. H. Análise de parâmetros e otimização do processo de soldagem de arco rotativo NG-GMAW. Shandong University, Shandong Province, China, Int j simul model 17 (2018) 1, 170-179. doi.org/10.2507/IJSIMM17 (1)CO4

EDMUR, E.; SOUZA, F. Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento com aço inoxidável austenítico sobre aço ASTM A-36. Monografia de Especialização em Soldagem – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG – Brasil, 2016.

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.

GÓRNIKOWSKA, M. R.; BLICHARSKI, M.; KUSINSKI, J. Influence of weld overlaying methods on microstructure and chemical composition of Inconel 625 boiler pipe coatings. Kovove Materialy, vol. 52, p. 1–7, 2014.

GUEDES, D., Soldagem de Aços Inoxidáveis Superausteníticos do tipo 904L (UNS 08904), 2012.

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.

GUNN, R. N. Duplex stainless steels. Microstructure, properties and applications. Cambridge – England: Abington Publishing, 2003.

IMOA – INTERNATIONAL MOLYBDENIUM ASSOCIATION. Practical Guidelines for the Fabrication of High Performance Austenitic Stainless Steels. London – England, 2010.

JONSSON, P. G., MURPHY, A. B. and SZEKELY, J. Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding Processes, Welding Research Supplement – Welding Journal, Fevereiro de 1995, 48-s 58-s.

JORGE, J. C. F.; MEIRA, O. G.; MADALENA, F. C. A.; DE SOUZA, L. F. G.; ARAUJO, L. S.; MENDES, M. C. Evaluation of the AISI 904L Alloy Weld Overlays Obtained by GMAW and Electro-Slag Welding Processes. Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 26, n. 5, p. 2204–2212, 2017.

JORGE, J. C. F, SOUZA, L. F. G., FARNEZE, H. N. Microstructural evolution of superaustenitic stainless steel weld metal subjected to post welding heat treatment. Mater Lett. 2023; 344:134476. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134476.

JUNIOR, R. O. A.; COSTA, J. F. M.; MAGALHÃES, H. A. Y.; JORGE, J. C. F.; SOUZA, L. F. G.; MENDES, M. C.; COSTA, H. R. M. GMAW process with rotating electrode: an advanced alternative to improve cladding performance, Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, DOI:10.1080/01694243.2023.2270179

KEJELIN, N. Z. Influência dos parâmetros de soldagem na formação de zonas parcialmente diluídas em soldas de metais dissimilares. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Fevereiro, 2006.

KIM, S. J.; HONG, S. G. A study on pitting initiation mechanism of super-austenitic stainless steel weld in chloride environment. Journal of Materials Research, vol. 31, n. 21, p. 3345–3351, 2016.

KOVACH, C. W. High-Performance Stainless Steel. Nickel Institute. Pittisburgh – PA, EUA, 2000.

KUMAR, V.; LEE, C.; VERHAEGHE, G.; RAGHUNATHAN, S. CRA Weld Overlay - Infuence of Welding Process and Parameters on Dilution and Corrosion Resistance. Stainless Steel World America, Houston – Texas, EUA, October 2010.

LABSOLDA, Instituto de Soldagem e Mecatrônica – Universidade Federal de Santa Catarina. Acessado em: setembro 2022. Disponível em: https://labsolda.ufsc.br/perm/si-2020-0019/figure-1ª-video.mp4

LABSOLDA**,** Instituto de Soldagem e Mecatrônica – Universidade Federal de Santa Catarina. Acessado em: setembro 2022. Disponível em: https://labsolda.ufsc.br/perm/si-2020-0019/figure-1b-video.mp4

LEFFLER, B. Stainless – Stainless Steels and their Properties. 2005. Disponível em: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/articles/stainless_steel.pdf

LINNERT, G.E. Welding Metallurgy, Vol.1. American Welding Society, pp.667-693, 1994.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. John Wiley& Sons, EUA, 2005.

LYTTLE, K. A.; STAPON, F. G. Select the Best Shielding Gas Blend for the Application, Welding Journal, novembro de 1990, pp 21 – 28.

MADALENA**,** F. C. A. Estudo Comparativo de Revestimentos Metálicos com as Ligas AISI 904L e Inconel 625 Obtidos pelo Processo de Soldagem Eletroescória. Dissertação de Mestrado; Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2013

MATIAS, J. V. S. Efeitos do Tratamento Térmico Pós-soldagem no Comportamento Microestrutural e de Corrosão de Revestimentos Depositados com o Aço Inoxidável Super Austenítico AISI 904L pelo Processo Eletroescória. Dissertação de Mestrado; Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2021.

MATIAS, J. V. S.; LOURENÇO, M. J. C.; JORGE, J. C. F. Behavior of a superaustenitic stainless steel weld cladding deposited by the gas metal arc welding process. Materials Today Com. 2023; 34:104978. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104978.

MEIRA, O. G. Avaliação de Desempenho da Liga AISI 904L como Material de Revestimento de Equipamentos na Indústria de Óleo e Gás. Dissertação de Mestrado; Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2015.

MODENESI, P. J.; Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2001.

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

MOTA, C.A.M.; NASCIMENTO, A.S.; GARCIA, D.N.; SILVA D.A.S.; TEIXEIRA F.R.; FERRARESI, V.A.; Nickel overlay deposited by MIG welding and cold wire MIG welding. Weld. Int. 2019; 32(9):588–598. Doi: 10.1080/09507116.2017.1347333

MOUGO, A. L.; NETO, F. M. A. B.; GARCIA, D. N. Effect of a cold wire on the metallurgical characteristics of nickel-based welds deposited by GMAW-CW. Trans Indian Inst Met. 2020;73 (10):2425–2434. doi: 10.1007/s12666-020-02068-7.

NAJAFI, M.; BAKHSHAYESH, M. M.; FARZADI, A. Microstructure and phase analysis of multilayer Ni-Cr-Mo clad for corrosion protection. Trans Indian Inst Met 2021;74:1663-1672. doi: 10.1007/s12666-021-02256-z

NELSON, T. W.; LIPPOLD, J. C.; MILLS, M. J. Nature and Evolution of the Fusion Boundary in Ferritic-Austenitic Dissimilar Metal Welds Part 1: Nucleation and Growth. American Welding Society. October, 1999.

NELSON, T. W.; LIPPOLD, J. C.; MILLS, M. J. Nature and Evolution of the Fusion Boundary in Ferritic-Austenitic Dissimilar Metal Welds Part 2: Nucleation and Growth. American Welding Society. October, 1999.

NORRISH, JN. “Advanced Welding Processes Technologies and Process Control”. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England, 2006.

NOURI, M.; ABDOLLAH-ZADEHY, A.; MALEK, F.; Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding. Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box 14115-143, Tehran, Iran – J. Mater. Sci. Technol., Vol.23 No.6, 2007.

Disponível em: https://www.jmst.org/EN/Y2007/V23/I06/817

PAREDES, R. S. C. Aços Inoxidáveis: Metalurgia e Soldabilidade. Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais – LABATS – Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba – PR, Brasil, 2020.

PICCHI, I. B. M. Soldagem dissimilar por eletroescória com fita de chapas de aço carbono cladeado com aço inoxidável 904L e passe de acabamento em Inconel 625. Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.

PRASAD, V., BABU, M., AJAY, P.; A Review on rotating arc welding process, Materials Today: Proceedings 2018; 5:3551-3555.

QUEIROZ, P. R. O. Influência da Energia de Soldagem e do Tecimento Sobre a Geometria do Cordão de Solda na Soldagem de Revestimento. Dissertação de Mestrado; Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, Brasil, 2021.

RAO, S. P.; GUPTA, O. P.; MURTY, S. S. N.; A Study On The Weld Bead 75 characteristics In Pulsed Gas Metal Arc Welding With Rotating Arc.23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada, Junho, 2004.

RIBEIRO, P. P. G.; ASSUNÇÃO, P. D. C., BRAGA, E. M., SANTOS, E. B. F. Influência dos Parâmetros de Soldagem GMAW e GMAW-CW Sobre a Diluição e Relação Reforço/Largura. 67thabminternationalcongress – issn 1516-392X. Rio de Janeiro, RJ, Brasil – 2012.

SAHA, M. K.; DAS, S. GMAW Cladding and its Anti-corrosive Performance – A Brief Review. Athens Journal of Technology and Engineering, v. 5, n. 2, p.155-174, 2018.

SANKAR, N.; MALARVIZHI, S.; BALASUBRAMANIAN, V. Effect of Rotating Arc on Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of Gas Metal Arc Welded Carbon Steel Joints, © ASM International 2021. doi.org/10.1007/s13632-021-00769-z

SANTOS, A. G. M.; BRITO, U. H. O.; FILHO, H. D.; OKUYAMA, M. P.; SCHWEDERSKY, M. B.; SILVA, R. H. G. Processo MIG/MAG com Eletrodo Rotativo: Investigação das Variações Geométricas Mediante a Distintas Frequências. ABS (Associação Brasileira de Soldagem), XLIV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Uberlândia, MG – de 10 a 13 de setembro de 2018.

SANTOS, A. G. M. Análise da Influência da Rotação do Eletrodo no processo MIG/MAG e Estudo para Aplicação em soldagem Narrow Gap. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC – 2019.

SATHIYA, P.; ARAVINDAN, S.; ATJITH, P. M.; ARIVAZHAGAN, B. e NOORUL HAQ A. Microstructural characteristics on bead on plate welding of AISI 904 L super austenitic stainless steel using Gas metal arc welding process, International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010;2(6):189-199.

SENTHILKUMAR, B.; BIRUNDHA, P.; KANNAN, T. Modelling and Simulation of Austenitic Stainless Steel Claddings Deposited by GMAW. International Journal of Scientific & Engineering Research, v. 5, n. 5, p. 363–370, 2014.

SILVA, C. C. Revestimentos de Ligas de Níquel Depositados pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio – Aspectos Operacionais e Metalúrgicos. Tese de Doutorado; Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, Brasil, 2010.

SILVA, R. H. G.; SCHWEDERSKY, M. B.; SANTOS, A. G. M.; Okuyama, M. P. Effects of the rotating arc technique on the GMA welding process. Soldagem & Inspeção. 2020;25:e2519. doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.19

SILVA, W. M; MAIA, R. R.; OGATA, P. H.; CORREIA, F. C.; MORAIS, D. Avaliação do processo de soldagem por deposição de metal regulada em aplicações de revestimento. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada - RBFTA, Ponta Grossa, v. 9, n. 1, p. 16-35, 2022.

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.

SILVEIRA G.M.S., FILHO, W. A. S.;COSTA, J.F. M.; MENDES, M.C.; SOUZA, L.F. G.; JORGE, J.C.F. Influence of rotation frequency and rotation diameter on mechanical properties and microstructure of weld metal produced by MCAW-RE. Int J Adv Manuf Technol 110: 1789–1803, 2020. DOI 10.1007/s00170-020-05961-z

SINGHAL, T. S.; JAIN, J. K. GMAW Cladding on Metals to Impart Anti-corrosiveness: Machine, Processes and Materials. Materials Today: Proceedings, Article in Press: Acepted 13 February 2020.

TCINOX – Fabricante de Tubo Centrifugado Inox. Disponível em: https://tcinox.com.br/acos-super-austeniticos/. Acessado em: Julho 2022.

VOLPI, A.; SERRA, G. Weld Overlay of Highly Corrosion Resistant Nickel Chromium Molybdenum Alloys, UNS N06059, on Low Alloy Equipment Operating at High Temperature. Proceedings of the ASME 2018 Symposium on Elevated Temperature Application of Materials for Fossil, Nuclear, and Petrochemical Industries ETAM2018

WANG, J. Y., REN, Y. S., YANG, F., GUO, H. E.; Novel rotation arc system for narrow gap MAG welding, Science and Technology of Welding and Joining 2007; 12(6):505-507.

ZHANG, H.; CHANG, Q.; LIU, J.; LU, H.; WU, H.; FENG, J. A novel rotating wire GMAW process to change fusion zone shape and microstructure of mild steel. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 2# Wenhua West Road, Weihai 264209, Shandong, China – Materials Letters 123 (2014) 101–103 – http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2014.03.018.