

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Estudo Comparativo de Juntas Soldadas, obtidas
pelos Processos GMAW Convencional e GMAW
com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE)**

Guilherme Mastrange dos Santos Silveira

Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

Coorientador: Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Estudo Comparativo de Juntas Soldadas, obtidas
pelos Processos GMAW Convencional e GMAW
com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE)**

Guilherme Mastrange dos Santos Silveira

Projeto final apresentado em cumprimento
às normas do Departamento de Educação
Superior do CEFET/RJ, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

Coorientador: Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

- S587 Silveira, Guilherme Mastrange dos Santos
Estudo comparativo de juntas soldadas, obtidas pelos processos GMAW convencional e GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE) / Guilherme Mastrange dos Santos Silveira.— 2018.
ix, 58f. : il. (algumas color.) , graf. , tabs. ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 56-58
Orientador : Jorge Carlos Ferreira Jorge
Coorientador : Luís Felipe Guimarães de Souza
Inclui anexos.
1. Engenharia mecânica. 2. Juntas (Engenharia). 3. Soldagem.
4. Soldagem – Testes. I. Jorge, Jorge Carlos Ferreira (Orient.). II. Souza, Luís Felipe Guimarães de (Coorient.). III. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Lívia Lima CRB-7/5904

AGRADECIMENTOS

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

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

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

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

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

Aos professores Jorge Carlos Ferreira Jorge (D. Sc.) e Luis Felipe Guimarães de Souza (D. Sc.) por toda a dedicação na orientação, ensinamentos técnicos e confiança depositada em mim;

Ao Eng. Marcos Lobato, por toda a mentoria, direcionamento e experiência transmitida durante todo este período;

Ao Eng. Jeferson Costa, pela orientação e por me auxiliar na realização de diversas etapas deste projeto;

Ao técnico Paulo Souza, pela experiência passada e pelo fundamental auxílio na execução das soldagens;

À Eng. Katarina Fernandes e ao Eng. Leonardo Borges, pelos ensinamentos e ajuda ao longo do trabalho;

Ao Eng. Walker Filho e ao IFRJ, pela usinagem dos corpos de prova e realização de ensaios;

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

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

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

RESUMO

O processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE) é uma variação do GMAW convencional, em que o arame-eletrodo é submetido a um movimento de rotação ao longo de um diâmetro. Desta forma, é possível alcançar regiões periféricas do chanfro e, portanto, proporcionar uma redução do risco de falta de fusão lateral, viabilizando a soldagem em chanfro estreito e reto. O presente trabalho tem como objetivos avaliar a soldagem pelo processo GMAW com eletrodo rotativo, desenvolver um procedimento de soldagem segundo as especificações do código ASME IX e realizar um estudo comparativo de produtividade e custos em relação ao processo GMAW convencional. Inicialmente, foram realizadas soldagens do tipo cordão sobre chapa para analisar a influência dos parâmetros de frequência e diâmetro de rotação no perfil da solda. Posteriormente, foram soldadas juntas por ambos os processos com níveis de energia similares. A junta soldada pelo GMAW-RE passou pelo ensaio não destrutivo por raios-gama e pelos ensaios mecânicos de tração e dobramento. Os resultados mostraram ser possível obter uma junta soldada livre de defeitos e com propriedades mecânicas adequadas utilizando este processo de soldagem. Em relação à produtividade, obteve-se uma redução de 34% do tempo de soldagem, assim como a redução do número de passes. Obteve-se, ainda, uma economia de cerca de 30% dos custos de soldagem com o processo GMAW com eletrodo rotativo.

Palavras-chave: GMAW com eletrodo rotativo, Custos de Soldagem, Produtividade, Chanfro estreito.

ABSTRACT

The GMAW with Rotating Electrode (GMAW-RE) is a variation of the standard GMAW, in which the welding electrode is subjected to a rotational motion along a diameter. It enables the electrode-wire to reach peripheral regions of the bevel and thus minimize the risk of lateral lack of fusion. That makes Narrow Gap Welding more feasible. The present work aims to evaluate the GMAW with rotating electrode process, to develop a welding procedure according to the specifications of the ASME IX code and to carry out a comparative study of productivity and costs against the standard GMAW process. First, bead-on-plate welding tests were conducted in order to verify the rotating frequency and the rotating diameter influence on the weld beads profile. Afterwards welded joints by both processes were prepared with similar energy levels. The welded joint produced by rotating arc welding process was submitted to the following tests: gamma-rays non-destructive test, tensile and bending mechanical tests. The results showed that it is possible to obtain a welded joint by GMAW-RE free of defects and with adequate mechanical properties. Concerning productivity, the welding time was reduced by 34% and it was also possible to decrease the number of welding layers. Also, the savings of the welding costs were 30% using GMAW with rotating electrode.

Keywords: GMAW with Rotating Electrode, Welding Costs, Productivity, Narrow Gap Welding.

SUMÁRIO

Capítulo 1

Introdução.....	1
-----------------	---

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica	3
2.1. O Processo de Soldagem GMAW com Eletrodo Rotativo	3
2.1.1. Características do Processo	5
2.1.2. Resultados de Soldagens com Eletrodo Rotativo.....	10
2.2. Produtividade e Custos de Soldagem.....	16

Capítulo 3

Materiais e Métodos	23
3.1. Materiais	23
3.1.1. Material de Base	23
3.1.2. Consumível de Soldagem	23
3.2. Procedimento de Soldagem	23
3.2.1. GMAW Convencional.....	25
3.2.2. GMAW com Eletrodo Rotativo.....	26
3.2.3. Sistema de Monitoramento de Soldagem	27
3.3. Testes Preliminares do Processo GMAW com Eletrodo Rotativo	27
3.4. Ensaio Não Destrutivos	28
3.5. Ensaio Mecânicos.....	29
3.5.1. Ensaio de Tração	29
3.5.2. Ensaio de Dobramento.....	30
3.6. Ensaio Metalográficos.....	30
3.7. Análise comparativa entre os processos	31

Capítulo 4

Resultados.....	32
4.1. Testes Preliminares	32
4.1.1. Soldagem de Cordões sobre Chapa	32
4.1.2. Diluição	35
4.1.3. Teste preliminar em chanfro reto.....	36
4.2. GMAW Convencional	36
4.3. GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE).....	38

4.4.	Ensaio Radiográfico.....	39
4.5.	Ensaaios Mecânicos.....	39
4.5.1.	Ensaio de Tração	39
4.5.2.	Ensaio de Dobramento.....	40
4.6.	Ensaaios Macrográficos.....	40
4.7.	Análise comparativa entre os Processos GMAW e GMAW-RE.....	41
4.7.1.	Comparativo de Produtividade	43
4.7.2.	Comparativo de Custos.....	43
Capítulo 5		
	Discussão.....	45
5.1.	Testes Preliminares	45
5.1.1.	Soldagem de Cordões sobre Chapa	45
5.1.2.	Diluição	46
5.1.3.	Teste Preliminar em Chanfro Reto	47
5.2.	Análise comparativa entre os Processos GMAW e GMAW-RE.....	47
5.2.1.	Comparativo de Produtividade	48
5.2.2.	Comparativo de Custos.....	48
Capítulo 6		
	Conclusão	50
	Sugestões para trabalhos futuros	51
	ANEXOS	52
	Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem (RQPS)	52
	Laudo Radiográfico	55
	Referências Bibliográficas	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tocha com Efeito de Rotação do Eletrodo: a) Com bocal / b) Sem bocal.....	3
Figura 2 - Esquema da Tocha com Eletrodo Rotativo [9, adaptado]	4
Figura 3 - Relação entre a Regulagem do Diâmetro de Giro com o Diâmetro de Giro Efetivo [11, adaptado].....	5
Figura 4 - Diâmetro da gota fundida em função da frequência de rotação [9, adaptado]	6
Figura 5 - Taxa de Fusão de Arame em função da frequência de rotação, Flat = Cordão sobre chapa / NGW = Chanfro estreito [9]	7
Figura 6 - Macrografias de cordões de solda com diferentes frequências de rotação [15, adaptado]	7
Figura 7 - Perfil de Penetração em função da Frequência de rotação [15].....	8
Figura 8 - Influência do Eletrodo Rotativo na Geometria do Cordão [15, adaptado]	9
Figura 9 - Efeito do Eletrodo Rotativo na penetração lateral em Chanfro reto [17]	10
Figura 10 - Efeito do Eletrodo Rotativo na penetração lateral em Chanfro reto a) Sem Rotação - b) 50Hz - c) 100Hz - d) 50Hz em uma junta de 50 mm de espessura [9].....	10
Figura 11 - Micrografia do Metal de Solda 1) GMAW convencional / 2) GMAW Pulsado com Eletrodo Rotativo [18].....	11
Figura 12 - Junta de aço de alta resistência soldada pelo GMAW-RE [12].....	12
Figura 13 - Ensaio de Dureza na junta soldada pelo processo GMAW-RE [12, adaptado].....	12
Figura 14 - Imagem do arco em diferentes momentos no chanfro [19]	13
Figura 15 - Oscilação lateral para soldagem com eletrodo rotativo [19]	14
Figura 16 - Diferença do perfil de penetração em cada parede do chanfro [19]	14
Figura 17 - Soldagem GMAW-RE e SAW [17, adaptado]	15
Figura 18 - Parcelas que compõe o Custo de soldagem [1].....	17
Figura 19 - Eficiência de Fusão e do Arco elétrico dos processos de soldagem [23, adaptado]	19
Figura 20 - Velocidade de soldagem de acordo com o processo [23, adaptado]	19
Figura 21 - Custo de consumível pelo tamanho da perna, em juntas de ângulo [21].....	21
Figura 22 - Material depositado por geometria do chanfro [20, adaptado].....	21
Figura 23 - Análise do Gás de Proteção	24
Figura 24 - Montagem dos equipamentos à esquerda. Controladores dos equipamentos à direita.....	24
Figura 25 - Croqui da Junta convencional.....	25

Figura 26 - Junta Convencional montada	25
Figura 27 - Croqui da junta GMAW-RE	26
Figura 28 - Junta em chanfro reto montada	26
Figura 29 - Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem - Maleta SAP	27
Figura 30 - Disposição dos corpos de prova, segundo o ASME IX [7]	29
Figura 31 - Representação dos corpos de prova para ensaio de tração, segundo o ASME IX [7, adaptado]	30
Figura 32 - Representação dos corpos de prova para ensaio de dobramento, segundo ASME IX [7, adaptado].....	30
Figura 33 – Matriz das Macrografias dos Cordões Sobre chapa.....	33
Figura 34 - Gráfico Diâmetro de Rotação x Perfil do Cordão.....	34
Figura 35 - Gráfico: Frequência de Rotação x Perfil do cordão.....	34
Figura 36 - Representação da diluição em cordão de solda [24].....	35
Figura 37 - Macrografia da Junta preliminar GMAW-RE	36
Figura 38 - GMAW convencional: Aspecto Visual do passe de raiz.....	37
Figura 39 - GMAW convencional: Aspecto visual do passe de acabamento. Sem limpeza....	37
Figura 40 - GMAW-RE: Aspecto visual do passe de raiz.....	38
Figura 41 - GMAW-RE: Aspecto visual do passe de acabamento. Sem limpeza.....	39
Figura 42 - Corpos de prova de tração	40
Figura 43 - Corpos de prova de Dobramento – a) Raiz / b) Face.....	40
Figura 44 - Análises Macrográficas – Esquerda (a) Junta 1 (GMAW) / Direita (b) Junta 2 (GMAW-RE).....	41
Figura 45 - Oscilogramas de Tensão e Corrente do GMAW-RE.....	42
Figura 46 - Oscilogramas de Tensão e Corrente do GMAW	42
Figura 47 - Gráfico dos componentes do custo de Soldagem	44
Figura 48 - Projeção dos respingos em função da frequência de rotação. Esquerda: 1500rpm / Direita: 3000 rpm	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas de junta soldada pelo processo GMAW-RE [12, adaptado]	13
Tabela 2 - Resultados dos Ensaios de impacto [12, adaptado].....	13
Tabela 3 - Resultado das Propriedades Mecânicas da Junta Híbrida – GMAW-RE e SAW [17, adaptado].....	15
Tabela 4 - Resultados Ensaio de Impacto Junta Híbrida [17, adaptado].....	15
Tabela 5 - Composição Química do Consumível de Soldagem, segundo Fabricante.....	23
Tabela 6 - Testes preliminares GMAW-RE - cordões sobre chapa.	28
Tabela 7 - Medição dos Cordões sobre Chapa, soldados pelo GMAW com Eletrodo rotativo.....	32
Tabela 8 - Diluição dos Cordões sobre chapa. Unidades: mm ²	35
Tabela 9 - Parâmetros de Soldagem da Junta preliminar GMAW-RE.....	36
Tabela 10 - Parâmetros de Soldagem da Junta 1 - GMAW Convencional	37
Tabela 11- Parâmetro de Soldagem da Junta 2 – GMAW-RE.....	38
Tabela 12 - Resultado dos Ensaios de Tração	39
Tabela 13 - Comparativo de Produtividade por metro de junta	43
Tabela 14 - Comparativo de custos de soldagem	43

Capítulo 1

Introdução

A soldagem é o principal processo industrial utilizado para a união e fabricação de peças metálicas, pois permite a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material [1; 2]. De maneira geral, a escolha do processo de soldagem dentre os diversos existentes, leva em consideração os seguintes aspectos: a facilidade operacional, a empregabilidade e versatilidade de aplicação, sejam para diferentes materiais, espessuras e/ou adequações ao meio, e, principalmente, a produtividade. A produtividade é uma forma de buscar uma maior competitividade no mercado. Ela está relacionada a maior capacidade de produção e a redução de custos, sendo estas as principais motivações para o desenvolvimento científico e tecnológico, tanto por incentivo da indústria quanto para a área acadêmica [3].

O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) possui destaque na indústria por apresentar diversos dos aspectos citados. Além de apresentar elevada produtividade, o GMAW permite soldas de boa qualidade. Este processo é caracterizado por possibilitar a soldagem em todas as posições, proporcionar altas taxas de deposição, altas velocidades de soldagem, baixo índice de respingos, fácil ajuste do perfil de penetração e facilidade de automatização do processo. [4, 5] Ademais, o mercado dispõe de um grande portfólio de consumíveis, gases de proteção, tochas e materiais em geral para a aplicação deste processo, o que facilita sua implantação. O GMAW é amplamente utilizado nas indústrias automotiva, naval e ferroviária, bem como na fabricação de equipamentos de médio e grande porte, como pontes rolantes, escavadeiras, tratores, vasos de pressão, entre outros [1].

O objeto de estudo deste projeto final é o processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE ou *SpinArc*TM), uma variação ao GMAW convencional, em que uma tocha específica confere ao arame eletrodo um movimento de rotação, permitindo inclusive o ajuste da frequência e diâmetro do giro [6]. Este processo apresenta características vantajosas em termos de produtividade e custo, principalmente por estar atrelado ao uso de chanfros estreitos (“Narrow Gap”). Ainda é pouca, todavia, a literatura disponível sobre a soldabilidade e propriedades mecânicas de juntas soldadas por este processo, o que justifica o desenvolvimento de uma pesquisa para o melhor conhecimento do processo [6]. Ademais, o projeto busca avaliar as dificuldades de controle sobre o processo, e, portanto, a viabilidade de aplicação na indústria.

Em linhas gerais, os principais objetivos deste projeto são a qualificação de um novo

procedimento de soldagem com a utilização do processo GMAW com eletrodo rotativo, a partir de um procedimento já empregado na indústria pelo processo GMAW convencional; e a realização de uma análise comparativa de produtividade e custo entre os dois processos. Os pontos discutidos ao longo do projeto são:

- a) Qualificar um Procedimento de Soldagem (EPS) para o GMAW com eletrodo rotativo, segundo o código ASME IX [7]. Esta EPS será utilizada como base no processo de fabricação de vasos de pressão da White Martins, para transporte de CO₂ líquido;
- b) Substituir o procedimento de soldagem atual da fabricação de vasos de pressão de CO₂, visando ganho de produtividade e redução de custos;
- c) Avaliar a soldabilidade de juntas pelo processo GMAW com tecnologia de eletrodo rotativo utilizando Chanfro estreito e reto;
- d) Desenvolver o processo GMAW com eletrodo rotativo e avaliar a influência dos parâmetros frequência de rotação e diâmetro de rotação na soldagem, através de testes preliminares de soldagem;
- e) Análise comparativa entre os processos e viabilidade de aplicação;

O procedimento homologado utilizado como base neste projeto final segue os requisitos do código ASME IX, sendo usado para a fabricação de vasos de pressão. O metal de base referido na EPS é um aço de alta resistência temperado e revenido, entretanto, por se tratar de um primeiro estudo sobre o processo GMAW-RE, este projeto utiliza de um aço C-Mn como metal de base.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. O Processo de Soldagem GMAW com Eletrodo Rotativo

O processo GMAW com eletrodo rotativo surgiu como uma variação do GMAW convencional. O diferencial deste processo é a tocha de soldagem, que confere ao arame eletrodo (e, conseqüentemente, ao arco elétrico) uma rotação ao longo de um diâmetro [6; 8]. A Figura 1 mostra o efeito de rotação do arame neste processo.

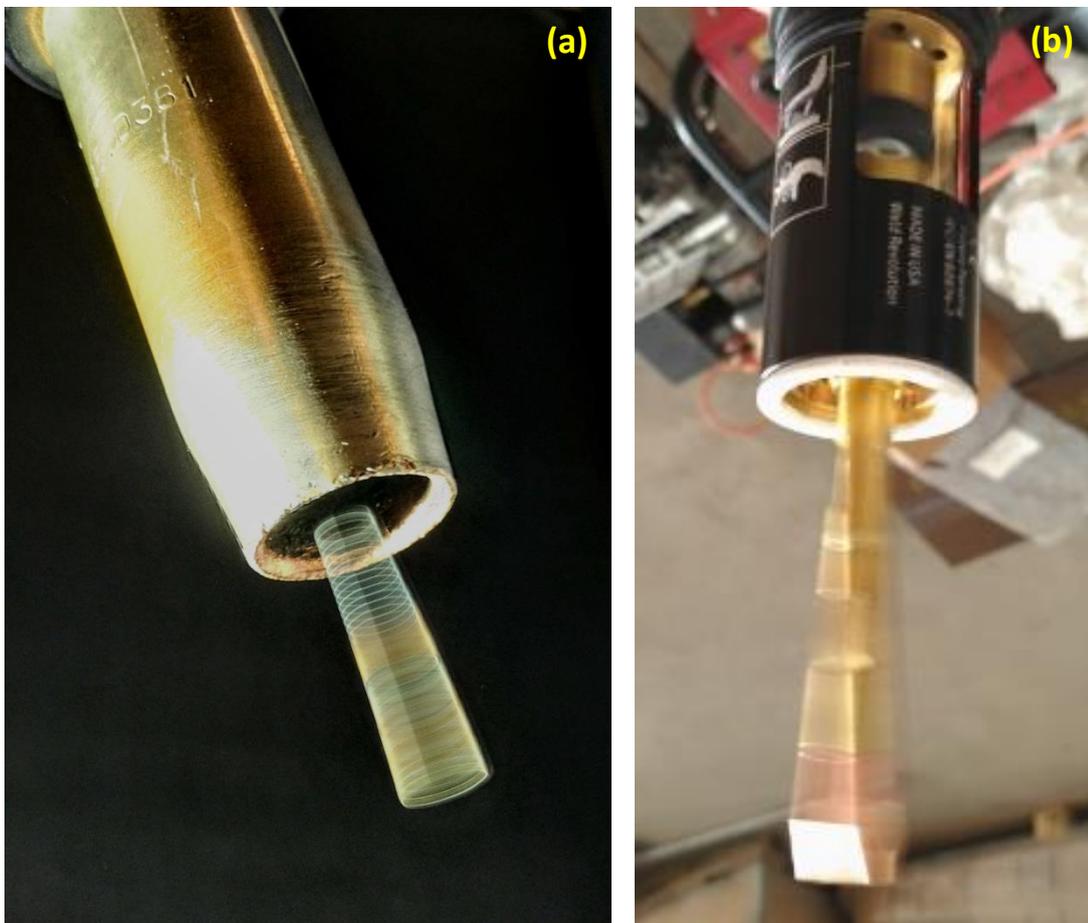


Figura 1 – Tocha com Efeito de Rotação do Eletrodo: a) Com bocal / b) Sem bocal

O sistema da tocha de soldagem é formado por um motor, que proporciona movimento de rotação a um bloco de rolamento excêntrico. Uma haste condutora é conectada ao excêntrico e presa a um flange em forma de anel, resultando em uma rotação cônica. Por fim, o bico de contato é rosqueado na outra extremidade da haste [9].

Durante a soldagem, o arame segue o seguinte percurso dentro da tocha: passa pelo interior do motor, em seguida pelo bloco de rolamento excêntrico, pela haste e por fim pelo bico de contato. Não há movimento relativo entre o bico de contato e o arame, isto é, não há torção do arame-eletrodo [9; 10]

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

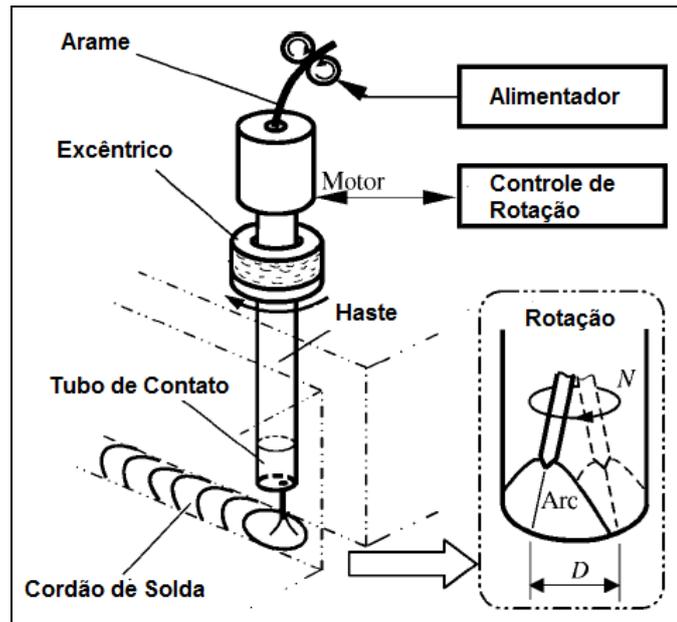


Figura 2 - Esquema da Tocha com Eletrodo Rotativo [9, adaptado]

Quando comparado ao processo GMAW convencional, o GMAW com Eletrodo Rotativo possui três parâmetros reguláveis adicionais [11]:

- Frequência (ou velocidade) de rotação: 0 a 5500 rpm (0 a 91,67Hz);
- Sentido de rotação: horário ou anti-horário;
- Diâmetro de rotação: 1 a 8.

Os valores do diâmetro de rotação, de acordo com o fabricante, representam o diâmetro formado pelo eletrodo, quando este está com 25 mm de comprimento para fora do tubo de contato e a frequência de rotação está regulada a 1000 rpm, conforme mostrado na Figura 3 [11].

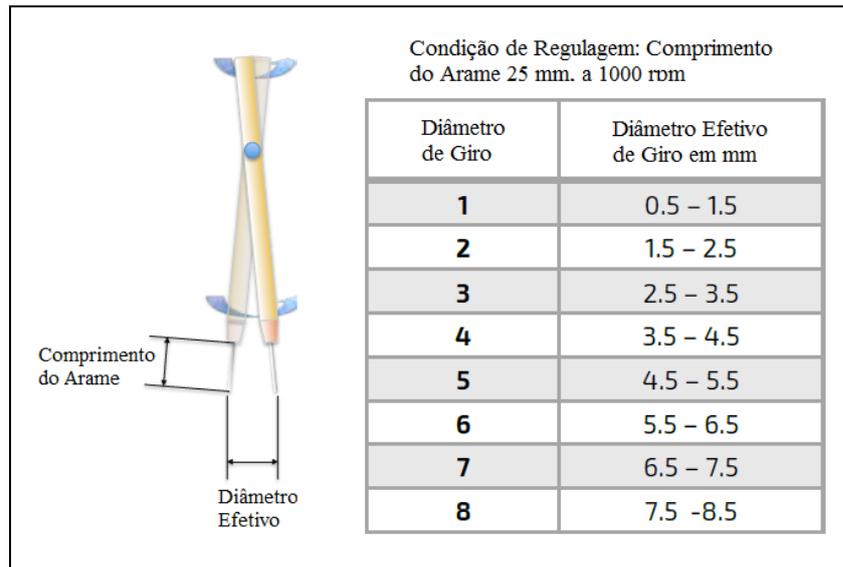


Figura 3 - Relação entre a Regulagem do Diâmetro de Giro com o Diâmetro de Giro Efetivo [11, adaptado]

2.1.1. Características do Processo

As principais premissas deste processo são o aumento de produtividade e redução de custos de soldagem, possíveis devido às seguintes características associadas: garante altas taxas de deposição, permite a redução ou eliminação do chanfro e o uso de juntas com chanfro estreito (Narrow Gap) [6].

A soldagem em juntas com chanfro reto e estreito (Narrow Gap Welding) é caracterizada pela elevada eficiência e qualidade [6]. Suas principais aplicações são na fabricação de navios, vasos de pressão e estruturas metálicas [9]. As vantagens atreladas ao processo são a redução do volume de material depositado, redução do tempo de soldagem, [12].

O grande desafio da soldagem de juntas com chanfro reto e estreito é garantir penetração lateral o suficiente nas paredes do chanfro. A complexidade e dificuldades de controle do GMAW com eletrodo rotativo em muitos casos se associam às do uso de chanfro estreito. Os principais defeitos encontrados são a falta de fusão na raiz e inclusão de escória entre passes [13].

De acordo com MURAYAMA et al. [14], a tolerância deste processo em relação à variação do chanfro é pequena, uma vez que não é possível mudar o diâmetro de rotação durante a soldagem. Portanto, caso ocorra uma diminuição da abertura do chanfro em alguma região ou se utilize um grande diâmetro de rotação, o arco elétrico tenderá a subir nas paredes do chanfro, gerando instabilidade na soldagem e falta de fusão [13, 14].

Por outro lado, quando bem empregado, o processo com eletrodo rotativo se mostra o mais prático para este tipo de chanfro. Isso pode ser explicado pelo fato de que neste processo de soldagem, as gotas do metal de adição estão sujeitas a uma força centrífuga, além das forças eletromagnética e gravitacional, comum aos demais processos de soldagem ao arco elétrico. Esta força centrífuga, criada pela frequência de rotação do arame-eletrodo, direciona de forma angular as gotas de metal fundido para as paredes da junta [6, 9]

Outro efeito da frequência de rotação é a alta taxa de fusão do metal de adição. A intensidade da força centrífuga aumenta proporcionalmente à velocidade de giro do arame eletrodo, tornando menor o tamanho das gotas de metal fundidos desprendidas, conforme mostra a Figura 4. Deste modo, a quantidade de calor necessária para fundir estas gotas também é menor, sendo possível obter maiores taxas de fusão, como mostra a Figura 5 [9].

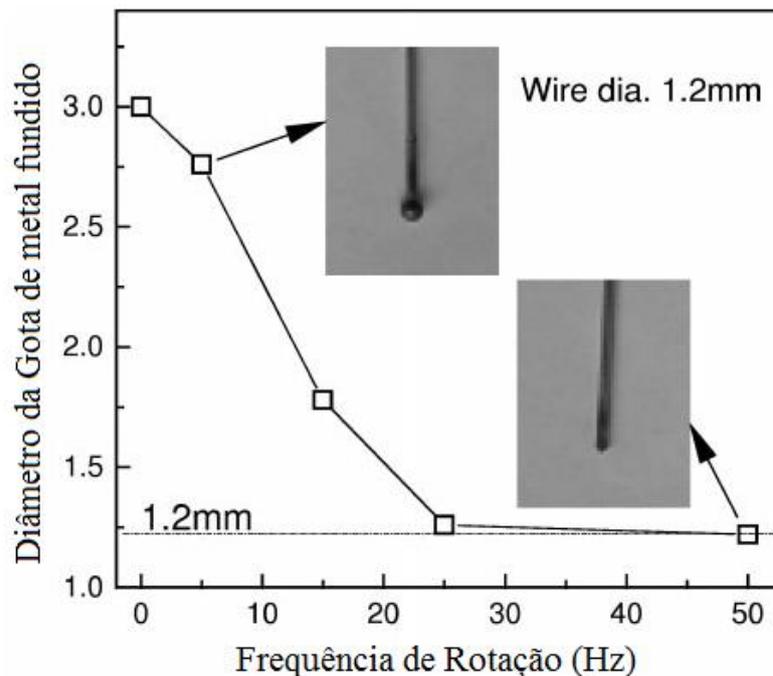


Figura 4 - Diâmetro da gota fundida em função da frequência de rotação [9, adaptado]

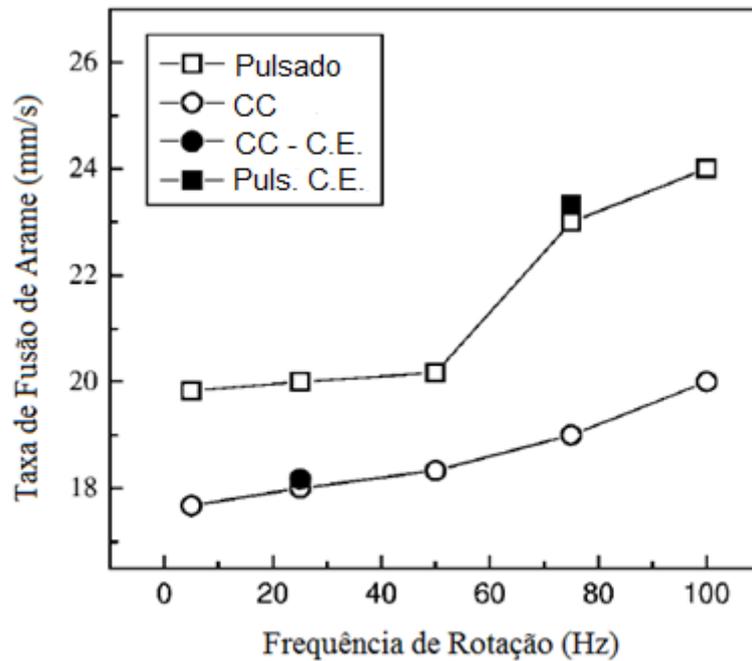


Figura 5 - Taxa de Fusão de Arame em função da frequência de rotação, C.E – Chanfro Estreito; CC – Corrente Contínua [9]

Em um trabalho realizado por SRINIVASA RAO et al. [15], foi investigado o efeito da frequência de rotação do arco elétrico no perfil de penetração de cordões sobre chapa. O perfil foi caracterizado a partir da medição de sua largura, sua penetração e sua altura (ou reforço), com o diâmetro de rotação fixado em 6 mm e com as frequências de 550, 750, 920, 1050, 1300rpm e sem rotação. A Figura 6 mostra os resultados das macrografias e a Figura 7 das medições.

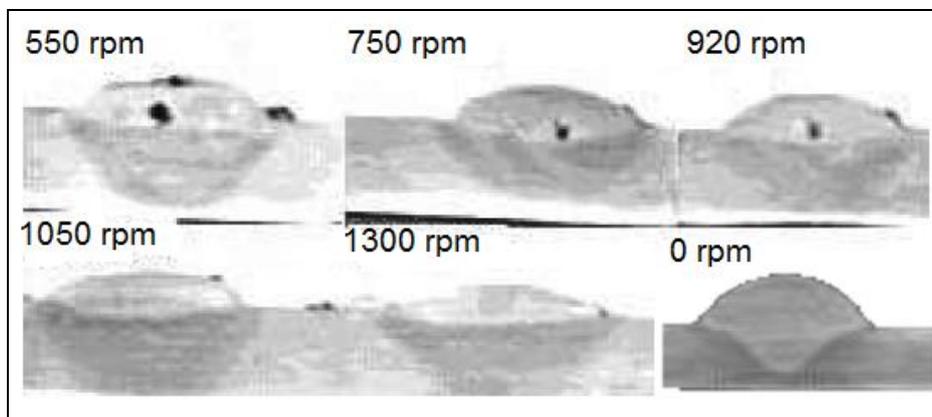


Figura 6 - Macrografias de cordões de solda com diferentes frequências de rotação [15, adaptado]

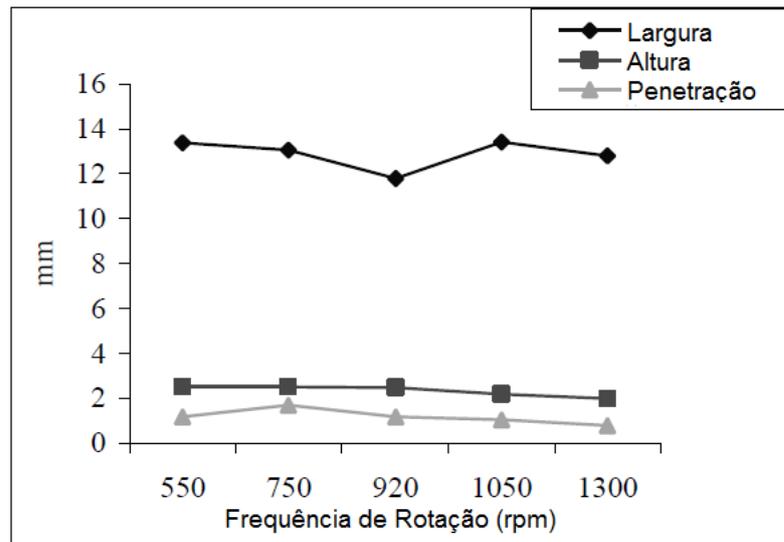


Figura 7 - Perfil de Penetração em função da Frequência de rotação [15]

Na Figura 6, pode-se observar que o parâmetro de rotação garante uma penetração mais superficial e uniforme, evitando o perfil com forma de “dedo”. Isso ocorre pelo fato que o processo favorece uma poça de fusão mais larga e de que as gotas de metal de adição são depositadas em uma área maior [15].

KUMAR et al. [16] realizaram um estudo semelhante, ao investigar os efeitos do eletrodo rotativo no perfil de cordões solda sobre chapas de alumínio. Foram medidas as larguras, as alturas e as penetrações de 81 cordões de solda. A partir dos dados, criou-se um modelo matemático para descrever a penetração (P) e convexidade (C) do cordão, com base na frequência de rotação N (rpm), na excentricidade E (diâmetro de rotação – mm), na taxa de alimentação de arame F (m/min) e na razão X entre a taxa de alimentação e velocidade de soldagem. As equações do modelo matemático são descritas da seguinte forma:

$$P = \frac{0,0231X^{0,693} \cdot F^{2,5005}}{N^{0,2219} \cdot E^{0,9698}} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{0,7168X^{0,2030}}{N^{0,2219} \cdot E^{0,9698} \cdot F^{0,1797}} \quad (2.2)$$

A partir das equações, verifica-se que a excentricidade e a frequência de rotação são inversamente proporcionais à penetração e à convexidade do cordão. Ademais, observou-se que quanto maiores os valores destes parâmetros, a largura do cordão também ampliará. [6, 16]. Na Figura 8 é representada a influência do Eletrodo Rotativo na geometria do cordão de solda.

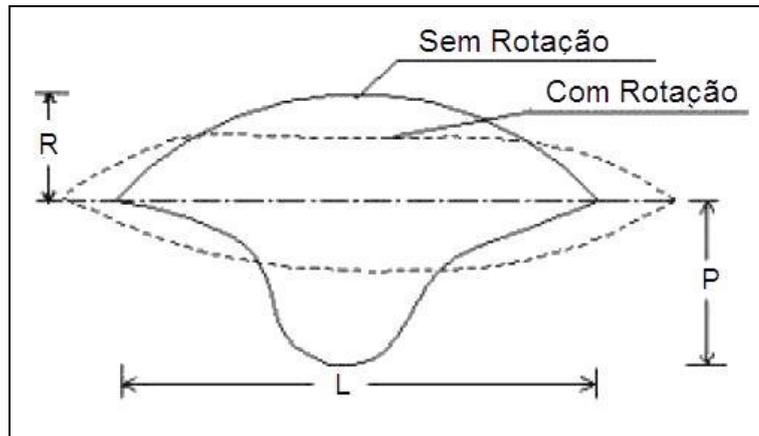


Figura 8 - Influência do Eletrodo Rotativo na Geometria do Cordão [15, adaptado]

ITAWA [17] e WANG [9] realizaram um estudo semelhante, porém avaliando o perfil de penetração lateral em um chanfro reto. Foi observado que, na soldagem sem rotação, a penetração se concentra no centro do chanfro e, como consequência, pode ocorrer falta de fusão lateral. Todavia, conforme a rotação do eletrodo é adicionada, constata-se que a penetração lateral se expande e o cordão apresenta maior concavidade em seu perfil, ideal para a soldagem em chanfro [15, 17]. As Figuras 9 e 10 mostram os resultados das macrografias dos testes de ITAWA e WANG, respectivamente. Novamente, verifica-se o perfil de dedo para a soldagem sem eletrodo rotativo.

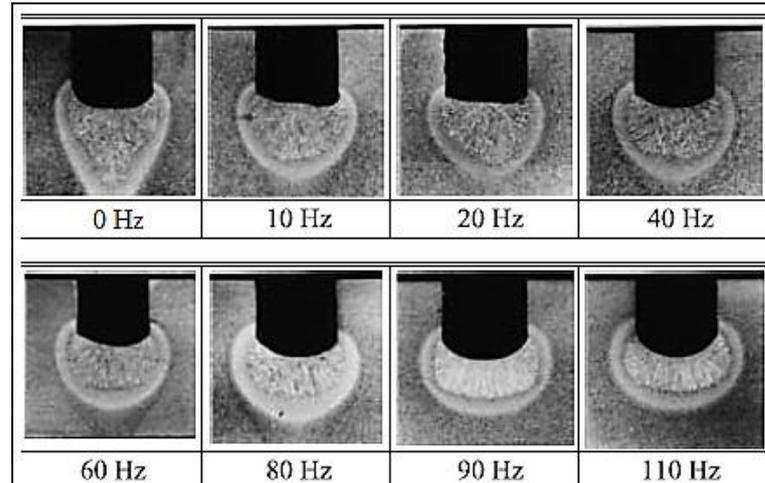


Figura 9 - Efeito do Eletrodo Rotativo na penetração lateral em Chanfro reto [17]

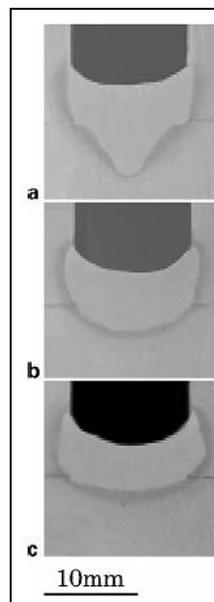


Figura 10 - Efeito do Eletrodo Rotativo na penetração lateral em Chanfro reto a) Sem Rotação - b) 50Hz - c) 100Hz [9]

2.1.2. Resultados de Soldagens com Eletrodo Rotativo

RAJU et al. [18] compararam as propriedades mecânicas e o perfil de penetração de juntas soldadas pelos processos GMAW convencional e GMAW pulsado com eletrodo rotativo. O metal de base utilizado foi a liga de alumínio 6061-T6 e as juntas foram preparadas com 0,5mm de abertura e chanfro reto. Foram realizados ensaios metalográficos (Figura 11) e ensaios mecânicos de tração e dureza Vickers nos corpos de prova.

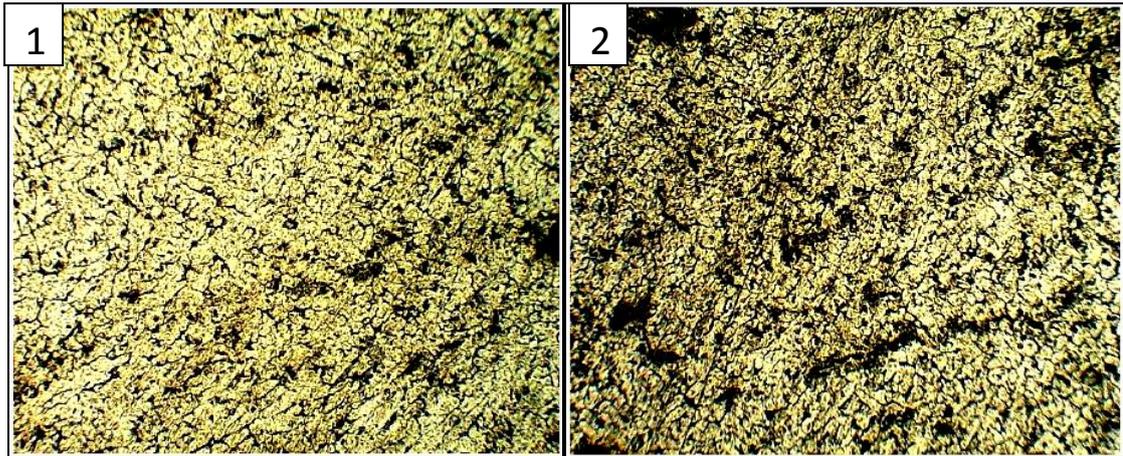


Figura 11 - Micrografia do Metal de Solda 1) GMAW convencional / 2) GMAW Pulsado com Eletrodo Rotativo [18]

A junta soldada pelo processo GMAW pulsado com eletrodo rotativo apresentou resultados maiores nos ensaios mecânicos: 187,22 MPa de resistência mecânica e 69,87 HV de dureza; contra 185,99 MPa de resistência mecânica e 67,50 HV do processo GMAW convencional. O motivo foi atribuído ao maior refino do constituinte eutético Al-Si com o processo GMAW-RE. Os autores também observaram um melhor perfil de penetração para o processo com eletrodo rotativo. [18].

MIN et al. [12] avaliaram as propriedades mecânicas de uma junta soldada pelo processo GMAW com eletrodo rotativo em aço temperado e revenido 10Ni5CrMoV. A soldagem foi realizada na posição plana 1G, com chanfro reto (Figura 12). Os autores enfatizam a influência da rotação do arco elétrico na geometria do cordão. Para evitar a falta de fusão nas paredes do chanfro, recomenda-se o cordão com o perfil côncavo, em concordância com ITAWA et al. [17]. A junta soldada está representada na Figura 12.

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas de junta soldada pelo processo GMAW-RE [12, adaptado]

Material	Resistencia Mecânica (MPa)	Alongamento (%EI)	Dobramento 180°	
			Face	Raiz
10Ni5CrMoV	864,3	15	Sem defeitos	Sem defeitos

Tabela 2 - Resultados dos Ensaios de impacto [12, adaptado]

Material	Ensaio Impacto Charpy-V -50°C (J)					
	Superfície		Meio		Fundo	
	Metal de Solda	ZTA	Metal de Solda	ZTA	Metal de Solda	ZTA
10Ni5CrMoV	95	203	89	152	88	124

Li et al. [19] realizaram soldagens com o processo buscando criar um modelo matemático para descrever a penetração lateral em chanfro reto de 20 mm de profundidade. Para isto, utilizaram recursos de filmagem para obter imagens no interior do chanfro, de modo a detectar o comportamento do arco nas paredes. Os resultados são mostrados na Figura 14.

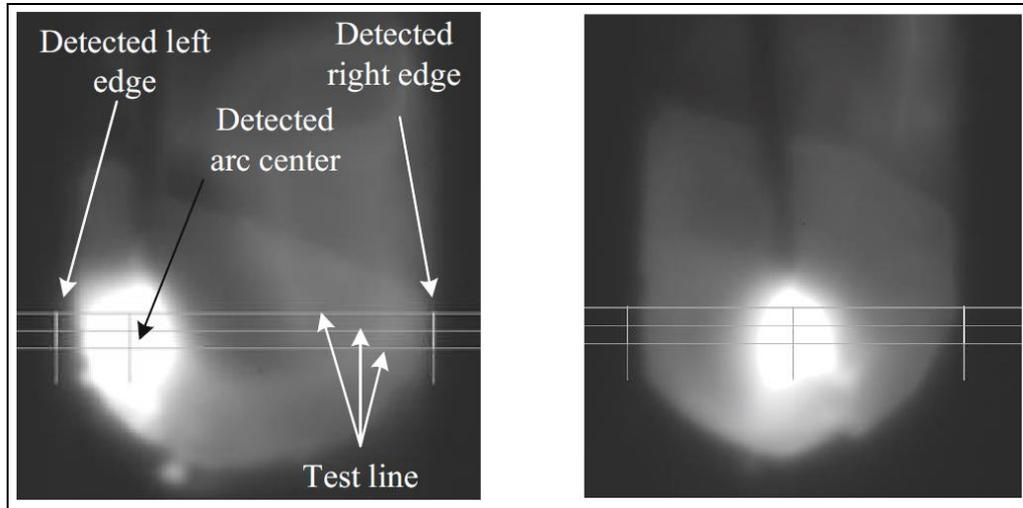


Figura 14 - Imagem do arco em diferentes momentos no chanfro [19]

Foi utilizado o recurso de oscilação lateral com diferentes configurações para a construção do modelo dinâmico, como pode ser visto na Figura 15. Os resultados de penetração da parede esquerda e direita do chanfro apresentaram padrões diferentes, sendo necessário criar um modelo para cada lado. Houve maior variação na penetração da parede esquerda por causa do sentido de rotação do arame-eletrodo (Figura 16) [19].

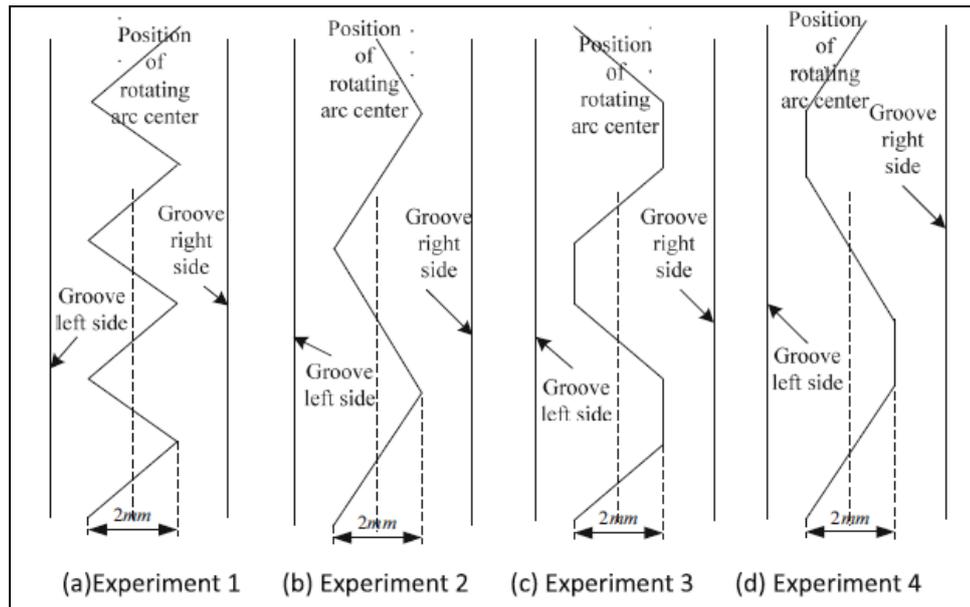


Figura 15 - Oscilação lateral para soldagem com eletrodo rotativo [19]

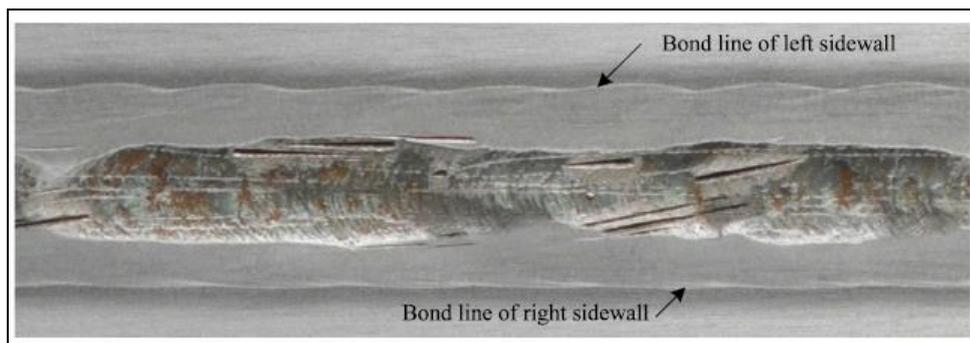


Figura 16 - Diferença do perfil de penetração em cada parede do chanfro [19]

Um processo de soldagem híbrido combinando os processos GMAW com eletrodo rotativo e arco submerso (SAW) foi desenvolvido por ITAWA et al [17]. A soldagem é aplicada na junção de chapas de 95 mm de espessura do aço ASTM SA440, para a fabricação de colunas estruturais em forma de caixa. Como mostra a Figura 17, destinou-se 65 mm da espessura para a soldagem com eletrodo rotativo (chanfro reto e 15 mm de abertura) e 30mm para o arco submerso (chanfro de 35°), com o objetivo de otimizar o procedimento. Foram avaliadas as propriedades mecânicas de cada uma das regiões, através de ensaios de tração e impacto Charpy-V. Os resultados são mostrados nas Tabelas 2 e 3.

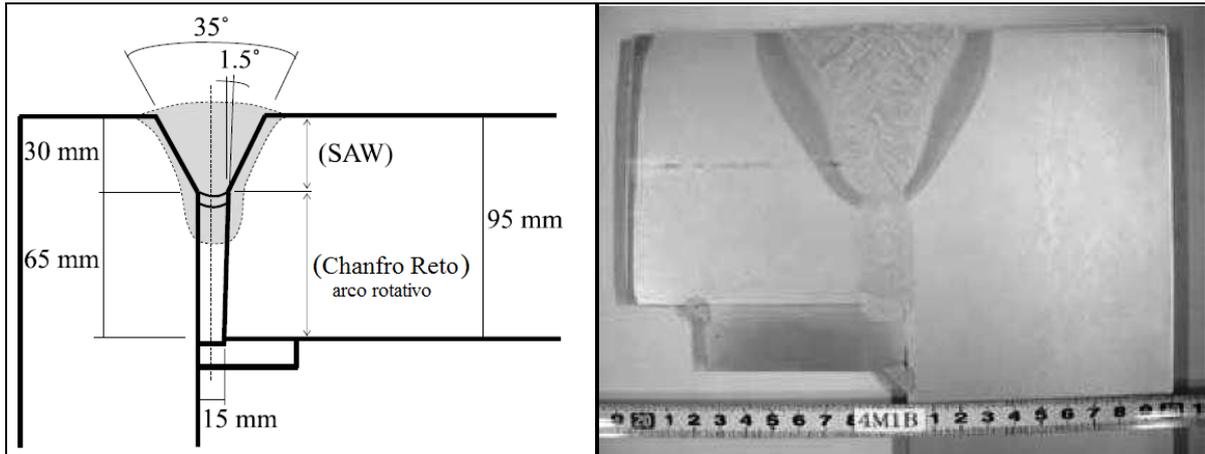


Figura 17 - Soldagem GMAW-RE e SAW [17, adaptado]

Tabela 3 - Resultado das Propriedades Mecânicas da Junta Híbrida – GMAW-RE e SAW [17, adaptado]

Posição das amostras	Número	Tensão de Escoamento (N/mm ²)	Resistência Mecânica (N/mm ²)	Alongamento EI (%)
Metal depositado (SAW)	1	552	647	24
	2	563	648	25
Metal depositado (Fronteira)	1	533	617	26
	2	558	627	24
Metal depositado (Eletrodo Rotativo)	1	657	690	24
	2	674	686	24
Requisitos	-	-	> 590	-

Tabela 4 - Resultados Ensaio de Impacto Junta Híbrida [17, adaptado]

Posição das amostras	Impacto: V-0°C (J)			
	1	2	3	Média
Metal depositado (SAW)	132	110	123	122
Metal depositado (Fronteira)	148	117	160	141
Metal depositado (Eletrodo Rotativo)	79	87	89	85
Junção da solda (SAW)	115	121	94	110
Junção da solda (Fronteira)	99	156	162	139
Junção da solda (Eletrodo Rotativo)	203	205	187	198
Requisitos	-	-	-	> 70

2.2. Produtividade e Custos de Soldagem

O processo GMAW, quando comparado a outros processos de soldagem, pode oferecer redução de custos consideráveis [20]. Em relação ao processo de soldagem com eletrodos revestidos, por exemplo, o processo GMAW oferece maior taxa de deposição, alto fator de operação, grande versatilidade de aplicação em diferentes materiais e espessuras e ausência de operações para remoção de escória [1]. Esta parte do capítulo aborda os temas de produtividade e custos de soldagem e serve como base da metodologia e dos cálculos utilizados nos experimentos deste projeto. Além disso, situa a importância do processo GMAW no cenário dos processos de soldagem, quando se trata destas questões.

De acordo com LOBATO [21], a produtividade na soldagem está relacionada à quantidade de metal de adição depositado, em massa (kg) ou volume (m³), em um determinado período de tempo (em horas). O tempo de soldagem é normalmente substituído pela quantidade de Homens-hora (Hh), de modo a considerar todas as etapas da soldagem, incluindo tempo de preparação, limpeza entre passes e o tempo de arco aberto. Um indicador que permite observar o quão produtivo está o procedimento de soldagem e o quanto pode ser melhorado é o Fator de Operação, mostrado na equação 2.3.

$$\text{Fator de Operação (\%)} = \frac{\text{Tempo de arco aberto (\%)}}{\text{Tempo total de soldagem (\%)}} \quad (2.3)$$

Este indicador mostra o tempo em que o soldador está efetivamente soldando [21]. Como pode ser visto na Figura 18, os custos com a mão de obra (Hh) representam a parcela com maior peso na distribuição dos custos de soldagem, cerca de 80%. A partir de então, verifica-se a importância da estimativa do fator de operação. Por outro lado, este indicador não deve ser considerado isoladamente de outras variáveis de desempenho de um procedimento de soldagem. Por exemplo, o processo TIG normalmente apresenta alto fator de operação quando comparado ao MIG/MAG, porém com uma taxa de deposição inferior, resultando em uma menor produtividade [21].



Figura 18 - Parcelas que compõe o Custo de soldagem [1]

Outro conceito que deve ser incorporado para uma análise de produtividade mais precisa é a Taxa de Deposição. Segundo Myers [22], a típica taxa de deposição para o processo GMAW varia entre 3,6 e 4,5 kg/h. Este indicador está associado a outros dois: a Taxa de Fusão e a Eficiência de Deposição, segundo a equação 2.4 [21].

$$\text{Taxa de Deposição} \left(\frac{kg}{h} \right) = \text{Taxa de Fusão} \left(\frac{kg}{h} \right) \times \text{Eficiência de Deposição}(\%) \quad (2.4)$$

Onde:

a) Taxa de Fusão: É definida pela quantidade de metal de adição consumido pelo tempo de arco aberto, calculada pela equação 2.5. Está associada a eficiência do arco elétrico, definida por Dupont [23] como a energia total do arco elétrico direcionada ao substrato; e à eficiência de fusão, definida como a razão entre a quantidade de energia que realmente é fornecida para a fusão e a quantidade de energia direcionada ao substrato [23].

$$\text{Taxa de Fusão} \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{\text{metal de adição consumido (kg)}}{\text{Tempo de arco aberto (h)}} \quad (2.5)$$

b) Eficiência de Deposição: É definida pela quantidade de metal de adição que efetivamente compõe o cordão de solda pela quantidade total de metal de adição consumido. A eficiência de deposição para o processo GMAW varia entre 95% a 98%, segundo Myers [22]. Pode ser calculada conforme a equação 2.6:

$$Eficiência (\%) = \frac{massa\ do\ cp\ antes\ (g) - massa\ do\ cp\ depois\ (g)}{massa\ total\ de\ metal\ de\ adição\ utilizada\ (g)} \times 100 \quad (2.6)$$

Por fim, deve-se considerar a velocidade de soldagem. Este parâmetro está diretamente relacionado à taxa de deposição, pois quanto mais material o processo permite depositar, maior será a velocidade de soldagem possível. A equação 2.7 mostra como esse parâmetro pode ser calculado:

$$Velocidade\ de\ soldagem\ \left(\frac{mm}{min}\right) = \frac{comprimento\ do\ cordão\ (mm)}{Tempo\ de\ arco\ aberto\ (min)} \quad (2.7)$$

Considerando os indicadores acima, o processo GMAW se destaca dentre outros, pois permite maiores velocidades de soldagem e altas taxas de deposição. A Figuras 19 mostra a eficiência do arco elétrico e eficiência de fusão e a Figura 20, a velocidade de soldagem relativas aos processos de soldagem mais comuns, respectivamente [23]. Por conseguinte, juntamente com outras características, associa-se este processo de soldagem à alta produtividade.

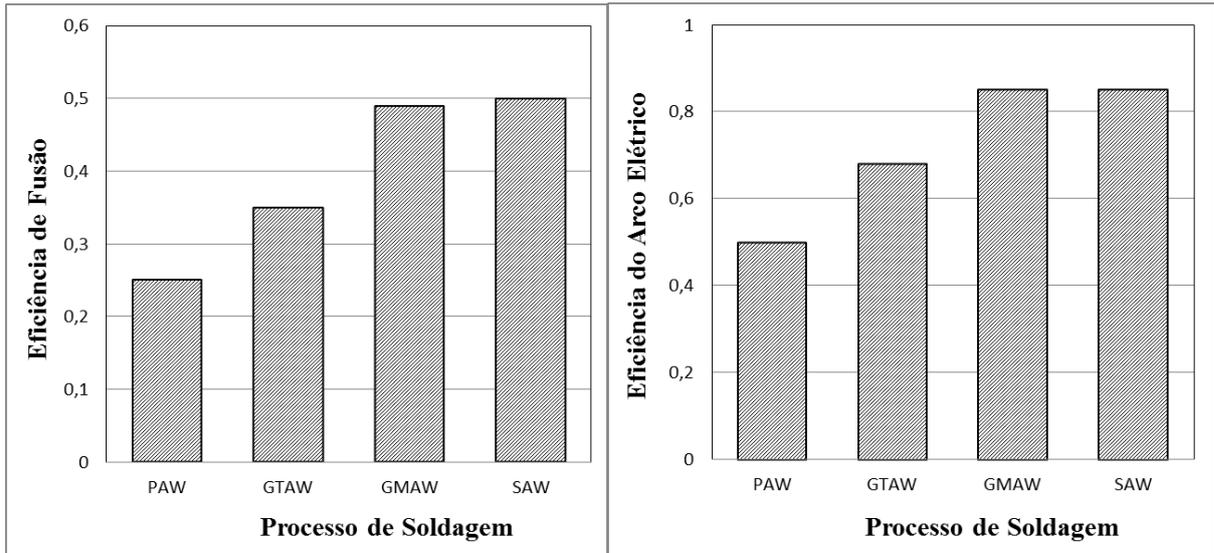


Figura 19 - Eficiência de Fusão e do Arco elétrico dos processos de soldagem [23, adaptado]

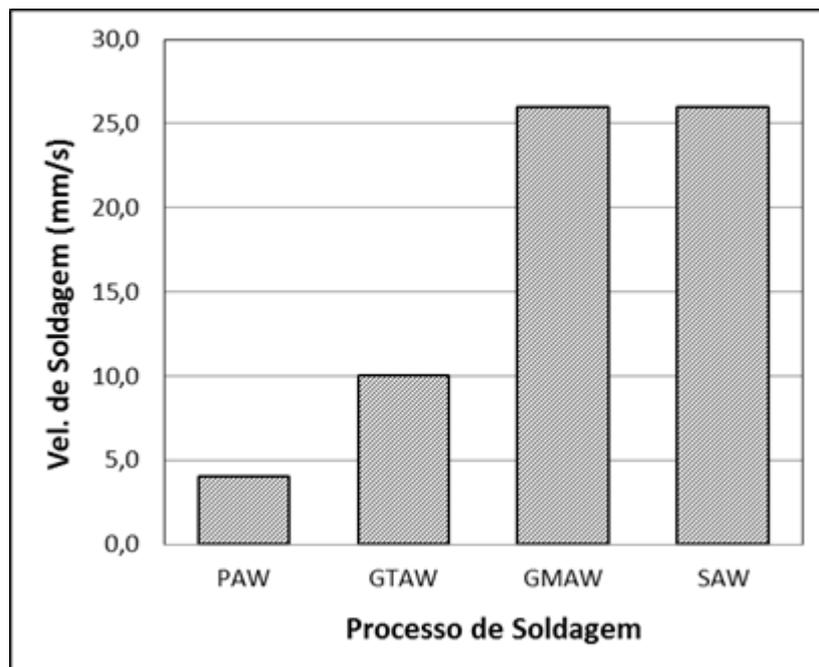


Figura 20 - Velocidade de soldagem de acordo com o processo [23, adaptado]

A determinação dos custos de soldagem é primordial na indústria para definir a viabilidade do procedimento e verificar a competitividade do produto. No caso deste projeto final de graduação, ela é importante para definir os reais ganhos da substituição do processo GMAW convencional para o GMAW com eletrodo rotativo.

O custo total de soldagem (CT) adotado para este projeto depende das parcelas indicadas na equação 2.8:

$$CT(R\$) = CMO + CC + CG + CE \quad (2.8)$$

Onde: CMO é o custo da mão de obra, CC é o custo dos consumíveis, CG é o custo do gás de proteção, CE é o custo da energia elétrica.

Os custos relacionados ao equipamento e a outros materiais não serão considerados para este projeto, uma vez que os processos de soldagem estudados neste projeto utilizam deste mesmos recursos (com excessão da tocha de soldagem com eletrodo rotativo). O detalhamento das parcelas do custo total de soldagem é mostrado a seguir.

a) Custo da mão de obra

O custo da mão de obra deve levar em consideração o tempo de soldagem e o custo Homem-hora (Hh) incluindo salário, encargos sociais e os custos fixos da empresa (overhead).

$$CMO(R\$) = \text{Custo Hh} \left(\frac{R\$}{h} \right) \times \text{tempo de soldagem (h)} \quad (2.9)$$

b) Custo do Consumível

O custo do consumível é custo do metal de adição utilizado para a fabricação da solda, calculado pela equação 2.10. Esta parcela do custo é bastante sensível ao projeto, como o tipo de chanfro e/ou o tamanho da perna de solda. Nas Figuras 21 e 22 são mostradas as relações de quantidade de metal de adição necessária de acordo com o projeto.

$$CC(R\$) = \text{Custo metal de adição} \left(\frac{R\$}{kg} \right) \times \text{metal de adição consumido (kg)} \quad (2.10)$$

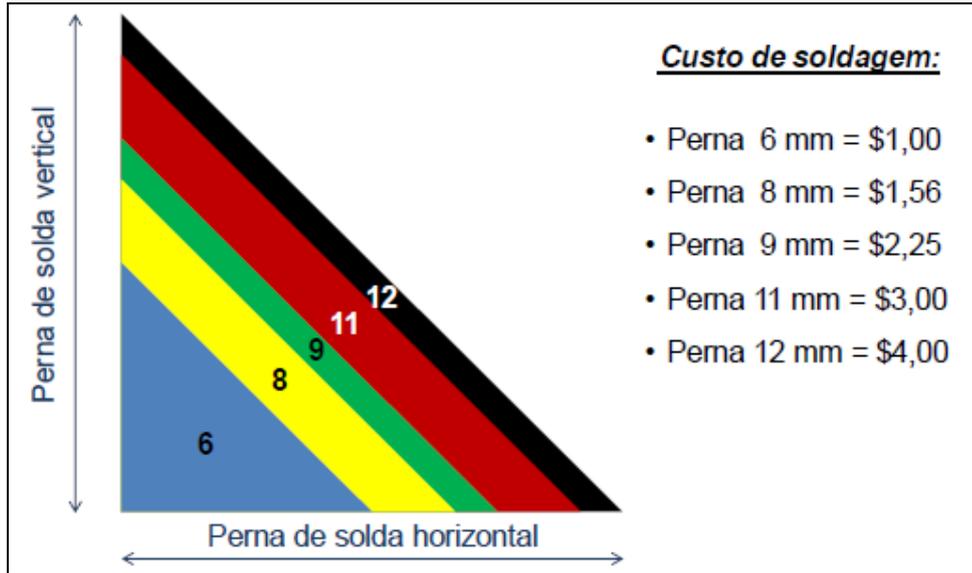


Figura 21 - Custo de consumível pelo tamanho da perna, em juntas de ângulo [21]

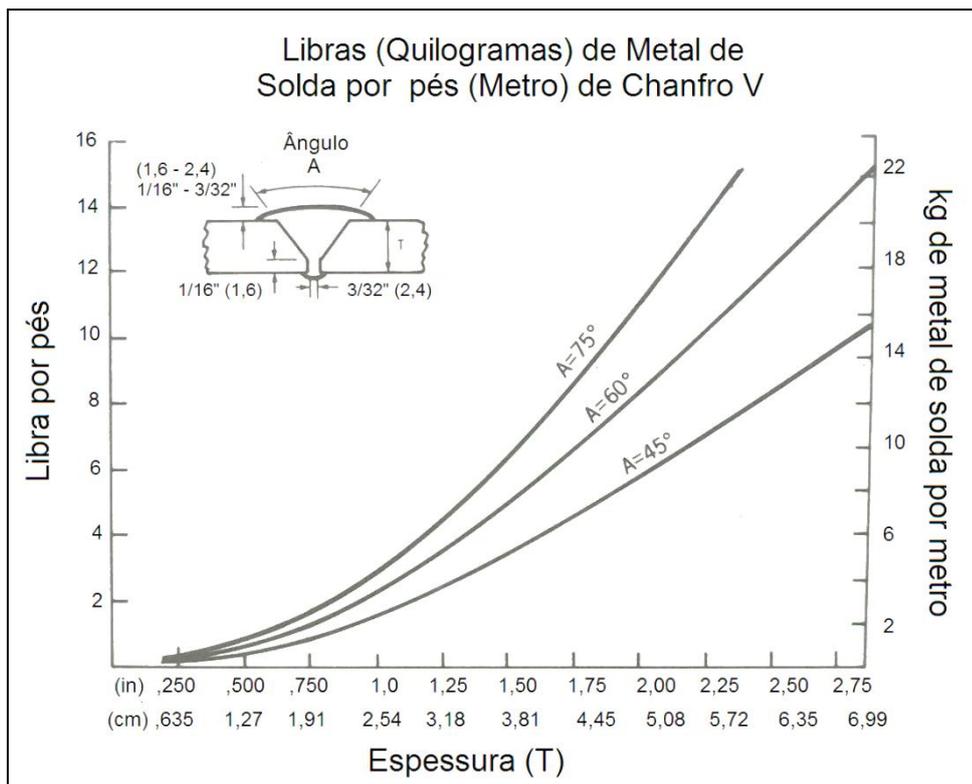


Figura 22 - Material depositado por geometria do chanfro [20, adaptado]

c) Custo do gás de proteção:

O custo do gás de proteção depende do tempo de arco aberto (s), da vazão utilizada (litro/min) e do preço por metro cúbico do gás (R\$/m³), como indica a equação 2.11.

$$CG (R\$) = \frac{\text{Vazão de gás} \left(\frac{l}{min} \right) \times \text{tempo de arco aberto}(s) \times \text{custo do gás} \left(\frac{R\$}{m^3} \right)}{60000} \quad (2.11)$$

d) Custo de energia elétrica

O custo da energia elétrica é uma função do preço do quilowatt-hora PE (R\$/kWh), da potência elétrica média de saída PES (kW), do tempo de arco aberto t (h) e da eficiência elétrica do equipamento E. Este custo pode ser calculado de acordo com a equação 2.12:

$$CE (R\$) = \frac{PE \left(\frac{R\$}{kWh} \right) \times \text{tempo de arco aberto}(h) \times PES(kW)}{E(\%)} \quad (2.12)$$

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1. Materiais

3.1.1. Material de Base

O metal de base a ser soldado é o aço estrutural ASTM A36, disponibilizado em chapas de 10 mm de espessura, 500 mm de comprimento e 150 mm de largura.

3.1.2. Consumível de Soldagem

O consumível selecionado é o de classificação AWS A5.28 ER110S-G e diâmetro de 1,20mm (0,045”). A Tabela 5 mostra a composição do eletrodo, de acordo com o fabricante.

Tabela 5 - Composição Química do Consumível de Soldagem, segundo Fabricante

% em Peso	C	Mn	Si	Ni	Mo	Cr	S	P	V	Al	Ti	Zr	Cu	Ceq
Min	0,05	1,63	0,46	1,88	0,43	0,04	0,002	0,005	-	-	0,03	-	0,11	0,625
Max	0,06	1,6	0,5	1,96	0,45	0,06	0,005	0,009	0,01	0,01	0,04	0,01	0,14	0,669

Onde:

$$\%Ceq = \%C + \frac{(\%Mn + \%Si)}{6} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} + \frac{(\%Cu + \%Ni)}{15}$$

3.2. Procedimento de Soldagem

Cada junta foi preparada a partir de duas chapas do material de base, dispostas lado a lado com o comprimento de 500 mm, largura total de 300 mm e espessura de 10 mm. Foram utilizados cobre juntas (“backing”) de material cerâmico. As juntas foram pré-aquecidas à temperatura mínima de 100°C, controlada por lápis térmico. O gás de proteção utilizado foi mistura de classificação AWS 5.32 ArO-2, cuja composição é 98% de Argônio (Ar) e 2% de Oxigênio (O₂). A Figura 23 mostra a composição do gás de proteção, obtida através do analisador WITT PA 7.0.

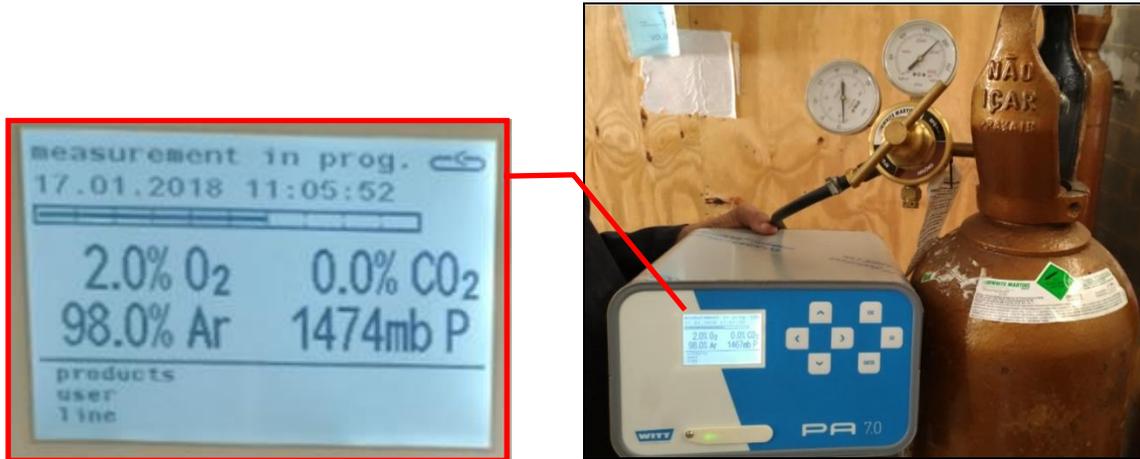


Figura 23 - Análise do Gás de Proteção

A soldagem foi mecanizada através de um trator com trilho magnético, conectado ao controlador dos parâmetros da tocha de soldagem e interligado à fonte de soldagem. Foi utilizada a ferramenta maleta SAP para aquisição de dados dos parâmetros de soldagem (item 3.2.3). A disposição e montagem dos equipamentos para realização das soldagens é apresentada na Figura 24.



Figura 24 - Montagem dos equipamentos à esquerda. Controladores dos equipamentos à direita

3.2.1. GMAW Convencional

A junta convencional foi soldada segundo um procedimento já homologado. O chanfro utilizado foi em V-60°, sem nariz e a abertura da raiz foi de 5 mm (Figura 25 e 26). A soldagem foi conduzida na posição plana AWS 1G, no modo de transferência “spray” e a vazão de gás ajustada em 20 L/min. No total, foram necessários três passes: raiz, enchimento e acabamento. A limpeza entre passes foi feita por escova de aço.

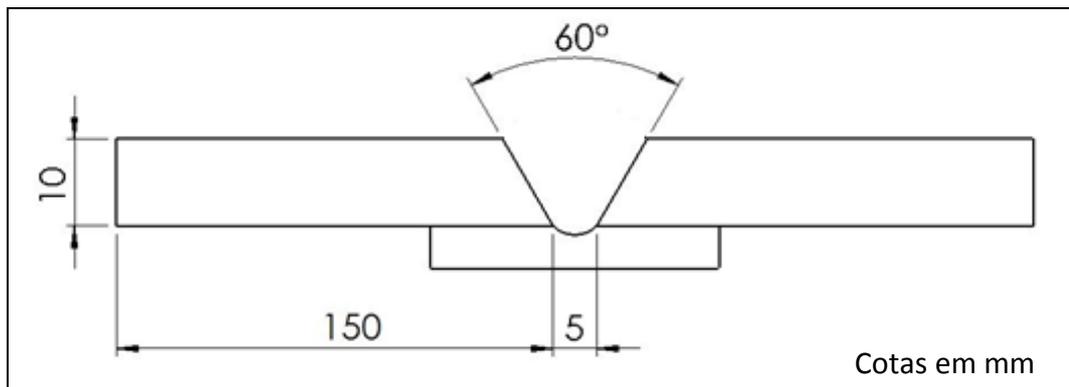


Figura 25 - Croqui da Junta convencional



Figura 26 - Junta Convencional montada

3.2.2. GMAW com Eletrodo Rotativo

Com base no mesmo procedimento da soldagem da junta convencional, porém com as adequações necessárias ao novo processo, foi realizada a soldagem da junta pelo GMAW com eletrodo rotativo. Foi utilizado o chanfro reto com abertura de 8 mm (Figura 27 e 28).

A soldagem foi conduzida na posição plana AWS 1G, no modo de transferência “spray” e a vazão de gás ajustada em 20 L/min. No total, foram necessários dois passes: raiz e enchimento/acabamento. A limpeza entre passes foi feita por escova de aço. A Tabela 7 mostra os valores dos parâmetros medidos em cada passe.

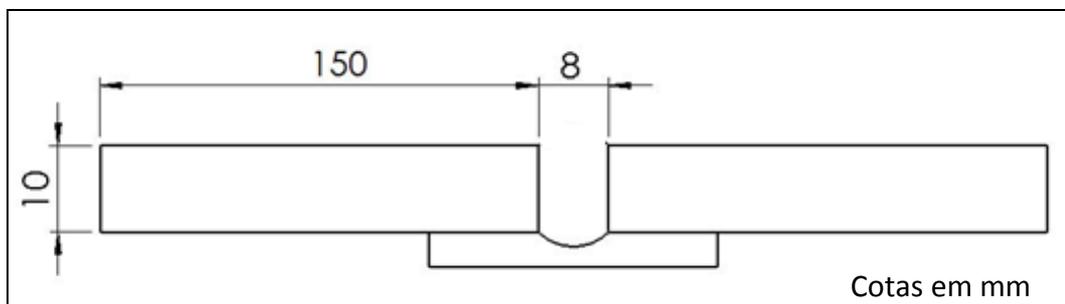


Figura 27 - Croqui da junta GMAW-RE



Figura 28 - Junta em chanfro reto montada

3.2.3. Sistema de Monitoramento de Soldagem

As soldagens foram monitoradas pelo sistema de aquisição de dados de soldagem, também chamado maleta SAP (Figura 29). Este equipamento permite analisar com precisão o comportamento dos parâmetros de soldagem, com taxa de aquisição de 5000Hz; e serviu como base para os cálculos de produtividade em cada uma das juntas citadas nos itens acima. É possível monitorar com o equipamento:

- Corrente;
- Tensão;
- Tempo de arco aberto;
- Velocidade de alimentação;
- Vazão de gás;
- Taxa de deposição;



Figura 29 - Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem - Maleta SAP

3.3. Testes Preliminares do Processo GMAW com Eletrodo Rotativo

Os testes preliminares com o processo GMAW com eletrodo rotativo tiveram como objetivo avaliar as melhores condições de soldagem, explorando os parâmetros frequência e diâmetro de rotação.

Inicialmente, foram executados nove cordões de solda, sobre chapas de 16 mm de

espessura, combinando os dois parâmetros em uma matriz 3x3, conforme a Tabela 6. Os parâmetros de soldagem utilizados foram: velocidade de alimentação igual a 7,9 m/min e velocidade de soldagem igual a 30 cm/min. Após as soldagens, realizaram-se análises macrográficas para descobrir a influência dos parâmetros no perfil de penetração, largura do cordão e reforço, além de comparar com os resultados encontrados por RAO [15] e KUMAR [16], citados no Capítulo 2 – Revisão bibliográfica.

Tabela 6 - Testes preliminares GMAW-RE - cordões sobre chapa.

Amostra	Frequência de Rotação (rpm)	Diâmetro de Giro	Tensão (V)	Corrente I (A)
1	1500	3	27	258
2	3000	3	27	260
3	5000	3	27	265
4	1500	6	27	258
5	3000	6	27	260
6	5000	6	27	275
7	1500	8	27	255
8	3000	8	27	248
9	5000	8	27	N/R

Val. = 7,9 m/min; Vs. = 30 cm/min

Com base nos resultados desse experimento, foram escolhidos os parâmetros para uma soldagem preliminar em uma junta com chanfro reto. O objetivo foi verificar as dificuldades do processo e avaliar possíveis melhorias.

3.4. Ensaios Não Destrutivos

Após a etapa de soldagem, os corpos de prova passaram por inspeção visual. No teste preliminar, a junta foi submetida ao ensaio por ultrassom. Na soldagem final pelo processo GMAW-RE, a junta foi submetida ao ensaio radiográfico. Estes ensaios têm como objetivo verificar a presença de descontinuidades e, portanto, avaliar a necessidade de eventuais correções antes do prosseguimento do projeto.

3.5. Ensaio Mecânicos

O corpo de prova soldado pelo processo GMAW com eletrodo rotativo passou pelos ensaios mecânicos de tração e dobramento, necessários para o desenvolvimento de um procedimento de soldagem segundo o código ASME IX. A Figura 31 mostra a disposição dos corpos de prova para chapas com espessuras menores que 19mm.

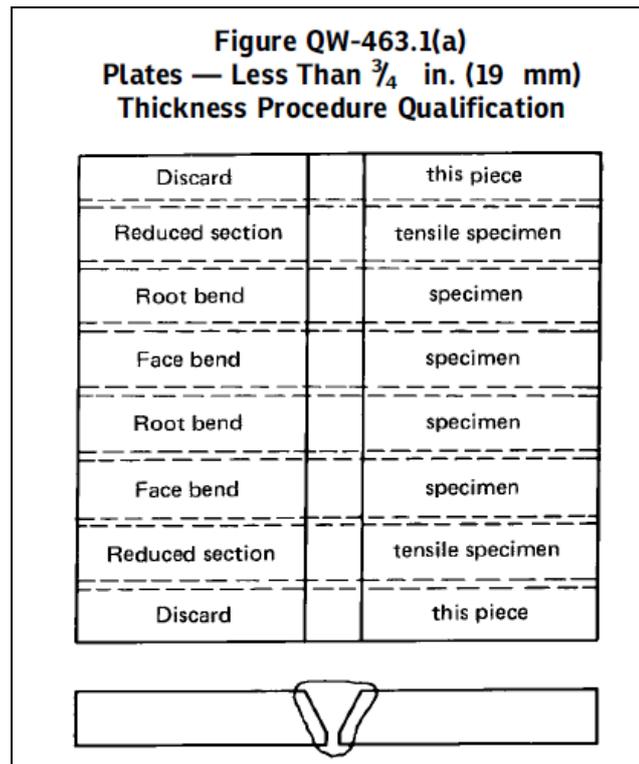


Figura 30 - Disposição dos corpos de prova, segundo o ASME IX [7]

3.5.1. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Materiais do CEFET/RJ, a temperatura ambiente, em corpos de prova padronizados conforme o ASME IX [7], retirados transversalmente ao cordão de solda conforme a Figura 32. De acordo com os requisitos do código para a qualificação do procedimento, são necessárias duas amostras deste ensaio. O equipamento utilizado para o ensaio de tração foi o Instron 5985, capacidade de 250 kN.

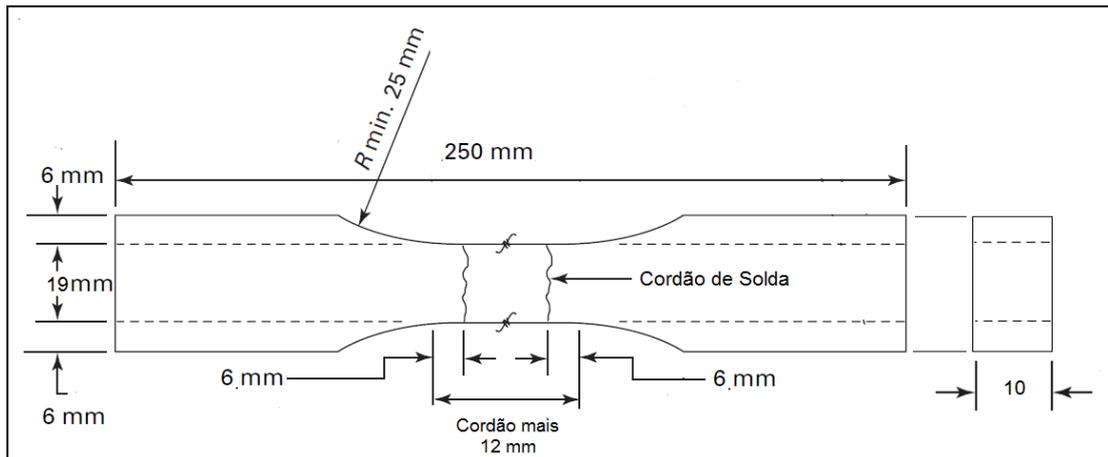


Figura 31 - Representação dos corpos de prova para ensaio de tração, segundo o ASME IX [7, adaptado]

3.5.2. Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do IFRJ, à temperatura ambiente, em corpos de prova padronizados conforme o ASME IX (Figura 32). De acordo com os requisitos do código para a qualificação do procedimento, são necessárias quatro amostras deste ensaio, dois ensaios de face e dois da raiz. O equipamento utilizado para os ensaios de dobramento foi o Shinjin modelo WDW-100E.

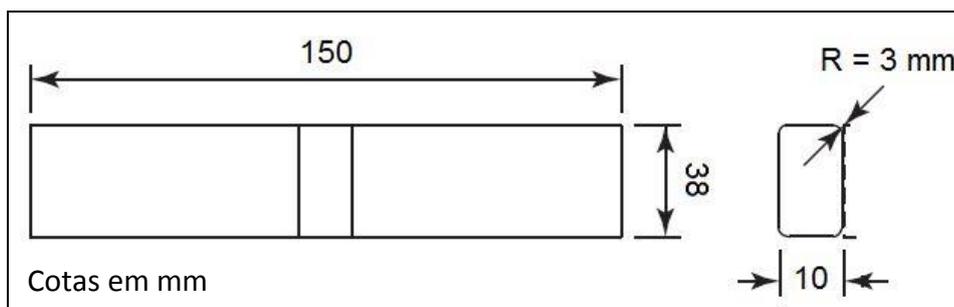


Figura 32 - Representação dos corpos de prova para ensaio de dobramento, segundo ASME IX [7, adaptado]

3.6. Ensaio Metalográfico

Essa etapa consiste em análise macrográficas de amostras dos corpos de prova soldados, com o objetivo de avaliar os perfis de penetração. A preparação das amostras consistiu na técnica convencional de lixamento na ordem de granulometria 100, 220, 320,

400, 500 e 600; seguido de polimento com pasta de diamante de 6 μm . Após o polimento foi realizado o ataque químico com reagente Nital 2%.

Nas soldagens preliminares de cordões sobre chapa, os resultados das macrografias serviram como base na escolha dos parâmetros para a soldagem da junta pelo método GMAW com eletrodo rotativo. Já o intuito das macrografias das juntas é comparar os perfis de penetração na soldagem pelo método GMAW-RE com o GMAW e verificar a presença de descontinuidades.

3.7. Análise comparativa entre os processos

Por último, este trabalho abordará uma análise comparativa entre os dois processos de soldagem. O foco deste tópico será na produtividade e no custo, uma vez que os principais objetivos deste projeto final é avaliar a viabilidade e competitividade do processo GMAW-RE na indústria. Ainda serão analisados os comportamentos dos parâmetros de energia através de oscilogramas de tensão e corrente.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Testes Preliminares

4.1.1. Soldagem de Cordões sobre Chapa

Os resultados das medições dos cordões sobre chapa são mostrados na Tabela 7 e as macrografias são mostradas na Figura 33. Os parâmetros foram medidos seguindo a Figura 8, do Capítulo 2. O software OriginLab foi utilizado para gerar gráficos qualitativos do comportamento dos parâmetros do perfil do cordão (penetração, largura e reforço) em função dos parâmetros principais do processo de soldagem com eletrodo rotativo (frequência de rotação e diâmetro de rotação). A partir dos pontos dos gráficos, foram inseridas linhas de tendência através do método de regressão linear. Os gráficos são mostrados nas Figuras 35 e 36.

Tabela 7 - Medição dos Cordões sobre Chapa, soldados pelo GMAW com Eletrodo rotativo

Amostra	Frequência Rotação (rpm)	Diâmetro de Rotação	Tensão (V)	Corrente I (A)	Penetração P (mm)	Reforço R (mm)	Largura L (mm)
1	1500	3	27	258	3,71	3,68	13,70
2	3000	3	27	260	2,23	3,53	15,15
3	5000	3	27	265	1,54	2,78	15,79
4	1500	6	27	258	2,74	3,44	13,3
5	3000	6	27	260	1,00	3,03	16,27
6	5000	6	27	275	1,51	1,73	17,06
7	1500	8	27	255	1,91	3,55	14,70
8	3000	8	27	248	2,23	3,46	14,22
9*	5000	8	27	N/R	-	-	-

* Não foi possível obter um cordão aceitável devido à instabilidade do arco

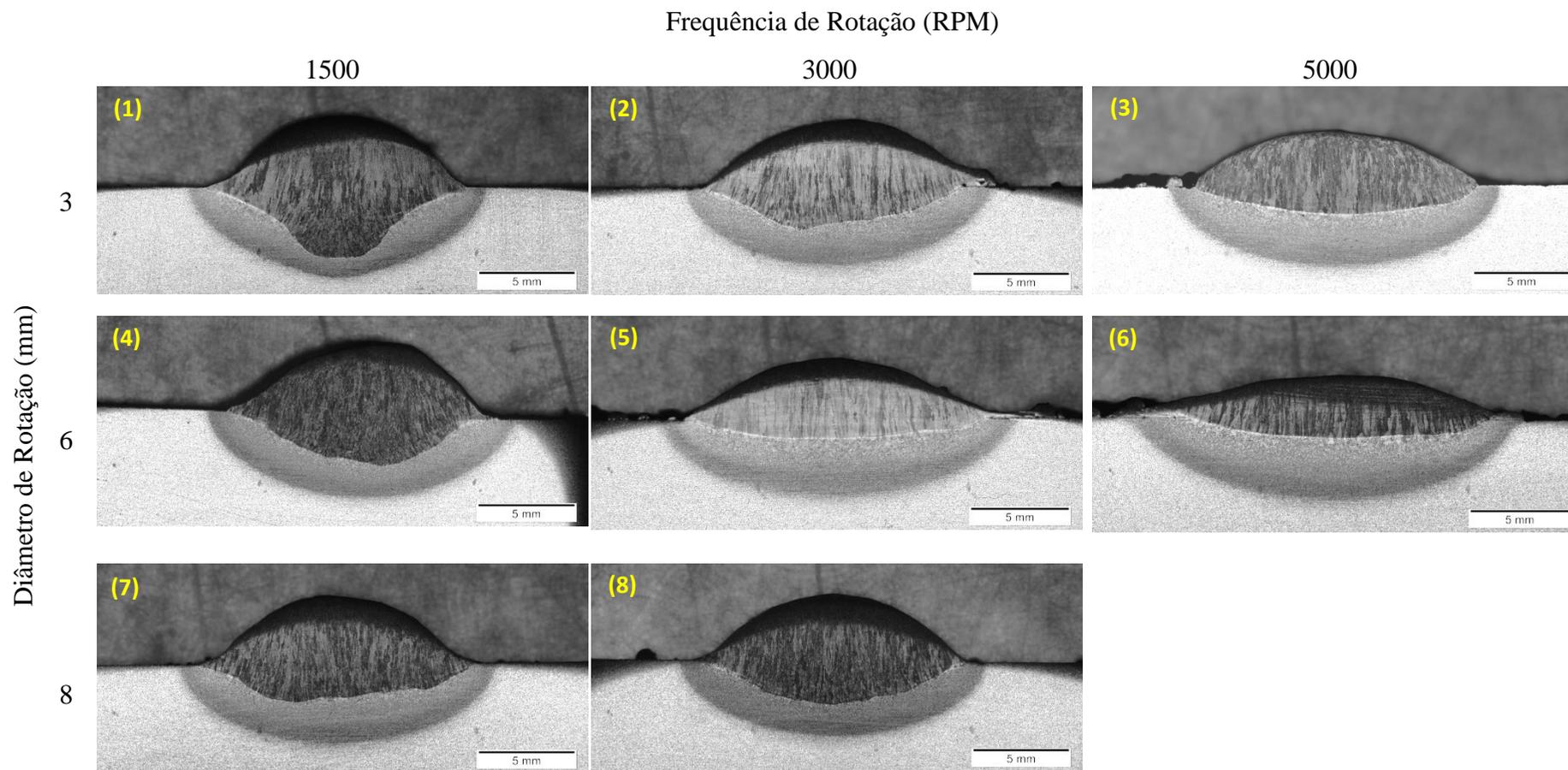


Figura 33 – Matriz das Macrografias dos Cordões Sobre chapa

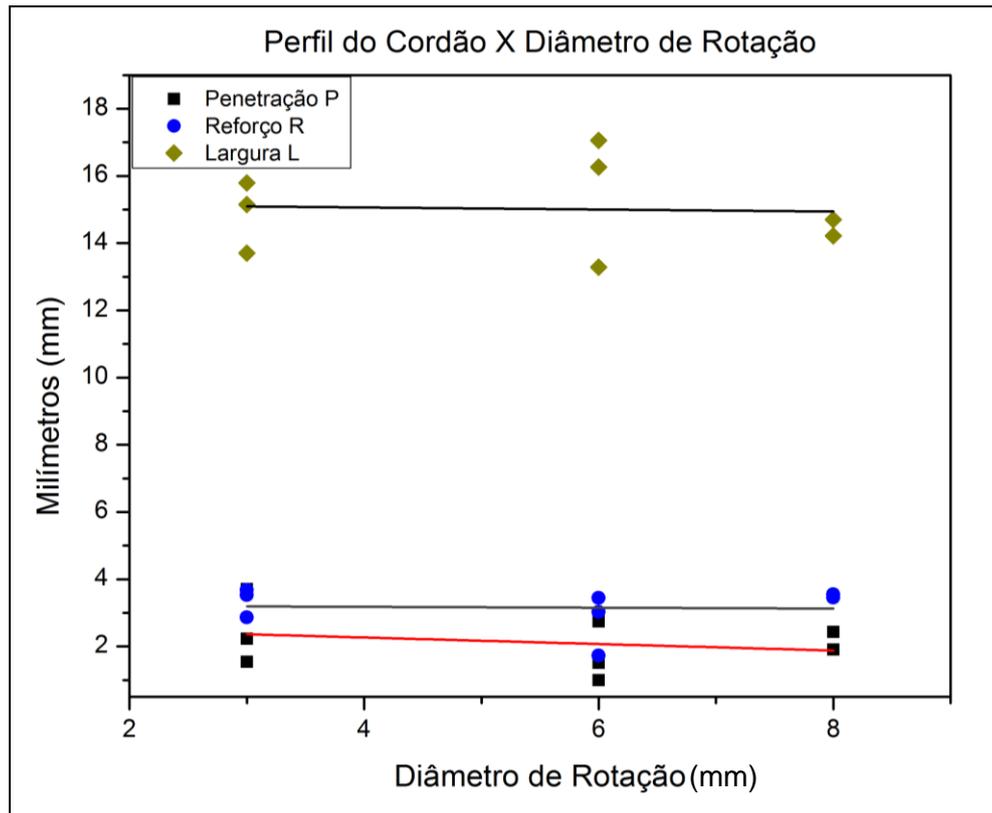


Figura 34 - Gráfico Diâmetro de Rotação x Perfil do Cordão

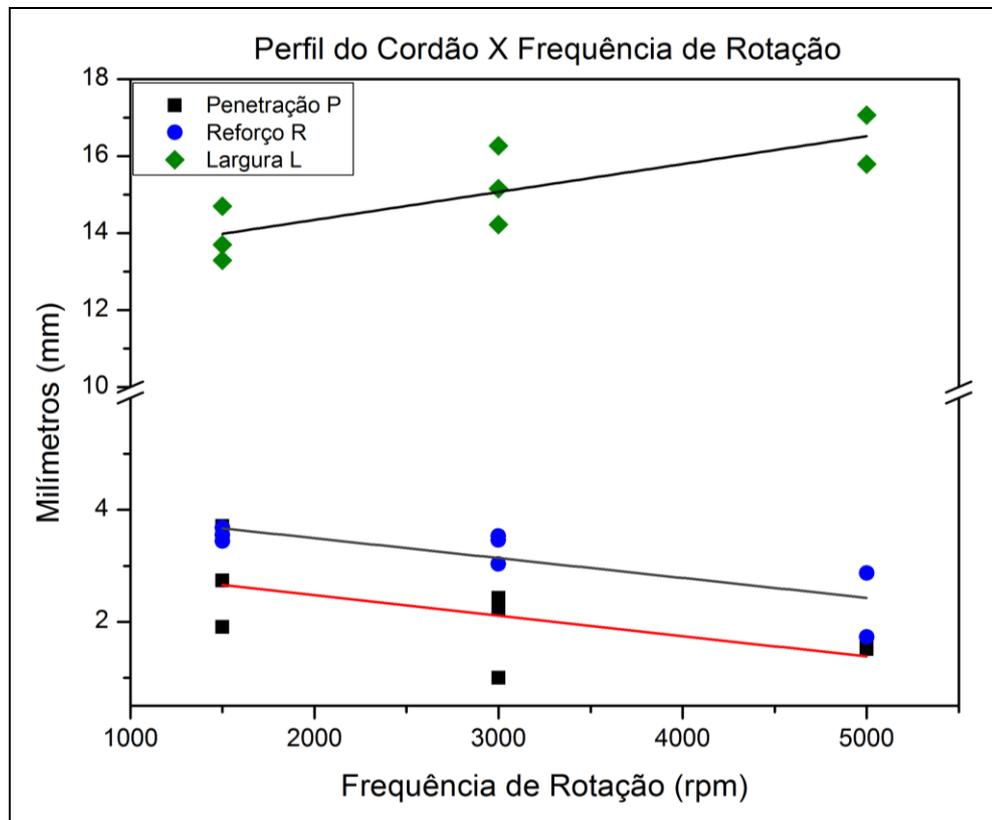


Figura 35 - Gráfico: Frequência de Rotação x Perfil do cordão

4.1.2. Diluição

Foi utilizado o software Image J para auxiliar nos cálculos de diluição das amostras apresentadas na Figura 33. A equação matemática que representa a diluição do cordão de solda é dada por:

$$\text{Diluição (\%)} = \frac{A_p}{(A_p + A_d)} \times 100 \quad (2.13)$$

Onde A_p representa a área penetrada e A_d a área depositada. A Figura 36 ilustra a metodologia adotada para a diluição [24]. A Tabela 8 mostra o resultado da diluição nas amostras 1 a 9.

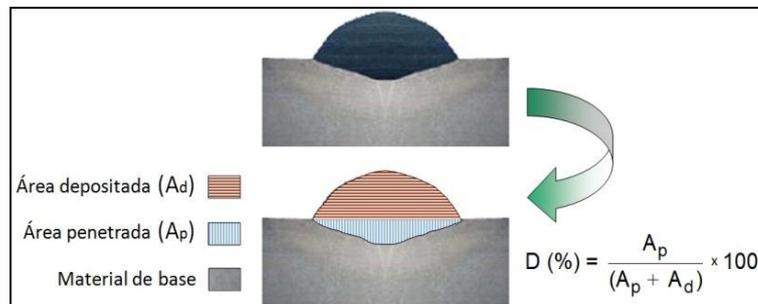


Figura 36 - Representação da diluição em cordão de solda [24]

Tabela 8 - Diluição dos Cordões sobre chapa. Unidades: mm²

Amostra	Frequência Rotação (rpm)	Diâmetro de Rotação	Área Penetrada (Ap)	Área depositada (Ad)	Área Total	Diluição
1	1500	3	25,934	33,526	59,460	44%
2	3000	3	18,216	36,785	55,001	33%
3	5000	3	16,355	31,970	48,325	34%
4	1500	6	20,366	32,650	53,016	38%
5	3000	6	11,762	33,031	44,793	26%
6	5000	6	13,277	27,872	41,149	32%
7	1500	8	18,550	33,087	51,637	36%
8	3000	8	19,654	32,743	52,397	38%

4.1.3. Teste preliminar em chanfro reto

O primeiro teste de soldagem em chanfro reto teve como objetivo avaliar as condições estabelecidas nas etapas anteriores. O corpo de prova foi montado com chapas de 12,7 mm de espessura, abertura de 10 mm, frequência de rotação de 2000 rpm e diâmetro de rotação de 6 para a raiz e 7 para o acabamento. A Tabela 9 apresenta os valores dos parâmetros de soldagem da junta. Posteriormente, o corpo de prova passou por ensaio por ultrassom e em seguida foi realizada uma macrografia na região da solda.

Tabela 9 - Parâmetros de Soldagem da Junta preliminar GMAW-RE

Chanfro	Passe	Frequência de rotação (RPM)	Diâmetro de Giro	U (V)	I (A)	Val. (m/min)	V. sol. (cm/min)
Reto 10 mm abertura	Raiz	2000	6	27	280	7,9	18,3
	Ench/Acab	2000	7	26,5	245	7,9	14



Figura 37 - Macrografia da Junta preliminar GMAW-RE

4.2. GMAW Convencional

A soldagem com o processo GMAW convencional seguiu os procedimentos da EPS já homologada. A Tabela 10 mostra os parâmetros de soldagem medidos em cada passe. Os aspectos visuais da raiz e do acabamento podem ser observados pelas Figuras 38 e 39, respectivamente.

Tabela 10 - Parâmetros de Soldagem da Junta 1 - GMAW Convencional

Passe	Raiz	Enchimento	Acabamento
Oscilação lateral (mm)	Não	8	13
Corrente (A)	215,9	250,6	257
Tensão (V)	25,7	27,3	27,3
Velocidade de Soldagem (cm/min)	13,33	20,69	19,61
Velocidade do Arame (m/min)	6,10	7,90	7,92
Energia de Soldagem (kJ/mm)	2,50	1,98	2,15
Tempo de arco (s)	225	145	153
Quantidade de arame (m)	22,860	19,085	20,198
Volume de Gás (l)	75,00	48,33	51,00
Taxa de deposição (kg/h)	3,25	4,21	4,22



Figura 38 - GMAW convencional: Aspecto Visual do passe de raiz



Figura 39 - GMAW convencional: Aspecto visual do passe de acabamento. Sem limpeza

4.3. GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE)

A soldagem com o processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE) foi executada seguindo as propostas contidas no item 4.1.2, com frequência de rotação de 3000 rpm e diâmetro de rotação igual a 3. A Tabela 11 mostra os parâmetros de soldagem medidos em cada passe. Os aspectos visuais da raiz e do acabamento podem ser observados pelas Figuras 40 e 41, respectivamente.

Tabela 11- Parâmetro de Soldagem da Junta 2 – GMAW-RE

Passe	Raiz	Enchimento/Acabamento
Oscilação lateral (mm)	3 - 4	4 - 5
Corrente (A)	254,6	241
Tensão (V)	27,3	27,3
Vel. Soldagem (cm/min)	18,40	16,5
Vel. Arame (m/min)	7,91	7,89
Energia de Soldagem (kJ/mm)	2,27	2,39
Tempo de arco (s)	163	182
Q. arame (m)	21,479	23,942
Volume de Gás (l)	54,33	60,67
Taxa de Deposição (kg/h)	4,22	4,21



Figura 40 - GMAW-RE: Aspecto visual do passe de raiz



Figura 41 - GMAW-RE: Aspecto visual do passe de acabamento. Sem limpeza

4.4. Ensaio Radiográfico

A junta 2 (GMAW-RE) foi aprovada pelo ensaio radiográfico. O laudo do ensaio se encontra nos Anexos.

4.5. Ensaios Mecânicos

4.5.1. Ensaio de Tração

A Tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de tração das duas amostras retiradas da junta 2 (GMAW-RE). Todos os corpos de prova romperam no metal base, conforme mostra a Figura 42.

Tabela 12 - Resultado dos Ensaios de Tração

Amostra	LE (MPa) Limite de Escoamento	LR (MPa) Limite de Resistência	Al (%) Alongamento	RA (%) Redução de área
1	330	460	22,8	42,8
2	338	474	33,3	42,2

Segundo o Código ASME II – Part A [28], seção de materiais, os requisitos mínimos para o aço estrutural de classificação ASME SA 36 são de 400 MPa para o limite de resistência e de 20% para alongamento. Desde modo, todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de tração atenderam ao código ASME II.



Figura 42 - Corpos de prova de tração

4.5.2. Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento de raiz e face são mostrados na Figura 43. Os corpos de prova foram aprovados, pois não apresentaram trincas ou quaisquer discontinuidades.

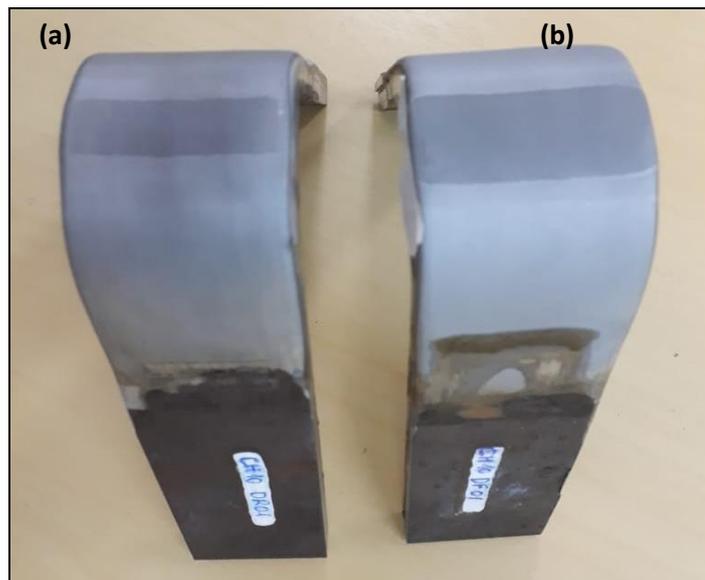


Figura 43 - Corpos de prova de Dobramento – a) Raiz / b) Face

4.6. Ensaio Macrográficos

As macrografias das soldagens são mostradas na Figura 44. No processo com arco rotativo, o cordão apresenta menor convexidade no acabamento, em concordância com KUMAR [16].

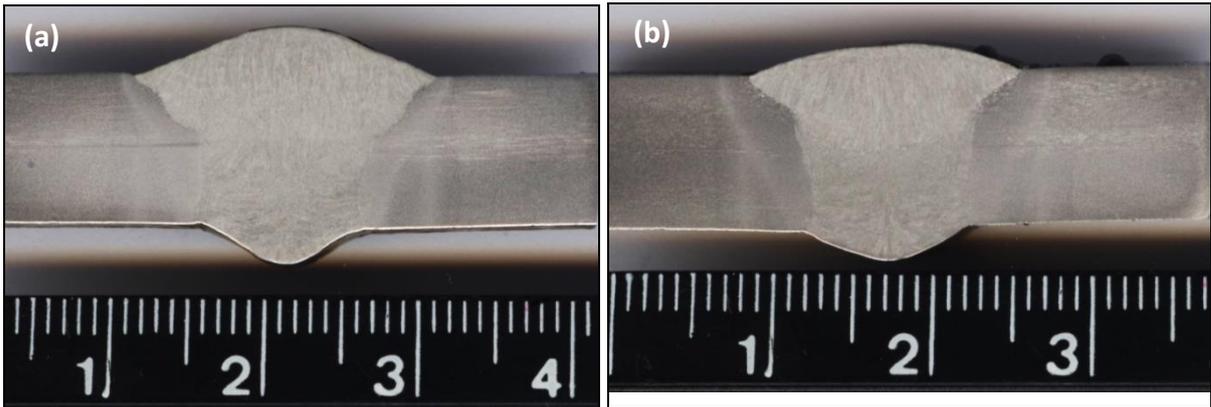


Figura 44 - Análises Macrográficas – Esquerda (a) Junta 1 (GMAW) / Direita (b) Junta 2 (GMAW-RE)

4.7. Análise comparativa entre os Processos GMAW e GMAW-RE

As soldagens com os processos GMAW convencional e GMAW com eletrodo rotativo foram realizadas com base no mesmo procedimento, mantendo aproximados os níveis energia (tensão, corrente e aporte térmico) e parâmetros como velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, gás de proteção e consumível. Apesar disto, a adição de rotação ao arame eletrodo e a conseqüente mudança de geometria do chanfro causaram significativas mudança nos resultados.

As Figuras 45 e 46 mostram os oscilogramas de corrente e tensão de ambos os processos nas escalas 0,2 segundos e 1,0 segundo, no passe de raiz.

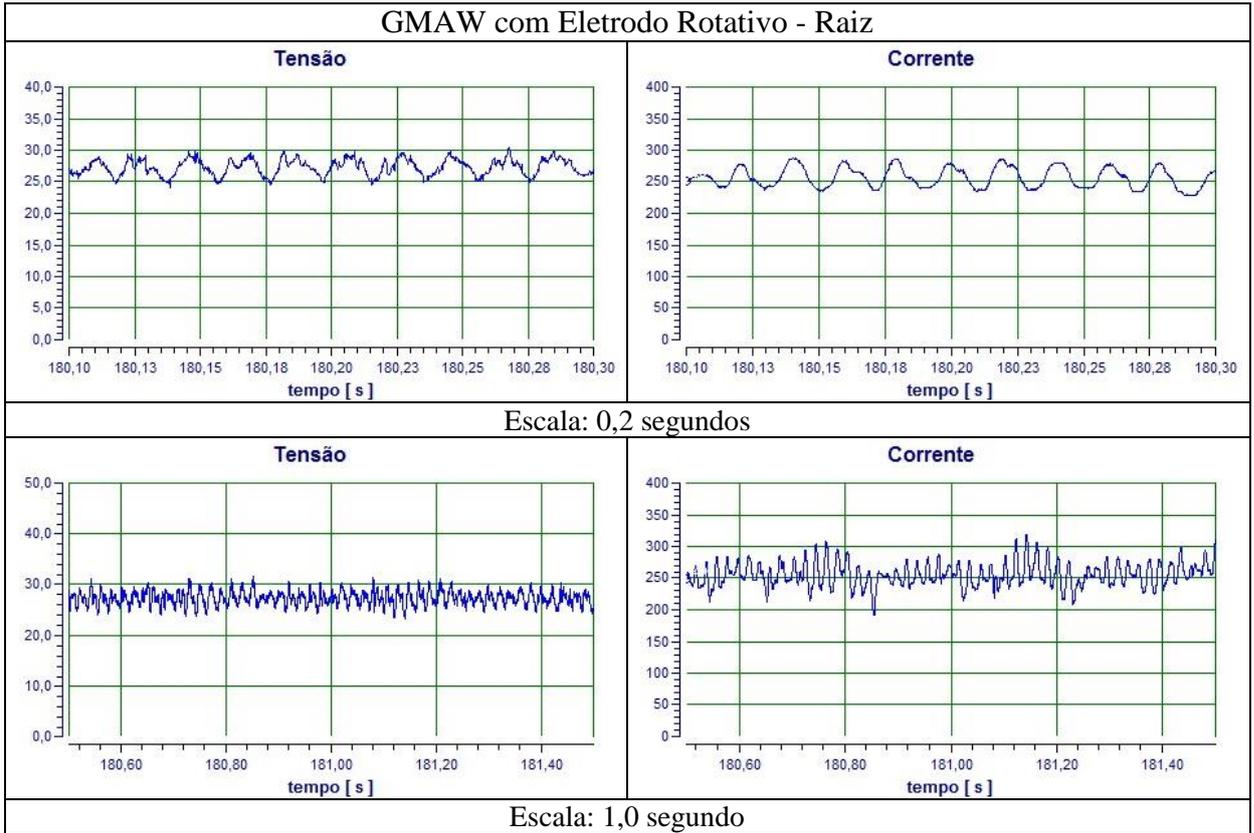


Figura 45 - Oscilogramas de Tensão e Corrente do GMAW-RE

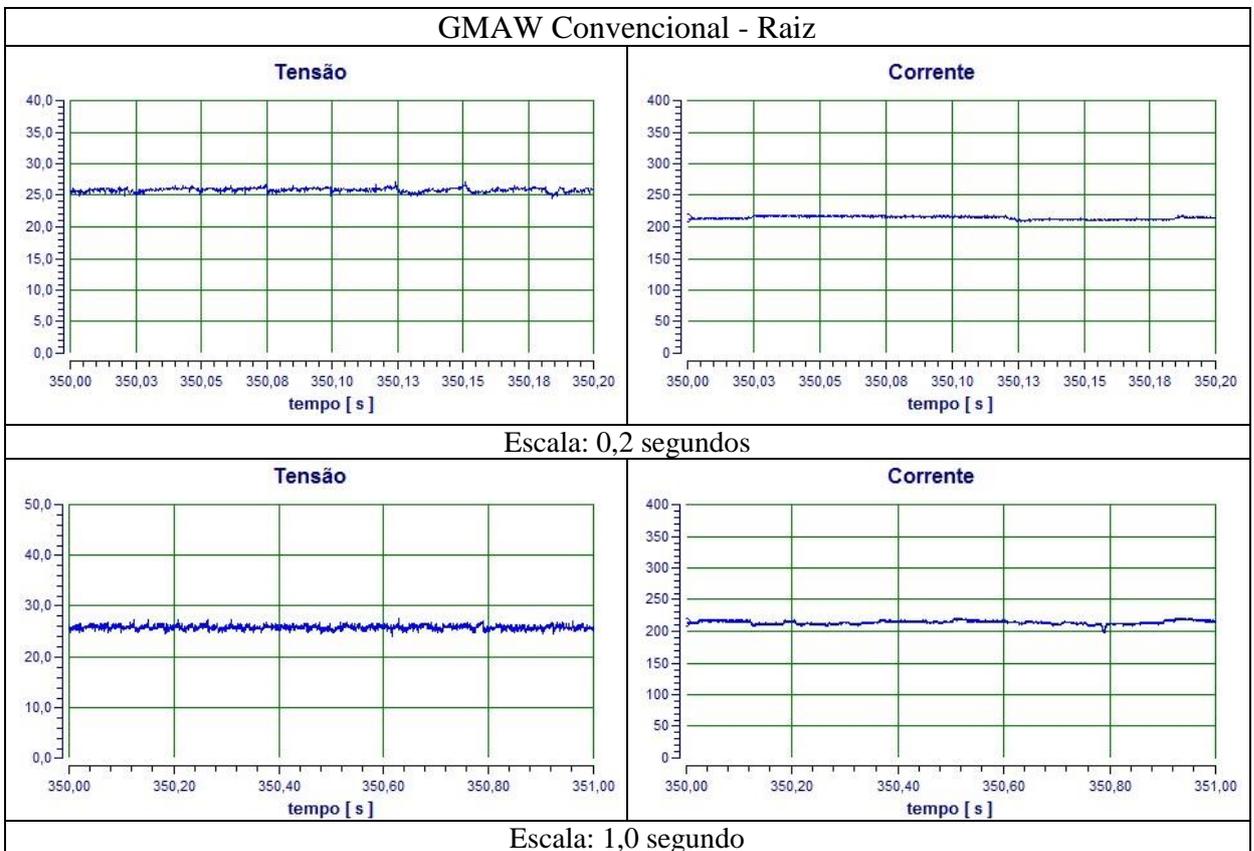


Figura 46 - Oscilogramas de Tensão e Corrente do GMAW

4.7.1. Comparativo de Produtividade

A Tabela 13 apresenta os valores obtidos e o comparativo percentual de produtividade entre os dois processos de soldagem, por metro de junta.

Tabela 13 - Comparativo de Produtividade por metro de junta

Parâmetros	GMAW Convencional	GMAW-RE	Comparativo Percentual (%)
Metro linear de arame (m)	124,3	90,8	-27%
Tempo de arco aberto (min)	17	12	-34%
Volume de Gás (L)	349	230	-34%
Metal depositado (kg)	1,10	0,81	-27%
Taxa de deposição média (kg/h)	3,80	4,21	11%

4.7.2. Comparativo de Custos

As equações para os cálculos dos custos são baseadas no Capítulo 2, item 2.2. O salário utilizado para o cálculo da parcela Homem-hora foi retirada do site dos sindicatos dos metalúrgicos de Duque de Caxias [25] e o fator de operação considerado foi de 60%, isto é, 60% representam o tempo de arco aberto e 40%, o tempo de limpeza, ajustes e pré-aquecimento. Para o cálculo dos custos da energia elétrica, foi utilizado o valor da eficiência elétrica indicado pelo fabricante [26]. A Tabela 14 mostra o custo de cada componente na soldagem de 1 metro de junta para o processo GMAW e GMAW-RE. A Figura 47 apresenta o gráfico das parcelas do custo de soldagem.

Tabela 14 - Comparativo de custos de soldagem

Custo de Soldagem por metro de Junta (R\$)		
Parcela	GMAW Convencional	GMAW-RE
Homem-hora	15,90	10,49
Metal de adição	33,15	24,23
Gás de proteção	5,23	3,45
Energia elétrica	0,76	0,53
Total	55,03	38,70
Redução de custos Total	30%	

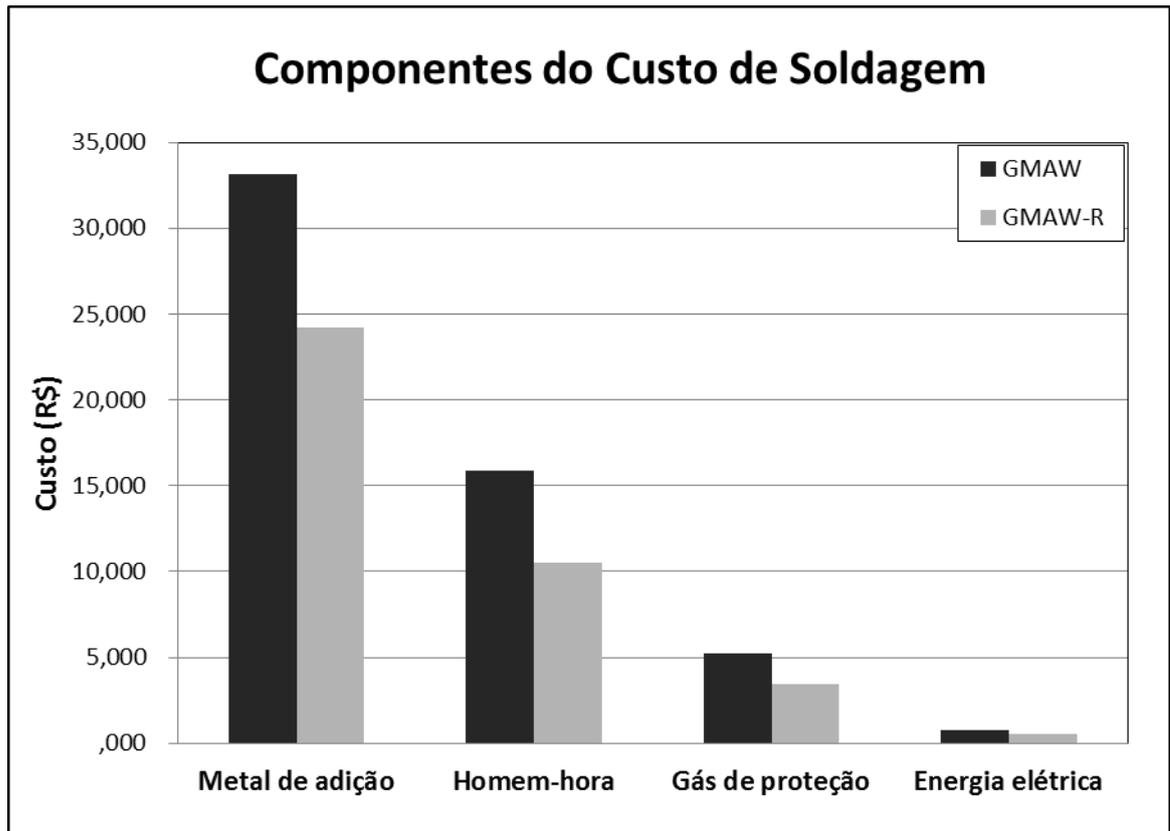


Figura 47 - Gráfico dos componentes do custo de Soldagem

Capítulo 5

Discussão

5.1. Testes Preliminares

5.1.1. Soldagem de Cordões sobre Chapa

Através dos resultados das macrografias dos cordões sobre chapa, pode-se observar similaridades com os trabalhos realizados por RAO [15] e KUMAR [16]. A frequência de rotação possui uma grande influência na convexidade do cordão. Estes parâmetros possuem relação inversamente proporcional, isto é, a convexidade do cordão tende a diminuir com o aumento da frequência de rotação do arco. O diâmetro de rotação possui a mesma relação com a convexidade, porém com baixa influência. Outra característica que coincide com os resultados apresentados no Capítulo 2 é o perfil de penetração. Quando o arame possui baixa ou nenhuma rotação, a penetração tende a apresentar forma tipo dedo (*finger type*). Entretanto, tanto o aumento do diâmetro quanto o aumento da frequência de rotação acarreta em um perfil de penetração mais uniforme em sua extensão. De acordo com RAO et al [15], isto ocorre devido ao processo de soldagem com eletrodo rotativo oferecer dispersão da força do arco em uma poça de fusão com maior área.

O gráfico apresentado na Figura 35 mostra que neste estudo não houve influência significativa do diâmetro de rotação nas medidas do perfil dos cordões.

O gráfico apresentado na Figura 36 mostra a influência da frequência de rotação nas medidas dos perfis dos cordões. Este parâmetro é diretamente proporcional à largura do cordão de solda. Uma possível explicação para este fenômeno é o aumento da intensidade da força centrífuga atuante nas gotas de metal de adição, projetando estas gotas em uma área maior. Em contraste, observa-se a diminuição da penetração no metal de base e no reforço do cordão, em concordância com KUMAR [16].

A partir deste teste preliminar, verificou-se outro aspecto característico deste processo de soldagem: ao aumentar a frequência de rotação do arco, a taxa de respingos cresce. Isto indica uma perda na eficiência do processo, quando utilizado na soldagem de cordões sobre chapa. Como pode ser visto na Figura 48, um cordão foi soldado da esquerda para a direita, primeiramente com a frequência de rotação de 1500 rpm, e a partir da segunda metade com 3000 rpm. Esse fenômeno pode ser explicado novamente pela maior projeção das gotas de

metal de adição, causada pelo aumento da força centrífuga.

Observou-se também que a combinação de altos valores de diâmetro e frequência de rotação gera instabilidade ao arco elétrico. Como se pode verificar na Tabela 7 e na Figura 33, a soldagem da amostra 9 não apresenta resultados. Isto ocorreu pelo fato de esta combinação de parâmetros não ter produzido um cordão de solda possível de ser medido. Esta instabilidade poderia ser explicada pelo fato do arco elétrico estar sendo projetado constantemente para fora da poça de fusão, que por sua vez não é formada adequadamente pelo desvio excessivo do arco elétrico.



Figura 48 - Projeção dos respingos em função da frequência de rotação. Esquerda: 1500rpm / Direita: 3000 rpm

5.1.2. Diluição

A partir da Tabela 8 percebe-se uma tendência de diminuição da área total do cordão de solda conforme o aumento do diâmetro de rotação, com exceção da amostra 8. Este efeito também é notado com o aumento da frequência de rotação, novamente com exceção da amostra 8, que apresentou resultados divergentes do comportamento esperado, observado nas demais amostras. É observada também uma diminuição acentuada da área penetrada nas frequências de rotação de 3000 rpm e 5000 rpm em relação à de 1500 rpm. Por exemplo, a amostra 1 (1500 rpm) apresentou área igual a 25,934 mm² contra 18,216 mm² e 16,335 mm², para 3000 rpm e 5000 rpm, respectivamente. A amostra 4 (1500 rpm) apresentou a área penetrada de 20,366 mm² contra 11,762 mm² e 13,277 mm², para 3000 e 5000 rpm.

Quando relacionadas ao diâmetro de rotação, a área penetrada e a área depositada decrescem conforme o aumento do diâmetro, como podem ser vistos na sequência de amostras 1, 4 e 7 para a frequência de rotação igual a 1500 rpm, por exemplo.

A frequência de rotação possui grande influência na diluição e na penetração na transição de 1500 rpm para 3000 rpm. Entretanto, na transição de 3000 rpm para 5000 rpm os resultados não seguem um comportamento padrão. Uma possível explicação para este

fenômeno é dada pelo aumento da taxa de respingos na transição da frequência de rotação de 1500 rpm para 3000 rpm (Figura 38), causada pelo aumento na intensidade da força centrífuga. O fato de as áreas totais dos cordões diminuírem conforme o aumento da frequência de rotação reforça esta teoria.

5.1.3. Teste Preliminar em Chanfro Reto

Durante a soldagem do passe raiz, observou-se que o arco elétrico subiu levemente nas paredes do chanfro, possibilitando o surgimento de defeitos. O arco elétrico não atingiu a profundidade necessária, de modo a não fundir as paredes do chanfro na altura da raiz. Conforme já descrito por Murayama [14] e Duan [13], este fenômeno pode ocorrer quando o valor do diâmetro de rotação é próximo ao da abertura do chanfro. Os defeitos foram confirmados pelo ensaio por ultrassom, ao longo de toda a extensão da solda. Na análise macrográfica, constatou-se falta de fusão na raiz e porosidade, como mostra a Figura 37.

Para a melhoria do processo, foram propostas as seguintes modificações: diminuição do diâmetro de rotação para 3, adição de oscilação lateral, redução da abertura do chanfro para 8 mm, aumento da frequência de rotação para 3000 rpm, aumento da vazão de gás de proteção de 15 para 20 l/min, limpeza com escova de aço entre passes e chapa de entrada no mesmo nível do backing cerâmico para evitar um “degrau” para o arco elétrico. Com estes parâmetros obteve-se a junta soldada pelo processo com arco rotativo, apresentada e utilizada como base nos estudos deste trabalho.

5.2. Análise comparativa entre os Processos GMAW e GMAW-RE

Os oscilogramas mostrados nas Figuras 45 e 46 apresentam o comportamento de tensão e corrente de cada processo. No processo GMAW com eletrodo rotativo, a curva destes parâmetros possuem um perfil senóide, que pode ser explicado pela variação da posição do arco dentro do chanfro devido à trajetória de rotação, alterando conseqüentemente a distância bico de contato peça (DBCP). Observa-se, por exemplo, o oscilograma de corrente na escala 0,2 segundos: cada período da curva representa uma rotação completa do arco elétrico, e cada crista da curva representa o arco elétrico em uma mesma posição, a de menor DBCP. Ao todo, contam-se 10 cristas neste intervalo de 0,2 segundos mostrado na Figura. Caso se considere o

intervalo de 1,0 segundo, têm-se 50 cristas, isto é, 50 Hz, exatamente a frequência utilizada para a soldagem desta junta.

No GMAW convencional, mostrado na Figura 46, é observado o modo de transferência goticular (*spray*), em que os parâmetros se mantêm com valores praticamente constantes, pois a DBCP não apresenta variações significativas.

Mesmo com as variações no comportamento de tensão e corrente, o índice de respingos de ambos os processos foram muito baixos. As Figuras 39 e 41 mostram a aparência dos cordões de solda sem limpeza.

5.2.1. Comparativo de Produtividade

O processo GMAW-RE permitiu a utilização do chanfro reto em substituição ao chanfro em V-60° usado para o GMAW convencional. Mesmo com uma abertura maior, o volume do chanfro reduziu em cerca de 26%, considerando a espessura da chapa de 10 mm. Esta redução de volume proporcionou a diminuição de metal de adição necessária para a soldagem e, por conseguinte, a redução do número de passes de soldagem, de 3 para 2. Além disso, o menor número de passes contribuiu para a eliminação de uma etapa de soldagem, composta por tempo de preparação, tempo de arco aberto e tempo de limpeza.

A taxa de deposição de ambos os processos estão dentro da faixa estimada por Myers (3,5 a 4,5 kg/h) [22]. O processo GMAW-RE ofereceu uma taxa de deposição média de 4,21kg/h, contra 3,80kg/h do processo GMAW convencional. Considerando apenas o tempo de arco aberto para o comparativo de produtividade, o GMAW-RE apresentou uma redução de 34%. Proporcionalmente, reduziu-se o consumo de gás de proteção, obtendo uma economia de 119 litros por metro de junta soldada. Mesmo utilizando uma chapa com espessura de apenas 10 mm, foi possível um ganho significativo de produtividade.

5.2.2. Comparativo de Custos

De acordo com o gráfico representado na Figura 47, a parcela do custo com maior valor é a de metal de adição, contrariando o mostrado na Figura 18. A explicação para este fato se dá por se tratar de um procedimento de soldagem mecanizado para vasos de pressão, utilizando materiais de alta resistência. Desta maneira, o custo do arame torna-se muito elevado e o tempo de arco aberto, reduzido. De modo geral, as parcelas do custo na soldagem GMAW-RE tiveram a seguinte participação: 63% do metal de adição, 27% do Homem-hora.

9% do gás de proteção e 1% da energia elétrica (considerando uma máquina inversora).

O processo GMAW com eletrodo rotativo apresentou um custo de 38,70 reais por metro de junta soldada, enquanto que o processo convencional apresentou um custo de 55,03 reais. A redução total de custos proporcionada pelo novo procedimento equivale a 30%, mesmo sendo utilizada uma chapa de espessura de apenas 10 mm, considerada o limite por outros autores para o qual existe ganho na aplicação deste processo [27].

Capítulo 6

Conclusão

O teste preliminar de soldagem do tipo cordões sobre chapa permitiu observar o comportamento dos parâmetros do perfil do cordão com as variações do diâmetro e frequência de rotação. As medições dos cordões e o cálculo da diluição indicaram que:

- a) A largura do cordão se mostrou diretamente proporcional à frequência de rotação;
- b) A altura do reforço e a penetração são inversamente proporcionais à frequência de rotação;
- c) A taxa de respingos aumentou a partir de uma frequência de 3000 rpm;
- d) O volume de material depositado diminuiu com o aumento do diâmetro e da frequência de rotação. Este fenômeno afetou o comportamento da diluição;

Em relação à soldagem em chanfro, foi produzida uma junta soldada em chanfro reto pelo processo GMAW com eletrodo rotativo livre de defeitos de soldagem e atendendo aos requisitos mínimos de propriedades mecânicas segundo os códigos ASME II. O registro de qualificação de procedimento de soldagem (RQPS), segundo os procedimentos do código ASME IX, e o laudo radiográfico estão na seção dos Anexos.

A soldagem pelo processo GMAW-RE permitiu o uso de chanfro estreito (Narrow Gap), apresentando fusão lateral adequada, problema este recorrente do processo GMAW convencional para este tipo de chanfro. Sobre as questões de produtividade e custos, constatou-se que a soldagem pelo processo GMAW-RE:

- a) Possibilitou o aumento a produtividade em 34%, a partir da diminuição do tempo total de soldagem;
- b) Consequentemente, reduziu a quantidade de gás de proteção por metro de junta soldada;
- c) Permitiu o aumento em 11% a taxa de deposição;
- d) Proporcionou uma redução de 30% dos custos de soldagem, sem levar em consideração a etapa de biselamento.
- e) Foi possível qualificar uma EPS pelo processo GMAW-RE

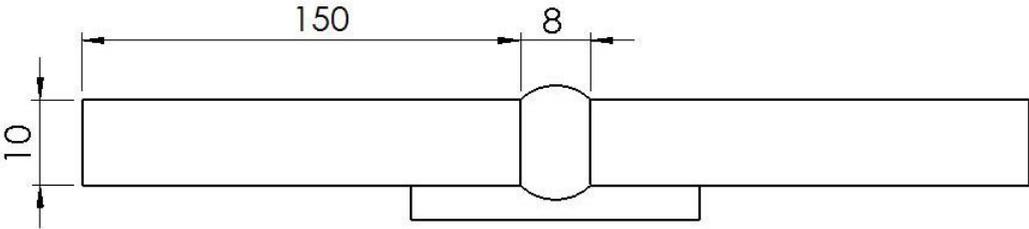
Sugestões para trabalhos futuros

Conhecendo o potencial deste processo de soldagem inovador através deste trabalho e com o propósito de melhor entendê-lo, pode-se sugerir para futuros trabalhos:

- Desenvolver um procedimento de soldagem pelo processo GMAW-RE para materiais de alta resistência;
- Promover a soldagem por este processo em materiais com maior espessura e realizar estudos de produtividade e custo;
- Explorar soldagens fora de posição;
- Realizar estudos metalúrgicos para conhecer a influência da frequência de rotação e do diâmetro de rotação na microestrutura formada.
- Verificar a influência do gás de proteção no processo GMAW com eletrodo rotativo;
- Realizar um estudo comparativo do uso dos consumíveis arame maciço e arame tubular de alma metálica (*Metal Cored*), para o GMAW-RE.

ANEXOS

Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem (RQPS)

		REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM - RQPS		Folha 1/2	
Código de Referência		ASME Seção IX		Data:	
Nome da Organização		Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca			
Número da RQPS					
Processo de Soldagem		GMAW com eletrodo rotativo – GMAW-RE			
Tipo (Manual, automático etc)		Mecanizada			
JUNTA (QW-402)					
					
METAL DE BASE (QW-403)			TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM (QW-407)		
Especificação do Material: ASTM A36			Faixa de Temperatura (°C)	N/A	
P-No: 1	Grupo: 1		Período de tempo (h)	N/A	
Espessura do material: 10 mm			Outros:		
Espessura máxima do passe: 6 mm					
Outros: Backing Cerâmico			GÁS DE PROTEÇÃO (QW-408)		
				Mistura	Vazão (l/min)
METAL DE ADIÇÃO (QW-404)			Gás de proteção:	98%Ar + 2%O ₂	20
	Raíz	Enchimento/Acabamento	Trailing:	N/A	N/A
Processo de soldagem:	GMAW	GMAW	Purga:	N/A	N/A
Especificação SFA:	5.28	5.28			
Classificação AWS:	ER110S-G	ER110S-G			
Diâmetro do metal de adição:	1.2	1.2	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409)		
Outros:			Corrente:	Contínua	
			Polaridade:	Direta	
POSIÇÕES (QW-405)			Tensão (V):	26 – 28	
Posição em Chanfro: 1G (plana)			Corrente (A):	230 - 270	
Progressão de Soldagem (Ascend./Descend.): N/A			Modo de Transferência:	Spray	
Posição em ângulo: N/A			Vel. de Alimentação (m/min)	7,5 – 8,5	
Outros:			Aporte térmico máx (kJ/mm)	2,50	
PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406)			TÉCNICA (QW-410)		
Temperatura mínima (°C):	100°C		Vel. Soldagem (mm/min): 16,0 – 20,0		
Temperatura máxima de interpasse (°C):	100°C		Oscilação: Sim	Amplitude (mm): 3 – 5	
Outros:			Passe simples ou múltiplo: Múltiplo		
			Limpeza entrepasses: Escova / Esmeril		

		REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM - RQPS				Folha 2/2
Código de Referência		ASME Seção IX				Data:
Resumo						
Passe	Processo de Soldagem	Metal de Adição	Corrente	Tensão	Vel. de avanço (mm/min)	
Raiz	GMAW-RE	ER110S-G – 1,2 mm	230 – 270	26 – 28	16 – 19	
Enchimento / Acabamento	GMAW-RE	ER110S-G – 1,2 mm	230 – 270	26 – 28	16 – 19	
ENSAIO DE TRAÇÃO (QW-150)						
Corpo de prova	Área (mm ²)	Limite de Resistência (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)	
1	192,3	460,1	396,8	22,8	42,8	
2	186,5	474,5	421,3	33,3	42,2	
ENSAIO DE DOBRAMENTO (QW-160)						
Tipo de Ensaio		Resultado				
Raiz		Aprovado				
Face		Aprovado				

Laudo Radiográfico

		EQUIPAMENTO: <input type="checkbox"/> Raio X <input checked="" type="checkbox"/> Raio Y
OBRA/Job: _____ 11 _____		
IDENTIFICAÇÃO/Identification:		
EQUIPAMENTO/PEÇA/Part: CORPO DE TROVA CTR		
MATERIAL/Material: A/C		ESPESSURA/Thickness: 10,0 + 2
JUNTA/Joint: L	FILME/Film: FUJI	POSIÇÃO/Position: 1 ~ 2
SOLDADOR/Welders: _____ 11 _____		OPERADORES/Operators:
LAUDO/Results		
NORMA/Norm:		
ENSAIO REALIZADO: () ANTES TRAT. TÉRMICO () APÓS TRAT. TÉRMICO () NÃO APLICÁVEL		
DESCONTINUIDADES/Discontinuities		
<input type="checkbox"/> Incl. Escória / S. Inclusion		<input type="checkbox"/> Poro / Pore
<input type="checkbox"/> F. Fusão / L. Fusion		<input type="checkbox"/> Trinca / Crack
<input type="checkbox"/> Outros / Others		<input type="checkbox"/> Mordedura / Undercutting
<input type="checkbox"/> F. Penetração / L. Penetration		
<input type="checkbox"/> APROVADO / Approved		<input type="checkbox"/> REPROVADO / Rejected
DENSIDADE NO IQI: Density in the body of IQI:	DENSIDADE NA ÁREA DE INTERESSE: Density in the area os interest:	
OBS/Remakes:		
Edson Alves Faria Filho OP II CNEN-003/18 ER-N2-ASNT MAXIM INPECOE		FISCALIZAÇÃO
INSPETOR - WMGIFEC / DATA Examiner-WMGI-FEC / DATE		

1 - A P0
 2 - A -



Referências Bibliográficas

- [1] MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q.; **“Soldagem: Fundamentos e Tecnologia”**; 4. ed.; Editora Elsevier, 2016
- [2] MODENESI, P.J.; MARQUES P.V.; SANTOS, D.B; **“Introdução à Metalurgia da Soldagem”**; Universidade Federal de Minas Gerais; Belo Horizonte, janeiro de 2012
- [3] SCHWEDERSKY, M.B.; **“Um Estudo da Eficiência e Produtividade dos Principais Processos de Soldagem a Arco”**; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011
- [4] AWS Welding Handbook – 9 Edition, Vol. 2; Welding Processes, American Welding Society, 2015
- [5] KAH, P.; LATIFI, H.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J.; PIRINEN, M.; **“Usability of Arc Types in Industrial Welding”**; International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 9:15; 2014
- [6] PRASAD, V.; BABU, M.; AJAY, P.; **“A Review on Rotating Arc Welding Process”**; Materials Today: Proceedings 5, 2018
- [7] ASME IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Qualification Standard For Welding, Brazing, And Fusing Procedures; Welders; Brazers; And Welding, Brazing, And Fusing Operators, The American Society of Mechanical Engineers, 2015
- [8] FUNDERBURK, S.; **“A New Spin on Welding”**; World Pipelines, p. 67, Jan 2015
- [9] WANG, J.Y.; REN, Y.S.; YANG, F.; GUO, H.B.; **“Novel Rotation Arc System for Narrow Gap MAG Welding”**; Science and Technology of Welding and Joining, 2007
- [10] GUO. N; LIN, S. B.; GAO, C.; FAN, C. L.; YANG, C. L.; **“Study on Elimination of Interlayer Defects in Horizontal Joints Made by Rotating Arc Narrow Gap Welding”**;

Science and Technology of Welding and Joining; 14:6, p. 584-588, 2009

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

[12] MIN, D.; XIN-HUA T.; FENF-GUI L.; SHUN, Y.; **“Welding of quenched and tempered steels with high-spin arc narrow gap MAG system”**; Springer-Verlag London Limited; 2010

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

[14] MURAYAMA, M.; OAZAMOTO, D.; OOE K.; **“Narrow Gap Gas Metal Arc (GMA) Welding Technologies”**; JFE Technical Report No. 20, Mar. 2015

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

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

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

[18] RAJU, D.; RAJU, G.; **“Effect of using a Rotating Electrode in Gas Metal Arc Welding on Weld Bead Characteristics of Aluminium Alloy 6061-T6 Weldments”**; Proceedings of the World Congress on Engineering, 2016.

[19] LI, W.; GAO, K.; WU, J.; WANG. J; **“Groove sidewall penetration modeling for rotating arc narrow gap MAG welding”**; Springer-Verlag London; 2014

- [20] MIG WELDING HANDBOOK; Union Carbide Corporation, Linde Division, Junho 1985
- [21] LOBATO, M.M.; **“Utilização de Misturas com Argônio e CO₂ na Soldagem de Arames Tubulares em Aço Carbono ASTM A36”**; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal Fluminense, 2015
- [22] MYERS, D.; **“Advantages and Disadvantages of Metal Cored Wires”**; Welding Journal; 81(9):39-42; 2002;
Disponível em:<<http://www.esabna.com/us/en/education/blog/advantages-and-disadvantages-of-metal-cored-wires.cfm>>
- [23] DUPONT, J.N.; MARDER, A.R.; **“Thermal Efficiency of Arc Welding Processes”**; 74: 406-s; 1995
- [24] CARMO, D.M.; FIGURELLI, M.H.; FERRAREZE, L.M.; SILVA, R.M; **“Cálculo para Diluição do Cordão de Solda utilizando IMAGEJ”**;
- [25] FIDALGO, C.A.P.; **“Convenção Coletiva de Trabalho 2016/2018”**; Sindicato dos Trabalhadores nas Ind Met Mec e de Mater Elétrico; Disponível em:
<<http://www3.mte.gov.br/sistemas/mediador/Resumo/ResumoVisualizar?nrSolicitacao=MR077572/2016>>
- [26] Miller Welds; **“Welding Guide to Power Efficiency”**; Disponível em:
< <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/welding-guide-to-power-efficiency>>
- [27] XU, G.; LI, L.; WANG, J.; ZHU, J.; LI, P.; **“Study of weld formation in swing arc narrow gap vertical GMA welding by numerical modeling and experiment”**; The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; Fevereiro, 2018
- [28] ASME II, ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Part A: Ferrous Materials Specifications (Beginning to SA-450), The American Society of Mechanical Engineers, 2015