

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

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

Pedro Lourenço Lacerda

Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

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

RIO DE JANEIRO

MAIO DE 2021

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

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

Pedro Lourenço Lacerda

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

Orientadores: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

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

RIO DE JANEIRO

MAIO DE 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do

L131 Lacerda, Pedro Lourenço
Efeito dos parâmetros de processo nas características de cordões de solda depositados pelo processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE) / Pedro Lourenço Lacerda – 2021.
34f : il.color. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow daFonseca, 2021.
Bibliografia: f. 32-34
Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge
Co-orientador: Luís Felipe Guimarães de Souza

1. Engenharia mecânica. 2. Eletrodos. 3. Solda e soldagem. I. Jorge, Jorge CarlosFerreira. (Orient.). II. Souza, Luís Felipe Guimarães de. (Co-orient.). III. Título

CDD 620.1

CEFET/RJ

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes –
CRB/7 nº 5281

Agradecimentos

Em primeiro lugar, a Deus pela bênção da vida e por ter me dado uma família maravilhosa.

Aos meus pais que não mediram esforços para me dar o melhor ensino e abriram mão de muitas coisas para me educar da melhor maneira possível.

À minha irmã Mariana por estar sempre ao meu lado me apoiando nas minhas decisões.

À minha futura esposa Mariane por me apoiar, me incentivar e me dar muita força em todas as minhas escolhas.

Ao meu avô Aridio (in memoriam) por ter seguido os seus sonhos, proporcionando enorme desenvolvimento familiar.

À minha avó Elenomar por me ensinar até hoje, por ser carinhosa presente e muito amorosa.

À minha avó Nely (in memoriam) por ter me ensinado muitos dos valores que vou carregar comigo durante a minha vida.

Ao Professor Orientador Jorge Carlos Ferreira Jorge (D Sc.) pela dedicação, pelos ensinamentos e pela confiança.

Ao Professor Coorientador Luís Felipe Guimarães de Souza (D Sc.) pela contribuição com muito conhecimento.

Ao Engenheiro Jeferson Costa por me auxiliar largamente com este projeto e por me transmitir muita experiência.

Ao Laboratório de Materiais do Cefet (LAMAT) por dispor de toda a infraestrutura necessária para realização das etapas deste trabalho.

Aos técnicos do LAMAT por estarem sempre dispostos a ajudar no que fosse necessário.

Aos amigos que me acompanharam durante toda a caminhada me apoiando e demonstrando enorme lealdade durante todo este trabalho.

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 pré-estabelecido. O presente trabalho investiga a influência dos parâmetros de soldagem nas características geométricas de cordões de solda depositados com a liga Inconel 625 pelo processo GMAW-RE sobre aço API 5L X65, de forma a estabelecer critérios para uma seleção de parâmetros adequada para a soldagem de revestimento por este processo. Para tal análise, foram depositados cordões sobre chapa variando os parâmetros de processo segundo o planejamento fatorial 3^2 , utilizando as frequências de rotação de 500, 1000 e 1500rpm, e diâmetros de rotação de 3, 6 e 8 mm. Os resultados mostraram que a melhor condição de soldagem foi obtida para uma frequência de 500rpm e diâmetro médio de rotação de 3mm, com base na avaliação de parâmetros geométricos, tais como penetração, largura do cordão e diluição.

Palavras-chave: Processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE), Frequência de rotação do eletrodo, diâmetro de rotação do eletrodo;

ABSTRACT

The GMAW process with rotating electrode (GMAW-RE) is a variation of conventional GMAW, in which the electrode wire is subjected to a rotational movement along a pre-established diameter. The present work investigates the influence of welding parameters on the geometric characteristics of weld beads deposited with Inconel 625 alloy by the GMAW-RE process on steel API 5L X65, in order to establish criteria for a selection of parameters suitable for overlays welding through this process. For such analysis, strands were deposited on plate, varying the process parameters according to the 3k factorial design, using the rotation frequencies of 500, 1000 and 1500 rpm, and rotation diameters of 3, 6 and 8 mm. The results showed that the best welding condition was obtained for a frequency of 500 rpm and an average rotation diameter of 3 mm, based on the evaluation of geometric parameters, such as penetration, bead width and dilution.

Keywords: GMAW process with rotating electrode (GMAW-RE), Electrode rotation frequency, electrode rotation diameter;

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
SUMÁRIO	7
CAPÍTULO 1	10
INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
II.1. O Processo GMAW com Eletrodo Rotativo (GMAW-RE)	13
II.2. Revestimento com a liga Inconel 625	18
CAPÍTULO III	19
MATERIAIS E MÉTODOS	19
III.1. Materiais	19
III.2 - Procedimento de Soldagem	19
III.4 - Ensaio Metalográficos	21
III.4.1 - Aspectos Geométricos	21
III.4.2 - Diluição	21
CAPÍTULO IV	23
RESULTADOS	23
IV.1. Aspectos Geométricos	23
IV.2. Diluição	24
IV.3. Ensaio de Microdureza Vickers (HV _{0,5})	25
CAPÍTULO V	27
DISCUSSÃO	27
V.1 - Aspectos Geométricos	27
V.1.1 – Diluição	29
V.2. - Propriedades Mecânicas e Microestruturais	29
V.3. - Seleção dos Parâmetros de Processo	30
CAPÍTULO VI	32
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	32
VI.1 – CONCLUSÕES	32
VI.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	32
CAPÍTULO VII	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 – Tocha com efeito de rotação do eletrodo [12]	14
Figura II.2 - Esquema similar da tocha com eletrodo rotativo [13].....	13
Figura II.3 - Relação entre a regulagem do diâmetro médio de giro com o diâmetro de giro efetivo [14].....	154
Figura II.4 - Influência do eletrodo rotativo no perfil do cordão [21].....	165
Figura II.5 - Efeito da frequência na penetração, reforço e largura do cordão de solda [17].	165
Figura II.6 - Efeito da frequência na penetração, reforço e largura do cordão de solda [12].	176
Figura III.1 - Montagem dos equipamentos para soldagem [12].....	209
Figura III.2 - Posicionamento dos pontos de microdureza (HV0,5).....	20
Figura III.3 - Representação da diluição em cordão de solda [18].....	Erro! Indicador não definido.1
Figura IV.1 – Macrografias dos cordões depositados. Ataque: nital 2%.....	232
Figura IV.2 – Aspecto visual dos cordões depositados.	243
Figura V.1 – Valores da largura do cordão de solda de acordo com a frequência de rotação e diâmetro de giro.....	28
Figura V.2 – Valores da altura do cordão de solda de acordo com a frequência de rotação e diâmetro de giro.....	28
Figura V.3 – Valores da penetração do cordão de solda de acordo com a frequência de rotação e diâmetro de giro	28
Figura V.4 - Relação de diluição em função dos parâmetros de processo (frequência e diâmetro médio de rotação)	29
Figura V.5 - Maiores durezas obtidas na ZTA das amostras de acordo com a posição do ponto de medição da dureza.....	30
Figura V.6 – Valores de maior dureza de acordo com a frequência de rotação e diâmetro de giro	30

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 - Efeito dos Parâmetros de soldagem nas características do cordão solda para o GMAW convencional [18].	176
Tabela III.1 – Especificação da Composição química e propriedades mecânicas do aço API 5L X65.	198
Tabela III.2 - Composição Química do consumível conforme dados fornecidos pelo fabricante.....	198
Tabela III.3 - Parâmetros de Processo usados na Soldagem dos cordões.	209
Tabela IV.1 - Aspectos geométricos dos cordões depositados	232
Tabela IV.2 - Cálculo da diluição dos cordões depositados.	243
Tabela IV.3 - Resultados dos ensaios de microdureza Vickers (HV0,5) no metal depositado.	254
Tabela IV.4 - Resultados dos ensaios de microdureza Vickers (HV0,5) no ZTA	265

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de petróleo passa por grandes transformações. O País ainda é líder na exploração de óleo e gás em águas profundas e ultra profundas, desde a descoberta dos reservatórios do Pré-Sal em 2007. De acordo com a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), as reservas brasileiras comprovadas são equivalentes à aproximadamente 14 bilhões de barris de petróleo, mas com a exploração do Pré-Sal, o país possui o potencial de aumentar suas reservas em 55 bilhões de barris [1]. Atualmente, o petróleo ainda tem uma perspectiva de crescimento, embora haja uma mudança de pensamento na sociedade, em relação poluição e engajamento com o meio ambiente. Estima-se que o pico na demanda pelo petróleo, ocorra por volta de 2040 [2].

Com a perspectiva de pico para 2040 e o surgimento de novas tecnologias, espera-se que o custo do barril de óleo diminua, pois, tais inovações auxiliam na automação da prospecção, na utilização de menos matéria prima na confecção de novos equipamentos e equipamentos mais duráveis e confiáveis [3].

A exploração das reservas do pré-sal sempre foi considerada um grande desafio, pois nos poços, além de óleo bruto, existem altas concentrações de gases altamente corrosivos. A presença destes gases é altamente prejudicial para uma grande parte dos materiais utilizados na fabricação de equipamentos mecânicos [4]. Concomitantemente, a necessidade de elevar o tempo de serviço destes equipamentos, garantir a eficiência e confiabilidade dos componentes com relação a leis ambientais, foram sendo utilizados materiais diversos para melhorar tais características.

Pelas razões citadas anteriormente, grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e tecnologias tornam-se necessários para diminuir o máximo possível esses problemas causados durante a extração e transporte do petróleo. Esses investimentos abrangem o desenvolvimento de processos de soldagem e a aplicação de novos materiais como revestimentos, bem como sua soldabilidade, para serem utilizados como revestimento materiais de menor custo em dutos e outros equipamentos, por exemplo.

As superligas de níquel vêm sendo utilizadas como uma alternativa aos aços na indústria petrolífera, pois são dotadas de alta resistência a corrosão, principalmente sob tensão, fluência e cavitação [5]. A liga comercialmente chamada de Inconel 625 é uma superliga de níquel largamente utilizada devido à sua alta resistência a tração e alta resistência à corrosão [6]. No entanto, por ter custo elevado, as superligas de

níquel vêm sendo estudadas para que a implementação das mesmas deixe de serem inviáveis. Por isso, o conceito de revestimentos metálicos utilizando materiais dissimilares se mostrou interessante. Atualmente, uma grande variedade de equipamentos, vem sendo beneficiados por este procedimento [7].

O revestimento por soldagem é uma solução flexível, que pode ser facilmente aplicada durante a fabricação. Pode ser realizado em peças de diferentes formas e geometrias e em diferentes posições. O processo de soldagem por fusão é selecionado para obter os melhores resultados em termos de qualidade e produtividade [8].

Neste contexto, o processo GMAW é o mais popular entre os vários processos de soldagem para revestimento, sendo amplamente aceito pela indústria devido a várias características, tais como soldagem em todas as posições, baixo custo, alta taxa de deposição, e facilidade de mecanização [9,10].

Usualmente, a utilização de proteção gasosa com mistura de gases inertes ou um gás puro influencia muito a geometria do cordão e a execução da soldagem. O Argônio (Ar) e Hélio (He) são exemplos destes gases usados sozinhos ou como misturas no processo GMAW. Ambos são inertes, mas propiciam propriedades diferentes, geometria do cordão e características do arco de soldagem. O Ar e o He têm potenciais de ionização diferentes, 15.755 e 24.580 eV, respectivamente [11]. Normalmente se utilizam revestimento com espessura de 3mm e assim, faz-se necessária a execução de soldagem multipasses para reduzir a diluição e garantir a conformidade de composição química e, conseqüentemente de resistência a corrosão. Assim, processos de soldagem que permitam a deposição com menor taxa de diluição são mais desejáveis.

Recentemente, alguns autores evidenciaram que o processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE) pode ser uma alternativa ao processo GMAW convencional, pois promove uma melhoria significativa na produtividade e na redução de custos associados à mecânica adequada propriedades [12-20].

O principal objetivo deste trabalho é investigar o efeito dos parâmetros de processo nas características de cordões de solda depositados pelo GMAW-RE, com o intuito de utilizar este processo na execução de revestimentos soldados com a liga Inconel 625. Especificamente, busca-se através da variação do diâmetro e da frequência de rotação compreender a influência nas propriedades mecânicas e geométricas dos cordões. Desta maneira, podem-se expor os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar a influência da frequência e diâmetro médio de rotação nas características geométricas de cordões de solda depositados pelo GMAW-RE e;

- b) Avaliar uma metodologia para seleção dos parâmetros de processo, frequência e do diâmetro médio de rotação, com o objetivo de otimizar seus efeitos nas propriedades dos cordões depositados.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

O processo GMAW-RE, que surgiu como uma variação do processo GMAW e se diferencia deste, pois a sua tocha permite ao arame-eletrodo um movimento de rotação em torno de um diâmetro pré-estabelecido com uma frequência controlada. Esta tocha é projetada para operar tanto nos modos mecanizado como automatizado.

A Figura II.1 mostra o efeito desta rotação do eletrodo [12].

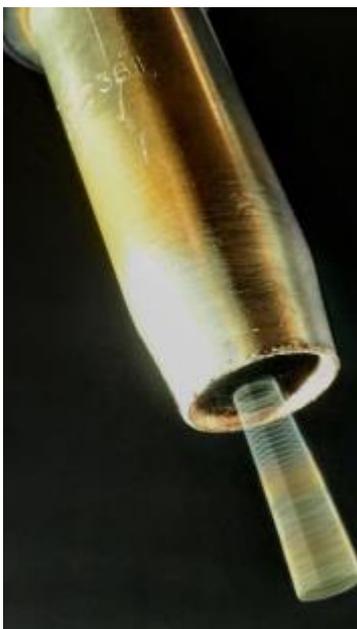


Figura II.1 - Tocha com efeito de rotação do eletrodo [12]

O sistema da tocha de soldagem responsável pelo giro do arame é composto por um motor que proporciona um movimento de rotação para um bloco. Uma haste condutora é conectada ao bloco 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 [12].

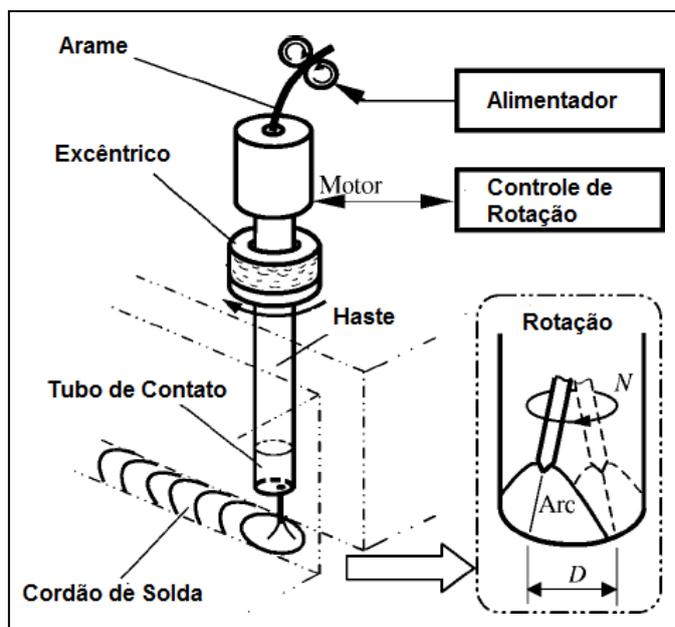


Figura II.1 - Esquema similar da tocha com eletrodo rotativo [13].

Quando comparado ao processo GMAW convencional, o processo GMAW-RE pode ser regulado com os seguintes parâmetros:

- Diâmetro médio de Rotação
- Sentido de rotação
- Frequência de rotação

Os valores do diâmetro médio de rotação, de acordo com o fabricante, representam o diâmetro formado pelo arame, quando este está com 25 mm de comprimento para fora do tubo de contato e a frequência de rotação está regulada a 1.000rpm, conforme mostrado na Figura II.3 [14].

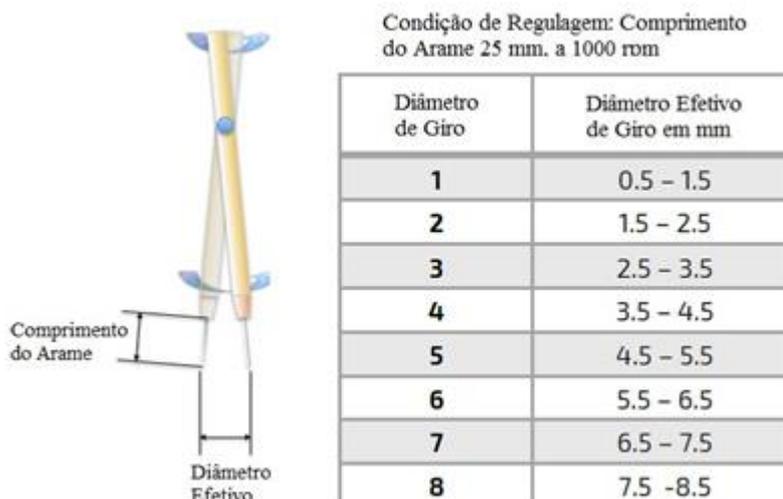


Figura II.2 - Relação entre a regulagem do diâmetro médio de giro com o diâmetro de giro efetivo [14].

As vantagens que se busca na utilização do revestimento metálico por meio do processo GMAW-RE são a redução do custo de fabricação, redução do tempo de soldagem e possibilidade de redução da quantidade de camadas depositadas devido a menor diluição e devido ao depósito mais eficiente. A principal aplicação para o revestimento metálico utilizando o processo GMAW-RE, é a fabricação de tubos e acessórios para equipamentos sujeitos a altas taxas de corrosão.

Entretanto, o grande desafio da soldagem de revestimento é garantir adequada diluição com uma geometria adequada, este é o principal desafio quando se fala em GMAW-RE.

O processo com eletrodo rotativo (GMAW-RE) vem sendo estudado, pois introduz uma modificação em relação ao convencional que influi no perfil, na penetração e diluição do cordão de solda. O movimento rotativo acelera as gotículas metálicas radialmente dependendo do diâmetro e da velocidade de rotação, conforme observado por GUO et al. [16]. Como consequência deste movimento rotativo, são geradas condições mais favoráveis para redução de camadas depositadas na solda de revestimento, pois permite menor diluição, melhor espalhamento da poça de fusão e melhor o perfil do cordão de solda propicia utilizar menos material de adição.

SRINIVASA RAO et al. [21] realizaram um estudo a fim de investigar os efeitos do eletrodo rotativo no perfil de cordões solda sobre chapas. Foram feitas medidas de larguras, alturas e penetrações em amostras depositadas pelo processo GMAE-RE com diâmetro médio de rotação de 6mm e frequências de rotação de 550, 750, 920, 1050,1300rpm sem rotação. A Figura II.4 mostra o resultado experimental obtido para o perfil do cordão de solda.

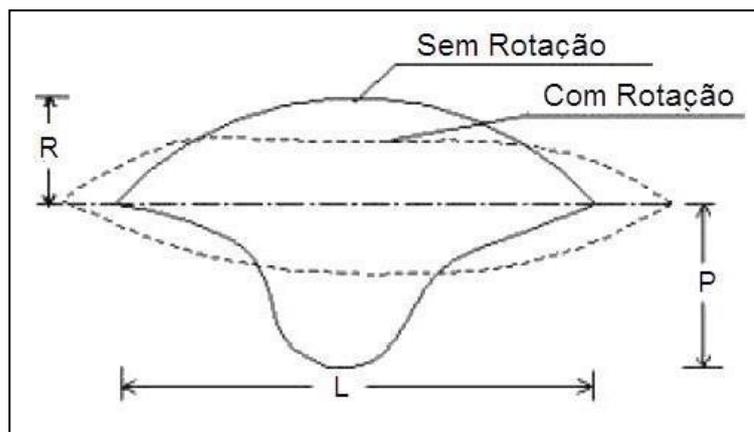


Figura II.3 - Influência do eletrodo rotativo no perfil do cordão [21].

Saber como aspecto geométrico dos cordões se comporta é de extrema importância para a soldagem de revestimento, pois a partir de suas características pode-se avaliar a propensão de se obter altas taxas de diluição, defeitos de soldagem e falta de fusão. SANTOS et al. [17] e SILVEIRA [12] realizaram estudos semelhantes a fim de investigar aspectos geométricos de cordões de solda obtidos pelo processo GMAW-RE. Santos manteve restrito o diâmetro médio de rotação em 3mm e utilizou frequências de no máximo 2000 rpm, no tocante que Silveira fixou o diâmetro em 6mm e utilizou frequências acima de 3000 rpm.

Os resultados obtidos tanto por SANTOS et al. [17] como por SILVEIRA [12], mostraram como a frequência de rotação possui uma grande influência na geometria do cordão de solda, pois o aumento deste parâmetro de processo provocou uma diminuição da penetração e do reforço do cordão e um aumento da largura do cordão, como se pode observar na Figura II.5 e Figura II.6.

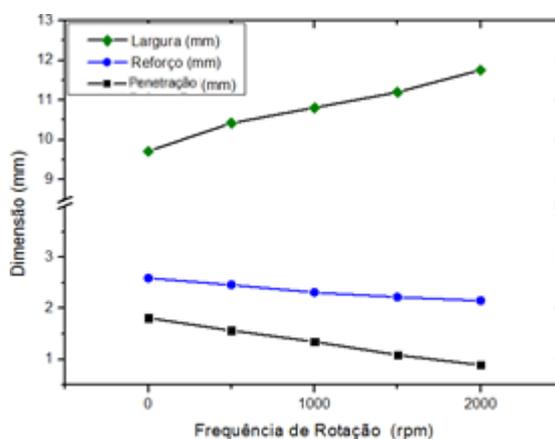


Figura II.4 - Efeito da frequência na penetração, reforço e largura do cordão de solda [17].

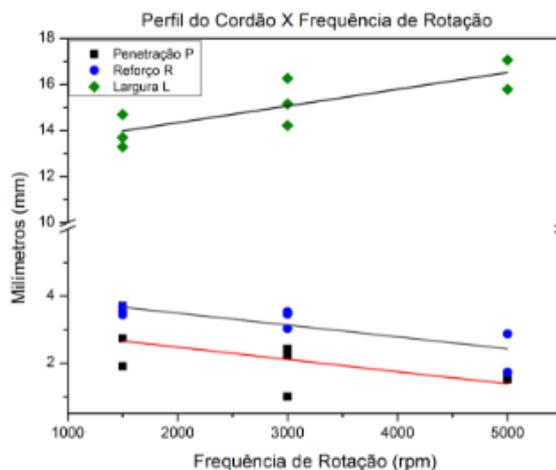


Figura II.5 - Efeito da frequência na penetração, reforço e largura do cordão de solda [12].

É importante ressaltar que não é tão somente a rotação e o diâmetro médio que influenciam no perfil do cordão de solda. Vale ressaltar que existem parâmetros comuns ao processo GMAW convencional também possuem grande influência no aspecto do cordão de solda. A corrente de soldagem determina o tipo de transferência metálica, influenciando na penetração, largura e no aspecto visual da solda. A tensão influencia no comprimento e largura do arco, afetando a altura do reforço e na largura do cordão. A Tabela II.1 mostra, um breve resumo, a relação entre alguns dos parâmetros de soldagem do processo GMAW comum, como afeta o perfil do cordão e os efeitos [22].

Tabela II.1 - Efeito dos Parâmetros de soldagem nas características do cordão solda para o GMAW convencional [22].

Parâmetro	Afeta no cordão	Efeitos
Corrente de soldagem	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração. • Taxa de deposição. • Modo de deposição 	Aumento na corrente aumenta a velocidade de alimentação; Aumento da taxa de fusão e penetração;
Tensão de soldagem	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito na Diluição. • Largura do cordão; 	Aumento da tensão do arco aumenta a largura do cordão. Redução da penetração. Importante para a estabilidade do arco elétrico.
Velocidade de soldagem	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade de penetração; • Largura do cordão; 	Aumentar a velocidade reduz a penetração, a largura do cordão e o reforço; Tendência a aumentar a probabilidade de mordeduras.

II.2. Revestimento com a liga Inconel 625

A soldagem de materiais dissimilares, aliada à soldagem de revestimento vem ganhando muita força na fabricação e reparos de elementos utilizados na indústria de óleo e gás. Isso ocorre pois os aços comumente utilizados na confecção de tubos, não são materiais que resistem bem à corrosão. Em razão disso, deu-se início a utilização de soldagem dissimilar com aços estruturais C-Mn e baixa liga com aços inox e as superligas de níquel, que possuem alta resistência à corrosão.

A soldagem de revestimento é definida como a deposição de um metal dissimilar (revestimento) sobre uma superfície metálica (substrato); visando a obtenção de propriedades específicas as quais o substrato carece [23]. Essa técnica de soldagem tem diversas aplicações, como na reconstrução de componente, reparo na forma e/ou ajuste dimensional [24], ou ainda, pode ser utilizada para promover uma modificação química da camada superficial do material de base visando a obtenção de propriedades dissimilares [25].

Ao contrário das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil do cordão de solda desejado é constituído de grandes larguras, baixos reforços, baixas penetrações e baixas porcentagens de diluição. Esse perfil de deposição é muito importante para que se possa obter um recobrimento de maiores áreas com menos material utilizado e garantia da integridade da composição química do material utilizado como revestimento, pois caso a diluição seja com valores altos é necessário aplicar mais camadas para garantir que a dada profundidade a composição química seja homogênea e se obtenha a composição desejada. O ajuste dos parâmetros que permita a obtenção desse perfil característico é um dos principais desafios da soldagem de revestimento [26].

A liga Inconel 625 vem sendo amplamente utilizados nas indústrias com a finalidade de ampliar a vida útil de equipamentos submetidos a ambientes altamente corrosivos [27], por meio do processo de revestimento metálico que consiste na deposição da liga através de procedimentos de soldagem sobre um substrato de um aço, melhorando significativamente a resistência à corrosão do equipamento, aumentando a sua vida útil e por ser feito de um aço estrutural revestido com um material mais nobre, o custo de fabricação é muito menor em comparação a um equipamento todo confeccionado com um material nobre. Tais melhorias, como aumento na resistência à corrosão e à fluência, se dão pela adição de aproximadamente 20% de Cr e 9% de Mo.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

III.1. Materiais

Foi utilizado um tubo de aço API 5L X65 com 635 mm de diâmetro, 210 mm de comprimento e 19 mm de espessura e como consumível foi utilizada a superliga de níquel 625 (AWS A5.14 ERNiCrMo-3) com diâmetro 1,2mm.

As Tabelas III.1 e III.2 mostram a composição química especificada pelos fabricantes do metal base e do consumível, respetivamente.

Tabela III.1 – Especificação da Composição química e propriedades mecânicas do aço API 5L X65.

Elemento	C	Mn	P	S	Nb+Ti+V
% em peso (valores máx.)	0,28	1,40	0,030	0,030	0,15

Tabela III.2 - Composição Química do consumível conforme dados fornecidos pelo fabricante.[29]

Ni	Fe	Mo	Cr	C	Mn	P	S	Nb
61	4	8,7	21,5	0,025	0,15	0,015	0,001	3,5

III.2 - Procedimento de Soldagem

As soldagens realizadas são do tipo cordões sobre chapa, utilizando uma mistura Ar-25% He como gás de proteção. Foram depositados cordões de solda com frequência de rotação de 500, 1.000 e 1.500 rpm e com diâmetro médio de rotação de 3, 6 e 8 mm, seguindo um planeamento fatorial 3_k , conforme mostra a Tabela III.3, seguindo a metodologia realizada por GARCIA [18] para o processo GMAW-RE. Em relação aos parâmetros de soldagem, foi utilizada uma tensão média de 35V, intensidade de corrente de cerca de 215A e velocidade de deslocamento de 20 cm/min. Estes parâmetros foram obtidos a partir de testes preliminares que propiciaram uma soldagem estável e cordões com bons aspectos visuais.

A soldagem foi mecanizada através de um trator com trilho magnético, conectado ao controlador dos parâmetros da tocha de soldagem e interligado à fonte de soldagem do tipo sinérgica. A Figura III.1 mostra a montagem dos equipamentos.

Tabela III.3- Parâmetros de processo usados na soldagem dos cordões.

Frequência\Diâmetro	3	6	8
500	AM 05	AM 04	AM 08
1000	AM 06	AM 03	AM 09
1500	AM 07	AM 02	AM 10

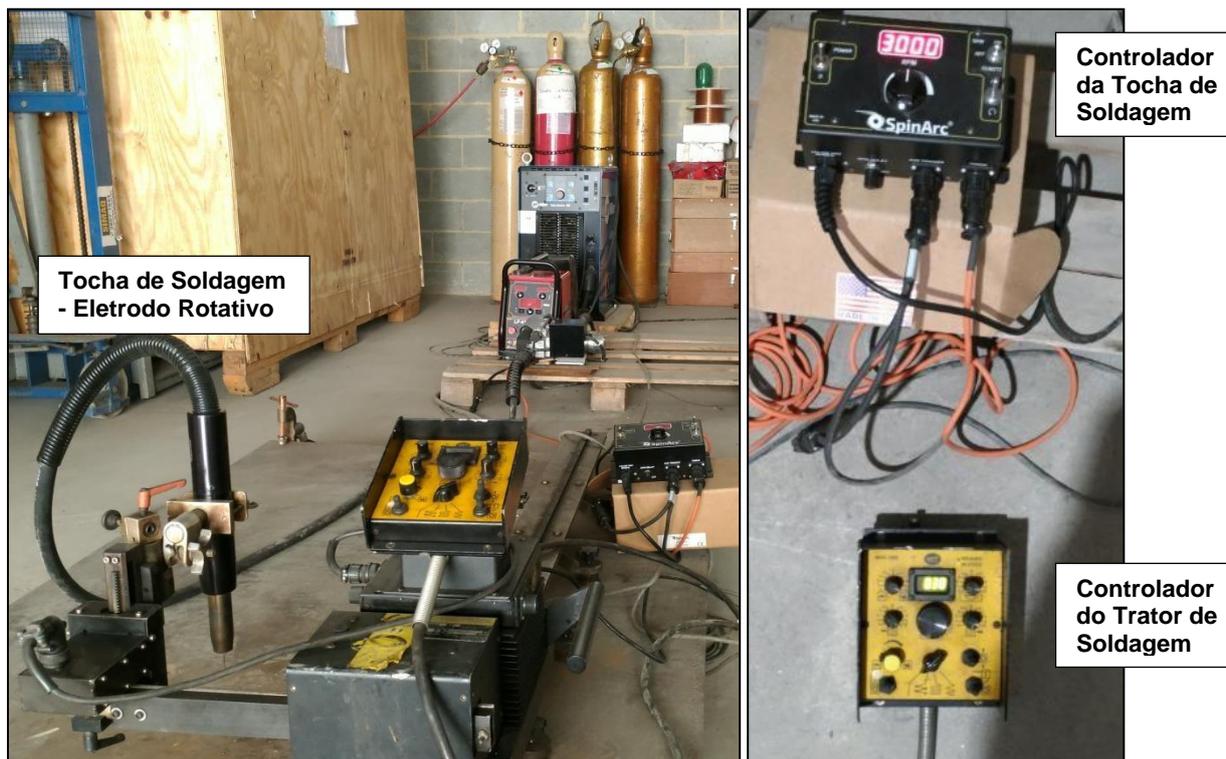


Figura III.1 - Montagem dos equipamentos para soldagem [12].

III.3 - Ensaios Mecânicos

Foram realizados ensaios de microdureza na escala Vickers ($HV_{0,5}$), conforme a norma ASTM E384–17 [28], em amostras retiradas da seção transversal dos cordões soldados, com carga de 500 gf. por 15 segundos a temperatura ambiente. Foi utilizado um microdurômetro da marca Instron-Wilson modelo 402 MVD

As impressões foram executadas em duas linhas, L1 e L2, distantes 6,0 mm uma da outra. A distância d1 foi de 0,5 mm e a distância d2 de 0,5 mm. A Figura III.2 mostra a localização das impressões de microdureza.

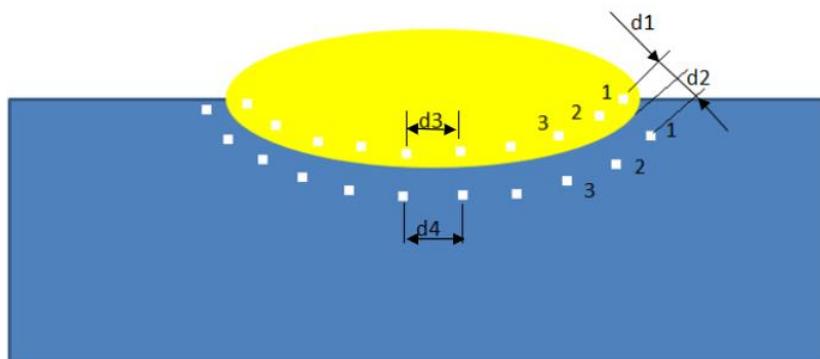


Figura III.2- Posicionamento dos pontos de microdureza ($HV_{0,5}$).

III.4 - Ensaios Metalográficos

Foi realizada análise metalográfica foi realizada por microscopia ótica (MO), com o objetivo de calcular a diluição e observar a existência de defeitos. A preparação das amostras consistiu das técnicas convencionais de lixamento com lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200 seguido de polimento com pasta de diamante de 6, 3, e $1\mu\text{m}$. Após o polimento, foi realizado ataque químico com reagente nital 2%.

III.4.1 - Aspectos Geométricos

Os aspectos da geometria foram avaliados com o foco de investigar de qual a melhor combinação entre frequência e o diâmetro médio de rotação de modo a influenciar no perfil macroestrutural dos cordões de solda. Através da microscopia ótica (MO), foram realizadas medições relativas à penetração, reforço e largura do cordão de cada amostra.

III.4.2 - Diluição

Foi realizada análise da diluição com auxílio do software Image J, a partir de imagens coletadas nas macrografias dos cordões depositados. As áreas consideradas para cálculo de diluição são mostradas esquematicamente na Figura III.3.

A equação III.1 mostra o cálculo para obtenção do valor de diluição de cada depósito, onde AP representa a área penetrada e AR, a área do reforço.

$$\text{Diluição} = (AP/AP+AR) \times 100$$

(III.1)

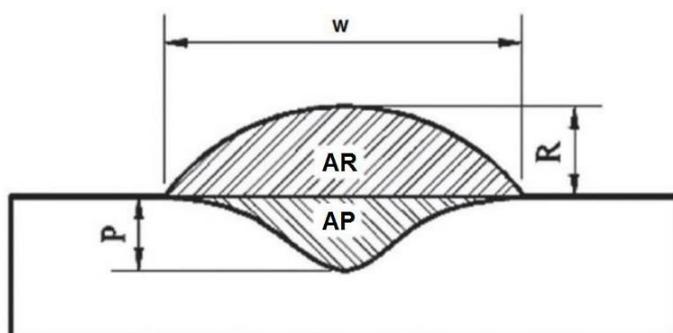


Figura III.3 - Representação da diluição em cordão de solda [18].

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

IV.1. Aspectos Geométricos

As macrografias dispostas na Figura IV.1 foram feitas a partir das amostras retiradas da seção transversal dos cordões de solda. Os resultados das medições de largura, reforço e penetração se encontram na Tabela IV.1.

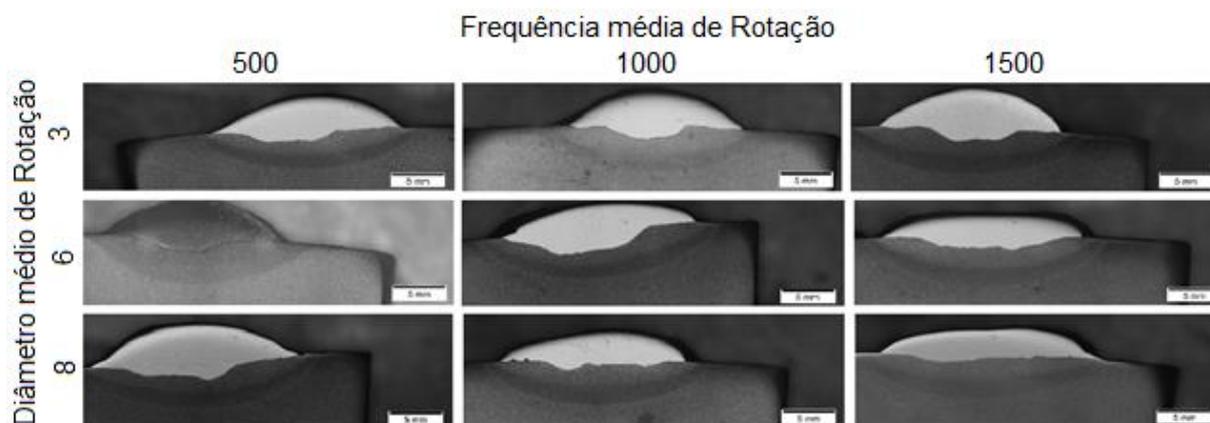


Figura IV.1 – Macrografias dos cordões depositados. Ataques: nital 2%.

Tabela IV.1 - Aspectos geométricos dos cordões depositados.

Amostra	Diâmetro médio de Rotação (mm)	Frequência de Rotação - rpm	Largura (mm)	Altura (mm)	Penetração (mm)
AM 05	3	500	18,13	3,77	1,00
AM 06		1000	17,12	2,81	2,00
AM 07		1500	18,13	3,74	1,31
AM 04	6	500	18,73	3,27	1,41
AM 03		1000	18,95	2,65	2,20
AM 02		1500	19,51	2,17	1,25
AM 08	8	500	19,85	3,26	2,01
AM 09		1000	18,21	2,84	1,04
AM 10		1500	20,79	2,48	1,01

As medidas foram realizadas com auxílio do software Image J e assim como encontrado por SANTOS et al. [17], os resultados obtidos apresentam uma tendência propensão no aumento da largura do cordão com o aumento da frequência de rotação. Em relação a altura e à penetração, foi observado uma tendência de redução em função da frequência de rotação.

Em relação aos aspectos visuais dos cordões de solda, foi observado que existe uma tendência a se obter cordões com menor volume de respingos para diâmetros menores e

menores frequências proporcionam cordões mais limpos e homogêneos, como pode ser observado na Figura IV.2. Tal fato foi observado também por SILVEIRA [12], que pode verificar que quando se tem alta frequência de rotação e altos diâmetros, diâmetros acima de 6 e frequências acima de 3000, pode ocorrer a má formação dos cordões de solda. Isto ocorre pois com alta rotação e maiores diâmetros, gera um aumento na força centrífuga que atua sobre as gotículas de metal projetando-as para fora da poça de fusão.

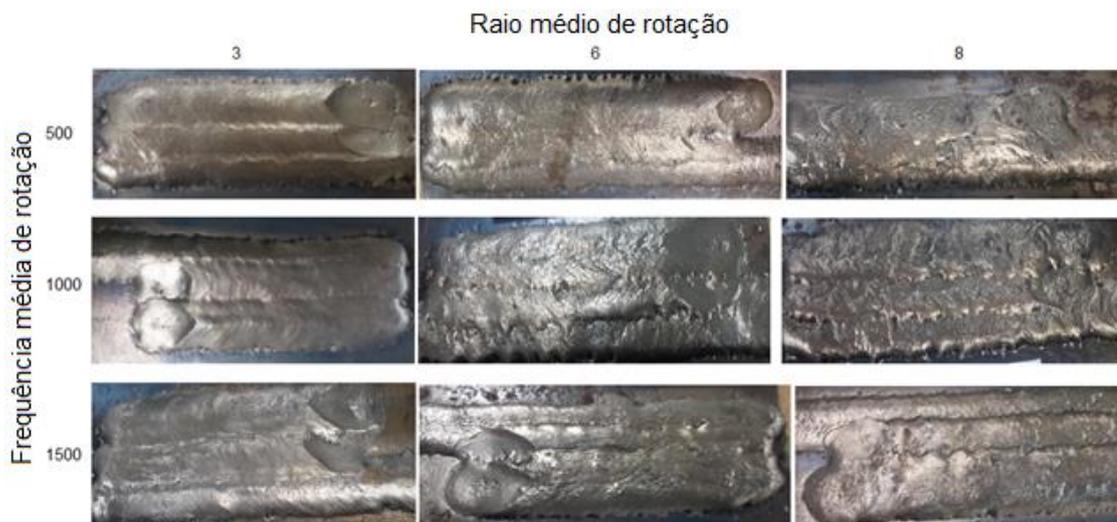


Figura IV.2 – Aspecto visual dos cordões depositados.

IV.2. Diluição

A Tabela IV.2 mostra os resultados de diluição das amostras, calculadas com o Softwer Image J a partir das macrografias mostradas na Figura IV.1. Observa-se que os índices de diluição das amostras soldadas sofreram uma ligeira queda quando se aumenta a frequência e aumenta o diâmetro de rotação.

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

Amostra	Diâmetro médio de Rotação (mm)	Frequência de Rotação - rpm	Área Total (mm ²)	Área Fundida (mm ²)	Diluição (%)
AM 05	3	500	185189	46331	25,02%
AM 06		1000	159421	29204	18,32%
AM 07		1500	193954	29520	15,22%
AM 04	6	500	173302	40029	23,10%
AM 03		1000	189298	86083	45,48%
AM 02		1500	162262	51978	32,03%
AM 08	8	500	212358	54619	25,72%
AM 09		1000	147788	21389	14,47%
AM 10		1500	146056	24864	17,02%

IV.3. Ensaio de Microdureza Vickers (HV_{0,5})

As Tabelas IV.3 e IV.4 mostram os resultados dos ensaios de microdureza no metal de solda e na ZTA, conforme o especificado no item III.3. A partir destes resultados, nota-se que:

- Os resultados de maior dureza se encontram normalmente nas amostras de maior frequência;
- As localizações dos pontos de maior dureza em cada amostra estão em pontos diferentes e até então aleatórios, o que mostra concordância com os resultados obtidos por GARCIA [18];
- Há uma grande variação de microdureza dentro das amostras.

Tabela IV.3 - Resultados dos ensaios de microdureza Vickers (HV_{0,5}) no metal depositado.

	AM 05	AM 06	AM 07	AM 04	AM 03	AM 02	AM 08	AM 09	AM10
Diâmetro	3			6			8		
Frequência	500	1000	1500	500	1000	1500	500	1000	1500
d1 (mm)	1,0	0,05	0,05	1,0	0,05	0,05	0,05	0,5	0,05
d3 (mm)	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	197	199	204	197	190	201	222	210	245
2	189	209	203	189	190	185	184	197	228
3	193	217	216	193	179	184	168	205	221
4	193	188	221	193	167	180	181	208	239
5	168	206	200	168	176	188	174	212	246
6	193	230	213	193	179	196	177	218	255
7	215	185	210	215	178	193	178	204	246
8	202	194	229	202	177	192	197	214	217
9	209	198	219	209	181	192	194	220	240
10	221	192	231	221	193	186	194	206	222
11	236	207	214	236	194	186	217	228	224
12	210	223	210	210	191	185	199	229	218
13	218	213	227	218	200	186	211	202	216
14	212	201	220	212	202	194	213	220	221
15	229	185	217	229	201	200	219	198	221
16	204	215	233	204	194	200	208	180	212
17	200	201	215	200	186	207	194	133	214

Tabela IV.4 - Resultados dos ensaios de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) no ZTA

Ponto/CP	AM 05	AM 06	AM 07	AM 04	AM 03	AM 02	AM 08	AM 09	AM 10
Diâmetro	3			6			8		
Frequência	500	1000	1500	500	1000	1500	500	1000	1500
d2(mm)	1,0	0,05	0,05	1,0	0,05	0,5	0,5	0,5	0,05
d4(mm)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1	214	209	203	214	207	213	208	227	194
2	212	206	211	212	192	213	214	221	223
3	208	222	217	208	213	208	229	227	207
4	225	216	214	225	210	211	215	228	199
5	217	216	208	216	233	223	219	226	219
6	211	228	227	211	197	226	224	229	239
7	214	201	225	214	212	207	212	218	222
8	202	218	239	202	211	214	229	217	230
9	218	215	236	216	225	213	224	239	232
10	230	212	235	230	219	213	215	218	239
11	222	221	236	222	219	208	231	215	219
12	223	214	214	223	208	211	258	236	233
13	238	229	243	238	241	209	211	227	233
14	237	216	225	237	221	211	251	212	230
15	242	218	234	242	228	220	204	212	242
16	240	222	235	240	220	223	221	202	230
17	235	221	230	234	227	215	207	207	223

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO

V.1 - Aspectos Geométricos

Os resultados obtidos a partir das medições feitas diante das macrografias mostram tendências de comportamento para os parâmetros intrínsecos do processo. No GMAW convencional, a característica de penetração tende a formar um cordão de solda onde pode-se observar na porção central da seção uma maior penetração (finger type), assim como verificado por RAO et al. [21]. Já no processo com o eletrodo rotativo, tanto com o aumento do diâmetro de rotação quanto com a frequência de rotação, a seção transversal do cordão de solda tende a ter uma formação de uma penetração mais homogênea com uma curvatura menos acentuada no centro, se diferenciando do processo GMAW. Também foi observado por RAO et al. [21], assim como ilustrado na Figura II.4 e, como pode ser observado experimentalmente, na Figura IV.1

Observando a Tabela IV.1 e a Figura V.1, é possível verificar uma tendência de aumento na largura dos cordões de solda com o aumento da frequência e do diâmetro de giro, assim como observa-se a tendência na diminuição da altura dos cordões. Tal fato se confirma quando se compara a amostra 05 com a amostra 03 com, respectivamente, 3mm de diâmetro e 500rpm e 6mm de diâmetro e 1000rpm, onde a AM 05 tem largura de 18,13 mm e altura de 3,77 mm e a AM 03 tem largura 18,95 mm e altura 2,65 mm, corroborando com o que foi citado acima, quanto maior a frequência e o diâmetro maior a largura e menor a altura.

As altas frequências de rotação aliadas com maiores diâmetros influenciam muito negativamente no aspecto visual dos cordões (Figura IV.2), sendo possível verificar que tal influência negativa fica em maior evidência na amostra 09, onde se observa um cordão de solda com muitos respingos, muita rugosidade superficial e a margem do cordão muito irregular. Tais observações corroboram com o que foi mostrado por SILVEIRA [12].

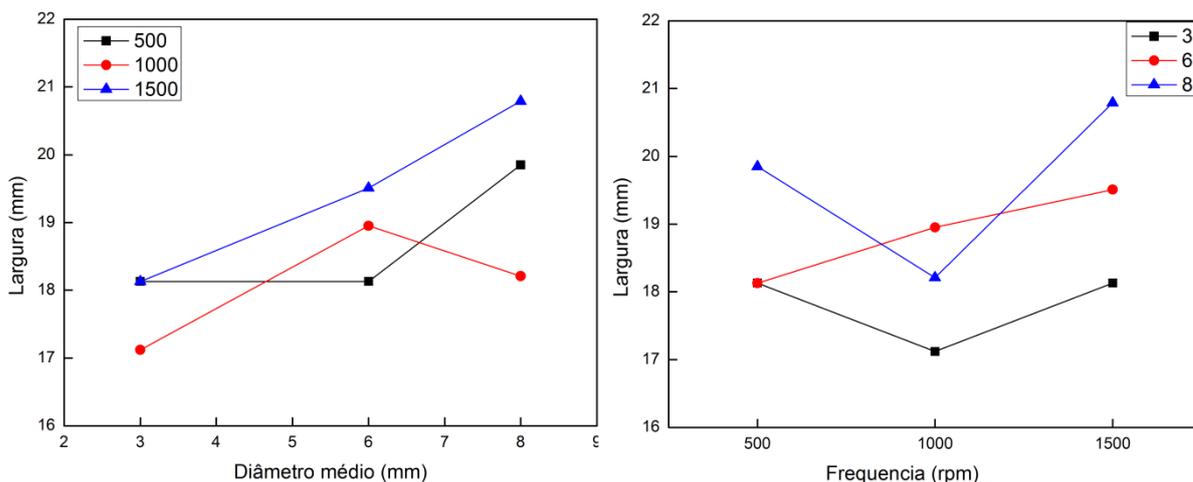


Figura V.1 – Valores da largura do cordão de solda de acordo com a frequência de rotação e diâmetro de giro.

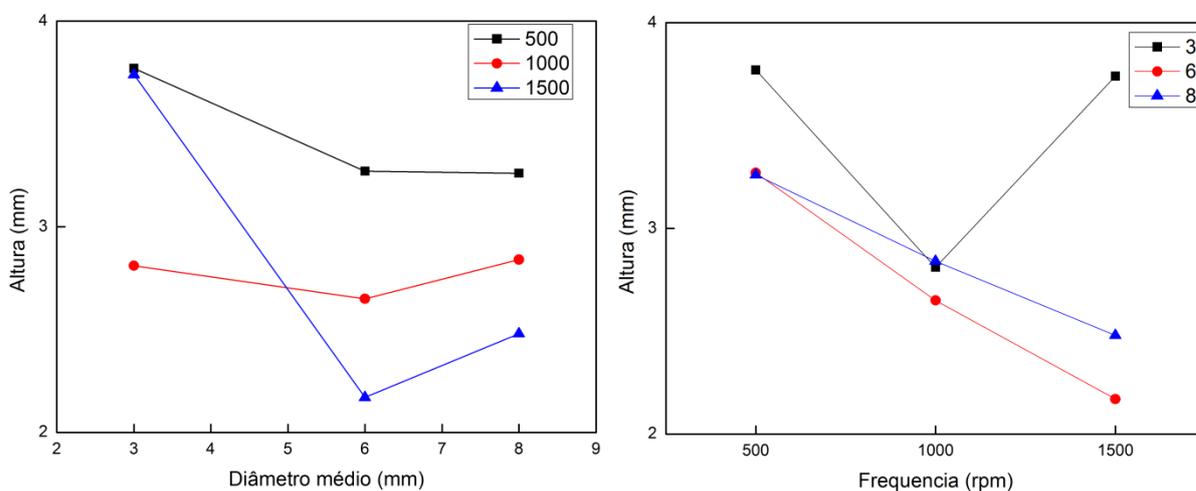


Figura V.2 – Valores da altura do cordão de solda de acordo com a frequência de rotação e diâmetro de giro.

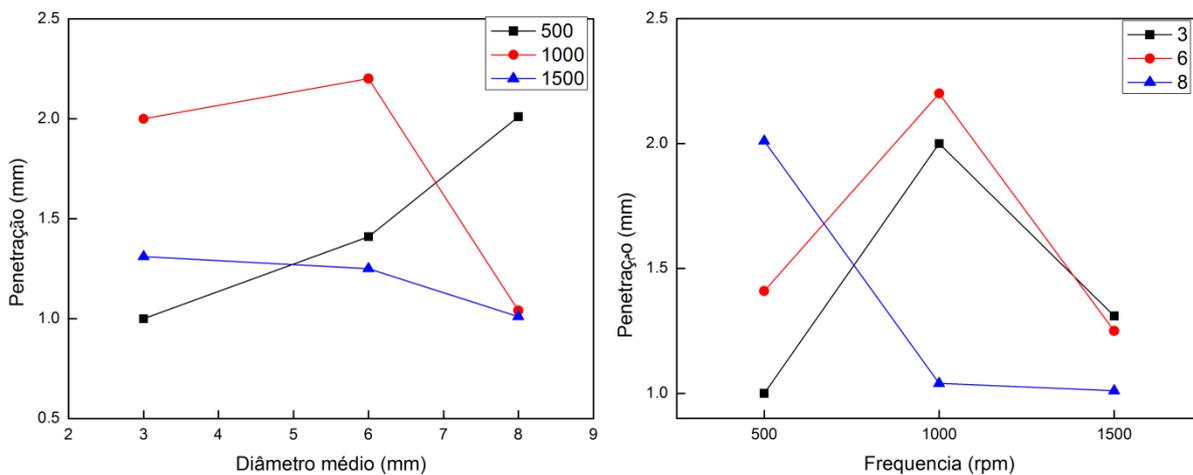


Figura V.3 – Valores da penetração do cordão de solda de acordo com a frequência de rotação e diâmetro de giro.

V.1.1 – Diluição

Tendo como foco a Tabela IV.1 e Tabela IV.2, pode-se observar algumas características semelhantes ao que foi observado por Silveira [12] e Silveira [15], para deposição com arame sólido e metal cored, respectivamente. Ao observar a tabela IV.1 é possível verificar uma tendência de diminuição da altura e na penetração do cordão de solda quando frequência e diâmetro são aumentados. Tais fatos validam a diminuição da diluição pois, quando se tem uma menor penetração do cordão de solda, a área penetrada é diretamente afetada e há uma queda na altura do cordão, fazendo com que a área depositada também seja diretamente afetada. Como a área total é a soma da área depositada com a área penetrada, tem-se também uma diminuição na área total. De acordo com SILVEIRA [12] este fenômeno pode ser explicado pois, ao submeter as gotículas de metal fundido a altos diâmetros e altas rotações, a força centrífuga que atua sobre elas fica muito alta, provocando o lançamento das mesmas para fora da poça de fusão, gerando também uma diminuição no diâmetro das gotas, o que foi observado por WANG [13], SANTOS [17] e SILVEIRA [15].

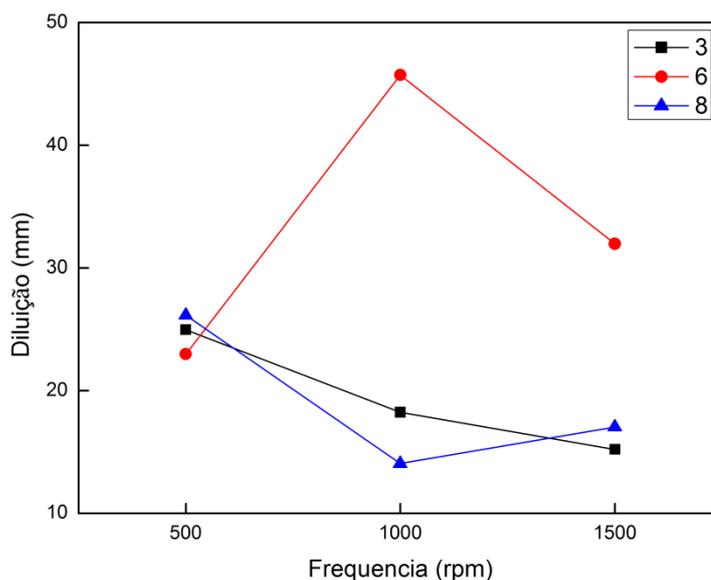


Figura V.4 - Relação de diluição em função dos parâmetros de processo (frequência e diâmetro médio de rotação)

V.2. - Propriedades Mecânicas e Microestruturais

De acordo com os pontos de maior e menor dureza localizados no metal de solda e na ZTA (Tabela IV.5), foi elaborado um gráfico para cada situação, na qual pode-se observar que as medidas de dureza feitas não seguem uma forma pré-definida. Este

resultado pode ser observado por SILVEIRA [15] para o processo MCAW-RE e por GARCIA [18] para o processo GMAW-RE. Ambos tratam esta aleatoriedade de pontos de maior dureza à rotação do arco elétrico pois, dependendo da seção retirada do corpo de prova o arco, pode estar localizado em qualquer posição, gerando, assim, uma concentração de calor em certo ponto propiciando a formação de constituintes e microconstituintes diferentes na área da seção estudada. O mesmo pode ser dito para o metal de solda.

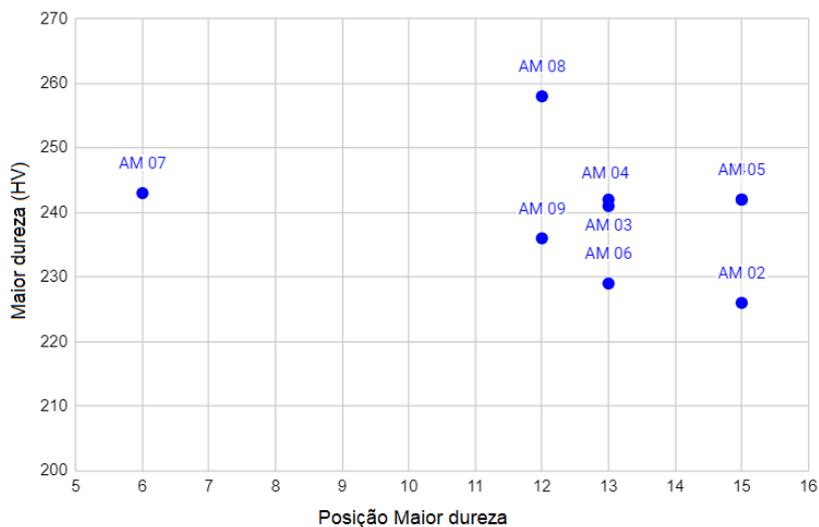


Figura V.5 - Maiores durezas obtidas na ZTA das amostras de acordo com a posição do ponto de medição da dureza

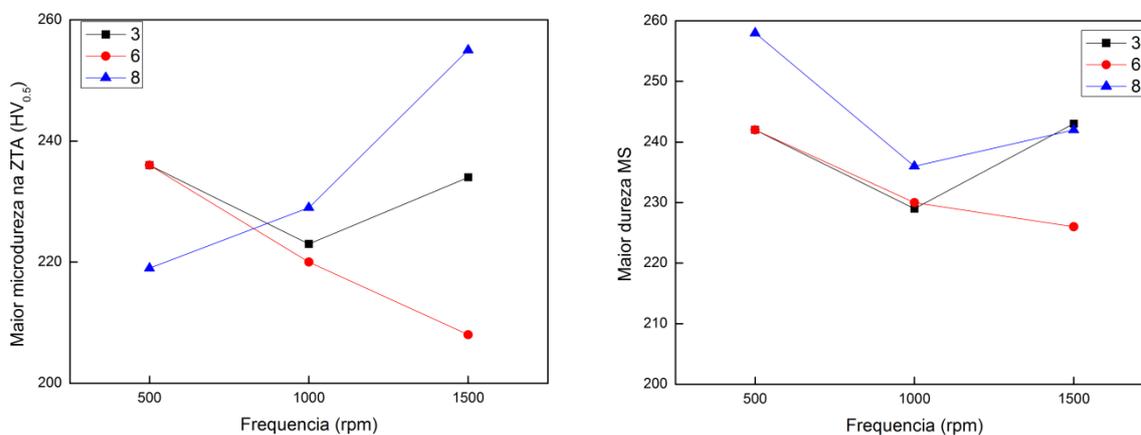


Figura V.6 – Valores de maior dureza de acordo com a frequência de rotação e diâmetro de giro

V.3. - Seleção dos Parâmetros de Processo

A partir dos fatos apresentados, admite-se ser possível selecionar alguns critérios para a seleção preliminar de ajuste de diâmetro médio de rotação e frequência de rotação, a fim de promover uma soldagem mais propícia para obter revestimentos de boa qualidade.

A primeira etapa eleita foi a realização de análise macroestrutural que compreende em uma avaliação visual em busca de defeitos, buscar parâmetros que proporcionem um cordão com aspectos visuais mais constantes e identificar parâmetros mais estáveis para que tal processo possa garantir uma utilização adequada para a fabricação de objetos revestidos. Logo após foi realizada uma varredura de microdureza nas amostras. Todavia, a varredura comumente utilizada em outros processos para o eletrodo rotativo já não é o mais suficiente, pois, como foi verificado neste trabalho e por SILVEIRA [15], os pontos de maior dureza não seguem uma regra de formação. Por conta disso foi necessário realizar uma varredura de dureza por toda a região de grãos grosseiros da ZTA e a região do metal de solda próximo à linha de fusão, a fim de buscar pontos onde as medidas de dureza alcancem valores elevados para a busca pela zona crítica, pois espera-se que esteja associada ao ponto de maior dureza.

Tal estudo trouxe progresso à utilização do processo GMAW-RE na soldagem de revestimento. No entanto, é necessário que haja estudos mais aprofundados para garantir que tais parâmetros vão ser suficientes para produzir um revestimento metálico com o Inconel 625 capaz de garantir as qualidades necessárias para ser empregados em campo. Todavia, dentre todos os parâmetros utilizados, foi possível selecionar, a partir da análise comparativa entre o aspecto visual, a altura dos cordões, a diluição, a penetração, a largura dos cordões e a baixa variação de dureza entre a região de grãos grosseiros e a região do metal de solda, uma combinação de parâmetros que garantiu nos ensaios os melhores resultados. A amostra escolhida foi a AM 05 que combina um diâmetro médio de rotação de 3 mm com uma frequência de rotação média de 500 rpm.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

VI.1 – CONCLUSÕES

Ao realizar a análise dos resultados foi possível selecionar uma combinação dos parâmetros de diâmetro médio de rotação e frequência média de rotação para a soldagem pelo processo GMAW-RE, onde se podem destacar as seguintes conclusões:

- a) Em relação aos aspectos geométricos, tanto o diâmetro médio quanto a frequência média, geram uma redução na penetração e um aumento na largura do cordão de solda;
- b) Utilizar diâmetro médio de rotação maior que 6 mm e frequência de rotação de 1500 rpm faz com que o perfil do cordão de solda seja alterado provocando, também, aumento na quantidade de respingos;
- c) A dureza varia significativamente por toda a extensão da região de grãos grosseiros;
- d) A amostra 05 se mostrou mais promissora dentre as outras, pois foi a que obteve os melhores resultados visuais e a melhor relação entre altura, penetração e diluição;
- e) A amostra 05 obteve êxito ao utilizar a seguinte combinação: AM05 (D.R=3, F.R=500rpm).

VI.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como principal foco avaliar e selecionar parâmetros de processo que garantam a soldagem de revestimento utilizando o processo GMAW-RE. Levando em consideração que este processo é novo, ainda é preciso obter muitos outros resultados e, para isso, deixo como sugestão para novos trabalhos os itens abaixo:

- a) Realizar experimentos com frequências altas acima de 3000 rpm;
- b) Realizar experimentos para obtenção de revestimento com 3 camadas e com os parâmetros indicados como mais adequados, de forma a avaliar o desempenho em corrosão;
- c) Realizar análises metalográficas mais detalhadas para avaliar a influência da frequência de rotação e do diâmetro de rotação na microestrutura do metal de solda e da ZTA;

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PricewaterhouseCoopers Brasil Ltda., “A Indústria Brasileira de Óleo e Gás”, 2014.
- [2] ANP, “A retomada da Indústria do Petróleo e Gás no Brasil”, 2018
- [3] PricewaterhouseCoopers Brasil Ltda., “O futuro da indústria”, 2019.
- [4] AGUERO, B.L.F; Avaliação da Resistência à Corrosão Localizada de Revestimentos Soldados com Ligas de Níquel pelo Processo MIG-Pulsado, Graduação; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,RJ,Brasil, 2015
- [5] JORDAN, D. E.; “Stress-Corrosion Cracking of Nickel-Base Alloy Weldments”; Comission IX, International Institute of Welding Annual Assembly; Montreal; Canada; 1990.
- [6] SONG, K. H.; NAKATA, K.; “Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded Inconel 625 Alloy”;2009
- [7] KEJELIN N, Z.; BUSHHINELLI, A.J.A; POPE, A. M.: "Effects of welding parameters on the Partially Diluted Zones Formation at Dissimilar Metal Welds". In: Anais do 18th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM: November; Ouro Preto. 2005.
- [8] VOLPI, A., SERA, G. “Weld overlay of highly corrosion resistant nickel chromium molybdenum alloys, UNS N06059, on low alloy equipment operating at high temperature.” Proc. of the ASME 2018 Symposium on Elevated Temperature Application of Materials for Fossil, Nuclear, and Petrochemical Industries ETAM2018, April 3-5, 2018, Seattle, WA, USA, ETAM2018-6715.
- [9] JORGE J.C.F., MEIRA, O.G., MADALENA, F.C.A., SOUZA, L.F.G., ARAÚJO, L.S., MENDES, M.C. “Evaluation of the AISI 904L alloy weld overlays obtained by GMAW and electro-slag welding processes”, J. Mater. Eng. Perform. 2017, 26(5):2204-2212.
- [10] FREI, J., ALEXANDROV, B.T., RETHMEIER, M., Low heat input gas metal arc welding for dissimilar metal weld overlays part II: the transition zone, Weld. World 2018, 62(2):317-324.

[11] LANCASTER JF. The Physics of Welding, Pergamom Press, Oxford, United Kingdon, 1986.

[12] 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

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

[14] Spinarc Operation Manual

[15] SILVEIRA, G. M. S, EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NAS CARACTERÍSTICAS DE CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS PELO PROCESSO MCAW COM ELETRODO ROTATIVO (MCAW-RE), Dissertação de Mestrado, CEFET-RJ, Rio de Janeiro, 2020

[16] 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

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

[18] 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.

[19] COSTA, J.F.M., SILVA FILHO, W.A., SILVEIRA, G.M.S., ALMEIDA, F.A.C., LOBATO, M.M., CHUVAS, T.C. et al. Comportamento de juntas soldadas de aço C-Mn obtidas pelo processo GMAW-RE com eletrodo rotativo. Soldagem & Inspeção. 2019;24:e2411. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.11>

[20] SILVEIRA, G.M.S., SILVA FILHO, W.A.S., COSTA, J.F.M. et al. 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).

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

[22] FERNANDES, João Carlos. Desenvolvimento de um dispositivo tipo carga constante para avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão de aço inoxidável austenítico. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010. <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1474>

[23] BARRA, S. R.; DUTRA, J. C.; RIBAS, A. C. Avaliação dos efeitos da variação dos parâmetros/procedimentos de soldagem e automação sobre a planicidade e aspecto superficial dos revestimentos empregados em turbinas hidráulicas. XXIV Encontro nacional de tecnologia da soldagem: congresso latinoamericano e ibero-americano de soldagem, Fortaleza. set., 1998.

[24] SILVA, C. C. Revestimentos de ligas de níquel depositadas pelo processo TIG com alimentação de arame frio – Aspectos operacionais e metalúrgicos: 2010. 319p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE

[25] KEJELIN, N. Z. (2012). Soldagem de revestimento de aços comuns C-Mn com superliga a base de níquel inconel 625. Dissertação de Doutorado.

[26] KEJELIN, N. Z.; Influência dos Parâmetros de Soldagem na Formação de Zonas Parcialmente Diluídas em Soldas de Metais Dissimilares; Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, Fevereiro 2006.

[27] SUAVE, L.M., CORNIER, J., VILLECHAISE, P., SOULA, A., HERVIER, Z., BERTHEAU, D., LAIGO, J. Microstructural evolutions during thermal aging of alloy 625: impact of temperature and forming process, *Metall. Mater. Trans. A*, 2014, 45A(7), p 2963–2982.

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

[29] SANDVIK. Sanicro 625, 2020. Disponível em: <https://www.materials.sandvik/pt/centro-de-materiais/datasheets-do-material/tube-and-pipe-seamless/sanicro-625/>. Acesso em 14/5/2021