

AVALIAÇÃO ENTRE O PROCESSO DE SOLDAGEM SMAW E GMAW PARA FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTO EM EIXOS PROPULSORES*

*Cícero Alberto Pereira Belém¹
Alessandro de Castro Corrêa²
Paulo D'Angelo Costa Assunção³
Danielle Cristina Gonzaga Corrêa⁴
Cláudia Canto de Souza Leão⁵
Arildomá Lobato Peixoto⁶
Victor Oliveira Ferreira⁷*

Resumo

Neste artigo, buscou-se replicar, em laboratório, os procedimentos de retificação do eixo propulsor, elemento responsável pela transmissão de força e potência para os hélices do Navio, e que, frequentemente, apresentam problemas de desgaste devido ao atrito entre o eixo e seus pontos de apoio (mancais). Em virtude do intenso uso deste tipo de transporte, é frequente a manutenção da linha de eixo dessas embarcações, havendo a necessidade de uma análise que verifique se os métodos utilizados seguem padrões normatizados e que passem por testes de qualificação. A relevância regional do estudo se justifica pelo potencial hidrográfico da Região Amazônica, a qual possui bacias como Solimões-Amazonas e Rio Madeira, que servem como vias de acesso e de transporte de pequenas, médias e grandes embarcações; seus afluentes são verdadeiras estradas fluviais, sendo um modal hidroviário de importância histórica e cultural. As operações em laboratório seguiram as etapas: soldagem dos Corpos de Prova pelos processos SMAW (processo mais utilizado na maioria das empresas de retificação de eixos na região Norte) e GMAW com dois métodos (automatizado e manual) e com adição de dois metais de solda diferentes (307, 309L com e sem adição de Nióbio); ensaio por Líquido Penetrante (LP), Metalografia, Análise Macrográfica e Micrográfica e Análise de Microdureza. Os resultados obtidos em laboratório demonstraram que a metodologia desenvolvida na retificação é apropriada e eficiente para a recuperação de eixos propulsores.

Palavras-chave: Eixo propulsor; Soldagem; Líquido penetrante; Metalografia.

EVALUATION BETWEEN THE SMAW AND GMAW WELDING PROCESS FOR THE MANUFACTURE OF COATINGS IN PROPULSION AXLES

Abstract

In this article, we replicated, in the laboratory, the procedures of propeller shaft's rectification, which is the element responsible for the transmission of force and power to the Ship's propellers, and that often presents problems of wear due to the friction between the axis and its Support points, named as bearings. Due to the intense use of this type of transport, the maintenance of the axis line of these vessels is frequent, and there is a need for an analysis to verify if the methods used follow standards and pass qualification tests. The regional relevance of the study is justified by the hydrographic potential of the Amazon Region, which has basins such as Solimões-Amazonas and Rio Madeira, which serve as means of access and transportation of small, medium and large vessels; its tributaries are true fluvial roads, being a mode waterway of historical and cultural importance. Laboratory operations followed the steps: welding of the test pieces by the SMAW processes (most used in most of the axis rectification companies in the North) and GMAW with two methods (automated and manual) and with the addition of two welding metals (307, 309L with and without addition of Niobium); testing by Penetrating Liquid (LP), Metallography, Macrographic and Micrographic Analysis and Microhardness Analysis. The results obtained in the laboratory demonstrated that the methodology developed in the rectification is appropriate and efficient for the recovery of propeller shafts.

Keywords: Propeller shaft; Welding; Penetrant Liquid; Metallography.

¹ *Engenheiro Mecânico, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PPGEI), Instituto de Tecnologia, UFPA, Belém, Pará, Brasil.*

- ² *Administrador, Doutor em Administração, Professor Titular, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEMAT/IFPA) e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PPGEI/UFPA), IFPA, Belém, Pará, Brasil.*
- ³ *Me. em Engenharia Mecânica, Doutorando na Universidade Federal do Para, UFPA, Belém, Pará, Brasil..*
- ⁴ *Administradora, Mestre em Administração, Professora, Curso de Administração, Faculdade Ideal-DeVry Brasil, Belém, Pará, Brasil.*
- ⁵ *Engenheira de Produção, Acadêmica de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEMAT), IFPA, Belém, Pará, Brasil.*
- ⁶ *Curso Técnico em Mecânica, Me. Em Engenharia Mecânica, Engenheiro Mecânico, IFPA, Belém Pará, Brasil.*
- ⁷ *Graduando em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém Pará, Brasil. .*

1 INTRODUÇÃO

Com a intensificação da navegação de longo curso e cabotagem no Brasil, é necessário um grande esforço da Marinha do Brasil para manter a segurança na navegação, incluindo a pesquisa e manutenção das cartas náuticas que é utilizado como guia tanto pela Marinha de guerra, Marinha mercante e praticarem.

De uma forma geral, as máquinas novas, quando bem projetadas, satisfazem os requisitos de operação, entretanto, com desgastes, acomodação de fundações, má utilização, falta ou inadequação da manutenção, as máquinas têm suas condições de funcionamento alteradas. Com isso, os eixos desgastam e se tornam desalinhados, peças se danificam, rotores ficam desbalanceados, etc. Todos esses fatores são refletidos na diminuição de rendimento e, conseqüentemente, no aumento do nível de vibração e ruído [1].

Considerando a importância do modal hidroviário para região Norte, fazem-se necessários cuidados redobrados sobre o principal meio de transporte utilizado, a saber, as embarcações de pequeno, médio e grande porte. Essas embarcações vão de pequenos barcos pesqueiros a navios de pesquisa e transporte de cargas, possuindo complexos sistemas de máquinas responsáveis pelo seu funcionamento e que trabalham sob intensos regimes de força e pressão, além do trabalho cíclico de seus componentes. Para que tal sistema funcione de forma eficiente e seguro, um Plano de Manutenção Preventiva deve ser seguido, garantindo que a embarcação esteja sempre em boas condições de navegação, evitando-se paradas inesperadas para manutenções corretivas, que demandam um custo maior de reparo e perdas por inoperância da embarcação.

O objetivo principal deste artigo é definir qual o processo de soldagem mais viável para retificação de eixo propulsor, pois o processo utilizado em algumas empresas da Região Norte é realizado de forma empírica.

1.1 Processos de soldagem (SMAW E GMAW)

A soldagem com eletrodos revestidos (SMAW), obtém a união das peças pelo seu aquecimento localizado com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico consumível, recoberto com um fluxo, e as peças (Figura 1). O revestimento é consumido junto com o eletrodo pelo calor do arco desempenhando uma série de funções fundamentais ao processo de soldagem como, por exemplo, a estabilização do arco, a proteção do metal fundido pela formação de escória e de gases e a adição de elementos de liga e de desoxidantes à poça de fusão [2].



Figura 1. Esquematização do processo SMAW (Eletrodo Revestido) [2].

O processo de soldagem a arco MIG/MAG ou GMAW, Figura 2, baseia-se na formação de um arco voltaico entre a peça de trabalho e um eletrodo nu maciço consumível, com contínua alimentação. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases suprida com pressão e vazão adequadas [3, 4 e 5].

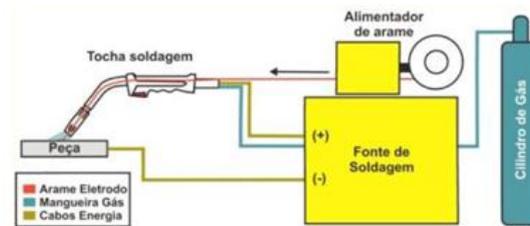


Figura 2. Esquema representativo da soldagem GMAW [14].

1.2 Taxa de Deposição

A taxa de deposição (Equação 1), isto é, a quantidade de material depositado por unidade de tempo, depende de vários fatores, incluindo o processo de soldagem, o tipo, o diâmetro e o comprimento do eletrodo e a polaridade e o nível da corrente [6]. Também está relacionada com o comprimento energizado do arame tubular (eletrodo) ou stickout, sendo esta definida como a distância entre a extremidade do bico de contato da tocha e a extremidade do arame em contato com o arco [7].

$$TD = \frac{PF - PI}{t} \quad (1)$$

Onde TD é taxa de deposição, PF é o peso final da chapa em g, PI é o peso inicial da chapa em g, t é o tempo de arco aberto.

1.3 Energia de Soldagem

Verificando a possibilidade de diminuir a deformação é observado a Teoria de Energia de Soldagem conforme Equação 2 [8].

$$E = \frac{(\eta * I * V)}{V_s} \quad (2)$$

Onde η representa o rendimento térmico de cada processo; I representa a corrente; V é a tensão; V_s é a velocidade de soldagem.

1.4 Rendimento Econômico

Rendimento econômico é definido como a relação (em porcentagem) entre as taxas de deposição e de fusão conforme Equação 3. Se o eletrodo não possuir adições metálicas em seu revestimento, este parâmetro indica a proporção da alma que foi utilizada na formação da solda) [6].

$$R = \frac{TD}{Tf} 100 \quad (3)$$

Onde TD é taxa de deposição e Tf, a taxa de fusão.

OBS: Taxa de fusão para cálculo da taxa de deposição (Equação 4).

$$Tf = \frac{Pf}{t} \quad (4)$$

Onde P_f é a massa de alma do eletrodo que foi fundida no tempo de arco aberto (t)

1.5 Geometria do Cordão de Solda

A avaliação da geometria da superfície plana do cordão de solda é realizada pela análise dimensional de sua seção transversal. Para o mesmo material e tipo de junta, a natureza do consumível, a corrente de soldagem, o comprimento do eletrodo, a tensão e a velocidade de soldagem interferem na geometria da solda. A geometria do cordão de solda tem influência básica na resistência mecânica da junta soldada. O esquema representativo do perfil geométrico do cordão de solda está presente na Figura 3 e nela estão indicadas as principais grandezas que caracterizam a geometria do cordão de solda: a penetração (P), o reforço (R) e a largura (L) [9].

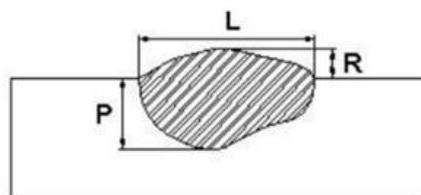


Figura 3. Representação das grandezas geométricas do cordão de solda [8].

A análise da geometria da solda é realizada pela avaliação dimensional da seção transversal da Figura 3. As medidas de largura (L), reforço (R) e penetração (P), definem tais características geométricas do cordão de solda depositado na superfície das peças metálicas. A composição química final da zona fundida depende da intensidade nas interações das composições químicas do metal de base e da adição e da participação relativa destes na formação da zona fundida. Esta participação relativa é conhecida como “coeficiente de diluição” ou, simplesmente pode ser expressa pela Equação 5, onde “diluição” (δ), “A” e “B” são as áreas formadas na junta soldada [8].

$$\delta = \frac{B}{B + A} 100 \quad (5)$$

Onde “diluição” (δ), “A” e “B” são as áreas formadas na junta soldada conforme Figura 4.

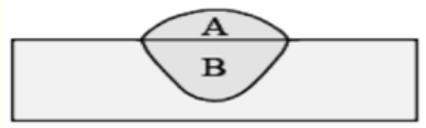


Figura 4. Representação das áreas da junta soldada [8].

1.6 Micrografia

A estrutura de solidificação da Zona Fundida é controlada pelo super-resfriamento, que depende do índice de temperatura, velocidade de solidificação e porcentagem de soluto na fase sólida e líquida. O índice de temperatura (G) é a diferença de temperatura no líquido em relação à distância, a partir da área de interação sólido/líquido. A velocidade de solidificação (R) está relacionada ao avanço da área

de interação sólido-líquido e esta por sua vez depende da diferença da temperatura líquidus [10].

Diferentes modos de solidificação podem ocorrer na Zona Fundida, tais como: planar, celular, celular dendrítico, colunar dendrítico e dendrítico equiaxial, na Figura 5 estão representados esquematicamente, as várias estruturas de crescimento, em relação ao índice de temperatura imposto no resfriamento (G) e a velocidade de avanço da interface sólido-líquido (R) [11].

Valores baixos de R e elevados de G , como ocorrem no início da solidificação favorecem uma estrutura de solidificação planar à frente da interface S-L. Conforme a frente avança na direção do centro da Zona Fundida, o valor de R se eleva rapidamente, resultando numa transição de estrutura planar para celular ou dendrítica. [12].

Utiliza-se a relação G/\sqrt{R} , mostrada na Figura 5, para estudar o modo de solidificação. Um valor baixo desta relação significa que, o líquido está super-resfriado e o crescimento dendrítico da interface é estável para uma determinada porcentagem de soluto. Por outro lado, para valores elevados, o líquido não está super-resfriado e favorece o crescimento planar da interface [11].

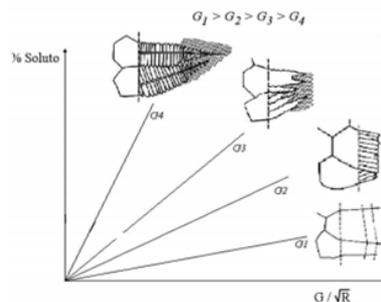


Figura 5. Diagrama esquemático dos diferentes modos de solidificação para relação G/\sqrt{R} [11].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Fonte de Soldagem

Foi utilizada uma fonte eletrônica Digiplus para os dois processos (SMAW e GMAW), modelo A7 de 400 A, 280A a 100% e alimentador de arame, modelo STA-20D da IMC, fonte tipo multiprocessos, tensão em vazio de 50V, corrente máxima de 400A e tensão máxima de 85V.

Os processos de soldagem com seus respectivos metais de adição tiveram suas ramificações para melhor visualização dos resultados conforme Quadro 1.

Quadro 1. Processos de soldagem a serem avaliados.

I	Processo	Código
1	SMAW (AWS E 309 L)	SMAW
2	GMAW automatizado AWS AR 307	GMAW 1
3	GMAW manual AWS AR 307	GMAW 2
4	GMAW manual AWS AR 309 L	GMAW 3
5	GMAW automatizado AWS AR 309 L	GMAW 4
6	GMAW automatizado AWS AR 309 L com adição de nióbio	GMAW 5

Para soldagem automatizada foi observada a velocidade de alimentação do arame 10m/min e tensão de 31V, e, para soldagem manual velocidade de alimentação do arame 6,0m/min e tensão de 26V, ambos parâmetros para o processo GMAW.

2.2 Metal de Base

O metal de base utilizado foi o aço inoxidável 316L, a qual segue as características químicas conforme Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável 316L.

MB	C _{máx}	Mn _{máx}	Si _{máx}	P _{máx}	S _{máx}	Cr	Ni	Mo
316L	0,03	2,00	0,75	0,045	0,030	16 a 18	10 a 14,	2 a 3

MB- Metal de base; C- Porcentagem de Carbono; Mn- Porcentagem de Manganês; Si- Porcentagem de Silício; P- Porcentagem de Fósforo; S- Porcentagem de Enxofre; Cr- Porcentagem de Cromo; Ni- Porcentagem de Níquel; Mo- Porcentagem de Molibdênio.

2.3 Eletrodo Rutílico

O revestimento rutílico contém grandes quantidades de rutilo (TiO₂- óxido de titânio) e produz uma escória abundante, densa e facilmente destacável. Os eletrodos com este revestimento são de fácil manipulação e podem ser utilizados em qualquer posição, exceto nos casos em que contenham um grande teor de pó de ferro; são considerados de grande versatilidade e de uso geral. Quando utilizados em corrente contínua ou alternada, produzem um cordão de bom aspecto, porém com penetração média ou baixa [13].

2.4 Ensaio por Líquido Penetrante

O Ensaio por Líquido Penetrante (LP) foi realizado no laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará. O ensaio de LP seguiu as etapas abaixo, conforme as recomendações da Norma ABNT NM 327.

2.5 Metalografia

O método utilizado para medir as durezas das regiões que compõe a junta soldada Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida (MB, ZTA, ZF) seguiram os termos da Norma ASTM E384-16.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros expostos na Tabela 2 foram obtidos durante os processos de soldagem e tem fundamental importância para os cálculos dos indicadores como: Taxa de deposição, energia de soldagem, taxa de fusão e rendimento econômico. O ensaio por Líquido Penetrante apontou que não ocorreram descontinuidades na superfície do material, assim como não apresentou trincas, fissuras ou dobras, qualificando a soldagem quanto aos padrões de aceitação técnicas.

Tabela 2. Processos de soldagem com os respectivos metais de adição e parâmetros.

CP	Processos	Ts	I	V	Lcs	Vs	Nb
1	SMAW (AWS E 309 L)	17	160	36,5	12,88	31,4	X
2	GMAW AUTOMATIZADO (AWS AR 307)	9	290	31	11,73	50	X
3	GMAW MANUAL (AWS AR 307)	24	228	26,3	13,36	25	X
4	GMAW MANUAL (AWS AR 309 L)	18	223	26	12,03	32	X
5	GMAW AUTOMATIZADO (AWS AR 309 L)	10	284	31	11,47	50	X
6	GMAW AUTOMATIZADO (AWS AR 309 L) COM ADIÇÃO DE NÍOBIO	10	286	31	12,26	50	1,2

CP- Corpos de prova; TS- Tempo de soldagem, dado em segundos(s); I- Corrente, dado em Ampere (A); V- Tensão, dado em Volts (V); Lcs- Largura do cordão de solda, dado em milímetros (mm); Vs- Velocidade de soldagem, dado em centímetro/minuto(cm/min) e Nb- Níobio, dado em gramas (g).

As taxas de deposição calculadas conforme Equação 1, tiveram variação entre os processos semiautomático (manual) e automatizado, os cordões de solda dos CP's 1, 3 e 5 demonstram que no processo semiautomático, por não ter o controle direto do tempo de arco aberto, os valores ficaram muito abaixo dos cordões de solda dos CP's 2, 5 e 6, caracterizando que o processo de soldagem automatizado tem o melhor controle sobre esse tempo (Tabela 3).

Na soldagem a arco com eletrodo consumível, este é fundido a uma velocidade que deve ser, para o processo funcionar de forma adequada, igual à velocidade com que ele é alimentado. No processo MIG/MAG (GMAW) um estado estacionário é atingido no qual o comprimento do eletrodo ("stickout") é mantido relativamente constante. A velocidade de fusão de arame controla a quantidade de metal depositado na solda por unidade de tempo (taxa de deposição), influenciando diretamente o custo e a produtividade da soldagem [6].

A energia de soldagem calculada conforme Equação 2, apresentou também algumas variações, expondo que nos CP's 1, 2, 4, 5 e 6 essa variação foi aproximada, e no CP 3 tivemos uma alta energia de soldagem, assim fazendo com que esse processo também obedeça a teoria da energia de soldagem exposto na literatura, onde pretende-se diminuir a mesma para evitar deformações excessivas. Os resultados da taxa de fusão calculados pela Equação 4, serviram para cálculo do rendimento econômico (Equação 3), conforme Tabela 3.

O rendimento econômico foi eficiente em todos os processos, em destaque para o CP 1, a qual é o processo utilizado em algumas empresas de manutenção da Região Norte. O rendimento econômico apresentado foi de aproximadamente 101%, isso devido à utilização de um eletrodo rutilico.

Tabela 3. Resultados da Taxa de deposição, Energia de soldagem, Taxa de fusão e Rendimento econômico.

CP	TD	E	Tf	R
1	0,4706	167,388535	0,4647	101,2658
2	1,8444	170,81	1,4500	127,2031
3	0,8667	227,8632	0,8700	99,6169
4	0,8667	172,1281	0,8700	99,6169
5	1,65	167,276	1,4167	116,4706
6	1,58	168,454	1,4167	111,5294

CP- Corpos de prova; TD- Taxa de deposição, dado em gramas/segundo (g/s); E- Energia de soldagem, dado em Joule/minuto (J/min); Tf- Taxa de fusão, dado em gramas/segundo(g/s); R- Rendimento econômico (%).

Em relação aos perfis macrográficos apresentados na Figura 6, foi notado pouca penetração no CP1 em relação aos demais, pois a influência dos gases no processo GMAW (o qual proporciona melhor penetração) e a Energia de Soldagem tiveram uma considerável influência. A Zona Termicamente Afetada (ZTA) foi pequena para todos os processos, isso afeta menos o Metal de Base, e poderia se tornar um elo fraco em uma junta soldada que normalmente seria resistente, se por ventura essa ZTA fosse consideravelmente maior.

No CP6 podemos ver que há duas fases, o que pode ser atribuído à adição de Nióbio, o qual possui uma densidade menor que o metal de solda (309L) e por é segregado à parte superior do metal fundido. Essa região apresentou pontos de microdureza maiores o que pode ratificar a tese de maior concentração de nióbio.

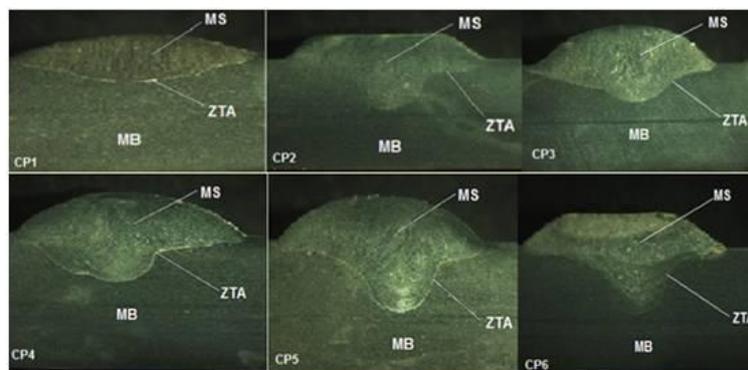


Figura 6. Perfis macrográficos dos Corpos de Prova.

A Tabela 4 mostra a variação dos valores da relação R/L em função dos parâmetros e processos de soldagem, observa-se que o valor de R/L é menor no cordão de solda aplicado com o processo SMAW, que é o processo utilizado pela empresa de recuperação de eixo. A relação R/L é a menor de todos os cordões de solda testado e esta relacionado com a quantidade de massa depositada comprovada pela menor taxa de deposição, calculada pela Equação 1 e exposta na Tabela 1, resultante nesse processo. Outra condicionante para menor R/L foi a oscilação aplicada no eletrodo durante a soldagem, que espalha a poça de fusão e resulta em um cordão mais baixo.

O cordão de solda do CP2 apresentou um acréscimo de 41.6% na relação R/L quando comparado ao cordão de solda do CP1, outro aspecto importante é que esse cordão de solda não teve a oscilação que o processo SMAW teve ocasionando um maior reforço influenciando diretamente no aumento da relação R/L. O cordão de solda do CP5 teve a relação R/L bem próximo ao do cordão de solda do CP2, que já era esperado, pois a única diferença entre eles é elementos de liga no metal de adição.

A maior relação R/L foi 48.14% maior em comparação ao cordão de solda realizado pelo processo SMAW, essa é o cordão de solda do CP3 que foi soldado com processo de soldagem GMAW manual oferece menor controle da poça de fusão. Mesmo com alto valor de relação R/L da ordem de 0,275 o cordão ainda está em conformidade para ser usado como revestimento. Pois está abaixo da relação R/L máxima de 0,30 [14].

O cordão de solda do CP4 foi soldado com o mesmo processo e procedimento do cordão de solda do CP3, a única diferença é o arame eletrodo que para soldagem do CP3 foi utilizado o arame AWS 307 e no CP4 foi o AWS 309L, ambos são aço inoxidável autêntico. O CP4 teve um aumento de 39.1% em relação ao processo SMAW ratificando o conceito de dificuldade no controle da poça de fusão.

O cordão de solda do CP6 apresentou relação R/L 22.2% maior em relação ao cordão de solda realizado com o processo SMAW, esse cordão foi realizado com mesmo processo e mesmo parâmetro utilizado para fazer o cordão de solda do CP 5, a única diferença foi a adição de 1,2g de Nióbio (Tabela 2) em forma de fita metálica na poça de fusão, e fez com que aumentasse a largura do cordão de solda influenciando diretamente a relação R/L.

Tabela 4. Geometria do cordão de solda.

CP	Re	Lcs	Pe	Relação Re/Lcs	δ
1	1,87	12,88	2,17	0,1452	68,3930
2	2,80	11,73	4,46	0,1901	64,8744
3	3,68	13,36	3,16	0,2754	62,1556
4	2,86	12,03	3,38	0,2377	64,5237
5	2,83	11,47	4,2	0,2467	64,9214
6	2,24	12,26	4,51	0,1827	66,1725

CP- Corpos de prova; Re- Reforço, dado em milímetros (mm); Lcs- Largura do cordão de solda, dado em milímetros (mm); Pe- Penetração, dado em milímetros (mm); δ - Diluição.

A investigação da diluição (Tabela 4), calculada de acordo com a Equação 5, é fator de grande relevância neste trabalho, pois foram realizados revestimento com metal de adição diferente em sua composição química, afim de buscar um revestimento mais resistente, apesar dos metais de adição não serem considerados dissimilares com metal de base busca-se mistura-los o menos possível. O conceito de diluição é importante quando se deseja controlar a participação do metal base na formação da solda como, por exemplo, na soldagem de metais dissimilares, em processos de recobrimento por soldagem e na soldagem de um metal base cuja composição seja desconhecida ou apresente elevados teores de impurezas ou elementos prejudiciais à solda [15].

O cordão de solda realizado com processo SMAW apresentou maior diluição em relação aos cordões realizado com o processo GMAW, os cordões 3 e 4 apresentaram diluição menor em 9,2 e 5%. A diferença de valores de diluição entre os cordões 3 e 4 está relacionado com o modo de aplicação do cordão que foi semiautomático (manual). Os cordões 2 e 5 foram soldados com mesmo processo e mesmo parâmetros do cordão 3 e 4, mas os cordões foram aplicados de forma automatizada por isso seus valores estão bem próximo o que expressa maior precisão entre os valores de diluição comparado com o cordão depositado pelo processo SMAW. O cordão 6 apresentou valor de diluição alto mesmo sendo depositado com o mesmo processo, procedimento e parâmetro dos cordões 2 e 5, o cordão 6 foi soldado com adição de Nióbio e apresentou maior penetração, o que está diretamente relacionado com o aumento da diluição. O Nióbio diminui a tendência ao crescimento de grão melhorar a soldabilidade e a condutividade elétrica o que pode ter afetado diretamente a penetração do cordão de solda.

É observado na micrografia (Figura 7) que a região soldada apresenta crescimento epitaxial da microestrutura, fenômeno que favorece a resistência da junta haja vista proporcionar continuidade dos grãos do Metal de Base (MB) em direção Zona

Fundida (ZF); evitando-se assim o acúmulo de tensões na Zona de ligação (ZL) [11]. Além disso, é possível observar nas imagens apresentadas que a Zona Termicamente Afetada (ZTA) dos corpos de prova é pequena, como o esperado, por tal comportamento ser característico de aços inoxidáveis.

Todos os corpos de prova apresentaram crescimento equiaxial dendrítico na ZF próxima à ZL. A microestrutura predominantemente é a ferrítica, em especial pelo elevado conteúdo de cromo, elemento ferritizante, na região do metal fundido com a elevada taxa de resfriamento. Segundo Fredriksson [16], em aços inoxidáveis austeníticos, altas taxas de resfriamento favorecem a formação de ferrita primária durante o processo de solidificação. Com exceção do CP 03, o qual apresentou microestrutura com característica austenítica próximo a ZL, com crescimento colunar dendrítico, o restante segue o padrão dito. A justificativa para tal encontra-se na discrepância entre os valores de energia de soldagem do CP 03 e do restante, o que provoca uma menor velocidade de solidificação (R). A mudança em R influencia na relação G/R a qual tem como resposta a característica da solidificação do material fundido. Como os CPs 02 e 04 têm energia de soldagem semelhante, suas microestruturas são, como esperado, bem semelhantes; confirmando a discussão proposta.

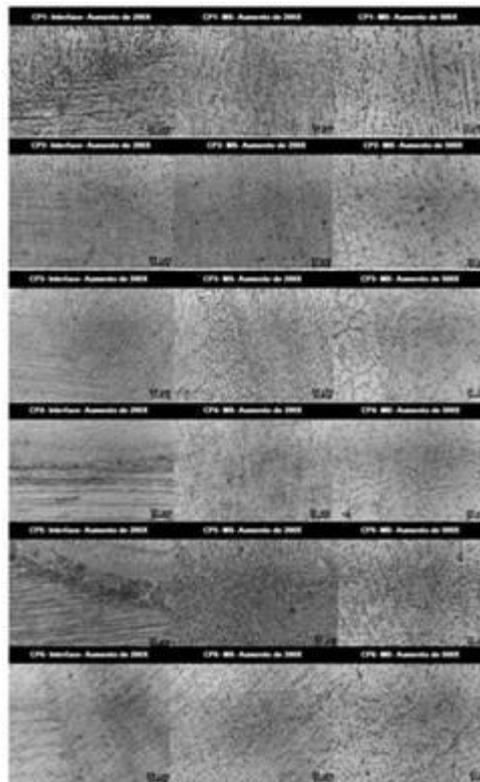


Figura 7. Micrografia dos corpos de prova.

O ensaio de microdureza foi utilizado para a avaliação da propriedade mecânica do revestimento, uma vez que as melhores condições para o mesmo é que tenha boa resistência mecânica, mantendo as mesmas propriedades do substrato. Podemos observar na investigação do CP 01 (Figura 8) a dureza do revestimento bem próxima a do metal de base, esse resultado é satisfatório mas ainda não atende a exigência de durabilidade do eixo que desgasta precocemente.

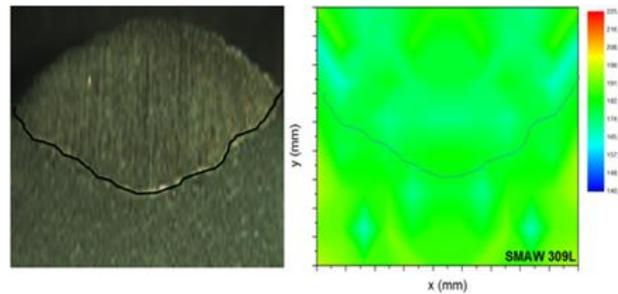


Figura 8. Gráfico de microdureza do CP1.

Os corpos de prova 02 e 03 (Figura 9) foram soldados com processo GMAW que possui dureza menor quando comparado com o CP01, segundo o fabricante de consumíveis Galeazzi [17] cordões depositados com eletrodo revestido tem maior resistência quando comparado com arame eletrodo nu em função de alguns elementos de liga que o eletrodo revestido carrega em seu revestimento. O CP03 tem maior dureza em relação ao 02, o que pode estar relacionado a energia de soldagem que facilita a nucleação de fases com maior dureza. Essa relação se aplica ao CP's 04 e 05 (Figura 10).

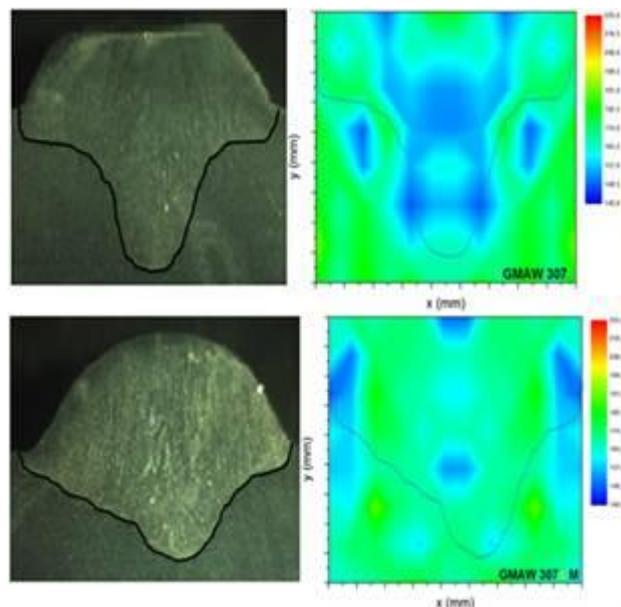


Figura 9. Gráfico de microdureza CP's 2 e 3 respectivamente.

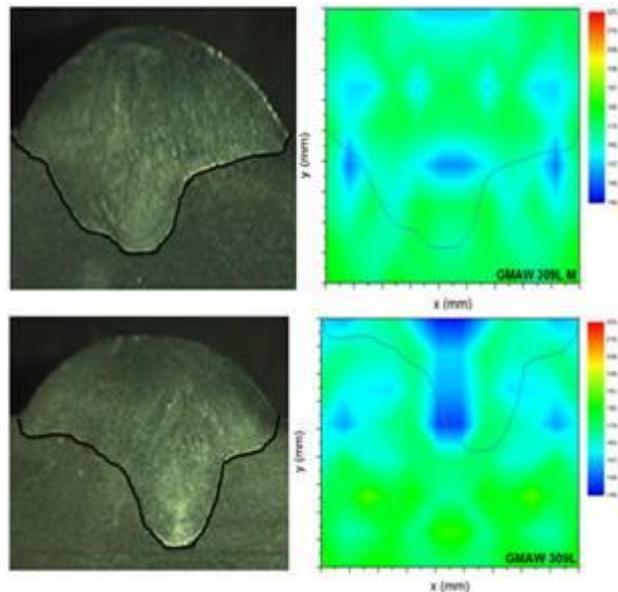


Figura 10. Gráfico de microdureza CP's 4 e 5 respectivamente.

A adição de nióbio aumentou consideravelmente a dureza do revestimento, podemos observar que a maior dureza ficou mais na superfície do cordão de solda (Figura 11), indicando também que as fases constituídas de nióbio estão nesse local, podemos comprovar isso pela diferença de cores na macrografia do CP 06, já é previsto em literatura o aumento da dureza do aço quando introduzido o nióbio, mas no caso do cordão de solda tivemos resultados além da expectativa, uma vez que a superfície do cordão ficou com maior dureza e quase toda área do finger ficou com dureza próxima a do metal de base.

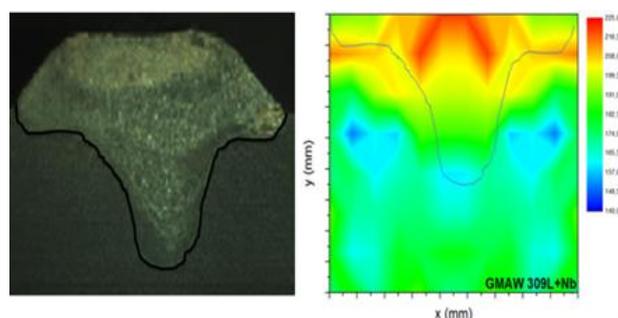


Figura 11. Gráfico de microdureza CP 6.

4 CONCLUSÃO

Os resultados dos experimentos demonstraram que os indicadores, Taxa de Deposição (TD), Energia de Soldagem (E), Rendimento Econômico (R) e Diluição (δ) do processo GMAW e suas ramificações foram satisfatórios; mesmo com os CP's 3 e 4, a qual foram realizados de forma manual e sem o controle adequado das variáveis que poderiam fazer uma considerável diferença quando comparado ao processo SMAW, no entanto, o processo realizado não deixa de ser relevante. O pacote operacional do processo GMAW apresentou melhor desempenho em relação ao processo SMAW cujo a taxa de deposição é quase duas vezes maior com energia de soldagem muito próxima ao SMAW o que satisfaz a necessidade da indústria naval.

Na macrografia, observa-se que a geometria do cordão de solda de todos os CP's foi satisfatória. As soldas produzidas pelo processo GMAW apresentaram maior penetração ou área de "finger", mas também com menor diluição o que é favorável para revestimento, esse resultado é devido ao estudo e implantação dos parâmetros de soldagem impostos aos processos e suas ramificações para obter características próximas ou melhores das soldas feitas pelo processo SMAW.

Na análise micrográfica, todos os CP's tiveram microestruturas muito parecidas com exceção do CP3, a qual teve um crescimento equiaxial considerável do grão, isso devido ao alto gradiente térmico e o resfriamento sofrido por esse CP. A adição do Nióbio (Nb) não modificou o tipo de solidificação e conseqüentemente não alterou a microestrutura demonstrando que para o pacote operacional do trabalho a variável de maior influência microestrutural é a energia de soldagem. Na Microdureza, o processo GMAW demonstrou valores de dureza (HV) bem próximos ao processo SMAW, em destaque para ramificação do processo GMAW com adição de Nióbio (Nb), a qual podemos perceber um aumento significativo de dureza na parte superior do reforço, fazendo com que esse processo tenha um melhor comportamento mecânico em relação aos demais, esse resultado é mais esperado pela indústria pois necessita-se aumentar a resistência do revestimento sem mudar a propriedade mecânica do substrato.

REFERÊNCIAS

- 1 Da Silva DA. Diagnóstico de Equipamentos de Propulsão Naval Através de Análise de Vibração. 2006. Tese de Doutorado: 1 - 135.
- 2 Modenesi PJ. Técnica operatória da soldagem saw. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2012.
- 3 Machado IG. Soldagem e Técnicas Conexas – Processos. Porto Alegre: UFRS; 1996.
- 4 Zielinska S. Microstructural analysis of the anode in gas metal arc welding (GMAW). Journal of materials processing technology; 2008.
- 5 Planckaert J. Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies. Applied Mathematical Modelling; 2009.
- 6 Modenesi PJ. Estimativa de Custos em Soldagem. Belo Horizonte: UFMG; 2001.
- 7 Marques VP, Modenesi PJ. Bracarense, A. Q. Soldagem. Fundamentos e Tecnologia. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2007.
- 8 Assunção PD. Estudo da viabilidade do processo de soldagem GMAW-DCW (DOUBLE COLD WIRE) [dissertação de mestrado]. Pará: Universidade Federal do Pará; 2013.
- 9 Braga EM. Aspectos sobre Descontinuidades em Juntas Soldadas. Apostila do Curso Metalurgia da Soldagem e em Tópicos em Processos de Fabricação - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém; 2008.
- 10 Olson DL., editor. ASM handbook: welding, brazing, and soldering. 9 ed. Asm Intl, 6; 1983, p. 647-671.
- 11 Das Neves, MDM. Solidificação da Zona de Fusão na soldagem do AISI 304 com Inconel 600 por laser de Nd: YAG. Soldagem Insp. São Paulo 14 (2009): 104-113.
- 12 David SA, Babu SS. Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3, ed H Cerjak and H K D H BHADESHIA (London: The Institute of Materials), 1997, pp 151–80.
- 13 Senai. Processo com eletrodo revestido – fundamentos. Coleção tecnológica Senai. 1997 ["acesso em 10/05/2017"]. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/processo-com-eletrodo-revestido-fundamentos.html>
- 14 Cruz, JR.; Cabral, T. S. Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas. 2008
- 15 Barros, PS. Influência da convecção forçada em juntas soldadas. Dissertação de Mestrado. 2015; 1 – 76.

- 16 Fredriksson, metalurgical transactions A, vol.3,p.2989,1972.
- 17 Galeazzi D. Análise de propriedades mecânicas de uma junta soldada de aço inoxidável martensítico AISI 410 [trabalho de conclusão de curso]. Panambi: Unijuí, Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias; 2016.