

Análise da soldagem multipasse utilizando delineamento experimental na manutenção de aço ASTM A131 Grau A

Analysis of Multi-Pass welding by using design of experiment on the maintenance of ASTM A131 Grade A steel

Filipe de Almeida Araújo¹, Mateus Oliveira de Amorim²
Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto³, Antônio do Nascimento Silva Alves⁴
Sérgio Duarte Brandi⁴, Jaime Casanova Soeiro Junior²

¹Instituto Militar de Engenharia, IME, Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais (PGCMSE/8), Pc General Tiburcio, 80, Urca, CEP: 22290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

²Universidade Federal do Amazonas, UFAM, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, PPG-CEM-UFAM, Av. Rodrigo Otávio, 3000, Coroado, CEP: 69080-005, Manaus, AM, Brasil.

³Universidade Estadual do Amazonas, UEA, Manaus, AM, Brasil. Av Djalma Batista, 3578, Chapada, CEP: 69050-010, Manaus, AM, Brasil.

⁴Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo (EPUSP), Avenida Professor Luciano Gualberto, Travessa do Politécnico, 380, Butantã, 05508-010, São Paulo, SP, Brasil.

e-mail: filipearaujo@ime.eb.br, mateusoliveiradeamorim@gmail.com, rubelmar.neto@gmail.com, ansa@usp.br, sebrandi@usp.br, jaimecasanova@ufam.edu.br

RESUMO

O estudo consiste na análise da relação entre a soldagem multipasse e os valores de corrente elétrica utilizada na soldagem de manutenção de um aço ASTM A 131 grau A. Por meio do processo de soldagem de eletrodo revestido e um delineamento experimental buscou-se identificar quais os fatores mais influentes e se existe relação entre os fatores estudados. Entre os principais resultados, a zona afetada pelo calor das amostras atravessou a espessura da chapa, entretanto os valores de dureza para as extremidades afetadas demonstraram dureza idêntica ao metal de base. Para uso em uma situação de reparo, a configuração mais indicada seria a configuração com dois cordões de solda do CP4 (1,15 kJ/mm e 1,37 kJ/mm) por apresentar os menores valores de microdureza na junta soldada.

Palavras-chave: Soldagem de manutenção. Aço naval. Soldagem por eletrodo revestido

ABSTRACT

The study consists on the analysis of the relation between multibead welding and the electric current used on maintenance welding of an ASTM A131 grade A steel, by using the shield metal arc welding process and a design of experiment to identify the factors with most influence and if there is relation between the studied factors. Between the main results the heat affected zone of the samples reached the lower extremity of the plate thickness, however the hardness values for the affected extremities show a hardness value identical to the base metal. For use in a repair situation, the desired configuration would be the one presenting 2 weld beads as the CP4 (1,15kJ/mm and 1,37kJ/mm) for having the lowest microhardness values on the welded joint.

Keywords: Maintenance welding; Shipbuilding steel; Shielded metal arc welding.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem de reparo é um procedimento altamente utilizado na indústria de navegação, devido ao baixo custo operacional envolvido, promovido pela redução do número de paradas operacionais e substituição de peças. O procedimento tende a modificar os estados de tensão do material soldado, afetando propriedades como resistência a fadiga, capacidade de carga, corrosão por tensão entre outros parâmetros críticos. A natureza do procedimento leva a desafios recorrentes devido a alta variação de condições das peças antes do repa-

ro e parâmetros de soldagem a serem aplicados, de forma a se obterem valores de dureza e resistência semelhantes à estrutura base [1, 2].

A base estrutural de embarcações é construída por vários tipos de aços de média e alta resistência, que possuem características como usinabilidade, soldabilidade e alta resistência, essenciais para uso naval.

Os reparos em navios usualmente incluem: conversões, revisões, programas de manutenção, reparo de danos e consertos de equipamentos. E devido ao alto custo envolvido na construção de novas embarcações, o uso de reparos é mais atrativo economicamente [3].

A soldabilidade depende de alguns fatores, dentre eles, a composição química do material, a energia de soldagem e a taxa de resfriamento. A falta de controle da energia e do resfriamento propicia a fragilização na zona afetada pelo calor na junta soldada do material podendo resultar em trincas [4].

As trincas por hidrogênio são consideradas uma das mais críticas, podendo ocorrer dias após o término da soldagem [5]. Esse tipo de trinca não ocorre somente em presença de hidrogênio, mas tensão residual de tração, baixas temperaturas e microestrutura susceptível.

Modelos estatísticos de análise de variância para controle de parâmetros de soldagem apresentam ser uma potencial ferramenta para análise dos parâmetros de maior influência, adquirindo a melhor relação de dureza e aporte térmico [6, 7].

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da quantidade de cordões de solda e da energia de soldagem no reparo do aço ASTM A131 grau A pelo processo de soldagem eletrodo revestido com obtenção de parâmetros para soldagem em manutenção.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Metal de base

Foram utilizadas chapas do aço ASTM A131 grau A com dimensões de 200 x 200 x 6,6 mm, onde as propriedades estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades mecânicas e composição química do ASTM A131 grau A

ASTM A131 grau A				
Propriedades Mecânicas	Resistencia a Tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)		Alongamento (%)
		445	235	
Composição Química (%wt)	C	Mn	S	P
	0,23	0,95	0,04	0,035

Para simular uma redução de espessura no material foi realizada a usinagem de um entalhe no centro da chapa na sua respectiva direção de laminação. O entalhe possui 3,0 mm de profundidade com 6,0 mm de largura, conforme a Figura 1.

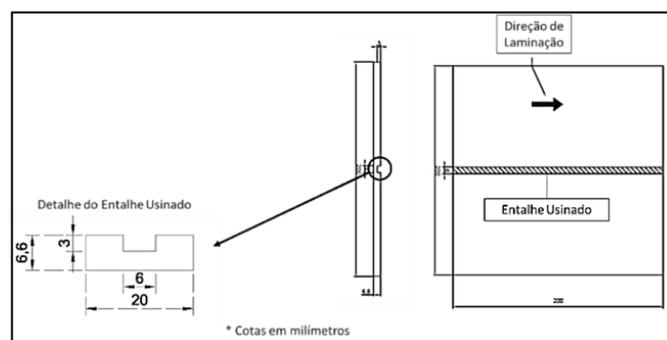


Figura 1: Representação do entalhe usinado.

2.2 Consumível de Soldagem (Eletrodo Revestido)

Conforme a norma AWS A 5.1 “Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding”[8], os eletrodos revestidos utilizados são classificados como E 7018, possuindo 2,5 mm de diâmetro com composição química e propriedades mecânicas indicadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas e composição química do eletrodo E7018

E 7018							
Propriedades Mecânicas	Resistencia a Tração (MPa)		Limite de escoamento (MPa)				Alongamento (%)
	580		490				
Composição Química (%wt)	C	P	Cr	V	Si	S	Mn
	0,081	0,005	0,47	0,005	1,47	0,008	0,023

Todos os eletrodos ressecaram em estufa à temperatura de 275 °C, como especificado pelo fabricante, e transportados por meio de porta eletrodos antes do procedimento de soldagem, conforme a norma AWS A 5.5 [9].

2.3 Procedimento de Soldagem

A soldagem foi realizada no entalhe usinado com o objetivo de preenchê-lo, Figura 2. Foram realizados dois cordões de solda em cada chapa. O primeiro cordão preencheu o entalhe até o fim do seu comprimento e o segundo cordão, foi realizado sobre o primeiro cordão de solda, porém preenchendo apenas a metade do comprimento do primeiro cordão de solda. Tal procedimento é denominado como soldagem dupla camada, um método controlado por deposição e aporte térmico entre as camadas [10], para simulação de um procedimento de reparo em campo o controle é realizado por tempo de soldagem e variação de corrente.

Para âmbito deste experimento, foi realizada uma variação de corrente de soldagem para cada cordão variando entre 70 A e 100 A, valores escolhidos por serem o máximo e mínimo de uso estipulado pelo fabricante.

Para aquisição de dados, foi realizada a medição de tempo de soldagem de cada cordão e medição do comprimento para aquisição da velocidade de soldagem, os valores das correntes de soldagem foram adquiridos pelo medidor do próprio aparelho.

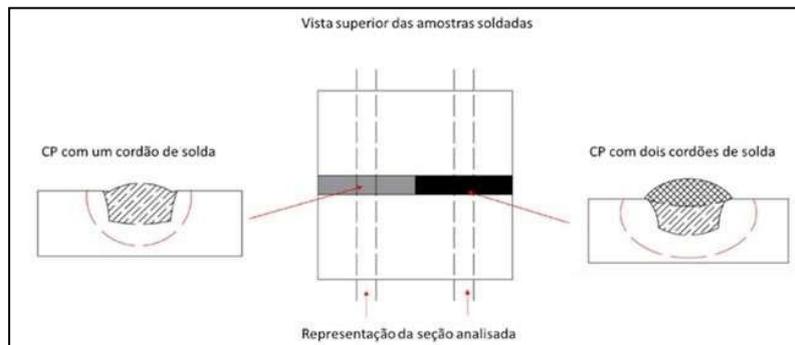


Figura 2: Representação da área soldada.

Para obtenção dos corpos de prova foram retiradas amostras por meio de cut-off com intuito de reduzir efeitos de aquecimento nas amostras, de duas regiões diferentes do entalhe soldado. Uma amostra com um cordão de solda e uma amostra com dois cordões de solda. Foram utilizadas quatro chapas de aço e foram obtidos no total de oito amostras, conforme a Tabela 3.

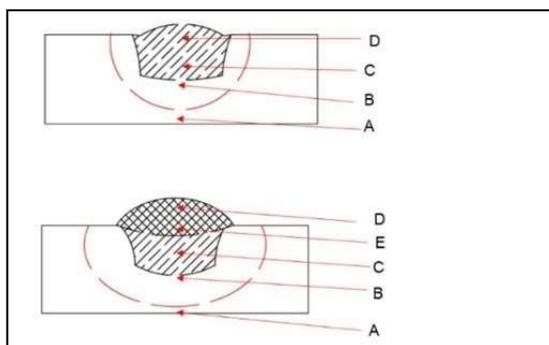
Tabela 3: Identificação das amostras analisadas.

Chapa	Amostra	Quantidade de Cordões	Corrente do 1º Cordão (A)	Corrente do 2º Cordão (A)
CHAPA 1	CP1	1	70	-
	CP2	2	70	70
CHAPA 2	CP3	1	100	-
	CP4	2	100	100
CHAPA 3	CP5	1	70	-
	CP6	2	70	100
CHAPA 4	CP7	1	100	-
	CP8	2	100	70

2.4 Ensaios

Ensaios de macrografia foram aplicadas as amostras por meio de reagente Nital 10%. Por conseguinte, foi realizado um ensaio de microscopia óptica por meio de reagente Nital com concentração de 2% para revelação das microestruturas.

Foi utilizado o ensaio de microdureza Vickers (HV 0,5) por meio de um microdurômetro Mitutoyo® [11]. A Figura 3 apresenta as áreas selecionadas para o ensaio com três marcações aplicadas em cada ponto em distância de 0,3mm.

**Figura 3:** Áreas marcadas para ensaio de microdureza.

2.5 Análise de Dados

Foi inicialmente realizado um delineamento experimental [12][13] por meio do software MiniTab® por análise fatorial de 2 fatores com 2 níveis para corrente do primeiro cordão e 3 níveis para a corrente do segundo cordão, e as médias dos resultados de dureza Vickers foram comparadas através do método Tukey com intervalos de confiança de 95%.

3. RESULTADOS

Para a aplicação do método de análise fatorial, se utilizaram os valores de dureza como resposta, seguindo sua nomenclatura anterior por zonas.

Para efeito de visualização as correntes alta, baixa e nula demonstradas nos ensaios se referem respectivamente as correntes de soldagem 100 A, 70 A e 0 A para o segundo cordão de solda, como demonstradas pelos gráficos de interação da figura 4.

Figuras 5 e 6 comparam os valores do ensaio de microdureza obtidos pelas amostras obtendo um valor médio de 147 HV para o metal de base e, posteriormente, comparados por análise Tukey.

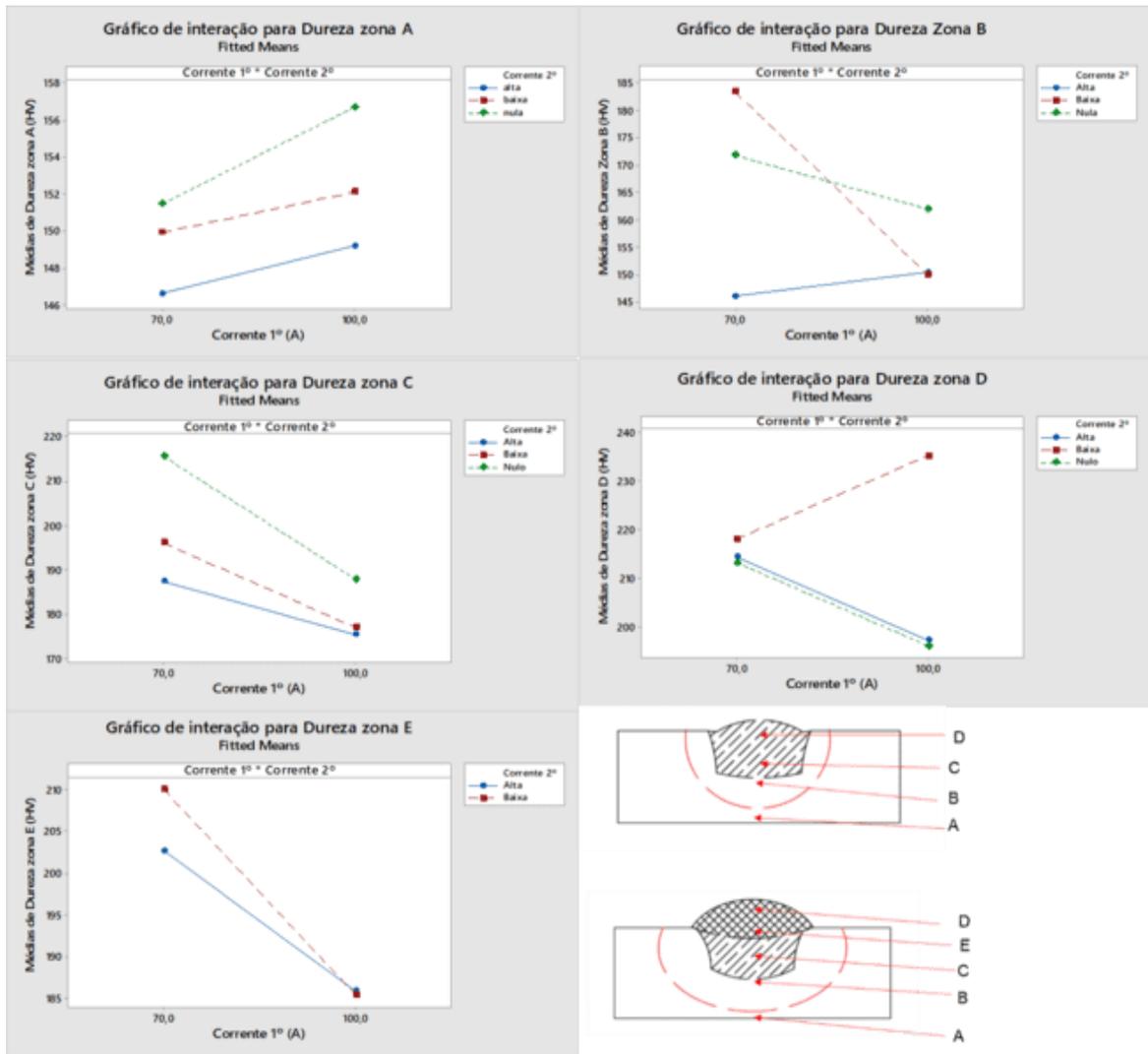


Figura 4: Gráficos de interação para as Zonas A, B, C, D e E.

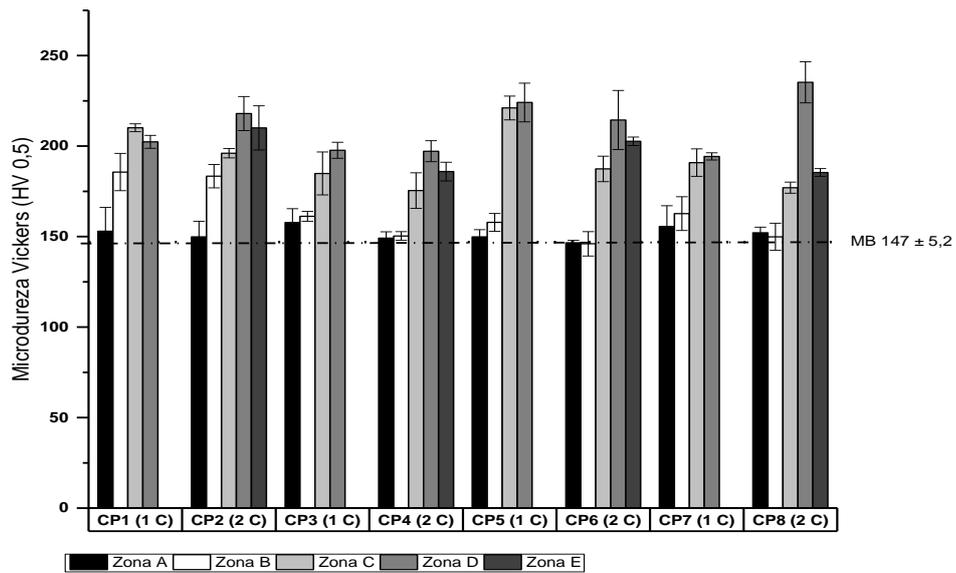


Figura 5: Gráfico dos valores médios de microdureza para os corpos de prova onde 1C (1 cordão) e 2C (2 cordões).

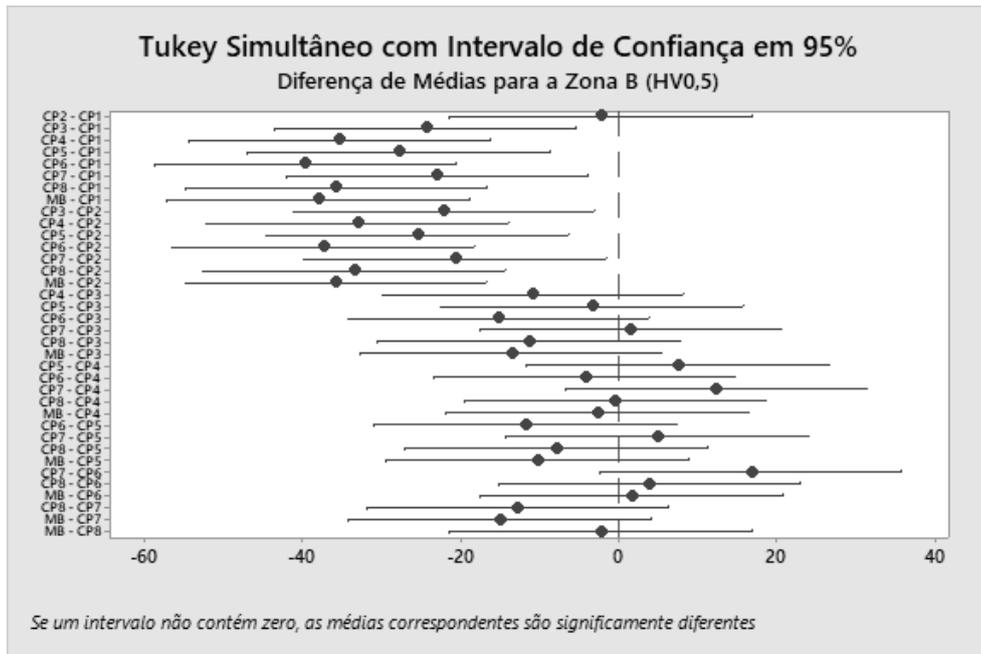


Figura 6: Método Tukey com 95% de índice de confiança para a dureza da Zona B entre as amostras.

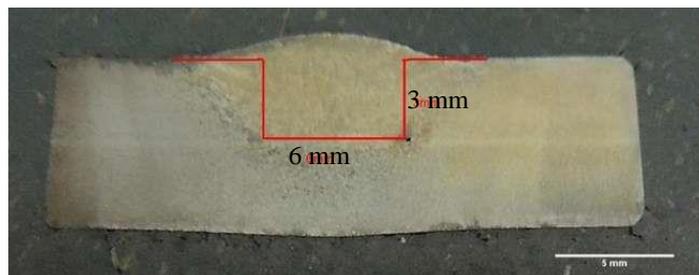


Figura 7: Imagem macrográfica do CP1.

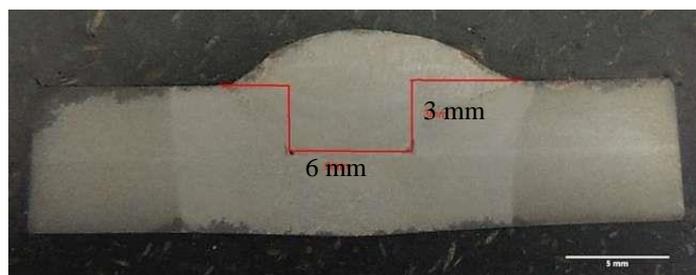


Figura 8: Imagem macrográfica do CP2.

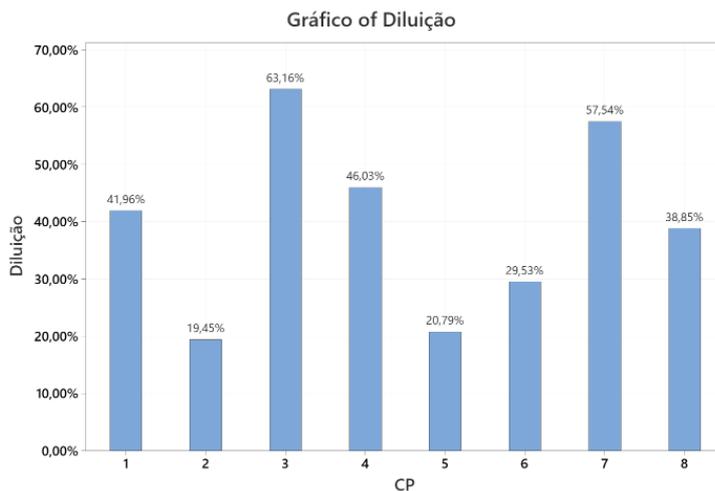


Figura 9: Gráfico de diluição do metal de solda no metal de base.

As Figuras 7 e 8 apresentam ensaios macrográficos realizados aos CP1 e CP2 sendo estas, amostras com um único cordão e com dois cordões de solda, respectivamente. As imagens são representativas do comportamento evidenciado em todos os corpos de prova, indicando que a energia de soldagem aplicada atravessou toda a espessura da chapa. A Figura 9 apresenta os percentuais de diluição calculados para os 8 corpos de prova.

A Figura 10 apresenta a Zona A com aumento de 400x, tal região é situada no metal de base da amostra, possuindo uma estrutura com ferrita intergranular poligonal e perlita.

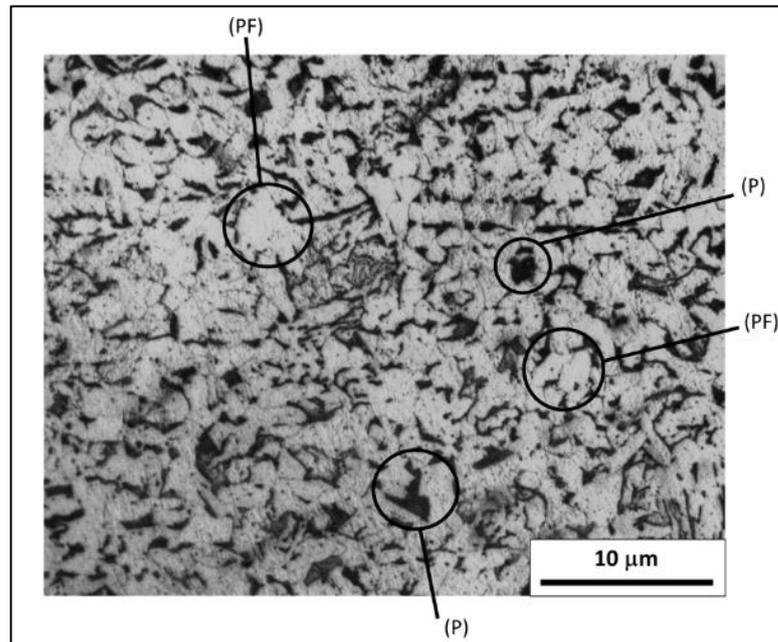


Figura 10: Região do metal de base do CP1 composta por ilhas de perlita (P) e ferrita poligonal (PF). Reagente: Nital com concentração de 2%.

A Figura 11(a) demonstra a Zona B do CP1 onde é localizada a sua zona afetada pelo calor, composta por ferrita de segunda fase e perlita e na Figura 11(b) sua transformação após a aplicação do segundo cordão de solda se tornando uma estrutura similar com maior concentração de perlita (CP2). De maneira similar as Figuras 12(a) e (b) demonstram a transformação da Zona B do CP3 com a aplicação do segundo cordão.

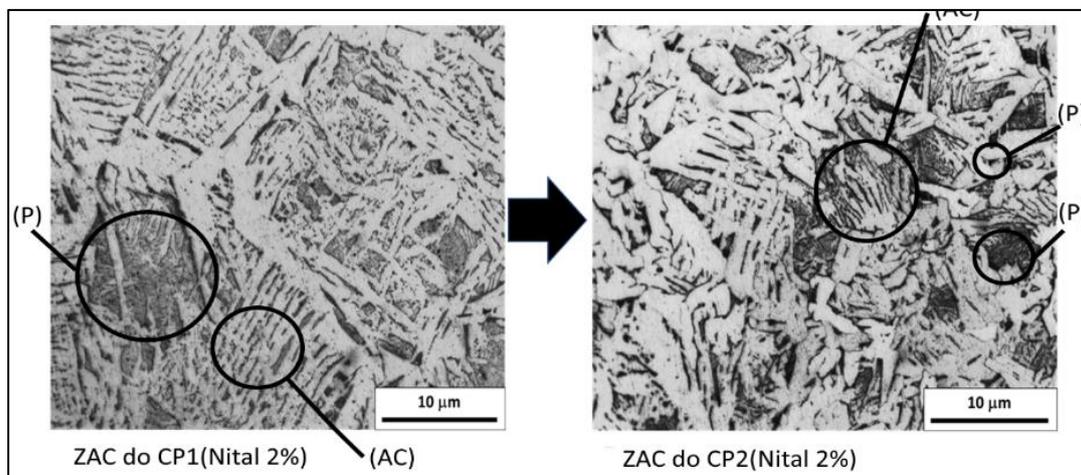


Figura 11: Demonstração da mudança microestrutural na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) do CP1 após a aplicação do segundo cordão de solda (CP2) à direita, compostas por ilhas de perlita (P) e ferrita de segunda fase alinhada (AC). Reagente: Nital com concentração de 2%.

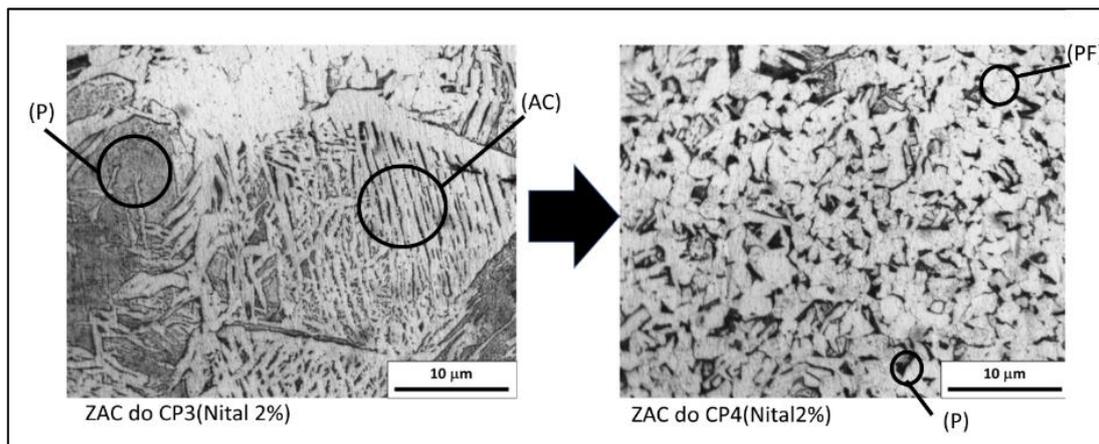


Figura 12: Demonstração da mudança microestrutural na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) do CP3 após a aplicação do segundo cordão de solda (CP4) à direita, compostas por ilhas de perlita (P) e ferrita de segunda fase alinhada (AC). Reagente: Nital com concentração de 2%.

4. DISCUSSÃO

Dentre os gráficos de interação demonstrados na Figura 4, somente as Zonas B e C demonstraram interações significantes, sendo estas situadas, respectivamente, na zona afetada pelo calor e zona fundida do primeiro cordão de solda das amostras.

O gráfico de interação da zona B demonstra uma interação entre as três condições de corrente apresentadas. Para baixa corrente, os valores de dureza do primeiro cordão de solda reduzem com o aumento de corrente, o mesmo ocorrendo na condição nula que demonstra interação cruzada. As condições de baixa e alta corrente demonstram interação, onde a condição baixa demonstra maiores valores de dureza em comparação com a alta.

O gráfico de interação da zona C demonstra o efeito entre as correntes baixa e nula, em dado caso, ambos os valores de dureza para as amostras caem com o aumento da corrente aplicada ao primeiro cordão, entretanto a condição baixa demonstra em geral valores de dureza maiores, tal interação das correntes é relacionada a velocidade de soldagem variante proveniente do processo manual.

Procedimentos de soldagem de reparo e em serviço apresentam uma influência adicional causada pela operação manual, que causa variação da velocidade de soldagem. HANNING [14] apresenta a influência de tal efeito, indicando que o ciclo de temperatura experimentado em uma ZAC é altamente influenciado pelo operador, efeito que pode afetar a microdureza da junta, entretanto os valores obtidos na zona C se encontram na faixa aceitável para o A 131.

Pela análise Tukey da Zona B demonstrada pela figura 6, o CP1 e CP2 demonstram valores de dureza fora da média, comparando a Figura 5, os mesmos demonstram valores de dureza elevados em relação às outras amostras.

O comportamento de aumento de dureza, de acordo com a menor quantidade de corrente utilizada, pode possuir relação com o fator de diluição do aço, ou seja, a propriedade de dureza superior foi mantida por não fundir completamente o metal de base e o metal de adição do primeiro cordão, após a aplicação do segundo cordão.

Pelos valores de diluição calculados e demonstrados pela Figura 9, é observado que as amostras com maior fator de diluição demonstraram menores valores médios de microdureza. Os CPs 3 e 7 sofreram um único cordão a 100 A obtendo os maiores valores de diluição entre as amostras com um único cordão de solda, para as amostras com dois cordões de solda os CP8 e 4 obtiveram os maiores valores.

MURTI e MAURER [15, 16] demonstraram que em aços de alta resistência e baixa liga, como o A 131 grau A estudado, a dureza da zona afetada pelo calor e zona fundida é reduzida com o aumento de aporte térmico, causado por um efeito de recozimento na peça. Assim, as amostras com menor corrente utilizada possuem uma maior taxa de resfriamento resultando no aumento da dureza.

JORGE [17] sugere que a técnica de eletrodo revestido também exerce influência nos valores de dureza da junta soldada, devido a maior energia de soldagem envolvida, a mesma podendo causar redução na dureza da amostra. Tal aporte térmico elevado também pode causar distorções na peça durante o reparo como reportado por SIRIATIEN [18].

A Figura 10 representa a região do metal de base do CPI sendo compostas de ferrita poligonal e perlita, os corpos de prova que sofreram a aplicação de um único cordão não possuíram variação de sua microestrutura, independente da corrente de soldagem utilizada.

As Figuras 11 e 12 demonstram a modificação microestrutural gerada pela aplicação do segundo cordão de solda, onde a sua estrutura inicialmente composta por ferrita de segunda fase alinhada e perlita deu lugar a uma estrutura similar com concentrações de perlita. A dissipação de fase alinhada da ferrita causada pelo efeito de recozimento, leva a redução dos valores de dureza da zona como indicado pelos valores de dureza médios reduzidos encontrados.

A aplicação do segundo cordão de solda nas amostras faz com que as microdurezas da zona B, onde se encontra a zona afetada pelo calor, sejam similares aos valores de microdureza da zona B das amostras com um único cordão.

Observando as macrografias das Figuras 7 e 8, as zonas afetadas pelo calor de todas as amostras atravessaram a chapa, indicando mudança microestrutural, entretanto, não demonstrando diferença do valor de dureza do metal de base como determinado pela norma A131 [19] e evidenciado na Figura 5. Explicar melhor

O CP3 e CP7 fizeram uso de um único cordão de 100 A possuindo o maior coeficiente de diluição, os CPs 2 e 5 demonstraram os menores valores de diluição sendo ambas soldadas a 70 A.

5. CONCLUSÕES

O Delineamento experimental indicou que durante uma soldagem de manutenção à grande influência da corrente utilizada nos valores de dureza da zona afetada pelo calor e zona fundida. O número de cordões de solda apresentou alteração no valor de microdureza, indicando que um maior número de cordões reduz a dureza média obtida nas zonas afetadas.

O comportamento de maior dureza do material está relacionado com a menor corrente de soldagem utilizada, efeito relacionado ao fator de diluição das amostras. Os corpos de prova com maior corrente demonstraram um maior fator de diluição.

O metal de base afetado pela aplicação de calor, de acordo com a análise macrográfica, não sofre variações de microdureza independente da corrente utilizada e número de cordões aplicados.

Para uso em uma situação de reparo, a configuração mais indicada seria a configuração com dois cordões de solda do CP4 (1,15 kJ/mm e 1,37 kJ/mm) por apresentar os menores valores de microdureza na junta soldada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os seus agradecimentos ao departamento Engenharia de Materiais da UFAM e ao departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP, por apoiar a realização deste trabalho.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] GUROVA, T., *et al.* Time-dependent redistribution behavior of residual stress after repair welding. *Welding in the World*, v. 61, n. 3, p. 507-515, 2017.
- [2] SALAMI, T., KHANDANI, P., ASADI. Friction stir welding/processing as a repair welding, *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*, Woodhead Publishing. 2014.
- [3] NSRP. National Shipbuilding Research Program. Characterizing Shipyard Welding Emissions and Associated Control Options. 1995.
- [4] KOU, S. *Welding metallurgy*, 2ª edição, 2003.
- [5] WAINER, E., BRANDI, S., MELLO, F. *Soldagem: Processos e metalurgia*. 10ª ed. São Paulo, Brasil, 1992.
- [6] CHANDRAN, S., RAJESH, R., ANAND, M. Dev. Analysis of mechanical properties and optimization of laser beam welding parameters on dissimilar metal titanium (Ti6Al4V) and aluminium (A6061) by factorial and ANOVA techniques. *Materials Today: Proceedings*, v. 42, p. 508-514, 2021.
- [7] SATHISHKUMAR, D., DAS, A.D. Investigations on effect of process parameters on GTAW of aluminium alloy welding using full factorial design technique. *Materials Today: Proceedings*, v. 37, p. 621-626, 2021.
- [8] AWS A5.1/A5.1M. Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, American Welding Society, Doral, FL, 2012.
- [9] AWS A5.5/A5.5M, Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, American Welding Society, Doral, FL, 2006.

- [10] GARCIA, D.N., BERNARDI, R.A., LIMA, A.K.F. Análise da zona afetada pelo calor em soldagem dupla camada utilizando o método dos elementos finitos. *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro, v.25, n.2, 2020.
- [11] ASTM E384, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [12] SHANMUGASUNDAR, G., KARTHIKEYANB, B., SANTHOSH, P., *et al.* Optimization of Process Parameters in TIG Welded Joints of AISI 304L - Austenitic Stainless Steel using Taguchi's Experimental Design Method, *Materials Today: Proceedings*, 16, 1188–1195, 2019.
- [13] KUMAR, S., SINGH, R. Optimization of process parameters of metal inert gas welding with preheating on AISI 1018 mild steel using grey based Taguchi method, *Measurement*, 106924, 2019.
- [14] HANNING, F., HURTIG, K., ANDERSSON, J. Measurement of the thermal cycle in the base metal heat affected zone of cast ATI® 718Plus™ during manual multi-pass TIG welding. *Procedia Manufacturing*, v. 25, p. 443-449, 2018.
- [15] MURTI, V.S.R., SRINIVAS, P.D., BANADEKI, G.H.D., *et al.* Effect of heat input on the metallurgical properties of HSLA steel in multi-pass MIG welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 37(1-4), 723–729. 1993.
- [16] MAURER, W., ERNST, W., RAUCH, R., *et al.* Evaluation of the factors influencing the strength of HSLA steel weld joint with softened HAZ. *Welding in the World*, 59(6), 809–822, 2015.
- [17] JORGE, J.C.F., MONTEIRO, J.L.D., GOMES, A.J.C., *et al.* Influence of welding procedure and PWHT on HSLA steel weld metals. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019.
- [18] SIRISATIEN, T., MAHABUNPHACHAI, S., SOJIPHAN, K. Effect of submerged arc welding process with one-side one-pass welding technique on distortion behavior of shipbuilding steel plate ASTM A131 grade A. *Materials Today: Proceedings*, 5(3), 9543–9551. 2018.
- [19] ASTM A131/A131M. Standard Specification for Structural Steel for Ships, ASTM International, 2019.

ORCID

Filipe de Almeida Araújo	https://orcid.org/0000-0003-4402-5982
Mateus Oliveira de Amorim	https://orcid.org/0000-0002-6254-2222
Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto	https://orcid.org/0000-0002-1408-5290
Antônio do Nascimento Silva Alves	https://orcid.org/0000-0001-8422-1414
Sérgio Duarte Brandi	https://orcid.org/0000-0002-8460-1297
Jaime Casanova Soeiro Junior	https://orcid.org/0000-0003-0905-8287