

Estudo de revestimentos de liga de níquel aplicados por soldagem em aço API 5L Gr B

Marcos Mesquita da Silva^[1], Gabrielly Santana Cardoso^[2], Theophilo Moura Maciel^[3], Marco Antonio dos Santos^[4], Renato Alexandre Costa de Santana^[5], Valmir Rodrigues Batista^[6]

[1] marcos.silva@ifpb.edu.br. [2] gbrillysc@gmail.com. Instituto Federal da Paraíba. [3] theophilo.maciel@ufcg.edu.br.

[4] santos.marco@ufcg.edu.br. [5] renatoacs@ufcg.edu.br. Universidade Federal de Campina Grande. [6] valmir5@yahoo.com.br. Centro Universitário Maurício de Nassau.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes revestimentos de superligas de níquel aplicados pelo processo de soldagem a arco submerso (SAW) em aço API 5L Gr B, empregado no setor de petróleo e gás. As soldagens foram realizadas com o metal de adição AWS ERNiCrMo-4 com 1,14 mm de diâmetro e um fluxo aglomerado e básico. Três revestimentos foram aplicados, sendo dois com corrente pulsada e um com corrente convencional. Em seguida, esses revestimentos foram caracterizados através de microscopia ótica, teste de microdureza, espectroscopia por energia dispersiva de raios-x (EDX) e ensaio de resistência à corrosão. Os resultados obtidos mostraram que o revestimento aplicado com corrente convencional apresentou um menor nível de diluição, maior largura e altura e maior resistência à corrosão quando comparado com os revestimentos realizados com corrente pulsada.

Palavras-chave: Soldagem de revestimento. Processo SAW. Superliga de níquel. Resistência à corrosão.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate different weld coatings of Ni alloy applied by the process of submerged arc welding (SAW) on API 5L Gr B steel used in the Oil and Gas Sector. The weldings were made with an AWS ERNiCrMo-4 filler metal of 1,14mm-diameter and an agglomerated, basic fluoride and non-alloying flux. Three weld coatings were made, two of them with pulsed and one with conventional current. Then, these weld coatings were characterized according to microhardness, optical microscopy, Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and corrosion resistance tests. The results showed that the coating applied with conventional current presented lower dilution levels, higher width and height, and higher corrosion resistance when compared to the coatings applied with pulsed current.

Keywords: *Weld coating . Submerged arc welding. Nickel alloy. Corrosion resistance.*

1 Introdução

A corrosão causada pelos ácidos naftênicos pode ocasionar sérios problemas nas unidades de destilação de petróleo, assim como no sistema de transporte do petróleo e do gás – feito através de tubulações de aço –, principalmente devido à baixa qualidade do petróleo extraído, que apresenta altos níveis de ácidos, enxofre e outros componentes potencialmente corrosivos. Muitas empresas prospectoras e beneficiadoras de petróleo enfrentam esse tipo de problema, que causa prejuízos devido à parada das unidades para que se faça a manutenção dos pontos atacados.

Independentemente do ramo de atividade, o aço carbono é um dos materiais mais utilizados hoje nas indústrias, principalmente na parte estrutural; no entanto, apresenta muitos problemas no que diz respeito à corrosão, necessitando, assim, de um mecanismo que impeça ou diminua essa ação indesejável e prejudicial aos equipamentos constituídos desse material. Uma das soluções encontradas para esse tipo de problema é o revestimento desse material com liga de níquel, através de processos de soldagem (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Hastelloy C-276 é uma liga de níquel muito utilizada na indústria petroquímica, aeroespacial e nuclear, pois possui alta resistência à corrosão em uma ampla gama de meios redutores e oxidantes, além de resistência a altas temperaturas (AHMAD *et al.*, 2005).

Para que os revestimentos de liga de níquel tenham bom desempenho sob corrosão, devem ter teor de ferro (Fe) o mais baixo possível, pois este último está intrinsecamente ligado ao nível de diluição do substrato no revestimento. Nesse caso, quanto menor a diluição, menor a probabilidade de formação de microestruturas frágeis e susceptíveis à corrosão e menor o teor de Fe na superfície (ARAÚJO *et al.*, 2010).

Segundo a norma ISO 10423, adotada pela Petrobras, são considerados ideais valores na faixa de 5% a 8% de Fe na superfície do revestimento em equipamentos com revestimentos metálicos para proteção contra corrosão (BATISTA *et al.*, 2011).

As características geométricas dos revestimentos é outro fator de grande importância na sua qualidade. O revestimento deve ser o mais largo possível e deve ter uma boa uniformidade, cobrindo assim maior área, otimizando o processo de revestimento, economizando tempo e minimizando custos.

Para revestimentos internos empregados em tubulações, no setor de petróleo e gás natural, exige-se um reforço líquido mínimo de 3 mm, devendo, portanto, obter-se um reforço bruto acima deste valor, a fim de permitir uma usinagem posterior que resulte neste valor estipulado (ISO, 2003).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do modo de corrente sobre o nível de diluição, a geometria e a resistência à corrosão de diferentes revestimentos de superliga de níquel (Hastelloy C-276) aplicados pelo processo de soldagem a arco submerso (SAW) em aço API 5L Gr B, empregado no setor de petróleo e gás.

2 Método da pesquisa

Como substrato, foi utilizado um segmento de tubo (290 mm de diâmetro interno e 18 mm de espessura) de aço API 5L Gr B enviado pelo CENPES, cuja composição química é apresentada na Tabela 1. O processo de soldagem utilizado foi a arco submerso (SAW), utilizando como consumíveis um fluxo aglomerado e básico, e o arame eletrodo de liga de níquel Hastelloy C-276 (ERNiCrMo-4), com diâmetro de 1,14 mm, cuja composição química, fornecida pelo fabricante, é apresentada na Tabela 1.

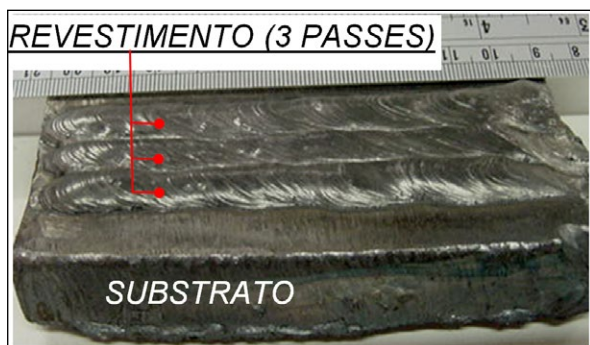
Tabela 1 – Composição química (% em peso) dos metais de base e de adição.

MATERIAL	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe	Co	W	V
ER NiCrMo-4*	0,009	0,54	0,05	0,005	0,001	15,3	15,3	58,2	6,12	0,03	3,82	0,27
API 5L GR B**	0,19	0,70	0,24	0,018	0,018	0,064	0,008	0,07	Bal.	-	-	-

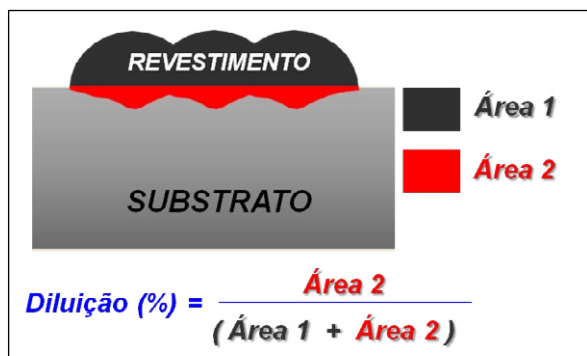
Fonte: *HAYNES Wire Company (fabricante) e **CENPES (PETROBRAS).

O equipamento de soldagem utilizado foi uma fonte multiprocessada modelo DIGI Plus A7 800, da marca IMC Soldagem. Antes da deposição do cordão de solda, o substrato foi lixado com disco de desbaste e escova de aço inoxidável e, por fim, sua superfície foi limpa com acetona. Revestimentos com três passes foram realizados em uma única camada, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Revestimento com três passes: a) vista superior; b) esquema da seção transversal.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelos autores.

Foram realizados testes com corrente pulsada (Revestimento Pulsado – RP) e corrente convencional (Revestimento Convencional – RC), com o objetivo de avaliar os efeitos dessas modalidades de corrente sobre as características do revestimento (geometria, diluição e resistência à corrosão).

Todos esses parâmetros foram utilizados para soldagem na condição sem pré-aquecimento. A nomenclatura dos corpos de prova (CP) e os parâmetros de soldagem são mostrados na Tabela 2. Foi observado em trabalho anterior com corrente pulsada (BATISTA *et al.*, 2011) que os melhores resultados de diluição e uniformidade do cordão foram

obtidos com DBCP (distância do bico de contato à peça) de 15 mm. Porém, em testes preliminares com corrente convencional, observou-se que foi possível atingir boa uniformidade e estabilidade do arco com DBCPs superiores a 20 mm, por isso a amostra RC tem DBCP superior.

Tabela 2 – Nomenclatura dos corpos de prova e parâmetros de soldagem.

CP	*RP1	**RP2	RC
Im (A)	183,83	183,93	165,69
Um (V)	30,87	37,38	41,30
Va (m/min)	6,00	6,00	7,00
H (kJ/cm)	15,45	18,75	18,65
DBCP (mm)	15,00	15,00	27,50

*Corrente de pico: $I_p = 260$ A; Corrente de base: $I_b = 125$ A. ** Corrente de pico: $I_p = 300$ A; Corrente de base: $I_b = 125$ A.

Fonte: Elaborada pelos autores.

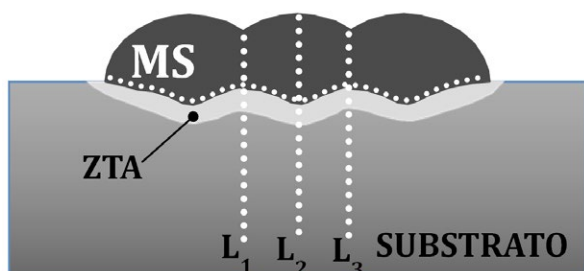
Seções transversais dos revestimentos foram cortadas para o cálculo de sua diluição, altura (h) e largura (L). A diluição é dada pela relação entre a área de penetração (Área 2) e a área total da seção transversal do revestimento (Área 1+Área 2), como mostram a Figura 1b e a Equação (1).

$$D(\%) = \frac{\text{Área 2}}{\text{Área 1} + \text{Área 2}} \quad (1)$$

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados empregando-se duas metodologias. A primeira metodologia consistiu na impressão, na seção transversal, de 3 (três) linhas verticais em pontos do metal de solda (MS), da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de base (MB), obedecendo a uma distância entre impressões de 0,20 mm, conforme mostra a Figura 2. Foram feitas 28 medições por linha, com distâncias de 0,1 mm da linha de fusão na parte da ZTA, 0,10 mm da interface no MS e de 0,20 mm da superfície do revestimento (no MS) em cada linha. Uma carga de 0,10 kg (100 g) e um tempo de 15 segundos foram utilizados. Essa primeira metodologia foi empregada a fim de conhecer o perfil de dureza ao longo do revestimento (MS) e do substrato (ZTA e MB).

A segunda metodologia consistiu de medidas realizadas próximas à linha de fusão do lado do MS, conforme mostra a Figura 2. Para isso, usou-se uma carga de 0,05 kg (50 g) por um tempo de 15 segundos, com espaçamento de 0,25 mm entre impressões.

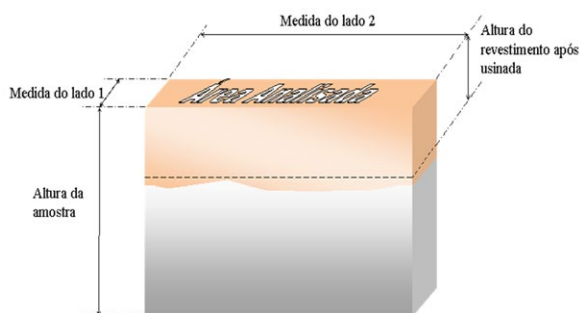
Figura 2 – Disposição das impressões de microdureza.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Foram realizados ensaios de corrosão em uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos, utilizando-se duas técnicas eletroquímicas: Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL) e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). Para realizar as medidas, foi utilizado um potenciostato/galvanostato PG STATE 30, da Autolab, conectado aos softwares GPES e FRA2. O eletrodo de referência utilizado foi prata cloreto de prata (Ag/AgCl) e todos os potenciais foram referidos a esse eletrodo. O contra eletrodo empregado foi uma placa de platina com área superficial de 6,0 cm². Os eletrodos de trabalho foram as amostras de ligas de níquel. O meio corrosivo usado foi o NaCl (1M).

Figura 3 – Desenho em perspectiva da amostra após o processo de usinagem.



Fonte: Elaborada pelos autores.

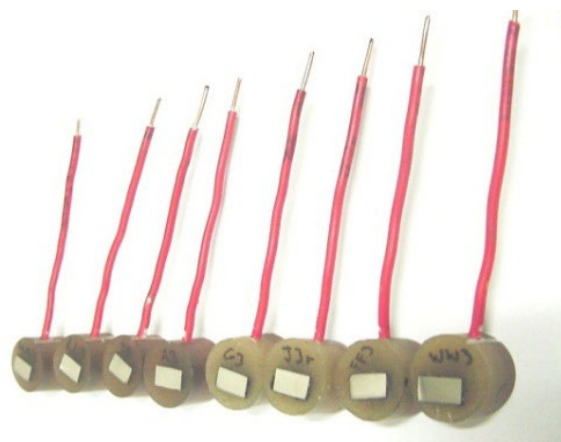
Para os ensaios de corrosão, as amostras foram confeccionadas retirando-se uma área do passe central que representasse significativamente o revestimento.

As amostras foram planejadas e deixadas com as mesmas características geométricas através de usinagem, com os requisitos indicados na Figura 3, cujos valores das medidas foram:

- Altura do revestimento depois de usinado = 3 mm;
- Altura das amostras = 9,80 mm;
- Área exposta para análise das amostras = 135,15 mm².

Foi conectado um fio elétrico rígido de 1,5 mm de diâmetro, com um comprimento constante de fio para cada amostra. Após essa conexão, as amostras foram embutidas (Figura 4).

Figura 4 – Eletrodos de trabalho (amostras) para análise de corrosão.



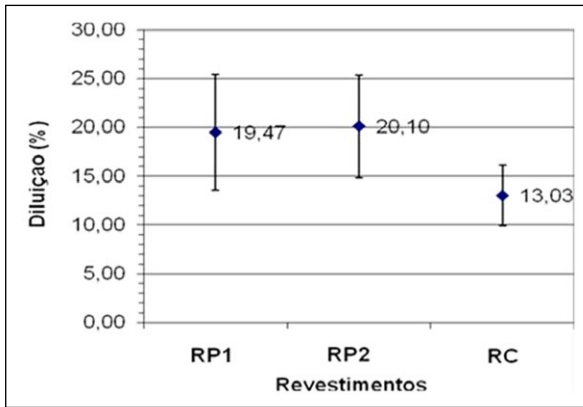
Fonte: Elaborada pelos autores.

Portanto, foi avaliada a influência dos parâmetros de soldagem sobre o comportamento corrosivo através das seguintes respostas: Potencial de corrosão (E_{corr}) e Resistência de polarização (R_p). Os teores de ferro na superfície das amostras foram determinados através da técnica de espectroscopia por energia dispersiva de raios-x (EDX).

3 Resultados da pesquisa

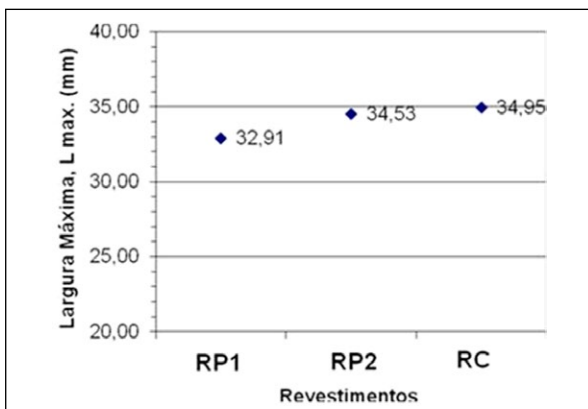
A Figura 5 ilustra a diluição dos revestimentos obtidos. Nota-se que os revestimentos aplicados utilizando corrente pulsada apresentaram valores de diluição média em torno de 20%, enquanto o corpo de prova RC, soldado com corrente convencional, apresenta um valor médio de 13%.

Figura 5 – Valores de diluição D (%) para cada amostra.



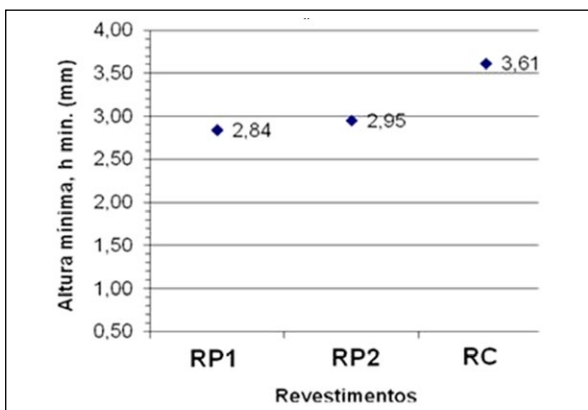
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 6 – Largura máxima dos revestimentos.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 7 – Altura mínima dos revestimentos.



(b)

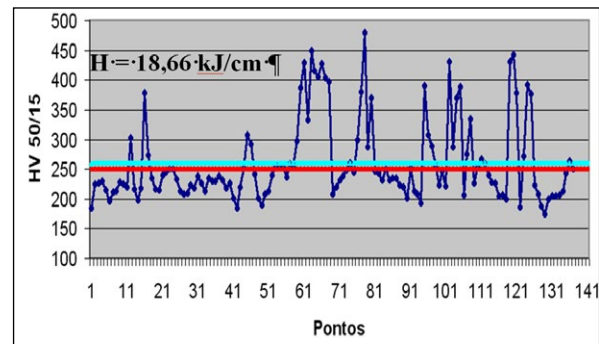
Fonte: Elaborada pelos autores.

Verifica-se na Figura 5 que a amostra RC – mesmo com uma energia de soldagem de 18,66 kJ/cm, da mesma ordem da amostra RP2 – apresentou menor diluição. Isso pode ser explicado pelo menor

valor de corrente de soldagem (166 A), enquanto nas demais amostras a corrente média foi de 184 A. Logo, a soldagem com corrente convencional apresenta melhores perspectivas, pois foram alcançados valores de diluição mais próximos do desejado, entre 10% e 15%.

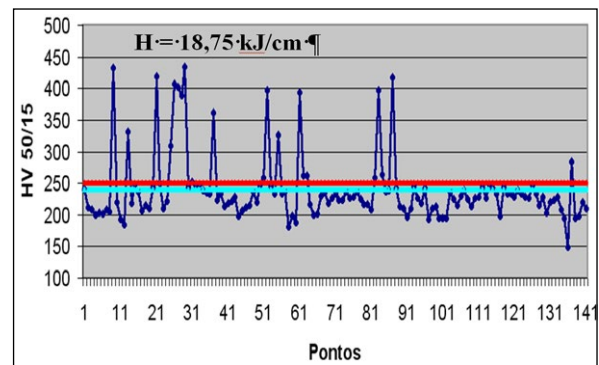
O gráfico da Figura 6 ilustra a largura dos três revestimentos, enquanto o gráfico da Figura 7 ilustra os valores das alturas mínimas dos revestimentos para as três condições de soldagem executadas. Observa-se que a amostra RC apresentou largura e altura superiores se comparada com as duas outras amostras soldadas com corrente pulsada (RP1 e RP2). Assim, percebe-se que a corrente convencional proporcionou resultados de maior interesse para a soldagem de revestimento com relação aos parâmetros diluição e geometria.

Figura 8 – Perfil de dureza Vickers ao longo da interface revestimento/substrato (condição RC).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 9 – Perfil de dureza Vickers ao longo da interface revestimento/substrato (condição RP2).



Fonte: Elaborada pelos autores.

As Figuras 8 e 9 apresentam os perfis de microdureza ao longo da interface MS/substrato para as amostras soldadas com corrente convencional

(RC) e com corrente pulsada (RP2), respectivamente, indicando o valor médio. Essas medidas foram feitas na interface, mas no lado do MS (Figura 2). A amostra RP1 apresentou um perfil de microdureza semelhante aos demais.

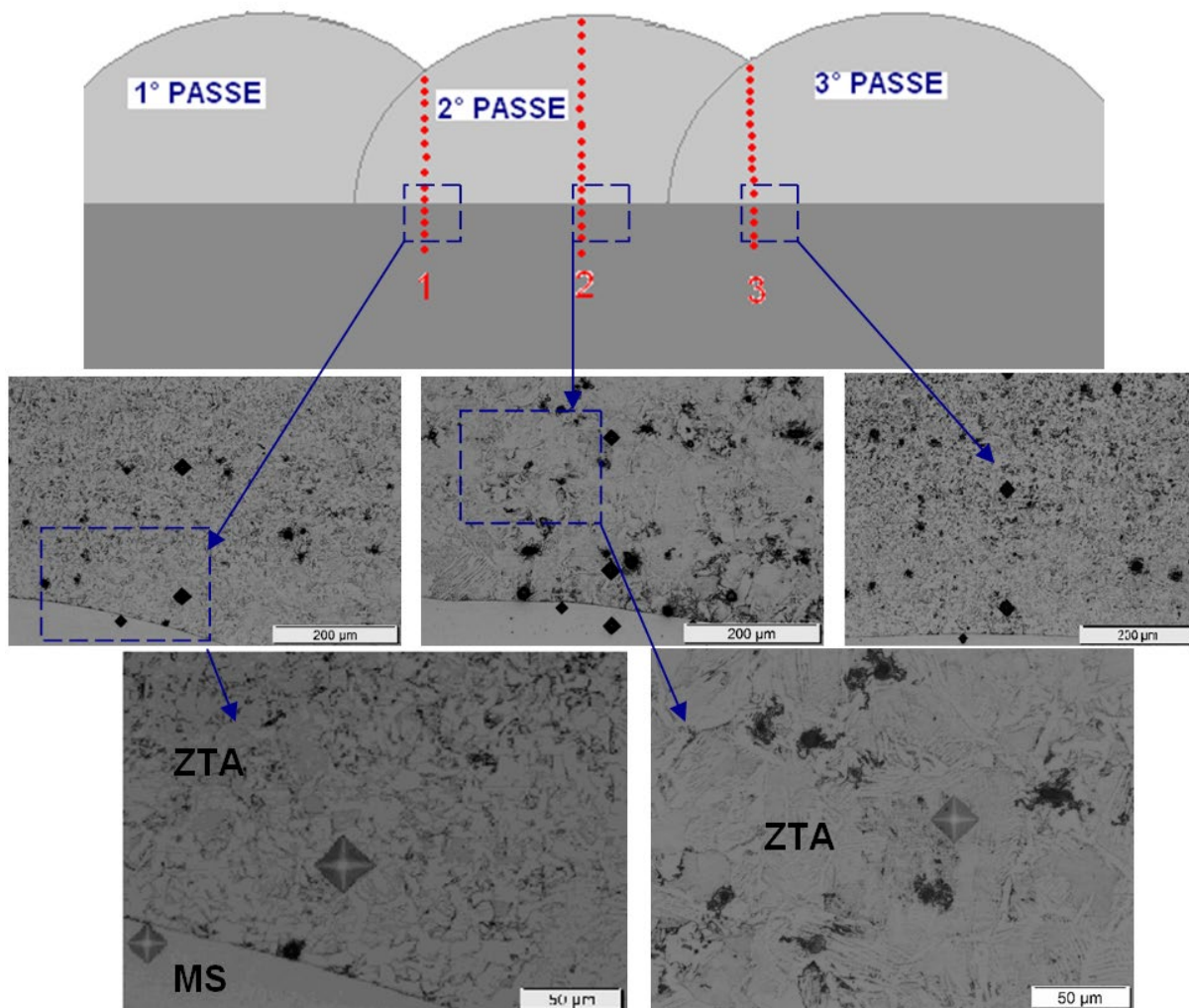
Podem-se observar, nas Figuras 8 e 9, médias (linha horizontal azul) com valores de microdureza bem próximos de 250 HV (linha horizontal vermelha), que é um valor máximo estipulado pela norma NACE para a superfície do revestimento. Porém, essas medidas foram realizadas na interface revestimento/substrato, na qual é possível a existência de zonas parcialmente diluídas, como será mostrado posteriormente.

Na Figura 10, pode-se observar a variação de microestrutura ao longo da ZTA do revestimento

RC. A ZTA do 2° passe – ou seja, parte central do revestimento na condição com corrente convencional (RC) – apresenta uma microestrutura com dureza um pouco mais elevada, que provavelmente formou-se devido a uma maior taxa de resfriamento.

Além disso, observa-se a influência do 3° passe depositado sobre o 2° passe do revestimento: na região entre os passes de revestimento (interseção), a microestrutura se apresentou refinada e, conseqüentemente, obteve-se um valor de dureza um pouco menor (na ZTA). Esse mesmo comportamento foi verificado nas demais condições de soldagem realizadas neste estudo.

Figura 10 – Variações de microestrutura ao longo do revestimento.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Quanto à região central no segundo passe, que não teve nenhuma influência do cordão de solda seguinte, constatou-se que, na ZTA-GG (ZTA de Grãos Grosseiros), o metal base se apresenta com uma estrutura principalmente bainítica (superior e inferior), com ferritas de Widmanstätten. Por outro lado, a região da ZTA-GG formada entre passes teve influência da ZTA do passe posterior, o que provocou um refino dos grãos. Os mesmos resultados foram constatados por Santos Neto (2003), que, trabalhando com soldagem em aços ARBL, confirma que esse fato proporciona melhores propriedades mecânicas nessa região.

As Figuras 11 e 12 mostram os perfis de microdureza através do MS e do substrato (ZTA e MB) para as amostras soldadas com corrente convencional (RC) e com corrente pulsada (RP2), respectivamente.

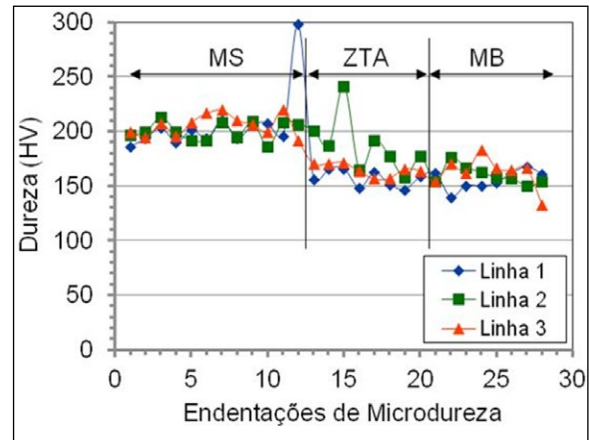
Observam-se, na Figura 11, dois valores de dureza bem acima da dureza média no revestimento (ponto 12 – Linha 1) e na ZTA (ponto 15 – Linha 2). Lundin (1982) afirma que, na região próxima à interface, ocorre migração de carbono do substrato para o metal de solda, o que proporciona aumentos de dureza (zona enriquecida de carbono). O valor de dureza elevado na ZTA está localizado numa região (Passe 2) que apresenta estrutura não refinada e, assim, provavelmente forma-se um precipitado. Com uma análise em microscópio eletrônico de varredura, seria possível confirmar essa hipótese.

Observam-se, na Tabela 3, as energias de soldagem utilizadas e os valores médios de microdureza com seus respectivos desvios.

Verificou-se que o corpo de prova RP2 obteve os menores valores de dureza média no revestimento. Essa média menor de dureza pode estar associada a uma menor taxa de resfriamento devido a uma energia de soldagem (18,75 kJ/cm) mais elevada. Além disso,

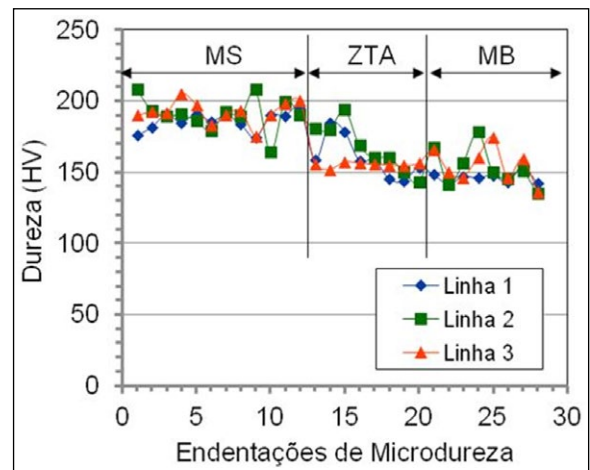
observa-se que o aumento de 3 kJ/cm na energia de soldagem não acarretou uma variação significativa de dureza, tanto na ZTA quanto no revestimento.

Figura 11 – Perfil de microdureza ao longo do revestimento de Hastelloy C-276 (condição RC).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 12 – Perfil de microdureza ao longo do revestimento de Hastelloy C-276 (condição RP2).

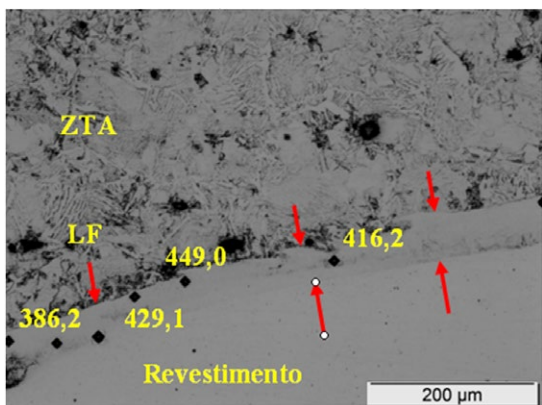


Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 3 – Valores médios de dureza HV nas regiões do revestimento e da ZTA dos corpos de prova, com as respectivas energias de soldagem.

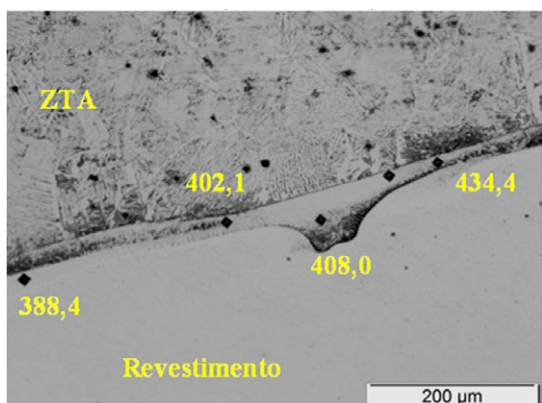
CPs	RP1	RP2	RC
Revestimento (HV)	206,7+10,7	189,6+9,2	204,2+18,4
ZTA (HV)	173,5+16,9	168,8+13,4	164,4+16,8
H (kJ/cm)	15,48	18,75	18,66

Figura 13 – Interface (linha de fusão) do revestimento RC. (valores em HV).



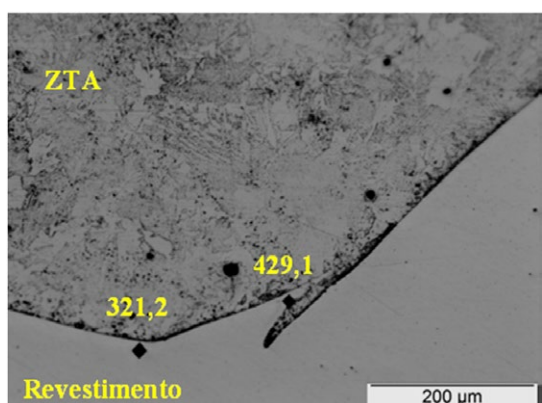
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 14 – Interface (linha de fusão) do revestimento RP1. (valores em HV).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 15 – Interface (linha de fusão) do revestimento RP2 (valores em HV).



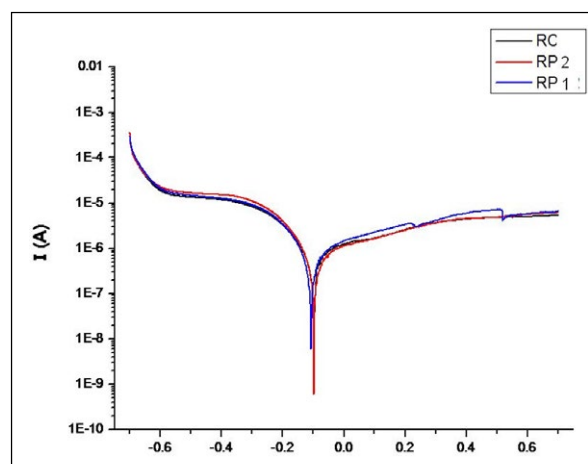
Fonte: Elaborada pelos autores.

Observando a qualidade dos revestimentos, constatou-se a ausência de falhas do tipo falta de preenchimento e/ou fusão, o que caracteriza, nesse

aspecto, um bom revestimento. Por outro lado, foi identificada a formação de ZPDs (zonas parcialmente diluídas) com diferentes morfologias, como “praias” (Figura 13) e “penínsulas” (Figuras 14 e 15).

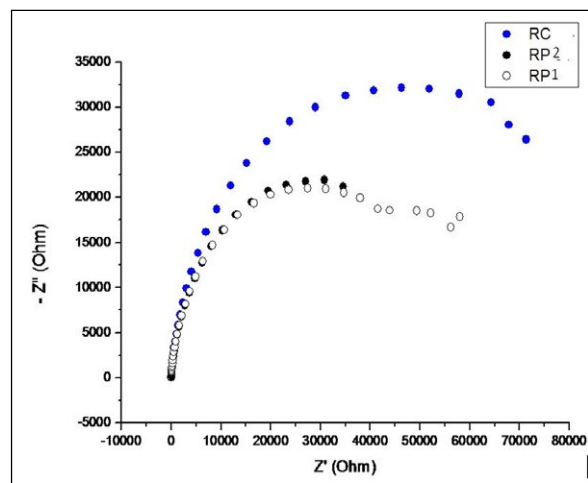
A Figura 16 mostra as curvas de polarização potenciodinâmica linear para os três revestimentos. Nela observa-se que o potencial de corrosão (variável que indica o início da corrosão) não foi alterado significativamente, o que indica que ambos os revestimentos têm a mesma característica ao iniciar o processo corrosivo.

Figura 16 – Curva de polarização dos três revestimentos soldados em substrato de aço API 5L Gr B.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 17 – Diagrama de impedância referente aos três revestimentos.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para confirmar os resultados obtidos com PPL, foram realizadas medidas de impedância eletroquímica

para avaliar a resistência de polarização (R_p) da liga Hastelloy C276. Os resultados são mostrados no diagrama da Figura 17.

Verificaram-se espessuras de ZPDs de até 63 μm para o revestimento com corrente convencional e de 69,24 μm para a corrente pulsada, estando esses resultados coerentes com os valores encontrados na literatura para os níveis de aportes térmicos empregados (SILVA *et al.*, 2010; SOUZA NETO, 2010). Foi constatado que ocorre uma maior quantidade e extensão de ZPDs com o aumento da energia de soldagem, como se observa nas Figuras de 13 a 15.

Na Figura 16 pode-se observar que o potencial de corrosão (E_{corr}), variável que indica o início da

corrosão, não variou com a mudança dos parâmetros de soldagem; sendo assim, os revestimentos apresentaram a mesma característica ao iniciar o processo corrosivo (SOUZA NETO, 2010).

Observa-se, na Figura 17, que o revestimento realizado com corrente convencional possui um valor de R_p maior do que os revestimentos soldados com corrente pulsada, confirmando-se, dessa forma, como a melhor condição para a resistência à corrosão da liga Hastelloy C276 até o momento. Tal fato se deve provavelmente ao baixo valor de I_M (corrente média), que proporcionou uma menor diluição e, conseqüentemente, o menor teor de Fe no revestimento (Tabela 4).

Tabela 4 – Resumo dos resultados dos testes de corrosão e teores de ferro.

AMOSTRAS	R_p (Ohm)	E_{CORR} (V)	Diluição (%)	% Fe	I (A)
RP1	$4,96 \times 10^4$	-0,110	$19,47 \pm 5,93$	20,83	$183,83 \pm 2,45$
RP2	$5,15 \times 10^4$	-0,099	$20,01 \pm 5,24$	24,83	$183,93 \pm 0,41$
RC	$7,98 \times 10^4$	-0,100	$13,03 \pm 3,10$	16,43	$165,69 \pm 7,21$

Fonte: Elaborada pelos autores.

4 Conclusões

- Os menores valores de diluição obtidos foram em torno de 13% ao utilizar-se corrente convencional;
- Os valores de dureza no revestimento e na ZTA foram todos inferiores a 250 HV;
- Foram identificadas zonas parcialmente diluídas (ZPD) ao longo da interface do revestimento, com valores de dureza acima de 400 HV, as quais se apresentaram em maior quantidade em revestimentos aplicados com maior energia de soldagem;
- Da avaliação dos E_{corr} , observaram-se resultados quase idênticos entre as três amostras, já que a maior diferença foi de 3,7%;
- As amostras soldadas com corrente pulsada (RP1 e RP2) não obtiveram variação significativa na resistência de polarização;
- Entre todas as amostras, a que teve melhor resultado em vários aspectos foi a obtida com corrente convencional, que apresentou o R_p maior em até 61%

em relação às demais. Apresentou também diluição e corrente média menores, aliadas a uma altura mínima superior e menor teor de Fe.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. *et al.* Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 390, n. 1-2, p. 88-93, Mar. 2005.
- ARAÚJO, F. S. *et al.* **Caracterização de soldagem dissimilar entre aço API 5L grau B e inconel 625 utilizada na indústria de petróleo e gás.** In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2010. v. 1. p. 1-8.
- BATISTA, V. R. *et al.* Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria e diluição de revestimentos de liga de níquel aplicados em aço API 5L Gr B. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos** (UFPG), v. 6, n. 3, p. 181-187, 2011.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10423:2003:**

Petroleum and natural gas industries – Drilling and production equipment – Wellhead and christmas tree equipment. Geneva, Switzerland: ISO, 2003.

LUNDIN, C. D. Dissimilar metal welds-transition joints literature review. **Welding Journal**, v. 61, n. 2, p. 58-63, 1982.

SANTOS NETO, N. F. **Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento**. 2003. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVA, M. M.; OLIVEIRA, W. C.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A.; MOTTA, F. M. Caracterização de solda de revestimento de AWS 317L depositados por GMAW duplo arame em aços ASTM a 516 gr 60 para uso na indústria do petróleo. **Soldagem e Inspeção** (Impresso), v. 15, n. 3, p. 225-233, 2010.

SOUZA NETO, F. A. **Avaliação de revestimentos com ligas de níquel aplicados por soldagem em tubulações para o setor de petróleo e gás**. 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2010.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem**: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.