

EFEITO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS DE AÇO INOXIDÁVEIS APLICADOS PELOS PROCESSOS SAW E FCAW¹

Raphael Henrique Falcão de Melo²
Mariana Karla Gurjão Pontes³
Jailson Alves da Nóbrega²
Theophilo Moura Maciel²
Marco Antonio dos Santos²

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da variação dos parâmetros de soldagem sobre as características de cordões de solda de aço inoxidável depositados em chapas do aço A36 pelos processos SAW e FCAW. Para isto, utilizou-se a técnica do planejamento experimental fatorial em dois níveis, tendo como fatores de controle a tensão de referência, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem. Determinando-se a influência deste sobre os valores de diluição, microdureza e microestrutura em diferentes regiões dos cordões de solda. A diluição variou de 11,61% a 27,01% no processo SAW e de 9,23% a 14,28% no processo FCAW, enquanto que a microestrutura resultante apresentou uma matriz austenítica com ferrita rendilhada e ferrita AF para ambos os processos. Os valores médios de microdureza Vickers foram de 211,2 HV para o processo SAW e 191,6 HV para o FCAW.

Palavras-chave: Revestimentos; Aço inoxidável; Microestrutura; Processos SAW e FCAW.

EFFECT OF THE VARIATION OF WELDING PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF STAINLESS STEEL OVERLAYS APPLIED BY FCAW AND SAW PROCESS

Abstract

The aim of this study was to evaluate the influence of the variation of welding parameters on the characteristics of weld beads of stainless steel deposited on plates of A36 steel by SAW and FCAW processes. For this purpose, it was used the technique of design of experiments in two levels, with voltage, wire feed rate and travel speed as control factors. Being determined the influence of this on dilution, hardness and microstructure in different regions of the weld beads. The dilution ranged from 11.61% to 27.01% in the SAW process, and from 9.23% to 14.28% in the FCAW process, while the microstructure has an austenitic matrix with lacy ferrite and ferrite AF for both processes. The average values of hardness Vickers were of 211.2 HV for the SAW process and 191.6 HV for the FCAW process.

Key words: Weld overlays; Stainless steel; Microstructure; SAW and FCAW processes.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Depto. de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba, Brasil; raphael.engmec@gmail.com.

³ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, UFCG, Paraíba, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As pressões econômicas e o elevado custo do petróleo estão forçando cada vez mais as refinarias do mundo a utilizarem petróleo pesado nos seus processos. A vantagem neste caso está no preço de venda mais baixo (cerca de 80%), quando comparado ao petróleo dito leve.⁽¹⁾

No Brasil, a produção de petróleo com alto índice de acidez naftênica está relacionado diretamente com as bacias produtoras existentes, sendo o tipo de exploração mais difundido a *offshore* a alta profundidade, cujos óleos explorados devido a sua composição química e a presença de diversas impurezas apresentam um elevado grau de corrosividade.^(2,3) Este aspecto exige dos diversos materiais empregados nas unidades de processamento e transporte de petróleo uma elevada resistência a corrosão e em especial à corrosão naftênica.⁽²⁾

Há uma grande variedade de materiais que atendem a estes requisitos, como os aços inoxidáveis e as ligas de níquel. Devido às condições de trabalho estes materiais devem apresentar excelente resistência mecânica, à corrosão, ao desgaste e às altas temperaturas, ou mesmo em alguns casos devem possuir uma combinação de todos estes fatores.⁽⁴⁾

Entretanto, devido ao elevado custo de fabricação de equipamentos ou componentes maciços constituídos por estas ligas, uma alternativa razoável é a aplicação de revestimentos por soldagem, na qual se deposita uma camada de material mais nobre (aço inoxidável ou ligas de níquel) sobre um substrato menos nobre (aços C-Mn e aços de baixa liga). A aplicação destes revestimentos em equipamentos industriais pode ser feita na forma de “*clad*”, “*lining*” e “*overlay*”. Esta última é realizada através da deposição de uma camada de material com características desejáveis (resistência à corrosão ou ao desgaste, etc.) sobre um substrato. O uso do aço inoxidável austenítico AWS E 308-L é justificável no combate a corrosão naftênica, apesar de apresentar apenas 075% de molibdênio em sua composição química, desde que apresente um teor razoável de ferrita δ na microestrutura do metal de solda.⁽⁵⁾ As especificações a respeito do teor mínimo de molibdênio deve-se a influência de teores crescentes deste elemento favorecer o aparecimento da ferrita δ , no entanto ainda deve-se ponderar que teores crescentes de Mo também favorecem a precipitação de compostos intermetálicos, principalmente a fase σ , o que pode tornar seu uso impróprio em algumas aplicações.⁽⁶⁾

Dentre os vários processos de soldagem utilizados para a aplicação de revestimentos podemos destacar o processo de soldagem ao arco submerso (SAW) e ao arame tubular (FCAW), este último enquadra-se como processo de soldagem moderno, pois utiliza arame fino e altíssimas densidades de corrente, levando a um aumento da produtividade.^(4,7)

Um fator importantíssimo e decisivo sobre a resistência à corrosão dos revestimentos aplicados por soldagem é o nível de diluição do substrato no metal de solda, uma vez que isto implica em uma menor probabilidade de precipitação de microestruturas frágeis e susceptíveis a corrosão ao longo de todo o volume do metal de solda. A relação entre o reforço e a largura (r/L) também é bastante importante, já que cordões mais largos proporcionam um melhor espalhamento e uniformidade do revestimento além de otimizar o processo produtivo, em que cordões mais largos revestem os tubos internamente de forma mais rápida.

Diante disso, o presente trabalho tem por objetivo verificar a influência de alguns parâmetros de soldagem sobre a diluição, microestrutura e microdureza de

revestimentos aplicados pelo processo SAW e FCAW, lançando mão da metodologia do planejamento experimental fatorial e análise morfológica da microestrutura do metal de solda.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Consumíveis

Neste trabalho foram utilizados como substrato chapas de aço ASTM A36 e como metal de adição o arame de aço inoxidável AWS E308-L com diâmetro de 1,2 mm. A Tabela 1 apresenta a composição química dos materiais empregados. Como elemento de proteção foi utilizado um fluxo neutro, básico e aglomerado, especial para soldagem de topo e soldagem de revestimento com arames e fitas de ligas de níquel e aço inoxidável.

Tabela 1. Composição química (% em peso) dos consumíveis empregados

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	P	S	Fe
E 308-L	0,03	19,5 - 22,0	9,0 - 11,0	0,75	1,0 - 2,5	0,30 - 0,65	0,75	-	-	Balanço
A 36	0,18-0,23	-	-	-	0,30-0,60	-	-	0,03 máx.	0,05 máx.	Balanço

2.2 Procedimento Experimental

As soldagens foram realizadas pelos processos FCAW e SAW. Utilizando-se uma fonte eletrônica de soldagem e sistema de aquisição de dados para controle dos parâmetros. O procedimento de soldagem foi executado sem restrição, na posição plana. Os parâmetros de soldagem variados nos experimentos foram a tensão (U) e as velocidades de deslocamento da tocha e de alimentação do arame (V_s e V_a) conforme apresentado na Tabela 2. Foram mantidos fixos: inclinação da tocha de soldagem ($\theta=15^\circ$ com a vertical), sentido de soldagem “empurrando”, modo de corrente com polaridade reversa CC+ e DBCP de 15 mm para os revestimentos aplicados pelo processo FCAW e de 20 mm para os revestimentos aplicados pelo processo SAW. Utilizou-se também uma sobreposição de $L/3$ em relação à largura do primeiro cordão (Figura 1), procurando sempre manter a temperatura de interpasso menor ou igual a 100°C .

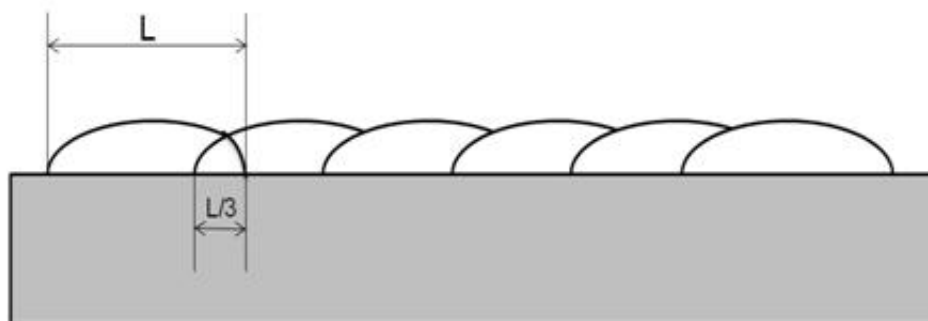


Figura 1. Ilustração da sobreposição entre os cordões.

Tabela 2. Níveis reais e codificados dos fatores em estudo para os processos FCAW e SAW

		Níveis		
		-1	0	+1
SAW	V _a (m/min)	6,0	6,5	7,0
	V _s (cm/min)	20,0	23,0	26,0
	U (volts)	30,0	35,0	40,0
FCAW	V _a (m/min)	8,0	8,5	9,0
	V _s (cm/min)	15,0	20,0	25,0
	U (volts)	25,0	27,5	30,0

Para avaliação da diluição (D%) foram retiradas 3 amostras da seção transversal de cada chapa revestida, a fim de obter-se valores médios e seus respectivos desvios para a diluição D(%), calculada conforme ilustrado na Figura 2.

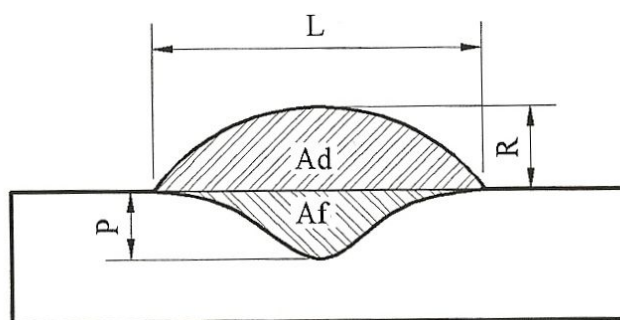


Figura 2. Representação esquemática das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões/revestimentos soldados.⁽⁴⁾

Onde a diluição é dada pela Equação 1.

$$D(\%) = \frac{A_f}{(A_d + A_f)} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Para A_d = Área depositada do cordão e A_f = Área fundida do metal de base.

Para avaliação da microdureza e microestrutura foi retirado um espécime da região central de cada revestimento, com aproximadamente 10 mm de largura. As amostras, depois de cortadas, foram lixadas (da granulação 200 até a granulação 1.200), polidas com alumina de granulometria 4 (3 μ m), 3 (1 μ m) e 2 (0,5 μ m) e, por fim, foram atacadas quimicamente com água régia fluorada (HF 48%:15%, HCl 45%, HNO₃ 15% e H₂O 25%), a fim de revelar a microestrutura do metal de solda (MS) e da zona termicamente afetada (ZTA). Os ensaios de microdureza foram executados aplicando-se uma carga de 100 gramasforça (gf) – por 15 segundos – com espaçamento entre as impressões de 200 μ m no MS, ZTA e MB. Em cada espécime foram realizadas medidas de microdureza Vickers (HV) ao longo de três linhas (Figura 3), para tanto foi utilizado um microdurômetro digital FM-700 da Future Tech. Esta metodologia foi empregada a fim de se conhecer o gradiente de dureza ao longo do revestimento (MS) e do substrato (ZTA e MB). Para o registro metalográfico utilizou-se um microscópio óptico Olympus BX 51M, todas as imagens foram registradas no campo claro.

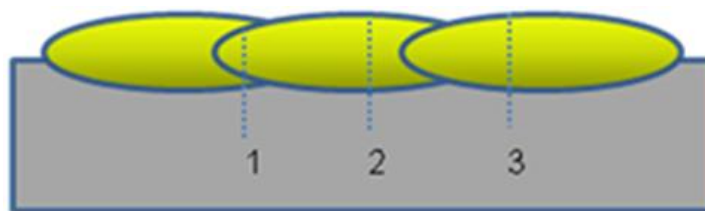


Figura 3. Disposição das endentações de microdureza.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os valores de diluição global (D) do revestimento e a relação entre o reforço e a largura (r/L) para um único cordão, variando a tensão (U), a velocidade de alimentação do arame (V_a) e a velocidade de soldagem (V_s). A partir destes dados é possível fazer uma análise estatística baseada no planejamento experimental fatorial e determinar os melhores parâmetros para aplicação de revestimentos metálicos tendo como critério de qualidade uma baixa diluição e baixo valor da razão r/L .

Tabela 3. Influência dos parâmetros de soldagem sobre a diluição e a relação r/L

		U (V)	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	H (kJ/cm)	D(%)		r/L	
CP							μ	σ	μ
FCAW	1	25	8	15	19,65	9,23	1,66	0,24	
	2	30	8	15	26,19	12,56	1,11	0,25	
	3	25	9	15	21,20	10,13	0,18	0,23	
	4	30	9	15	28,19	14,28	1,51	0,22	
	5	25	8	25	10,97	10,45	0,36	0,31	
	6	30	8	25	14,51	12,86	1,39	0,28	
	7	25	9	25	11,82	9,96	1,50	0,32	
	8	30	9	25	15,99	13,92	1,96	0,22	
	9	27,5	8,5	20	16,94	12,70	0,36	0,25	
	10	27,5	8,5	20	17,52	10,62	2,22	0,28	
	11	27,5	8,5	20	17,44	11,80	1,30	0,28	
SAW	1	30	6	20	12,25	11,61	2,04	0,41	
	2	40	6	20	16,94	22,14	2,56	0,31	
	3	30	7	20	13,62	11,27	0,78	0,34	
	4	40	7	20	19,12	20,28	1,07	0,33	
	5	30	6	26	9,52	19,15	2,28	0,33	
	6	40	6	26	13,01	27,01	1,65	0,29	
	7	30	7	26	10,28	15,65	0,63	0,33	
	8	40	7	26	14,41	24,95	1,83	0,28	
	9	35	6,5	23	13,13	17,85	2,35	0,28	
	10	35	6,5	23	13,25	14,22	1,64	0,35	
	11	35	6,5	23	13,10	20,21	4,38	0,32	

Para o processo FCAW a diluição (D) variou de 9,23% a 14,28 %, enquanto que para o processo SAW a diluição variou de 11,07% a 27,01 %. Valores na faixa de 10% a 15% são considerados ideais para revestimentos metálicos aplicados por

soldagem para aplicações como revestimentos duros e revestimentos resistentes à corrosão.⁽⁷⁾ No entanto quanto mais baixo este valor maior a garantia de maior resistência à corrosão. Por outro lado, a Petrobras, adota para vasos de pressão com revestimento interno valores na faixa de 10%.⁽⁸⁾ O reforço variou de 3,3 mm a 4,3 mm. Em tubulações do setor de petróleo e gás o valor líquido mínimo exigido para reforços de revestimentos metálicos é de 3 mm, daí a necessidade de obter-se um reforço bruto de aproximadamente 5 mm, para posterior usinagem.⁽⁸⁾ A relação r/L, para um único cordão, deve ser sempre inferior a 0,3, condição esta imposta como critério de qualidade.⁽⁹⁾ Baixos valores de r/L implicam em maior molhabilidade do cordão de solda (cordões mais largos) aumentando a eficiência do processo produtivo de revestimento de tubos. Nos revestimentos aplicados pelo processo FCAW a relação r/L variou de 0,22 a 0,31, e para os revestimentos aplicados pelo processo SAW variou de 0,28 a 0,41.

A Figura 4 apresenta a relação entre a diluição (D) e a relação entre o reforço e largura (r/L). Observa-se que menores valores de diluição resultam em maiores valores da relação r/L.⁽¹⁰⁾ No entanto pode-se notar que a rotação dos fatores de controle através da técnica de planejamento experimental fatorial nos permite obter valores otimizados das variáveis respostas, como aqueles dentro da elipse na Figura 3a. Logo um modelo corrigido foi gerado levando em conta este fenômeno.

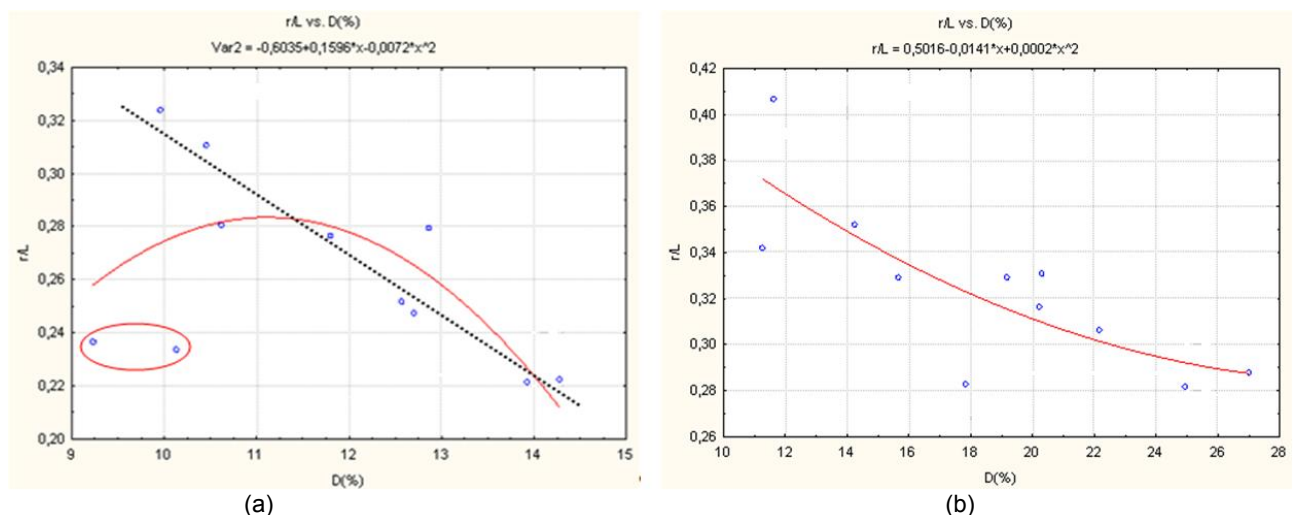


Figura 4. Relação entre r/L e D(%) para os processos FCAW (a) e SAW (b).

Uma combinação ideal entre estas duas variáveis resposta é bastante difícil de obter, uma vez que menores valores de diluição são conseguidos com menores valores de corrente que conduzem a maiores valores de r/L, quando da manipulação errônea dos parâmetros de soldagem, podendo ser otimizado através de técnicas como planejamento experimental fatorial e o método Taguchi.

Com os resultados da Tabela 3, foi realizada uma análise estatística de variância e com isso foi calculado o nível de significância “ α ” dos fatores de controle sobre a diluição (D). Níveis de significância menores que 0,05 indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 95% em se admitir que este fator de controle esteja influenciando nas variáveis de resposta analisadas. Entretanto optou-se por não ignorar alguns dos efeitos não “estatisticamente significativos”, pelo fato de estarem próximos aos estatisticamente significativos ou manterem influência física sobre o fenômeno que também podem ser considerados importantes. O que é bastante aceitável. Na seleção de variáveis é, provavelmente, melhor aceitar o valor de $\alpha > 0,1$ do que deixar algum fator

importante fora.⁽¹¹⁾ Segundo este autor⁽¹¹⁾ o julgamento prático do pesquisador deve ser o árbitro final. O mesmo ainda afirma que devemos utilizar o bom senso na interpretação das análises estatísticas. Os valores sublinhados e em negrito na Tabela 4 representam os fatores estatisticamente significativos, bem como aqueles que também foram considerados estatisticamente significativos por manterem influência física estreita sobre o fenômeno.

Tabela 4. Nível de significância dos fatores de controle sobre diluição de ambos os processos

		D (%)		D (%)	
FCAW	Média	0,000023		Média	0,000014
	U (V)	0,010469		U (V)	0,005946
	Va (m/min)	0,277499		Va (m/min)	0,322386
	Vs (cm/min)	0,708844		Vs (cm/min)	0,035543
	U*Va	0,397979	SAW	U*Va	0,992597
	U*Vs	0,676474		U*Vs	0,746798
	Va*Vs	0,457538		Va*Vs	0,650816
	U*Va*Vs	0,781780		U*Va*Vs	0,689162
	R ²	0,924870		R ²	0,909110
	Adj	0,749570		Adj	0,772770
MS Residual	0,726210	MS Residual	5,915530		

*U*Va; U*Vs; Va*Vs; U*Va*Vs = representam interações entre os parâmetros.*

Os modelos matemáticos empíricos, codificados, com os seus respectivos parâmetros estatísticos, estão apresentados nas Equações 5 e 6 para os processos SAW e FCAW respectivamente, onde foram considerados somente os valores estatisticamente significativos.

$$D(\%) = 11,683 + 1,731 * U + 0,399 * V_a \quad (5)$$

$$D(\%) = 18,576 + 4,588 * U - 0,97 * V_a + 2,68 * V_s \quad (6)$$

Na Tabela 5 estão ilustrados os resultados das análises de variância para todas as respostas, mostrando através dos valores de $F_{\text{Calculado}}$ que todos os modelos foram estatisticamente significativos, pois $F_{\text{Calculado}} > F_{\text{Tabelado}}$.

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para a resposta D

Fontes de Variação		Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Fcalc
		D	D	D	D
FCAW	Regressão	25,25	2	12,62	26,9
	Resíduo	3,75	8	0,46	4
	Total	29,00	10	-	-
SAW	Regressão	233,46	3	77,82	23,0
	Resíduo	23,66	7	3,38	2
	Total	257,12	10	81,20	-

$F_{2,8}=4,46; F_{3,7}=4,35; F_{4,6}=4,53.$ ⁽¹¹⁾

3.1 Influência dos Parâmetros de Soldagem Sobre a Diluição

A Tabela 4 informa que a diluição foi significativamente influenciada pela tensão (U) e velocidade de alimentação (V_a) quando do processo FCAW e também foi significativamente influenciada por estas variáveis acrescido da influência da velocidade de soldagem quando da soldagem pelo processo SAW. As Figuras 5 e 6 apresentam a influência dos fatores de controle sobre a diluição.

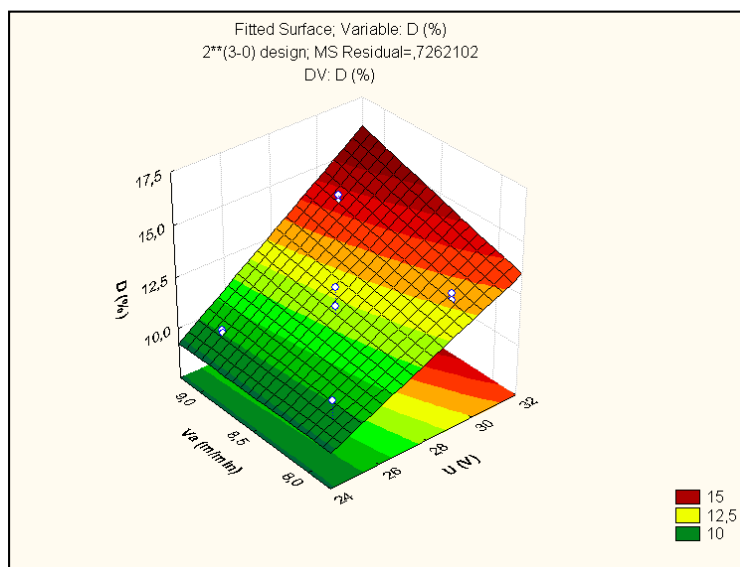


Figura 5. Influência da tensão (U) e velocidade de alimentação (V_a) na diluição do processo FCAW.

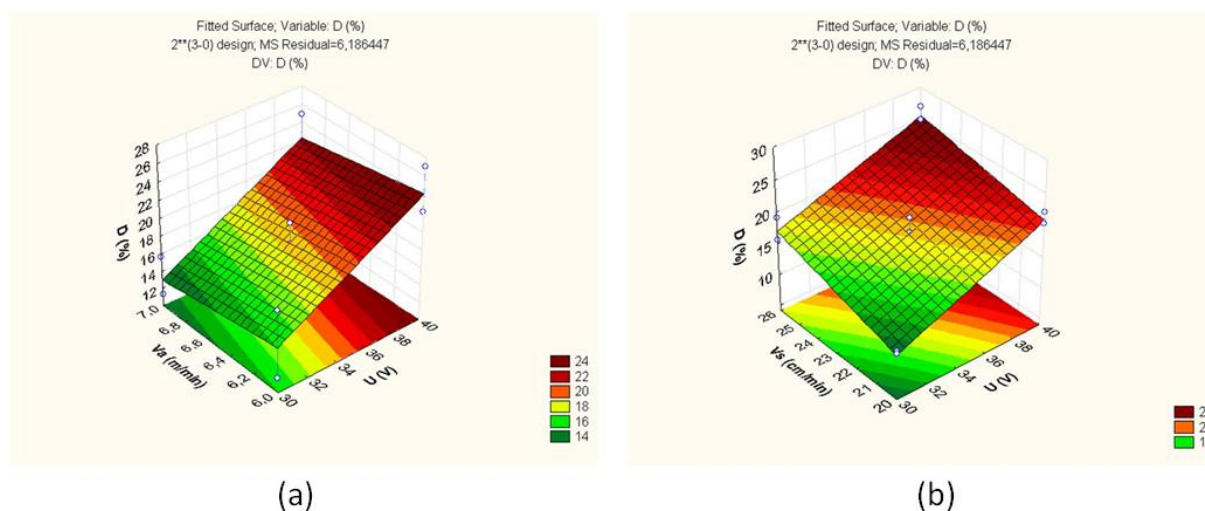


Figura 6. Influência da Tensão e velocidade de alimentação (a) e tensão e velocidade de soldagem (b) na diluição do processo SAW.

Como pode ser visto nas Figuras 5 e 6, com o aumento da tensão há um aumento significativo da diluição. Como o aumento da tensão resulta em cordões de solda mais largos e com pequeno reforço, não sendo, portanto capaz de atuar como barreira para o arco elétrico, então, não evitando que a força deste aja diretamente sobre a poça de fusão, ocasionando assim um aumento significativo da área fundida do metal de base, enquanto que a área depositada do cordão não é afetada significativamente, resultando em maiores valores de diluição.

Para o processo FCAW Maiores valores da velocidade de alimentação por outro lado proporcionaram maiores valores de diluição. Tal fato esta alinhado com a

literatura que confirma que esta variável é o parâmetro de maior significância no aumento da penetração.⁽¹²⁾ Já para o processo SAW Maiores valores de velocidade de alimentação (V_a) levam a menores valores de diluição, já que aumentando a velocidade de alimentação há um aumento da quantidade de material depositado que atua como barreira e amortece a força do arco sobre a poça de fusão.

A Figura 6 indica que maiores valores de diluição são obtidos com maiores velocidades de soldagem. Isto se deve ao fato que maiores velocidades de soldagem promovem uma redução maior na área de metal depositado do que na área fundida, ocasionando assim maiores valores de diluição.^(4,13)

3.2 Microestrutura e Microdureza do Processo SAW

Foi levantado o perfil de microdureza nos revestimentos ao longo da seção transversal, compreendendo as zonas de metal de solda (MS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB). As Figuras 7a e 7b apresentam o perfil de microdureza do revestimento SAW – 9 (Figura 7a) e o *box-plot* da variação da microdureza no MS (Figura 7b).

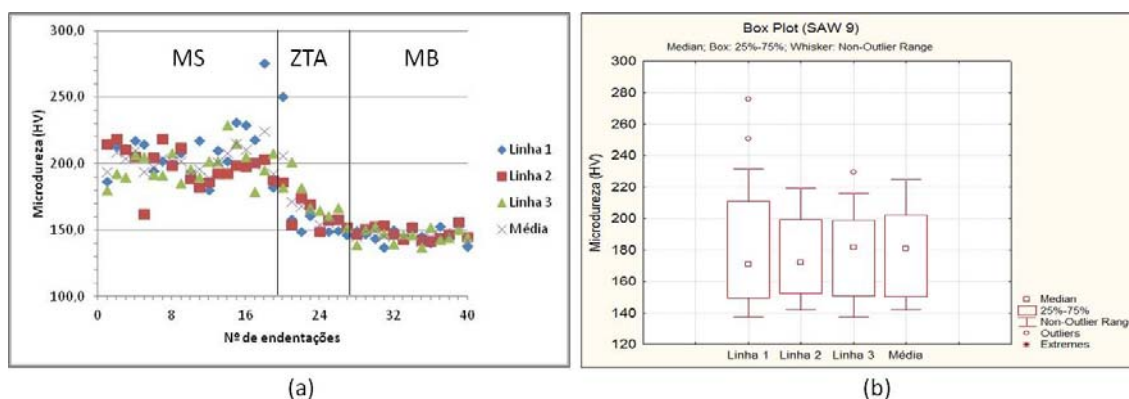


Figura 7. (a) Perfil de microdureza em HV revestimento SAW-9; (b) variação da microdureza no MS.

O revestimento SAW – 9 foi aplicado com energia de soldagem 13,13 kJ/cm. A partir da Figura 7a nota-se que a dureza no metal de solda foi superior àquela observada na ZTA e metal de base. Ainda pode-se notar que a extensão média da ZTA foi de aproximadamente 1,8 mm; a extensão da ZTA está ligada ao tamanho dos grãos grosseiros, logo ZTA's mais extensas apresentam menor tenacidade ao impacto na interface MS/MB.

Aumentos de 0,5 mm na extensão da ZTA resultam em uma redução média de 390 kJ/m² na energia específica Charpy, quando do entalhe localizado na interface metal de solda/ZTA de revestimentos de aços inoxidáveis à temperatura ambiente.⁽¹⁴⁾

Na Figura 7b observa-se que para a primeira linha de microdureza há dois pontos que diferenciaram bastante do comportamento geral do metal de solda. Unindo as informações da Figura 7, podemos afirmar que esta discrepância se deve ao fato das zonas parcialmente diluídas, que ocorrem junto à linha de fusão. A Figura 8 apresenta uma micrografia do revestimento SAW – 9.



Figura 8. Micrografia apresentando o metal de solda, zona parcialmente diluída (ZPD) e a ZTA do revestimento SAW – 9. Ampliação: 100x.

As zonas parcialmente diluídas apresentam composição de baixa liga, sendo uma região de mistura dos componentes do metal de solda e metal de base. O carbono migra do metal de base em direção à poça de fusão fazendo com que haja precipitação de carbonetos de cromo de elevada dureza, este fenômeno é observado apenas na região da linha de fusão, uma provável ocorrência de carbonetos na Figura 9 pode ser observada na forma de partículas circulares dispersas na matriz.

As micrografias das Figuras 9a e 9b e 9c apresentaram uma microestrutura basicamente austenítica, onde se pode observar a formação de uma microestrutura típica de solda de aço inoxidável com modo de solidificação FA na zona fundida rica em ferrita δ com morfologia em espinha e laminar.

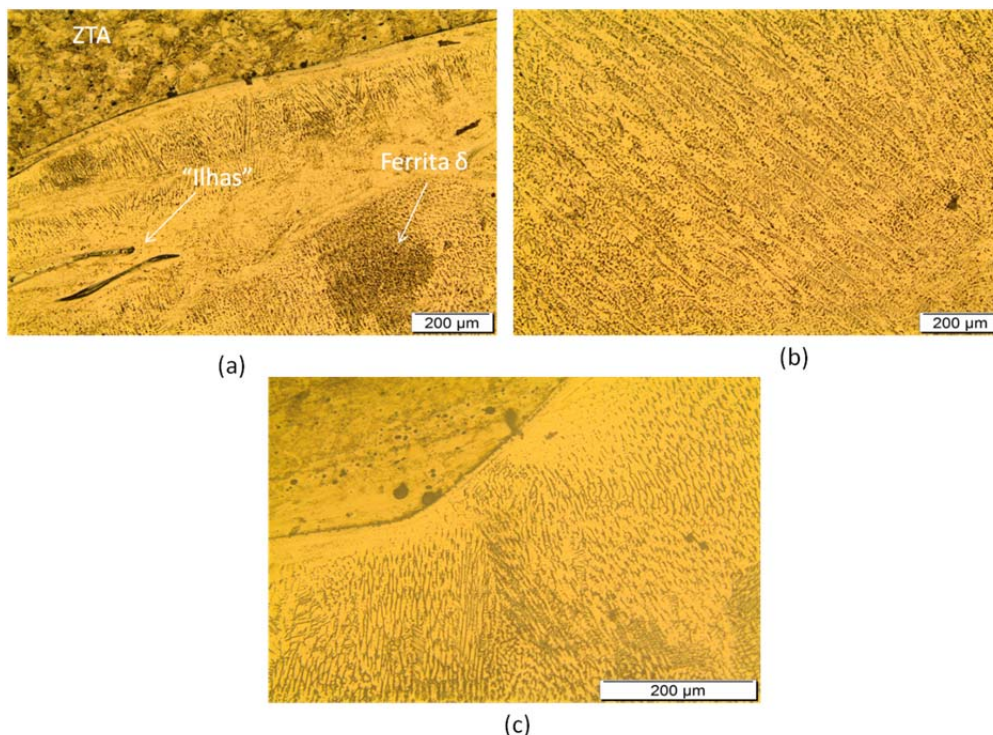


Figura 9. Interface MS/ZTA e região rica em ferrita delta, apresentando ZPD na morfologia de “ilhas” (a); Matriz austenítica com ferrita eutética e em espinha (b); Mudança na morfologia da ferrita eutética para ferrita δ (c). Ampliação: 100x (a) e (b). Ampliação: 200x.

A Figura 10a apresenta o perfil de microdureza no revestimento SAW – 3, que teve energia de soldagem de 13,62 kJ/cm. De maneira qualitativa não houve mudança no perfil de microdureza do revestimento SAW – 3 para o SAW – 9. De forma análoga ao revestimento SAW – 9 nota-se que junto à linha de fusão ocorreram valores elevados de dureza, caracterizando novamente o aparecimento de zonas parcialmente diluídas. O tamanho médio da ZTA para esta condição de soldagem foi de aproximadamente 1,4 mm.

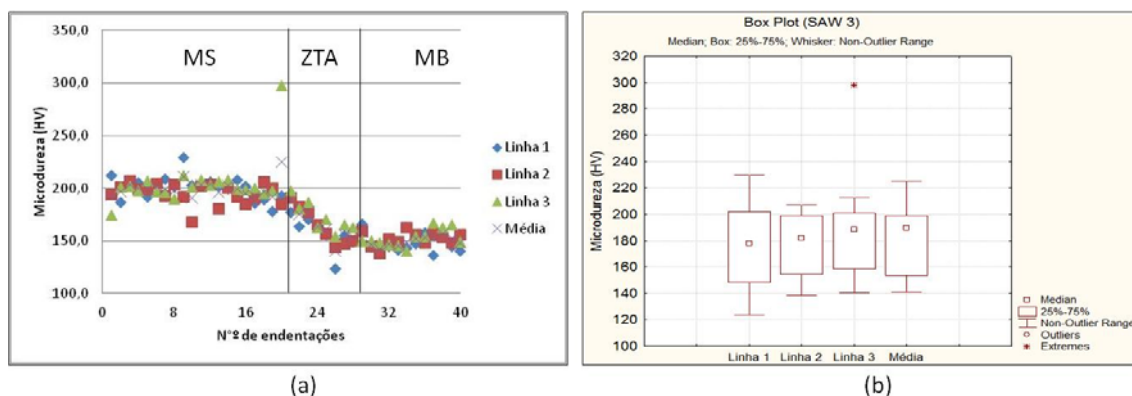


Figura 10. Perfil de microdureza em HV revestimento SAW-3 (a); variação da microdureza no MS (b).

A Figura 11 apresenta as zonas parcialmente diluídas na morfologia de “praia” (Figura 11a) e “ilha” e “península” (Figura 11b). A Figura 11a apresenta a possível precipitação de carbonetos, devido a sua morfologia. Carbonetos de cromo empobrecem localizadamente o metal de solda em cromo, deixando-o susceptível a corrosão por pite.

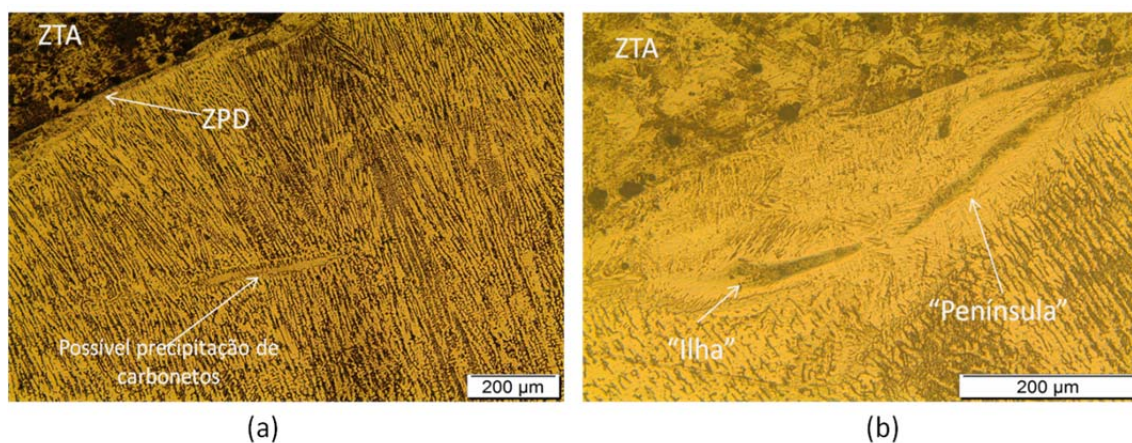


Figura 11. Micrografia apresentando o metal de solda do revestimento SAW – 3. Possível precipitação de carbonetos (a); Morfologia de “ilha” e “península” (b). Ampliação: 100x (a); Ampliação: 200x (b).

O perfil de microdureza do revestimento SAW – 1 está apresentado nas Figuras 12a e 12b, este revestimento foi aplicado com energia de soldagem de 12,25 kJ/cm. Ele foi o único a apresentar variações severas nos valores de dureza no metal de solda, isto pode ter sido causado por altas taxas de resfriamento, uma vez que menores energias de soldagem resultam em taxas maiores de resfriamento, fazendo com que o metal de solda “passasse” muito rápido pelo campo austenítico do diagrama Fe-Cr, precipitando estruturas com morfologia do tipo AF, que

apresentam valores de dureza maiores que a morfologia do tipo FA, que é formada por austenita + ferrita em espinha ou vermicular, sendo esta ultima a morfologia mais comumente observada em soldas de aços inoxidáveis austeníticos.⁽¹⁵⁾

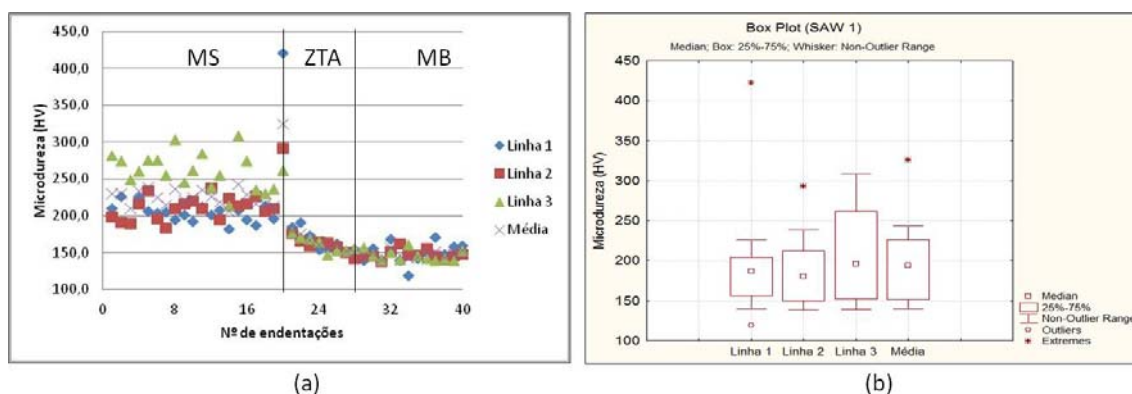


Figura 12. Perfil de microdureza em HV no revestimento SAW – 1.

A partir da Figura 12a notamos que a ZTA se estendeu por aproximadamente 2 mm, sendo a maior extensão média entre os revestimentos do processo SAW. Neste trabalho, nos revestimentos aplicados ao arco submerso, a ZTA tende a ser mais extensa quanto menor for a energia de soldagem.

Os valores mais discrepantes de microdureza foram observados na terceira linha de endentações. O calor imposto aos dois cordões anteriores pode ter revenido a microestrutura do metal de solda de tal sorte que os valores de dureza foram menores que o observado no terceiro cordão (último cordão do revestimento). Também foram observados elevados valores de dureza junto à linha de fusão, de forma semelhante aos demais revestimentos. A Figura 13 indica a ocorrência de ZPD junto à linha de fusão na morfologia de “praias”.

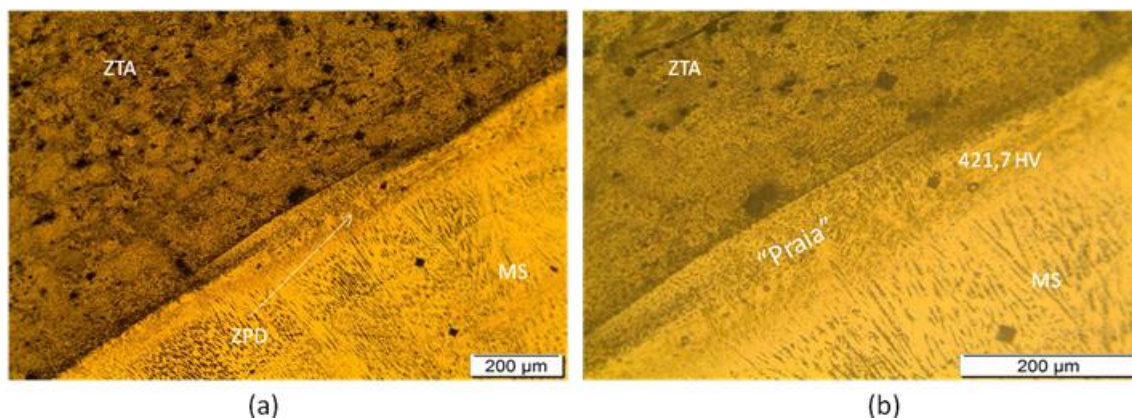


Figura 13. Micrografias do revestimento SAW – 1. Interface metal de solda/substrato (a); Zona parcialmente diluída com dureza de 421,7 HV (b). Ampliação: 100x (a); Ampliação: 200x (b).

A Tabela 6 apresenta os valores médios de dureza para o metal de solda. Não houve grandes variações de dureza nos revestimentos soldados pelo processo SAW, exceto pelo revestimento SAW – 1, que apresentou um aumento na dureza de aproximadamente 30 HV. Este aumento pode ser atribuído a mudanças na microestrutura da zona fundida.

Tabela 6. Durezas médias no MS dos revestimentos aplicados pelo processo SAW

	SAW – 1		SAW – 3		SAW – 9	
	(H= 12,25 kJ/cm)		(H= 13,62 kJ/cm)		(H= 13,13 kJ/cm)	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Microdureza Vickers (HV).	230,3	24,6	200,3	7,7	202,9	8,7

3.3 Microestrutura e Microdureza do Processo FCAW

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam os perfis de microdureza (a) e o *box-plot* da variação da microdureza no MS (b) dos 3 revestimentos podendo se visualizar também a extensão da zona termicamente afetada (ZTA) do substrato.

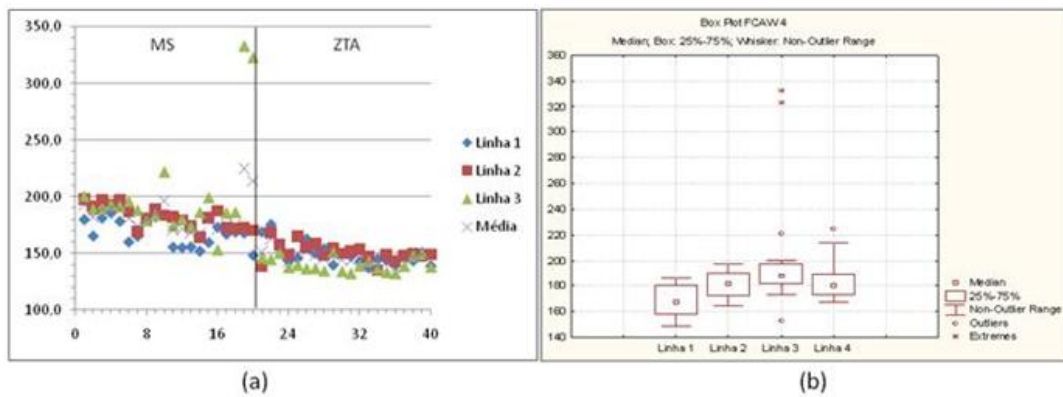


Figura 14. Perfil de microdureza em HV do revestimento FCAW – 4 (a); variação da microdureza no MS (b).

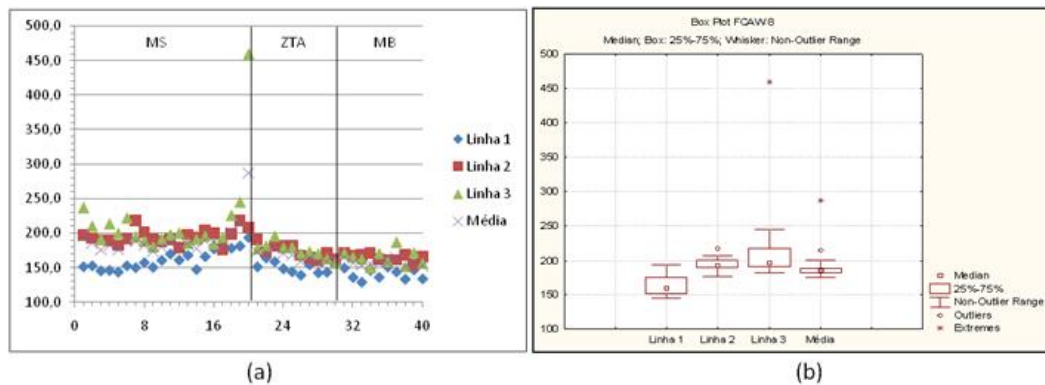


Figura 15. Perfil de microdureza em HV do revestimento FCAW – 8 (a); variação da microdureza no MS (b).

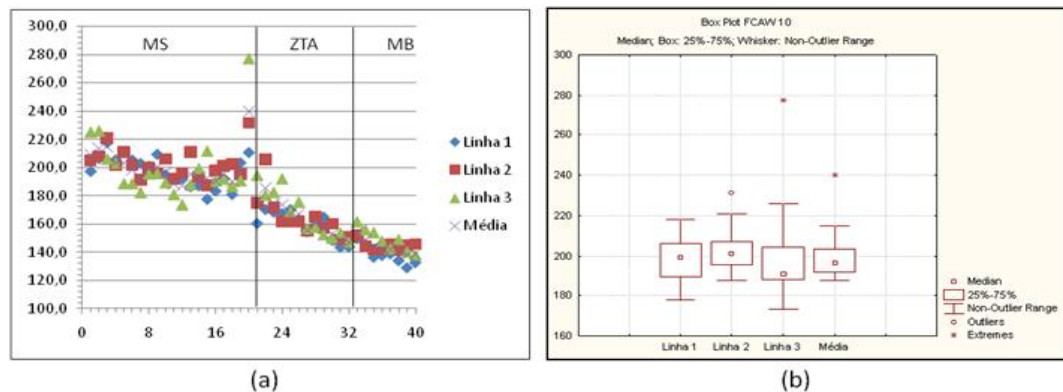


Figura 16. Perfil de microdureza em HV para o revestimento FCAW – 10 (a); variação da microdureza no MS (b).

O revestimento FCAW – 4 aplicado com energia de soldagem de 28,19 kJ/cm apresentou uma dureza média no revestimento de 183,8 HV, um pouco inferior às durezas dos outros dois revestimentos aplicados com menores energias de soldagem. Pode-se perceber também que a extensão da ZTA, maior que 4mm foi superior à dos outros revestimentos. A partir da Figura 14a podemos notar que este apresentou uma ZTA maior que 4 mm, devido a elevada energia de soldagem com que foi aplicado. A partir das Figuras 14a e 14b nota-se que a dureza média no metal de solda foi de 183,8 HV, mantendo a configuração de que a dureza no MS é maior que na ZTA e MB. O *box-plot* deixa bastante nítida a influência sobre a dureza dos cordões subseqüentes, pois verifica-se um aumento do valor da dureza no último cordão do revestimento. Esta é uma condição crítica em que os projetistas da área de soldagem devem atentar para a execução de um passe de soldagem autógena a fim de reaver a microestrutura do último cordão de solda. Ainda no *box-plot* observa-se alguns valores de microdureza discrepantes em relação ao comportamento geral do revestimento na linha 3, estes pontos ocorreram junto a linha de fusão dos cordões, caracterizando a presença de zonas parcialmente diluídas (ZPD's). As ZPD's apresentam composição química de aços baixa liga, sendo uma região de mistura dos componentes do revestimento e do substrato. Devido a incorporação de elementos de liga como o cromo e o níquel, além do próprio carbono, para o metal de base líquido, que não se mistura completamente ao metal de adição ao longo da linha de fusão, aumentando significativamente a temperabilidade desta região resultando em microestrutura martensítica e/ou bainítica. O carbono migra do metal de base em direção à poça de fusão fazendo com que haja precipitação de carbeto de cromo de elevada dureza.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾

O perfil de microdureza do revestimento FCAW – 8, aplicado com aporte térmico de 15,99 kJ/cm está apresentado na Figura 15a o qual teve um valor médio de dureza de 191,1 HV. Verifica-se que a ZTA neste revestimento se estendeu por aproximadamente 2 mm, um valor correspondente a 50% do observado no revestimento FCAW – 4. Esta diferença significativa na extensão da ZTA confirma a importância do valor da energia utilizada. O comportamento do perfil de microdureza deste revestimento é bem próximo do FCAW – 4. Pode-se notar que as linhas 1 e 2 apresentaram durezas menores que a terceira linha, pelos motivos já expostos anteriormente. Novamente na linha 3 observa-se a presença de valores elevados de microdureza, da ordem de 450 HV, caracterizando a presença de zonas parcialmente diluídas.

O perfil de microdureza do revestimento FCAW – 10 aplicado com energia de 17,52 kJ/cm está apresentado nas Figuras 16a apresentando a mesma configuração dos outros dois com os valores de dureza decrescendo do revestimento para o substrato. A ZTA deste revestimento se estendeu ao longo de 2,4 mm, sendo ligeiramente maior que a observada no revestimento FCAW – 8 e bastante menor que a do FCAW – 10, confirmando a influência da energia de soldagem com relação à esta variável. Os valores mais discrepantes de microdureza foram observados na 3ª linha de endentações. O calor imposto aos dois cordões anteriores pode ter homogeneizado a microestrutura e gerado um perfil mais constante de microdureza do que aquele observado na 3ª linha (último cordão do revestimento). Também foram observados elevados valores de dureza junto à linha de fusão, de forma semelhante aos demais revestimentos, indicando a presença de zonas parcialmente diluídas.

As Figuras 17 e 18 apresentam micrografias da microestrutura do MS dos revestimentos FCAW – 4 e FCAW – 10, respectivamente.

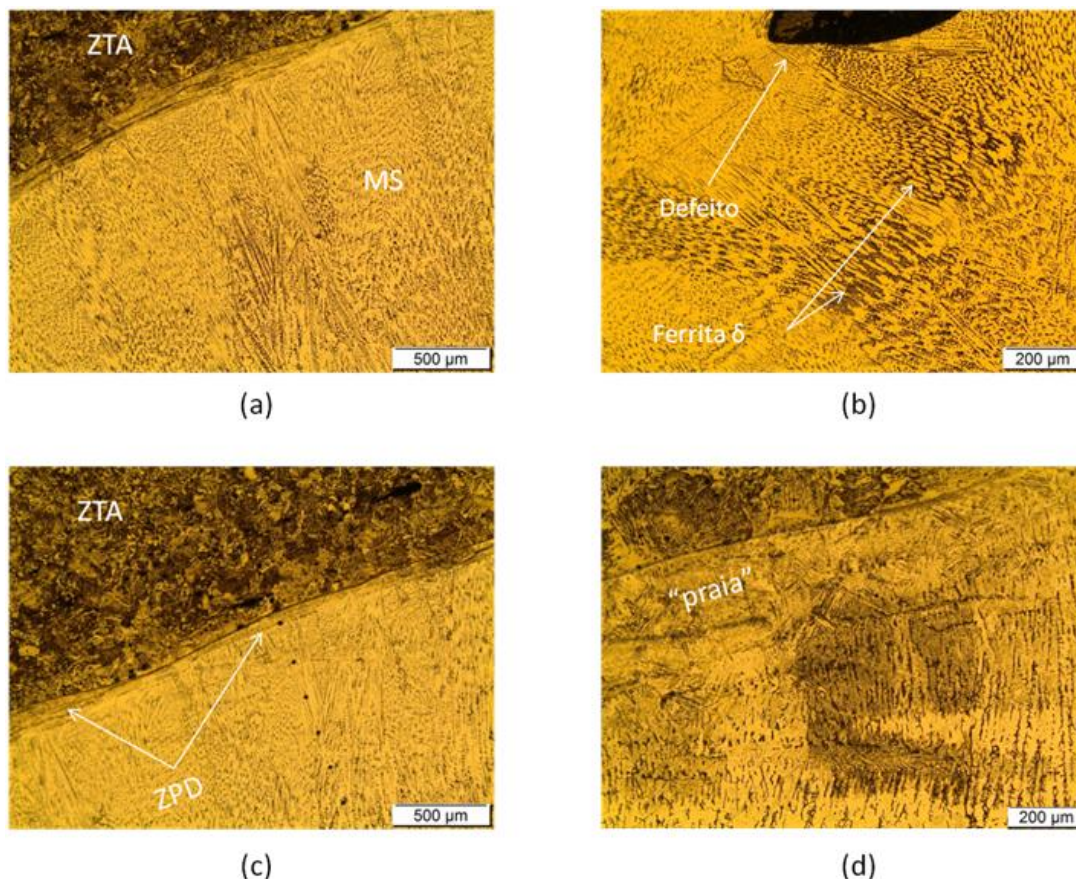


Figura 17. Metal de solda rico em ferrita δ (a); Presença de defeito de soldagem junto à linha de fusão do revestimento (b); Presença de zonas parcialmente diluídas (c) e “praia” com estrutura martensítica (d). Ampliação: 50x (a) e (c); 100 x (b) e (d).

Devido ao grande aporte térmico imposto durante a soldagem do revestimento FCAW – 4 o metal de solda resfriou lentamente, possibilitando a nucleação preferencial de ferrita δ , como é possível ver nas Figuras 17a e 17b, justificando assim os valores de dureza obtidos. O defeito de soldagem observado na Figura 17b foi originado devido a um acúmulo do fluxo que há no arame tubular quando da sobreposição dos cordões de solda. As Figuras 17c e 17d apresentam a presença de zonas parcialmente diluídas, justificando os resultados dos ensaios de microdureza.

Das Figuras 18a, 18c e 18d verifica-se a tendência a formação de ferrita eutética (AF). A Figura 18d em especial mostra a presença de austenita + ferrita eutética (AF) localizada nos contornos de dendritas, resultante da solidificação em austenita primária com formação de ferrita em reação eutética ao final da solidificação.⁽¹⁵⁾ As diferenças nas microestruturas são justificáveis devido aos diferentes parâmetros de soldagem utilizados em cada caso o que além de gerar diferentes taxas de solidificação proporciona diferentes valores de diluição que implica em variações na composição química dos revestimentos.⁽¹⁷⁾

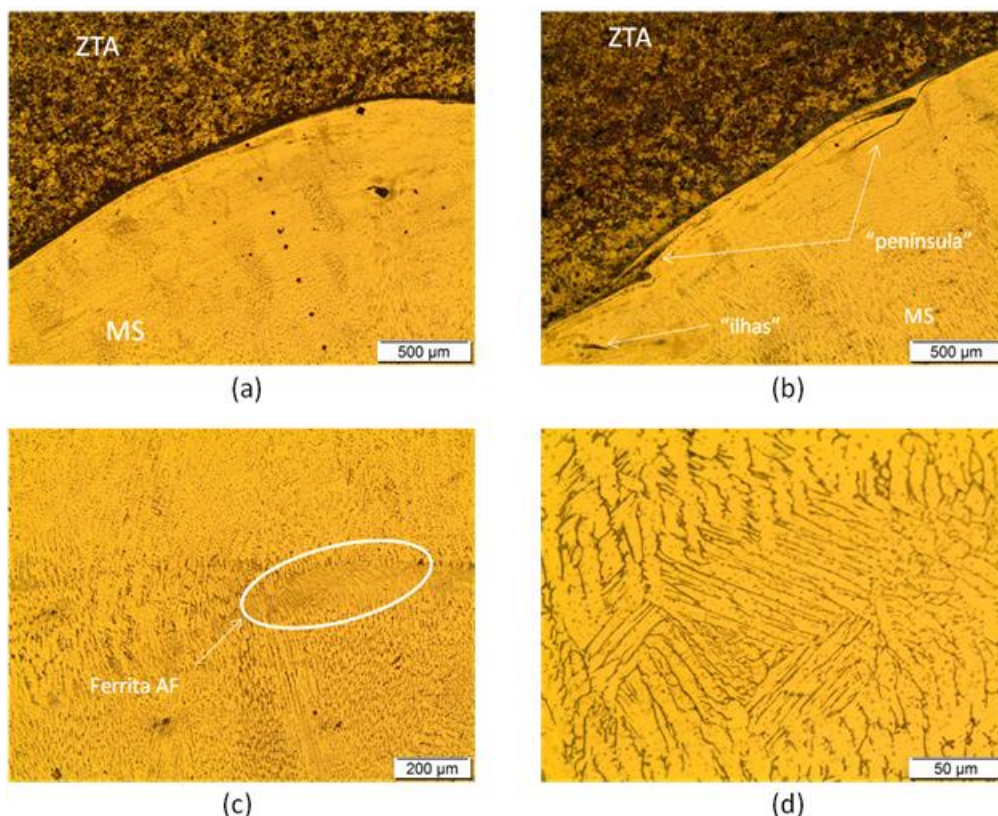


Figura 18. Micrografia do MS apresentando baixa tendência à formação de ferrita δ (a); Presença de ZPD's na morfologia de "ilhas" e "península" (b); Presença de ferrita AF no MS (c); Morfologia da ferrita FA (d). Ampliação: 50x (a) e (b); 100x (c) e 500x (d).

A Tabela 7 apresenta um resumo dos valores de dureza média para cada revestimento. Considerando-se os desvios padrão apresentados pode-se considerar que as variações aplicadas no aporte térmico não foram suficientes para influenciar significativamente os valores de dureza dos revestimentos. Além disso, todos ficaram abaixo do valor máximo estipulado pela NACE MR - 0175 que é de 250 HV⁽¹⁶⁾ para revestimentos contra corrosão.

Tabela 7. Durezas médias no MS dos revestimentos aplicados pelo processo FCAW

	FCAW – 4 (H=28,19 kJ/cm)		FCAW – 8 (H=15,99 kJ/cm)		FCAW – 10 (H=17,52 kJ/cm)	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Microdureza Vickers.	183,8	14,85	191,2	24,52	199,9	12,20

4 CONCLUSÕES

- Para o processo FCAW a diluição foi de cerca de 10%, enquanto que para o processo SAW esta ficou entorno de 20% indicando a adequação dos parâmetros de soldagem utilizados e que estes foram estatisticamente significativos, como foi mostrado pelo planejamento experimental;
- Para os revestimentos aplicados pelo processo FCAW a condição ótima de aplicação de revestimentos, ou seja, baixa diluição e baixo valor da razão r/L, foi para a condição CP 3 com tensão de 25 V, velocidade de alimentação de 9 m/min e velocidade de soldagem de 15 cm/min. Para os revestimentos aplicados pelo processo SAW estas condições foram atendidas pelo

revestimento CP 3 com tensão de 30 V, velocidade de alimentação de 7 m/min e velocidade de soldagem de 20 cm/min;

- De uma forma geral a microestrutura observada no metal de solda foi austenítica com ferrita δ em espinha e laminar para ambos os processos, sendo influenciada pela energia de soldagem empregada;
- O processo FCAW apresentou uma ligeira redução nos valores de dureza do metal de solda quando comparado aos valores do processo SAW. Para a menor energia de soldagem do processo FCAW o valor de dureza foi de 199 HV, contra 230 HV do SAW, já para as maiores energias de soldagem o valor de dureza no metal de solda para o processo FCAW foi de 183 HV contra 202 HV do SAW;
- O processo SAW apresentou-se isento de defeitos de soldagem, já o processo FCAW apresentou acúmulo do fluxo característico do arame tubular nas zonas de sobreposição do cordão.

Agradecimentos

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e à Finep e à Petrobrás pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 CAPRA, A. R. Desenvolvimento de Intermetálicos de Fe/Al através de Aspersão Térmica e Tratamento Posterior, 2005. Dissertação M. Sc. (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- 2 DOS SANTOS, I. S. Corrosão por Ácidos Naftênicos em Unidades de Destilação Atmosférica e a Vácuo. 1992. Comunicação: Documento Interno REPLAN/SEIEQ/PETROBRAS, p 18.
- 3 ABDALLA, F. E. S. Aplicação das variantes MAG pulsado e MAG térmico com arame maciço em soldas de revestimento do tipo “lining”, 2005. Dissertação. M.Sc. (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- 4 PASSOS, D. O., OTUBO, J. A influência da ferrita delta em aços inoxidáveis austeníticos forjados. Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, v. 63, nº1, p. 057-063, 2010.
- 5 ZAPELINI, A. *Corrosão naftênica: interação entre ácidos naftênicos e compostos sulfurados contidos nos petróleos*. ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1996. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica).
- 6 PESSOA, A. R. P., Revestimento de Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG com Transferência por Curto-Circuito. 2009. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.
- 7 SILVA, M. M. Caracterização Metalúrgica e Tenacidade de Revestimentos em Aços Inoxidáveis 317L Aplicados por Soldagens MIG Manual e Robotizado para Equipamentos do Setor de Petróleo e Gás. 2009. 110p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.
- 8 WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. D. H. SOLDAGEM: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.
- 9 PETROBRAS N – 1707. Projeto de vaso de pressão com revestimento. Rio de Janeiro – RJ: PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. 1999.

- 10 COSTA, S. C.; RIBEIRO, L. G. Otimização dos Parâmetros de Pulso de um Processo de Soldagem Mig Através de Análise Fatorial em dois Níveis. In: XXI Encontro de Engenharia de Produção, Salvador - BA, Anais do XXI Encontro de Engenharia de Produção, Salvador-BA: ENEGEP, 2001.
- 11 BATISTA, V. R., SILVA, M. M., MACIEL, T. M., MELO, R. H. F., ARAÚJO, F. S., SANTOS, M. A. Influência dos Parâmetros de Soldagem Sobre as Características de Revestimentos de Liga Níquel Aplicados em Aços API 5L Gr B. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMat), 10, 2010, Campos do Jordão. Anais do 19º CBECIMat, Campos do Jordão, 2010 v. I. p 6534 – 6543.
- 12 SCOTTI, A. & PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho. 1. Ed. São Paulo: Artibre. 2008. 248p.
- 13 HAALAND, P. D., Experimental Design in Biotechnology. Marcel Dekker, INC., N.Y. 1989.
- 14 RODRIGUES, L. O. Análise e Otimização de Parâmetros de Soldagem com Arame Tubular. 2005. 82p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais.
- 15 SILVA, M. M. *Caracterização Metalúrgica e Tenacidade de Revestimentos em Aços Inoxidáveis 317L Aplicados por Soldagens MIG Manual e Robotizado para Equipamentos do Setor de Petróleo e Gás*. 2009. 110p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.
- 16 MODENESI, P. J., *Soldabilidade dos aços inoxidáveis*, São Paulo, SENAI-SP, 2001, 100p.
- 17 OMAR, A. A. Effects of Welding Parameters on Hard Zones Formation at Dissimilar Metal Welds. Welding Journal, Miami, v. 77, n. 2, p.86-93, 1998.
- 18 GUIMARÃES, R. F. Avaliação Comparativa dos “Linings” dos Aços AISI 444 e AISI 316L para Aplicação em Torres de Destilação de Petróleo. 2005. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.