



REVESTIMENTOS DE LIGA NiCrMo-4 APLICADOS EM TUBO DE AÇO CARBONO. PARTE 1: DILUIÇÃO, TEOR DE Fe E DUREZA

Marcos Mesquita da Silva¹; Clarice Oliveira da Rocha²; Bruno Allison Araújo³; Theophilo Moura Maciel⁴; Marco Antonio dos Santos⁵

¹ Instituto Federal da Paraíba, Campus Campina Grande, Petróleo e Gás – marcos.silva@ifpb.edu.br

² Instituto Federal da Paraíba, Campus Campina Grande, Petróleo e Gás – clarice.rocha@ifpb.edu.br

³ Instituto Federal da Paraíba, Campus Cajazeiras, Automação Industrial – bruno.araujo@ifpb.edu.br

⁴ UFCG, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica - theophilo.maciell@dem.ufcg.edu.br

⁵ UFCG, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica - santos.marco@dem.ufcg.edu.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar revestimentos de superliga de níquel (Hastelloy C-276) depositados com diferentes parâmetros, através do processo de soldagem ao arco submerso (SAW), e aplicados em tubo de aço usado no setor de petróleo. As soldagens foram realizadas com o metal de adição AWS ER NiCrMo-4 de diâmetro 1,13 mm e um fluxo aglomerado e básico. Já o substrato foi um tubo de aço de especificação API 5L Gr B de 12 polegadas de diâmetro nominal (\varnothing_N) e série 80. Os revestimentos foram aplicados internamente com o tubo girando e a tocha estática. Em seguida, os revestimentos foram caracterizados por microscopia ótica, microdureza, dureza e testes de composição química. Foi constatado que um aumento na Distância Bico de Contato à Peça (DBCP) proporcionou uma redução na corrente de soldagem que implicou em menores níveis de diluição, menores teores de Fe. A dureza na superfície dos revestimentos variou levemente com o teor de Fe, isto é, o revestimento com o menor teor de Fe apresentou o maior nível de dureza na superfície. A parte II deste artigo apresenta os resultados dos perfis de composição química e da resistência à corrosão dos revestimentos obtidos nesta pesquisa.

Palavras-chave: Revestimento, Soldagem ao arco submerso, Liga NiCrMo-4, Diluição, Dureza.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão pode causar sérios problemas nas unidades de destilação de petróleo, assim como no sistema de transporte do petróleo e gás, que é feito através de tubulações de aço. Muitas empresas prospectoras e beneficiadoras de petróleo enfrentam esse tipo de problema, o qual causa prejuízos devido à parada das unidades para que se faça a manutenção dos pontos atacados.

Independente do ramo de atividade, hoje nas indústrias o aço carbono é um dos materiais mais utilizados principalmente na parte estrutural, porém

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 [MANKINS, 1990; PAIVA, 2000].

Hastelloy C-276 é uma liga de níquel muito utilizada na indústria petroquímica, aeroespacial e nuclear, pois ela possui alta resistência à corrosão em uma ampla gama de meios redutores e oxidantes e



resistência em altas temperaturas [AHMAD *et. al.*, 2004].

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

Para revestimentos internos empregados em tubulações, no setor de petróleo e gás natural, exige-se um reforço líquido mínimo de 3 mm, devendo portanto se obter um reforço bruto acima deste valor a fim de permitir uma usinagem posterior que resulte neste valor estipulado [PETROBRAS, 1999].

Para que os revestimentos de liga de níquel tenham bom desempenho sob corrosão devem ter teor de Ferro (Fe) o mais baixo possível, o qual está intrinsecamente ligado ao nível de diluição do substrato no revestimento. Neste 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 [WAINER *et. al.*, 1992].

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar revestimentos de superliga de níquel (*Hastelloy C-276*) depositados com diferentes parâmetros, através do processo de soldagem ao arco submerso (SAW), e aplicados em tubo de aço usado no setor de petróleo.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho a deposição interna dos revestimentos de superliga de níquel *Hastelloy C-276* (ERNiCrMo-4), de 1,13 mm de diâmetro foi realizada através do processo de soldagem ao Arco Submerso (SAW) internamente a um tubo de aço API 5L Gr. B ($\varnothing_N = 12$ polegadas e série 80), com diâmetro interno de 289,9 mm e 17,4 mm de espessura. As composições químicas do revestimento e do substrato (tubo) estão dispostas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Durante as soldagens foi utilizado um fluxo aglomerado, neutro e básico, apropriado para soldagens de revestimento com aços inoxidáveis austeníticos e ligas de níquel.

Os revestimentos internos com três passes foram realizados no tubo, com este girando e a tocha fixa (Figura 1a). A técnica e procedimento de soldagem tais como, sobreposição, inclinação da tocha, estão esquematicamente representados na Figura 1b. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros de soldagem empregados, onde V_a é a velocidade de alimentação do arame, DBCP é a distância do bico de contato à peça, I_m é a corrente média e U_m a voltagem média

Tabela 1: Composição química do metal de adição AWS ER NiCrMo-4.

	C	Mn	Si	P	S	Cr
AWS	0,009	0,540	0,050	0,005	0,001	15,3
ER NiCrMo - 4	Mo	Ni	Fe	Co	V	W
	15,30	58,20	6,120	0,030	0,270	3,820

Fonte: HAYNES Wire Company [2009].

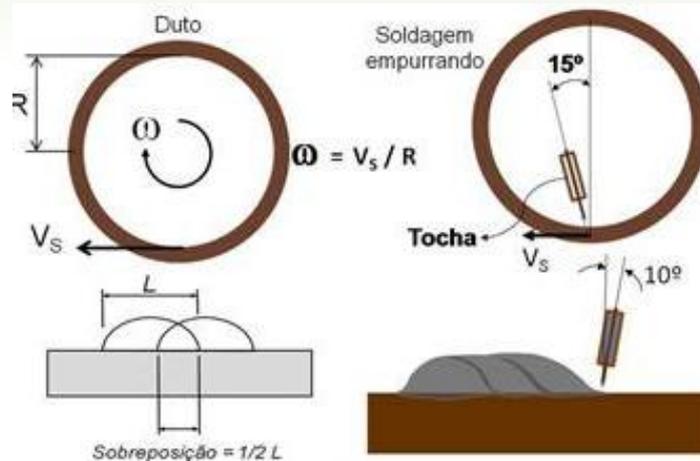
Tabela 2: Composição química do duto API 5L Gr B.

	C	Mn	Si	P	S	Cr
API 5L GR B	0,19	0,70	0,24	0,018	0,018	0,064
	Mo	Ni	Fe			
	0,008	0,07	Bal.			

Fonte: Silva *et al.* [2010].



(a)



(b)

Figura 1: Soldagem ao Arco Submerso (a) Tocha de soldagem e (b) Técnica e procedimentos de soldagem.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem utilizados.

Revestimento	RT1	RT2	RT3
V_a (m/min)	7,0	7,0	7,5
DBCP (mm)	20,0	28,0	30,0
I_m (A)	$186,1 \pm 9,3$	$166,7 \pm 7,0$	$169,3 \pm 5,5$
U_m (volts)	$38,2 \pm 0,2$	$37,6 \pm 0,4$	$40,6 \pm 0,4$



Figura 2: Desenho esquemático da geometria do revestimento.

Após as análises metalográficas, as características geométricas dos revestimentos foram determinadas a partir de seções transversais. Também foram calculados os níveis de diluição dos revestimentos (RT1, RT2 e RT3). As medições das áreas 1 e 2 (Figura 2) foram realizadas através de um software CAD. Assim, os níveis de diluição foram definidos conforme a equação a seguir:

$$\text{Diluição}(\%) = \frac{\text{Área 2}}{(\text{Área 1} + \text{Área 2})} \quad [1]$$

Foram realizados nos revestimentos ensaios de microdureza e dureza Vickers. O ensaio de microdureza consistiu na realização na seção transversal de 3 linhas verticais (L_1 , L_2 e L_3) em pontos do metal de solda (MS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB), obedecendo a uma distância entre endentações de 0,20 mm, conforme mostra a Figura 3.

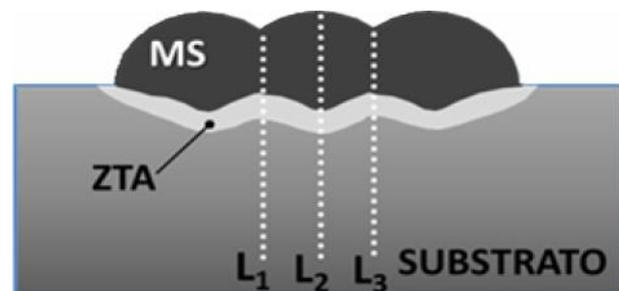


Figura 3: Disposição das endentações de microdureza.



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 (100g) e um tempo de 15 segundos foram utilizados. Esta primeira metodologia foi empregada a fim de conhecer o perfil de dureza ao longo do revestimento (MS) e substrato (ZTA e MB).

Já os ensaios de dureza Vickers foram realizados, com aplicação de uma carga de 5kg durante um tempo de 15 segundos, na superfície do revestimento a uma altura de 3 mm.

Os testes de composição química, para a quantificação do teor de Fe, foram realizados através da técnica de caracterização EDX (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio X ou Energy Dispersive X-Ray). Estes testes foram conduzidos com um colimador de diâmetro 3mm e atmosfera a vácuo (30Pa).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta os níveis de diluição obtidos em função da DBCP. Já as Figuras 4, 5 e 6 apresentam as seções transversais dos revestimentos RT1, RT2 e RT3, respectivamente.

Tabela 4 – Níveis de diluição obtidos.

Revestimento	DBCP (mm)	Diluição (%)	Fe (%)
RT1	20,00	24,30	25,94
RT2	28,00	17,22	15,39
RT3	30,00	14,29	14,66

A partir destas figuras e da Tabela 4 é possível notar a influência da DBCP nos valores de diluição. Isto é, quanto maior a DBCP menor o valor da diluição. Verifica-se que o menor valor de diluição obtido ficou em torno de 14 % e o valor do

percentual de Fe também próximo deste valor, o que confirma a relação direta de uma variável com a outra. Verificou-se também de 8 mm na DBCP proporcionou um decréscimo em torno de 20 A na corrente média (Tabela 3), o que por sua vez reduziu a diluição de 24,30% para 17,22% (Tabela 4). Estes resultados são de importância prática para o estabelecimento de parâmetros para aplicação de revestimentos por soldagem. Ou seja, uma soldagem com DBCP elevada torna-se mais adequada para revestimentos, originando menores valores de corrente média (I_m), o que provoca menores valores de diluição e consequentemente menores teores de Fe no metal de solda (em situações em que o substrato é rico em Fe).

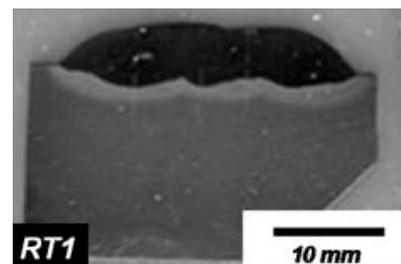


Figura 4: Revestimento RT1 com diluição de 24,30%.

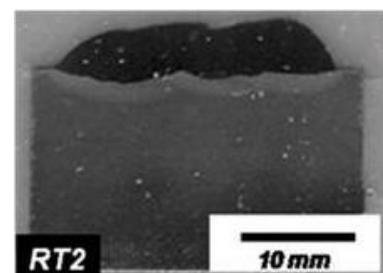


Figura 5: Revestimento RT2 com diluição de 17,22%.

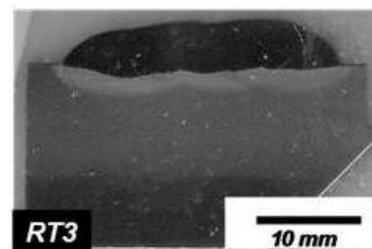


Figura 6: Revestimento RT3 com diluição de 14,29%.



Devido a diluição ser altamente sensível aos parâmetros de soldagem, ela também pode ser analisada do ponto de vista da taxa de alimentação volumétrica do metal de adição (T_V) para uma determinada quantidade de energia do arco elétrico ($\eta_a \cdot U \cdot I$), onde η_a é a eficiência do processo de soldagem, U é a voltagem e I é a corrente de soldagem.

Para o processo de soldagem ao arco submerso o valor do coeficiente de eficiência do arco (η_a) é igual a 0,88 [DuPONT e MARDER, 1996]. Em outras palavras, esta razão $T_V/(\eta_a \cdot U \cdot I)$ representa o volume de metal depositado por unidade de energia.

A Figura 7 mostra a influência desta razão sobre os níveis de diluição obtidos no corrente trabalho. Observa-se que houve uma tendência do nível de diluição diminuir quando a razão $T_V/(\eta_a \cdot U \cdot I)$ é aumentada. Isto acontece porque a diluição é controlada pelas taxas de fusão do metal de adição e do metal de base, que por sua vez são controladas pela

distribuição de energia requerida para fundir o metal de adição e o metal de base. Assim, quando a taxa de alimentação do metal de adição é incrementada, mantendo-se a energia do arco constante, a fração de energia do arco elétrico usada para fundir o metal de adição aumenta enquanto menos energia estará disponível para fundir o substrato.

Logo, o nível de diluição diminui quando menos substrato se funde e se mistura com o metal de adição. Analogamente, se a taxa de alimentação do metal de adição é diminuída, para uma energia de arco constante, a fração de energia requerida para fundir o metal de adição é reduzida enquanto que a fração de energia disponível para fundir o substrato aumenta. Nestas condições uma maior quantidade de substrato se funde e a diluição aumenta. Assim a diluição será reduzida quando a razão $T_V = \eta_a \cdot U \cdot I$ for maximizada [BANOVIC *et al.*, 2002].

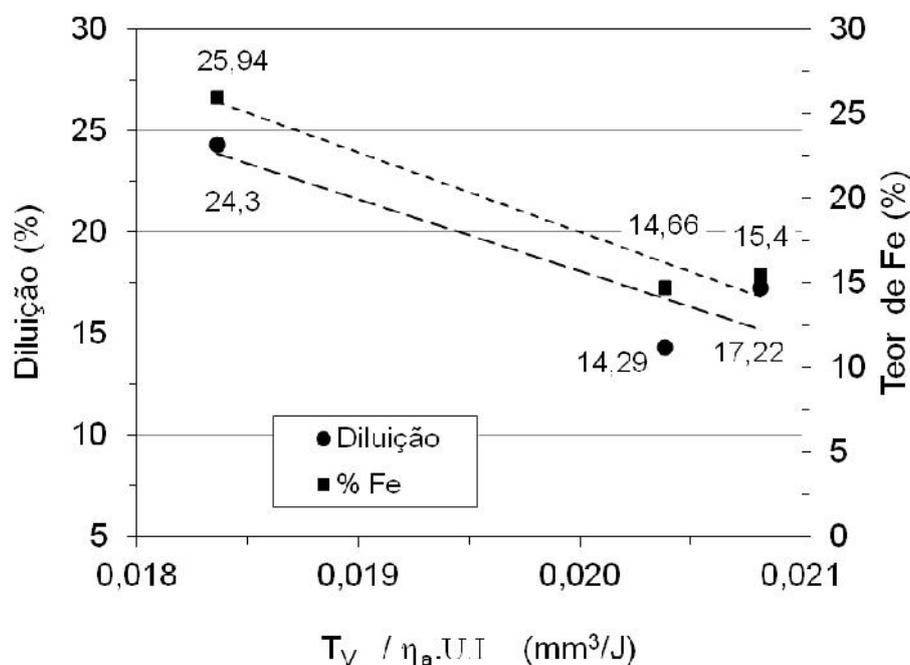


Figura 7: Níveis de diluição em função da razão entre a taxa de alimentação volumétrica do metal de adição (T_V) e a energia do arco ($\eta_a \cdot U \cdot I$) para os revestimentos internos.



Nos gráficos das Figuras 7, 8 e 9 são apresentados os perfis de microdureza das três linhas passando pelo ponto médio do passe central (linha 2) e intersecção deste com os demais passes (linhas 1 e 3) para cada revestimento. Cada linha contemplou as regiões do revestimento do metal de solda (MS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB). Em geral, a dureza média do metal de solda um pouco superior em relação à dureza da ZTA do substrato, conforme apresenta a Tabela 5. Além disso, a ZTA de grãos grosseiros (ZTA-GG), aqueles pontos próximos ao MS, apresentaram valores de dureza um pouco mais elevados do que a ZTA de grãos finos e MB.

Na Figura 11 pode-se observar a variação de microestrutura da ZTA ao longo da interface revestimento/substrato do revestimento RT3. A região do 2º passe, ou seja, parte central do revestimento, apresentou ZTA-GG com grãos maiores que as regiões entre passes. Por outro lado, as regiões entre os passes de revestimento (intersecção) apresentaram uma microestrutura refinada. Todos os revestimentos (RT1, RT2 e RT3) apresentaram estas características.

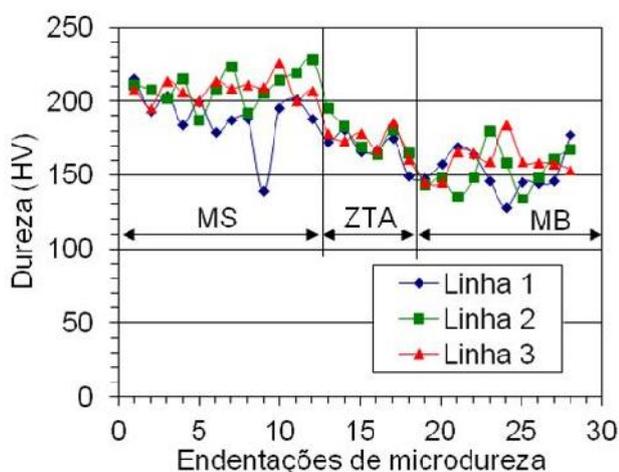


Figura 8: Perfil de microdureza para o revestimento RT1.

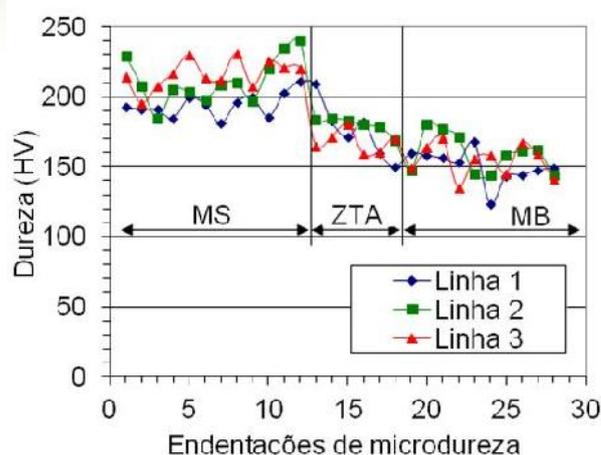


Figura 9: Perfil de microdureza para o revestimento RT2.

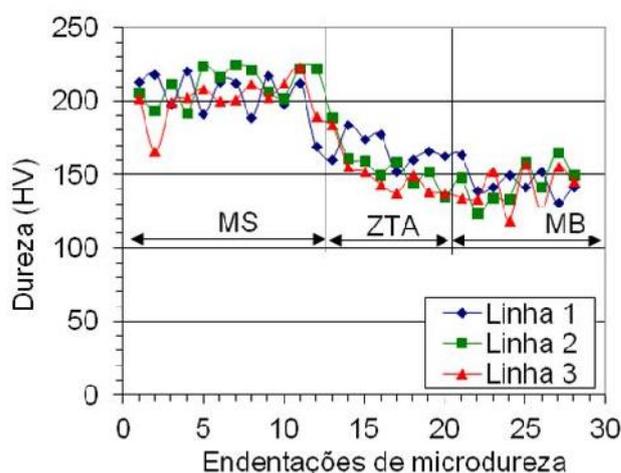


Figura 10: Perfil de microdureza para o revestimento RT3.

Tabela 5: Valores médios de dureza nos MS e ZTA dos revestimentos.

	RT1	RT2	RT3
MS (HV)	204±12	207±15	206±14
ZTA (HV)	176±9	177±13	160±15

Os grãos refinados nas regiões de interseções são devido à influência do aporte térmico do 2º passe depositado sobre o 1º passe do revestimento e do 3º passe depositado sobre o 2º passe do revestimento. Este mesmo comportamento foi verificado nas demais condições de soldagem realizada neste



estudo. Souza Neto [2010], trabalhando com soldagem em aços carbono, constatou que o refinamento de grãos obtidos através de passes posteriores proporciona melhores propriedades mecânicas nesta região de grãos refinados.

A Figura 12 e a Tabela 6 apresentam os resultados do teste de dureza realizado na superfície (após retificação) dos revestimentos, onde posteriormente foram feitos ensaios de corrosão. Nota-se que os revestimentos

que apresentaram maiores valores de diluição e, conseqüentemente, maiores teores de Fe, mostraram menores níveis de dureza. Uma diluição mais elevada significa, nesta pesquisa, que o revestimento irá conter mais elementos do metal de base, e esses elementos provavelmente podem ter provocado uma redução da dureza do revestimento. Isto é, houve uma tendência da dureza diminuir com o aumento da diluição e do teor de Fe.

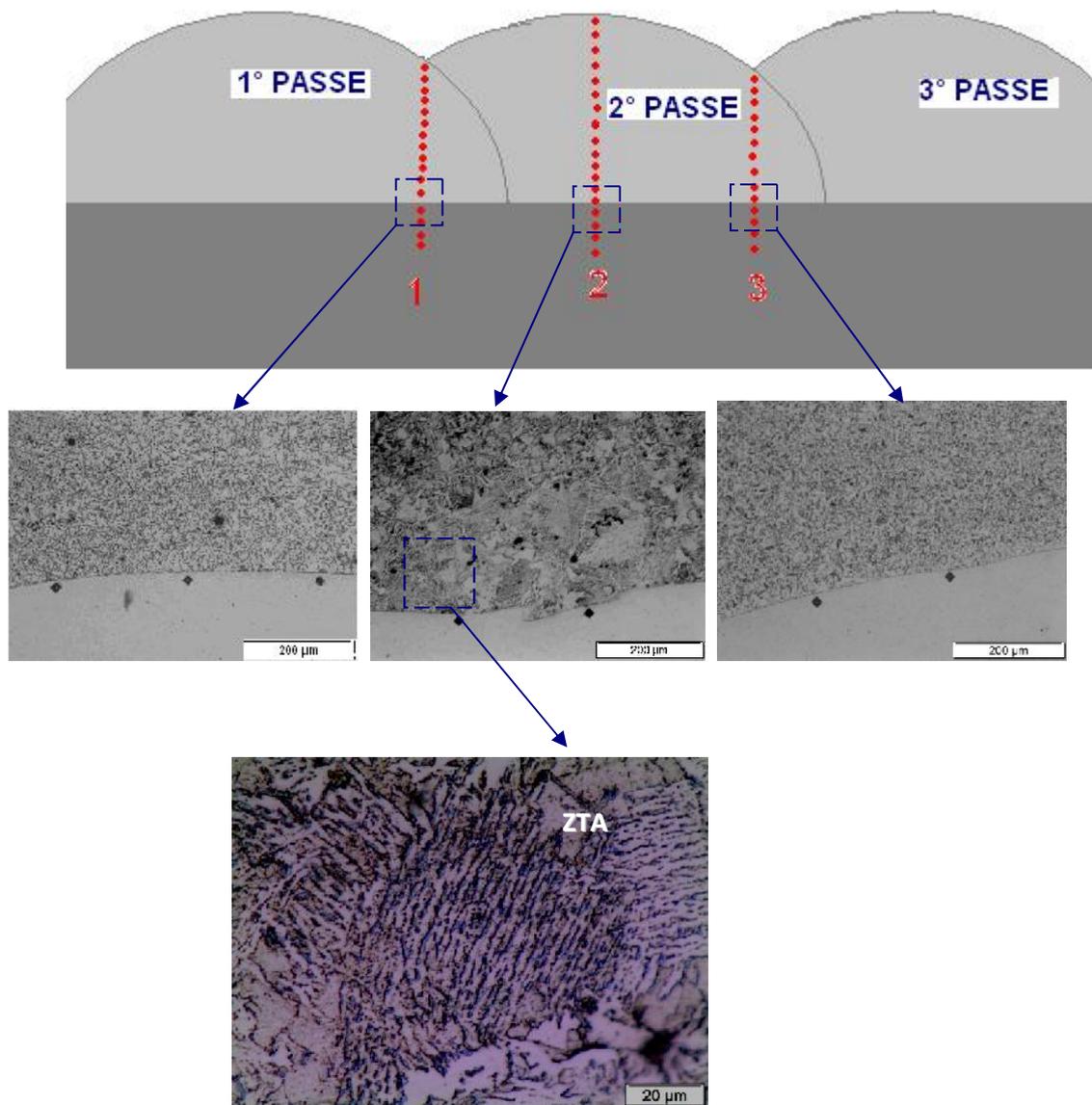


Figura 11: Variações de microestrutura ao longo da interface MS / substrato, na ZTA do revestimento RT3.

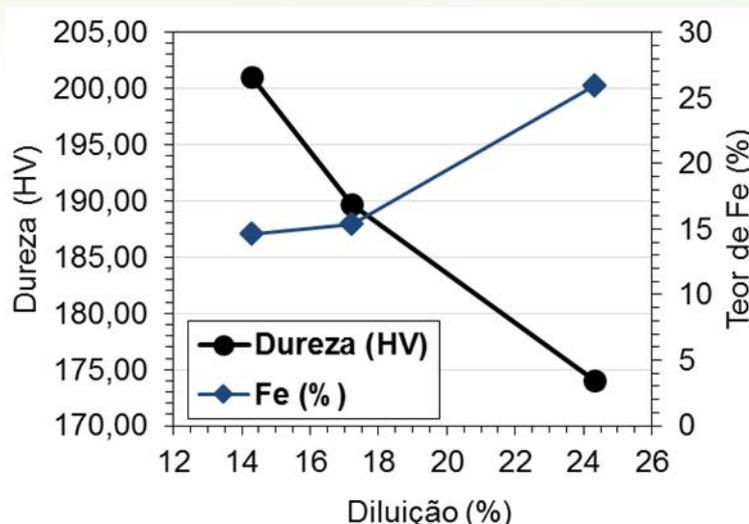


Figura 12: Dureza e teor de Fe em função da diluição.

Tabela 6: Resultados do ensaio de dureza nos revestimentos internos.

	RT1	RT2	RT3
Diluição (%)	24,30	17,22	14,29
Fe (%)	25,94	15,40	14,66
Dureza (HV)	174,01 ± 13,55	189,75 ± 10,54	201,06 ± 12,78

Tabela 7 – Resumo da influência do tamanho atômico (raio) e da solubilidade de vários elementos de liga no Ni em 1000 °C

Soluto	Diferença aproximada de tamanho atômico em comparação com o níquel (%)	Solubilidade aproximada em níquel a 1000 °C (% em peso)
C	+43	0,2
Al	-15	7
Si	+6	8
Ti	-17	10
V	-6	20
Cr	-0,3	40
Mn	+10	20
Fe	+0,3	100
Co	-0,2	100
Cu	-3	100
Nb	-15	6
Mo	-9	34
Ta	-15	14
W	-10	38

Fonte: DuPONT *et al.* [2009]

As ligas de Ni do sistema NiCrMo pertencem ao grupo daquelas endurecidas por solução sólida. Assim, vários elementos de ligas podem ser

adicionados a este sistema a fim de proporcionar este mecanismo de endurecimento. Adicionalmente, o desempenho de cada elemento (soluto)



neste mecanismo dependerá da solubilidade do mesmo e da diferença entre os raios atômicos do soluto e do solvente. Ou seja, quanto maior a diferença entre raios atômicos e menor a solubilidade, mais eficaz será o elemento de liga no mecanismo de endurecimento por solução sólida. A Tabela 7 apresenta o tamanho atômico e solubilidade de vários elementos de liga em relação ao níquel na temperatura de 1000°C [DuPONT *et al.*, 2009].

Percebe-se que a diferença de tamanho atômico entre ferro e o níquel é muito pequena de modo que a solubilidade do ferro é de 100% no níquel. Assim, se o teor de ferro aumentar em uma solução sólida – que contém elementos de liga que desempenham a função de endurecer a liga (pelo mecanismo de solução sólida), tais como Mo, W, etc. – o nível de dureza desta liga tenderá a diminuir. Isto pode ser justificado pelo fato deste aumento do teor de ferro diluir o efeito daqueles outros elementos (de baixa solubilidade), já que a solubilidade do ferro é de 100% no níquel. Portanto, o revestimento RT1 apresenta o menor valor de dureza porque contém o maior percentual de ferro em solução sólida.

A Parte II deste artigo apresenta a influência dos parâmetros de soldagem nos perfis de composição química e resistência à corrosão dos revestimentos RT1, RT2 e RT3.

4. CONCLUSÕES

- Um incremento de 8 mm na DBCP proporcionou um decréscimo em torno de 20A na corrente de soldagem, o que por sua vez reduziu a diluição de 24,30% para 17,22%. Ou seja, um aumento da DBCP promoveu uma redução na corrente de soldagem que, por sua vez, reduziu a diluição e, conseqüentemente, também diminuiu o teor de Fe nos revestimentos.

- Houve uma tendência da diluição e do teor de Fe diminuírem com o aumento da razão entre a taxa de alimentação volumétrica do metal de adição e a energia do arco elétrico. Ou seja, a diluição e o teor de Fe diminuíram com o aumento do volume de metal de adição depositado por unidade de energia;
- Os perfis de microdureza mostraram que a dureza foi maior no MS (liga de Ni) em comparação com o substrato de aço carbono. Além disso, as regiões de maiores durezas no substrato ocorreram na ZTA-GG, adjacente ao MS;
- Os ensaios de dureza, na superfície dos revestimentos, indicaram que um aumento na diluição promoveu um incremento do teor de Fe, resultando em menores níveis de dureza. Ou seja, quanto mais Fe tiver o revestimento de liga de Ni, menor vai ser a dureza do mesmo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem programa Capes/CNPq pela Bolsa de pesquisa, à FINEP, ao Cenpes/Petrobrás pelo suporte financeiro e à Rede Multitarefa de Materiais Avançados do Norte e Nordeste (REMULT) através do Núcleo de União e Revestimentos de Materiais (UNIREV).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M et al. ***Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276***. Journal of Alloys and Compounds, Islamabad, v.390, p.188-193, Aug. 2004.

BANOVIC, S. W.; DUPONT, J. N.; MARDER, A. R.. Dilution and microsegregation in dissimilar metal welds between super austenitic stainless steel



and nickel base alloys. **Science And Technology Of Welding And Joining**, v. 7, n. 6, p.374-383, 2002.

DUPONT, J. N.; MARDER, A. R.. Dilution in Single Pass Arc Welds. **Metallurgical And Materials Transactions B**, v. 27, p.481-489, 1996.

DUPONT, John N.; LIPPOLD, John C.; KISER, Samuel D.. **Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-base Alloys**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

HAYNES WIRE COMPANY (Estados Unidos). **Product Certification. Specification:** C-276-0450-12BP-B00. Houston, 2009. 2 p.

MANKINS,W.L.; LAMB,S. **Nickel and nickel alloys**, ASM Handbook vol 2; Properties and selection:Nonferrous alloys and special purpose materials,1990.

PAIVA,G.J. M. **As técnicas de perda de massa e resistência elétrica da avaliação da corrosão naftênica em laboratórios e em campos**. Tese de Ms.UFRJ,2000.

PETROBRAS. N-1707 - **Projeto de Vaso de Pressão com Revestimento Metálico**, 1999.

SILVA, M. M. et al, **Avaliação da Microestrutura e da Microdureza de Revestimentos de Ligas de Níquel Aplicados por Soldagem em Tubos de Aços ARBL**. Relatório Técnico de Pesquisa.Laboratório de Soldagem (LABSOL). UFCG. Reunião do Grupo de Pesquisa: Campina Grande. 2010. 78 p.

SOUZA NETO, F.A.S. **Avaliação de Revestimentos com Ligas de Níquel Aplicados por Soldagem em Tubulações para o Setor de Petróleo e Gás**. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia,

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Campina Grande-PB, 2010.

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