

# PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS DE LIGA INCONEL 625 OBTIDOS PELOS PROCESSOS ARAME TUBULAR E ELETRODO REVESTIDO\*

Camila Pereira Alvarães<sup>1</sup>

Francisco Carlos Albuquerque Madalena<sup>2</sup>

Leonardo Sales Araújo<sup>3</sup>

Luis Felipe Guimarães de Souza<sup>4</sup>

Jorge Carlos Ferreira Jorge<sup>5</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa das propriedades de revestimentos soldados com a liga INCONEL 625 sobre o aço ASTM A516 grau 70 obtidos pelos processos eletrodo revestido e arame tubular. Para tanto, foram realizados ensaios de mecânicos, metalográficos e de corrosão nos revestimentos obtidos. A análise metalográfica evidenciou a presença de precipitados ao longo do metal de solda obtido pelo processo arame tubular, não sendo verificada esta ocorrência para o processo eletrodo revestido. Os ensaios mecânicos mostraram resultados satisfatórios para ambos os processos. Os ensaios de corrosão realizados em conformidade com a norma ASTM G48 não evidenciaram a ocorrência de pites e a perda de massa foi satisfatória para ambos os processos. Baseado nos resultados obtidos pode-se inferir que ambos os processos de soldagem se mostraram adequados para a deposição de revestimentos com a liga INCONEL 625.

**Palavras-chave:** INCONEL 625; Soldagem; Revestimento

## PROPERTIES OF INCONEL 625 ALLOY'S WELD OVERLAY OBTAINED THROUGH FLUX CORED ARC WELDING AND SHIELDED METAL ARC WELDING PROCESSES

### Abstract

This paper aims to conduct a comparative analysis of INCONEL 625 alloy weld overlay's properties on ASTM A516 grade 70 steel obtained by flux cored arc welding (FCAW) and shielded metal arc welding (SMAW). Therefore, mechanical, metallographic and corrosion tests were performed in the studied weld overlays. Metallographic examinations revealed the presence of precipitates over the weld metal obtained by the FCAW process. Those precipitates were not observed for the SMAW process. The mechanical tests showed satisfactory results for both processes. The corrosion tests conducted in accordance with ASTM G48 showed no occurrence of pits and the loss of mass was satisfactory for both processes. Based on the results in the resent work, it can be concluded that both welding processes are suitable for the weld overlay of the INCONEL 625's alloy.

**Keywords:** INCONEL 625; Welding; Cladding.

<sup>1</sup> Eng. Mecânica, Mestrando, CEFET/RJ, PPEMM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, M.Sc., Engenheiro, PETROBRAS – E&P-ENG/IPPE/EISA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Metalúrgico, D.Sc., Professor Adjunto da COPPE/UFRJ, PEMM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Eng. Metalúrgico, D.Sc., Professor Titular do CEFET/RJ, DEPMC/PPEMM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>5</sup> Eng. Metalúrgico, D.Sc., Professor Titular do CEFET/RJ, DEPMC/PPEMM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A descoberta dos campos do pré-sal indicou a existência de fluidos ainda mais agressivos aos materiais até então utilizados. Altas concentrações de gás carbônico e ácido sulfúrico presentes nos fluidos mostraram a necessidade de desenvolver novos materiais e novas técnicas [1]. Dentro desse contexto, a técnica de revestimento por soldagem vem sendo amplamente utilizada, pois ela é capaz de prover uma maior resistência a corrosão aliada a uma boa resistência mecânica [2]. Uma opção alternativa ao revestimento por soldagem é a construção de componentes mecânicos inteiramente por aços duplex, que apresentam as duas características previamente citadas. No entanto, a utilização destes aços torna a fabricação mais onerosa, além dos problemas intrínsecos envolvendo a metalurgia física dos mesmos [3].

Nesse cenário, surge o conceito de revestimento por soldagem ou *cladding*, que consiste em uma soldagem dissimilar, onde a união é caracterizada por dois materiais de características e composições químicas diferentes [4]. Essa união nem sempre se dá de forma simples, pois por possuírem características distintas, os materiais tendem a se comportar de maneiras diferentes durante sua fusão e, conseqüentemente sua soldagem. Além disso, durante a deposição do revestimento zonas parcialmente diluídas (ZPD), faixas onde a composição é intermediária entre o revestimento e o substrato, podem se formar, criando regiões susceptíveis à formação e propagação de trincas devido ao seu alto valor de dureza [5].

O presente trabalho tem como objetivo avaliar de forma comparativa a adequação da deposição de revestimentos pelos processos arame tubular e eletrodo revestido. A seleção destes processos é consequência da versatilidade e baixo custo dos mesmos, cabendo destacar que embora o processo eletrodo revestido apresente uma menor produtividade que o processo arame tubular, se torna uma alternativa mais viável para operações em locais de operação complexa e, notadamente, na execução de reparos. O revestimento considerado é a deposição da superliga de níquel INCONEL 625 sobre o substrato do aço ASTM A516 Gr.70, amplamente utilizado na manufatura de vasos de pressão. O revestimento por soldagem é aplicado aos bocais e flanges de tais componentes presentes na indústria de óleo e gás, pois são áreas críticas do equipamento onde há alta circulação de fluidos corrosivos [6].

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Como metal base (substrato), foi utilizado o ASTM 516 Gr. 70, amplamente utilizado na construção de vasos de pressão, cuja composição química é mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química do aço ASTM 516 Gr. 70

Elemento	Fe	C	Ni	Cr	Mo	Mn	Al	V	Cu	Si
(% em peso)	Bal.	0,15	0,01	0,02	0,01	0,95	0,02	0,03	0,4	0,2

Para o revestimento, os consumíveis de soldagem ENiCrMo3T1-4 e ENiCrMo-3 foram utilizados, para os processos arame tubular e eletrodo revestido, respectivamente. A Tabela 2 mostra a composição química de cada consumível de acordo com os fabricantes.

**Tabela 2.** Composição química dos consumíveis de soldagem

Elemento (% em peso)	Ni	Cr	Mo	Nb	Mn	Si	Fe	C
Arame ENiCrMo3T1-4	Bal.	21,0	8,5	3,3	0,4	0,4	<1,0	0,05
Eletrodo ENiCrMo-3	Bal.	22,0	9,0	3,3	0,6	<0,5	3,0	<0,04

## 2.2 Soldagem

A deposição dos revestimentos foi realizada pelos processos arame tubular e eletrodo revestido, na posição plana, preaquecimento de 15°C e temperatura máxima interpasse de 150°C, em 3 camadas com sobreposição de 50% entre os cordões de solda, sobre chapas de aço ASTM A 516 Gr.70 de dimensões de 12,5 x 200 x 250 mm, sendo a deposição do revestimento realizada em 80 x 250 mm.

Na soldagem com o processo arame tubular, utilizou-se um consumível de 1,2 mm de diâmetro, uma mistura Ar-25CO<sub>2</sub> como gás de proteção com a vazão de 16 l/min. A soldagem foi realizada com os parâmetros de corrente e tensão iguais a 167 A e 25 V na primeira camada e 185 A e 26 V nas demais e energia de soldagem média de 0,65kJ/mm. Para o eletrodo revestido, utilizou-se eletrodos de 4,0 mm de diâmetro na primeira e terceira camadas e de 3,2 mm na segunda. A soldagem foi realizada com os parâmetros de 26 V e 120 A para a primeira camada e terceira camadas e 25 V e 105 A e aporte térmico médio de energia de soldagem média de 0,63kJ/mm.

## 2.3 Análises Metalográficas

Realizou-se análise metalográfica consistindo de macrografia, microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). A preparação das amostras envolveu as convencionais técnicas de lixamento e de polimento com pasta de diamante com granulometria de 6, 3 e 1 µm. O ataque químico, consistiu de 2 etapas. Inicialmente, o metal de base foi atacado com nital 2% e, posteriormente, utilizou-se uma solução composta por 20% de CrO<sub>3</sub> e 80% de água destilada para revelar a microestrutura do metal depositado. O ataque químico para o metal de solda foi feito em meio eletrolítico com os parâmetros de 4 V durante 30 segundos.

## 2.4 Ensaios de Microdureza

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers com aplicação de uma carga de 500 gf durante 20 segundos com a finalidade de traçar um perfil de microdureza ao longo do revestimento. O espaçamento entre as identações foi de aproximadamente 0,25 mm ao longo do metal de base e do metal de solda, em uma perpendicular à linha de fusão, com marcações extras nas regiões de interesse, como as zonas parcialmente diluídas.

## 2.5 Ensaios de Dobramento

Foram realizados ensaios de dobramento para verificar a integridade do revestimento e a isenção de defeitos superficiais, de acordo com os requisitos da norma ASME IX [7].

## 2.6 Análise Química

Foi realizada análise química dos revestimentos por espectrometria de emissão ótica, nas posições relativas à linha de fusão e às distâncias de aproximadamente 1, 3 e 5 mm da linha de fusão, de forma a permitir uma análise da variação dos principais elementos de liga ao longo do revestimento.

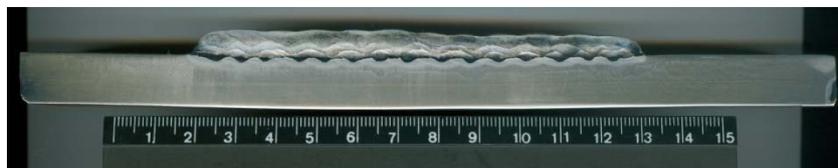
## 2.7 Ensaio de Corrosão

Tratando-se de um revestimento resistente a corrosão, ensaios de corrosão se mostram fundamentais para avaliar o desempenho do revestimento. O ensaio de corrosão foi realizado de acordo com a norma ASTM G-48 [8], método A, tendo como critério de aceitação a norma NORSOK M 601 [9].

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da análise macrográfica foi possível observar a interface entre os dois materiais e avaliar a ausência de discontinuidades superficiais e de porosidades, como pode ser visto nas Figuras 1 e 2.

A Figura 3 mostra o aspecto dos corpos-de-prova de dobramento após a realização dos ensaios, onde se nota que os mesmos não apresentaram quaisquer discontinuidades superficiais ou deslocamento tendo sido considerados aprovados [7], mostrando dessa forma que ambos os processos são adequados para a deposição do revestimento.



**Figura 1.** Macrografia referente à amostra soldada por arame tubular.



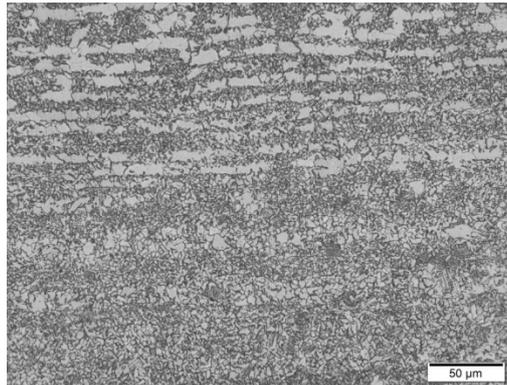
**Figura 2.** Macrografia referente à amostra soldada por eletrodo revestido.



**Figura 3.** Aspecto dos corpos-de-prova de dobramento após o ensaio.

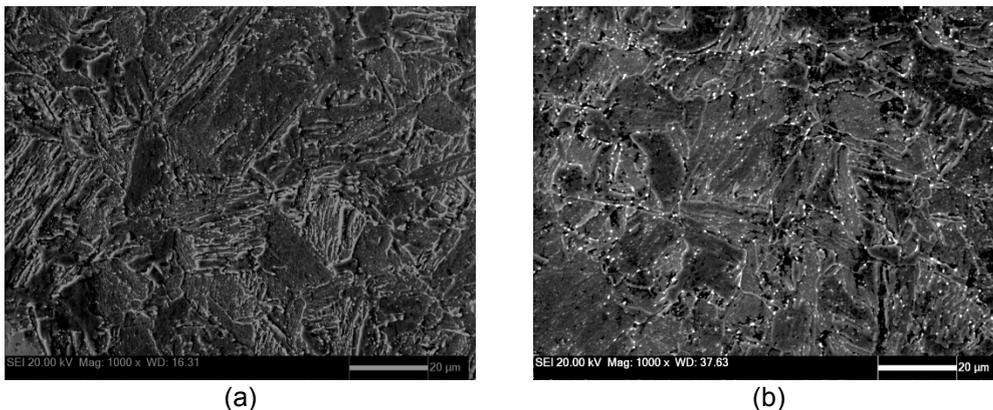
Nestas mesmas macrografias e com o auxílio do software AutoCAD também foi possível avaliar a diluição global, tendo sido verificados resultados similares para ambos os processos, tendo sido obtidos os valores de 9,6% de diluição para a

amostra soldada por arame tubular e 10,3% para a amostra soldada por eletrodo revestido. Para valores abaixo de 70% de diluição espera-se encontrar uma solda sem defeitos, sendo assim os valores de diluição encontrados são aceitáveis [4]. As análises micrográficas evidenciaram a mudança na microestrutura do metal de base ocasionada pelos ciclos térmicos de soldagem. Os grãos grosseiros da estrutura composta por perlita e ferrita inicialmente orientados longitudinalmente, em uma disposição típica do processo de laminação, se tornam mais finos e desorientados, indicando o início de uma zona termicamente afetada, como pode ser visto na Figura 4.

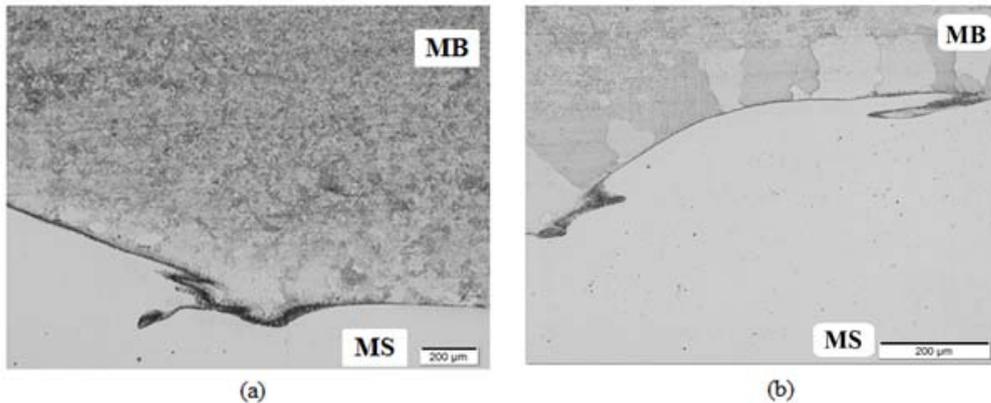


**Figura 4.** Transformação microestrutural do metal de base. Aumento:500X. Ataque: Nital 2%.

Além disso, foi possível observar a interface entre os dois materiais e notar a ocorrência de martensita revenida no metal de base próximo a linha de fusão (Figura 5). A presença de martensita indica uma zona de dureza elevada que é prejudicial ao revestimento, pois a alta dureza pode indicar locais propensos para a nucleação e propagação de trincas. Na região de interface também é possível avaliar regiões onde há uma mistura entre os dois materiais, a chamada zona parcialmente diluída, com composição química intermediária entre o metal de base e o metal de solda, como pode ser visto na Figura 6. Apesar do frequente aparecimento de zonas parcialmente diluídas ao longo da interface entre os dois materiais, não foi possível notar um prejuízo para os revestimentos estudados com a formação de trincas, deslocamento ou defeitos de deposição, como será visto adiante.

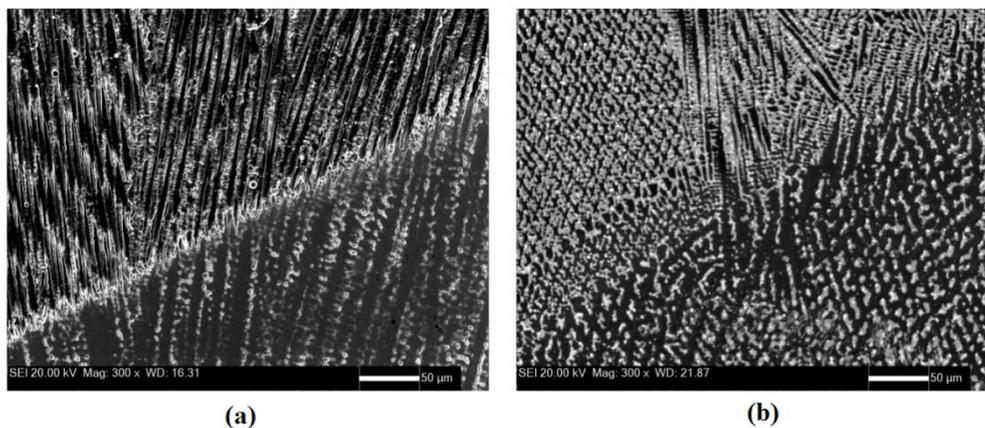


**Figura 5.** Ocorrência de martensita revenida na linha de fusão (MEV). Aumento:1000X. Ataque: Nital 2% (a) arame tubular; (b) eletrodo revestido



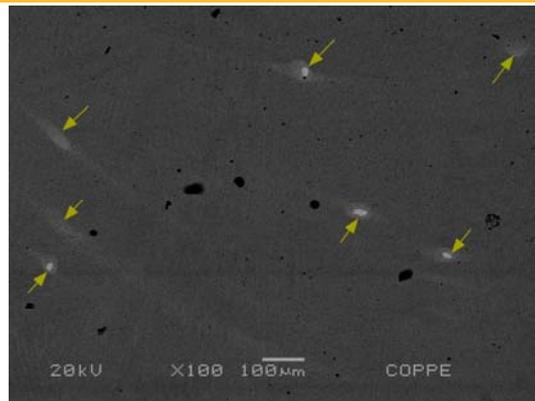
**Figura 6.** Ocorrência de zonas parcialmente diluídas na interface (MO). Aumento:100X. Ataque: Nital 2% (a) arame tubular; (b) eletrodo revestido

Avaliando a microestrutura do metal de solda é possível notar que em ambos os processos o comportamento é similar. O revestimento possui estrutura predominantemente dendrítica característica da solidificação dos cordões de solda, Figura 7.



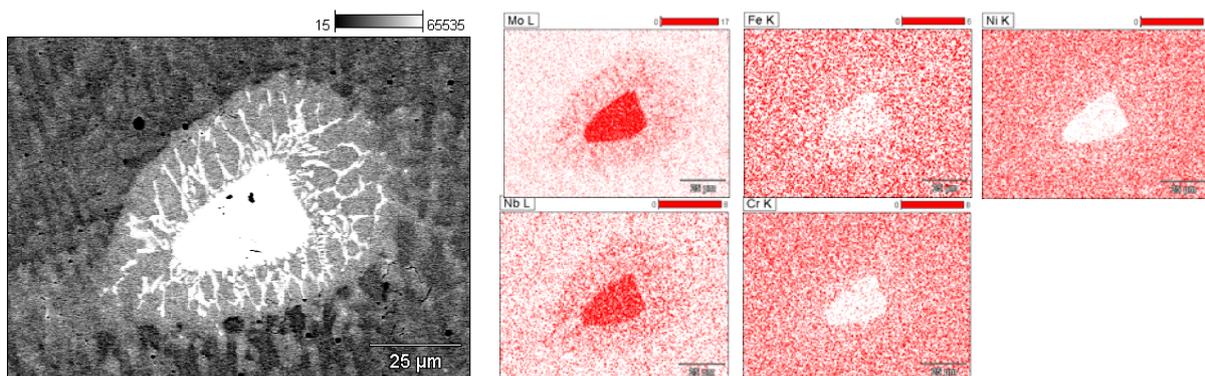
**Figura 7.** Interface e microestrutura dendrítica do revestimento. Aumento:300X. Ataque:  $\text{CrO}_3$  eletrolítico: a) arame tubular ; b) eletrodo revestido

Durante análise por MEV do revestimento produzido por arame tubular, em modo retroespalhado foi possível observar diversas regiões com a formação de uma fase com morfologia diferente das regiões dendríticas e interdendríticas. Tais fases foram evidenciadas ao longo do revestimento desde regiões próximas da linha de fusão até próximo ao topo do revestimento. A análise em mapeamento químico por espectroscopia dispersiva de raios-X (EDS) mostrou que tal fase era enriquecida dos elementos Mo e Nb. A Figura 8 apresenta a distribuição de tal fase no revestimento e a Figura 9 apresenta em detalhe a morfologia observada, com mapeamentos químicos realizados por EDS.

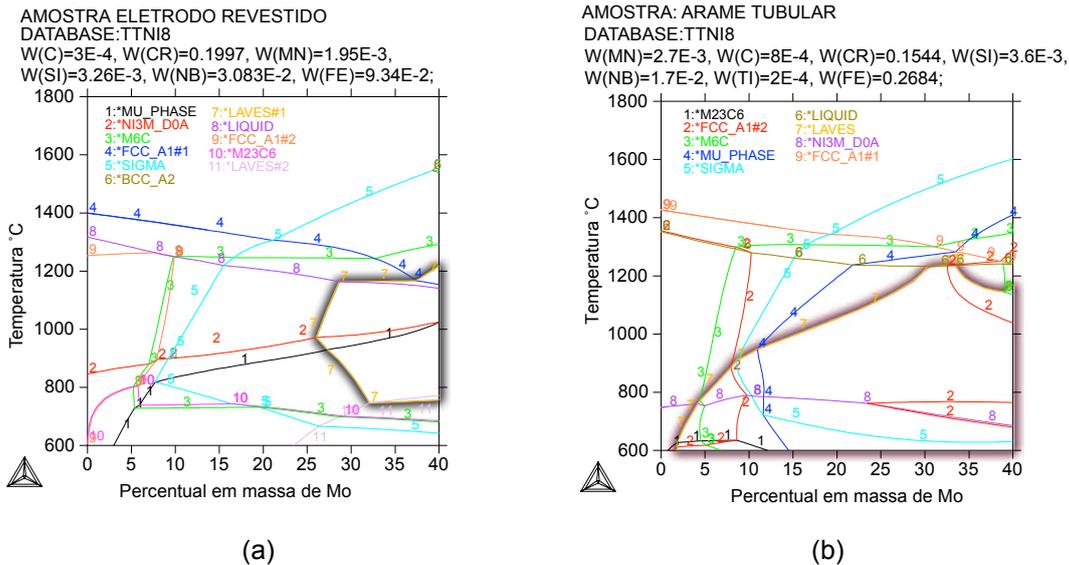


**Figura 8.** Distribuição das fases identificadas no revestimento de liga 625.

A referida fase se apresentou como uma partícula globular envolvida por uma região de morfologia lamelar do tipo eutética. A análise por EDS revelou que essa região apresenta alta concentração primordialmente de Mo e Nb e empobrecimento local de Fe, Cr e Ni. A morfologia lamelar eutética foi identificada em outros trabalhos como fase de Laves [10,11]. A ocorrência dessa fase apenas no processo de arame tubular pode ser relacionada a uma maior concentração de Fe no metal de solda, em relação ao eletrodo revestido. Isso ocorre devido a uma maior turbulência no processo, o que promove uma maior mistura dos elementos. Tal fato foi corroborado pela maior diluição de ferro na região onde tais fases foram formadas. A importância do Fe na formação da fase de Laves foi evidenciada por Silva et al. [10]. Adicionalmente, simulações termodinâmicas com o software ThermoCalc (utilizando a base de dados TTNI8 [12]) mostraram que o aumento do teor de Fe dissolvido induz a formação da fase de Laves para menores teores de Mo dissolvido. A Figura 10 mostra diagramas pseudo-binários para as composições a cerca de 1,30 mm da linha de fusão para o revestimento de liga 625 por eletrodo revestido e arame tubular.

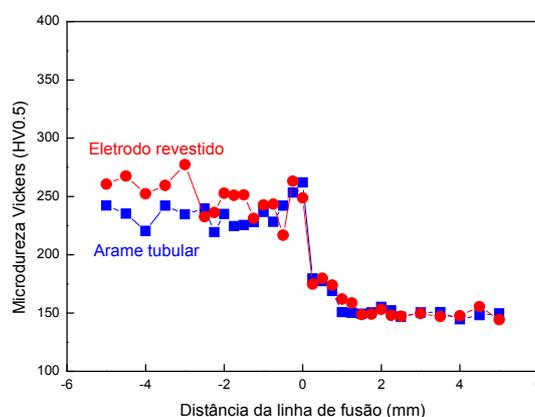


**Figura 9.** Detalhe da fase formada e mapeamento químico por EDS.

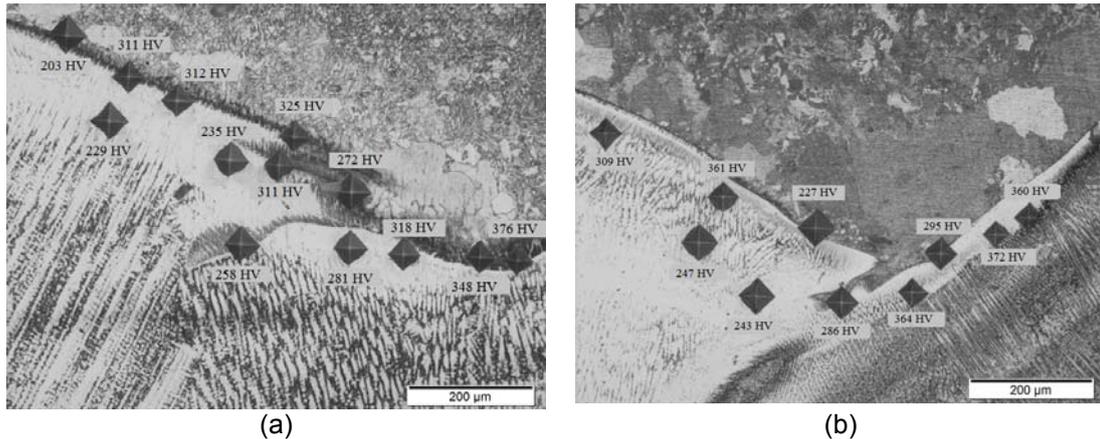


**Figura 10:** Diagramas pseudo-binários para a região a cerca de 1,30 mm da linha de fusão para o revestimento depositado por: (a) eletrodo revestido; (b) arame tubular.

De acordo com a norma NACE MR 0175 [13] a microdureza no metal de base não deve ultrapassar 250 HV para que haja a qualificação do procedimento de soldagem para a deposição do revestimento. Durante os ensaios de microdureza nenhuma medida superior a esse valor foi encontrada para o metal de base. Quanto ao metal de solda e à zona parcialmente diluída, que é de grande interesse no estudo de revestimentos, a literatura relata valores em torno de 400 HV encontrados nessas regiões [4]. O perfil de microdureza das amostras estudadas pode ser visto na Figura 11. Os maiores valores encontrados se referem às zonas parcialmente diluídas, indicando a grande influência dessas regiões nas amostras. No entanto, no presente trabalho o perfil de microdureza não apresentou valores próximos aos de 400 HV indicando que um possível revenimento da martensita presente pode ter ocorrido devido aos diversos ciclos térmicos de soldagem. Novas medições foram realizadas na região próxima à interface para avaliar a microdureza da zona parcialmente diluída e os valores encontrados estão apresentados na Figura 12. Altos valores de microdureza próximos de 400 HV indicam uma região dura e frágil, onde é possível haver a formação de uma estrutura prejudicial ao revestimento. É possível perceber que, no geral, os valores de microdureza são bastante próximos para as duas amostras.



**Figura 11.** Resultados de microdureza dos revestimentos.

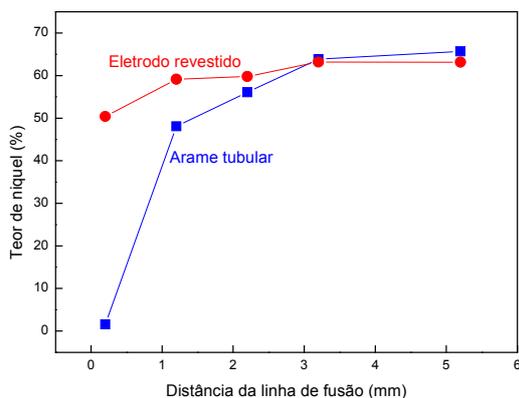


**Figura 12.** Resultados de microdureza da interface dos revestimentos. (a) arame tubular (b) eletrodo revestido.

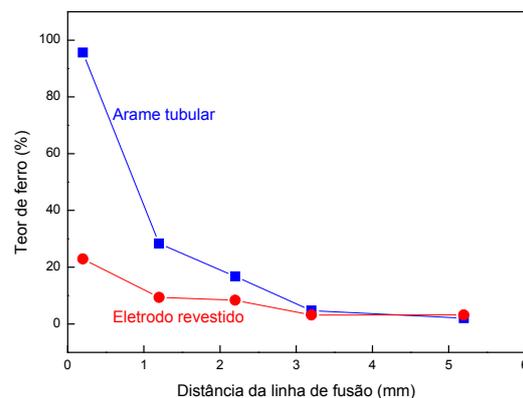
Outro importante ponto que deve ser avaliado no caso de revestimentos é o teor de ferro na superfície. Com base na norma ISO 10423 [14] o teor de ferro na superfície não deve ultrapassar 5% para garantir a qualidade do revestimento. Nas Figuras 13 e 14 é possível ver o comportamento do ferro e do níquel, principais elementos do substrato e do revestimento, respectivamente.

É possível observar que conforme há o distanciamento da linha de fusão em direção à superfície do revestimento o teor de ferro cai e o teor de níquel sobe, até atingir a composição final do metal de solda. Para a soldagem com arame tubular o teor final de ferro na última camada é de 2,08% e, para a soldagem com eletrodo revestido o teor é de 3,32%. Essa mudança de composição química ao longo do revestimento se dá devido à diluição intrínseca ao processo de soldagem e ao aporte térmico envolvido no processo. Uma menor diluição está associada a valores de corrente e energia baixos e velocidades mais elevadas [4]. Uma baixa diluição é interessante para revestimentos por soldagem, pois indica que a composição final do revestimento se estabiliza de maneira mais rápida, ou seja, em uma menor espessura, tendo assim menos carbono e ferro em sua composição.

Os resultados para os ensaios de corrosão podem ser vistos na Tabela 3.



**Figura 13.** Diluição de níquel ao longo do revestimento.



**Figura 14.** Diluição de ferro ao longo do revestimento

**Tabela 3.** Resultados dos ensaios de corrosão.

Amostra/ Processo	Pites	Perda de Massa (g/m <sup>2</sup> )
Arame Tubular	Não	0,35
Eletrodo Revestido	Não	2,09
Critério de aceitação	Não	<4,00

De acordo com a norma NORSOK M 601 [9] a perda de massa durante o ensaio de corrosão deve ser menor que 4,0 g/m<sup>2</sup>. Sendo assim, ambos os processos se mostram qualificados para a deposição dos revestimentos. A ausência de pites reforça a adequação dos procedimentos. Tendo a amostra soldada pelo processo arame tubular apresentado menor perda de massa no ensaio de corrosão e menor teor de ferro na superfície do revestimento, pode-se inferir que esse processo apresenta vantagens na execução dos revestimentos, devido à associação de propriedades obtidas com a maior produtividade propiciada pelo mesmo. No entanto, deve-se ressaltar que o processo eletrodo revestido também propiciou resultados satisfatórios no aspecto de corrosão, o que também o qualifica para execução dos revestimentos e para operações de reparo, onde a versatilidade deste processo pode ser um diferencial na escolha.

#### 4 CONCLUSÃO

Do exposto no transcurso do presente trabalho, pode-se concluir que:

- Uma região de diluição foi encontrada em ambas as amostras, porém a composição química do revestimento se estabilizou a aproximadamente 3 mm da linha de fusão, espessura mínima para o revestimento;
- Para o depósito realizado por arame tubular, notou-se a formação de fase de Laves, induzida pelo maior teor de Fe diluído no revestimento. A formação da mesma parece não apresentar grande influência sobre as propriedades do revestimento e;
- Tanto a soldagem por arame tubular quanto por eletrodo revestido apresentaram resultados satisfatórios em todas as análises realizadas, permitindo a qualificação de procedimentos de soldagem de acordo com as normas aplicáveis.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem às seguintes Instituições pelo apoio prestado na execução do presente trabalho: CEFET/RJ, PETROBRAS, UFRJ, CNPq e FINEP.

#### REFERÊNCIAS

- Omar, A. A.; Effects of Welding Parameters on Hard Zones Formation at Dissimilar Metal Welds. *Welding Journal*, Miami, 77, n. 2, p.86-93, Feb. 1998.
- Joining. *Special Metals Corporation*, SMC-055. 2003.
- Giraldo, C. P. S.; Precipitação de Fases Intermetálicas na Zona Afetada pelo Calor de Temperatura Baixa (ZACTB) na Soldagem Multipasse de Aços Inoxidáveis Duplex, Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2001.
- Kejelin, N. Z.; Influência dos Parâmetros de Soldagem na Formação de Zonas Parcialmente Diluídas em Soldas de Metais Dissimilares; Dissertação M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2006.

- 5 Campos, P. T.; Caracterização Mecânica e Microestrutural de Juntas Soldadas Pelos Processos MIG/MAG (GMAW) e Arame Tubular (FCAW); Dissertação M.Sc., Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, PR, Brasil, 2005.
- 6 Madalena, F. C. A.; Jorge, J. C. F.; Souza, L. F. G.; Costa, H. R. M; Cabral, T. B.; Estudos de propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável superaustenítico AISI 904L utilizado como revestimento interno de vasos de pressão fabricados em aço carbono ASTM-A-516 grau 70; 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Penedo, Itatiaia, RJ, Brasil, 20-24 Maio 2013.
- 7 ASME Boilers and Vessels Code, Section IX, Qualification Standard for welding and Brazing Procedures, Welders, Brazes, and Welding and Brazing Operators, July 1, 2000.
- 8 ASTM G48, Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution, 2009.
- 9 Norsok M-601; Welding and Inspection of Piping, Rev. 4, 2004.
- 10 Silva, C.S., Motta, H.C., Motta, M.F., Farias, J.P., Afonso, C.R.M., Ramirez, A.J.; New insight on the solidification path of an alloy 625 weld overlay, Journal of Materials Research and Technology, vol.2, 228-237.
- 11 DuPont, J.N., Solidification of an Alloy 625 Weld Overlay, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.27, 3612-3620.
- 12 Thermotech Ltd NI-DATA Nickel Superalloys database version 8, (Acessado em 14 de março de 2015);
- 13 NACE MR 0175; Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H<sub>2</sub>S-containing environments in oil and gas production; Part 2: Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons, 2009.
- 14 ISO 10423, Petroleum and Natural Gas Industries—Drilling and Production Equipment - Wellhead and Christmas Tree Equipment; 2011.