

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS INTERNOS EM TUBO EMPREGADO NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS

Gabrielly Santana Cardoso¹; Divanira Ferreira Maia²; Davi Misael Felix Cavalcante³; Marcos Mesquita da Silva⁴

¹Discente do curso Técnico de Petróleo e Gás – IFPB – Campus Campina Grande. email: gbriellysc@gmail.com

²Docente do curso Técnico de Petróleo e Gás – IFPB – Campus Campina Grande. email: divanira.maia@ifpb.edu.br,

³Discente do curso Técnico de Petróleo e Gás – IFPB – Campus Campina Grande. email: davimisaelfc.2@gmail.com,

⁴Docente do curso Técnico de Petróleo e Gás – IFPB – Campus Campina Grande. email: marcos_m_silva@yahoo.com.br

Resumo: A Soldagem é o processo de união de materiais, particularmente os metais, mais importante do ponto de vista industrial sendo extensivamente utilizada na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. Este artigo teve como objetivo estudar a influência dos parâmetros de soldagem nos aspectos metalúrgicos de revestimentos de liga de níquel aplicados internamente a um tubo de aço API 5L Gr. B. Para isso, foram estabelecidos parâmetros de soldagem como por exemplo corrente (A), voltagem (volts), velocidade (m/min e cm/min) e DBCP (distância bico contato-peça), possibilitando a obtenção de três revestimentos internos à tubulação através do processo de soldagem ao arco submerso (SAW), RT1, RT2 e RT3. Além disso, foi realizado a avaliação metalúrgica dos revestimentos através de técnicas tais como microscopia ótica, microscopia eletrônica, edx e ensaios de corrosão (a partir da técnica de Espectroscopia Impedância Eletroquímica-EIE). Para a quantificação de fases secundárias, dois métodos foram utilizados: método das malhas e métodos das áreas. Os resultados indicaram que a diluição e o teor de Fe dos revestimentos aumentaram quando a corrente (A) foi incrementada. Além disso, a resistência à corrosão diminuiu quando o teor de Fe foi maior. A quantificação das fases secundárias, através dos métodos das áreas, indicou que o revestimento (RT3) – aplicado com o menor nível de corrente e diluição –, apresentou fases em menores quantidades e menores dimensões. Assim, o revestimento RT3 foi o melhor revestimento aplicado internamente ao tubo, já que o mesmo apresentou o menor teor de Fe, a menor diluição, maior resistência à corrosão e menores quantidades de fases secundárias ricas em molibdênio e tungstênio.

Palavras-chave: Soldagem, Liga de Ni, Resistência à corrosão.

Introdução

A Soldagem é atualmente o principal processo de fabricação usado na união permanente de peças metálicas (MARQUES, et al., 2009). Esse processo vem sendo bastante usado na fabricação de plataformas onshore e offshore, navios petroleiros, tanques de armazenamento, vasos de pressão, reatores químicos, óleo/gasodutos, etc. Segundo CUNHA et al. e BATISTA et al., uma aplicação bastante interessante da soldagem é a aplicação de revestimentos de ligas nobres em tubulações de aço estrutural para a proteção contra corrosão interna. No entanto, vários tipos de processos de soldagem podem ser empregados, além de uma diversidade de parâmetros que podem ser empregados.

Por exemplo, o processo de soldagem SAW tem como grande vantagem a sua elevada taxa de deposição. Para amenizar os impactos metalúrgicos inerentes ao processo, podem-se lançar mão de técnicas que reduzam a energia de soldagem tendo assim menores distorções e penetração. Para isso é possível variar parâmetros de soldagem tais como velocidade de

soldagem, velocidade alimentação de arame, corrente, tensão, polaridade, tipo de fluxo, temperatura de pré-aquecimento, temperatura de interpasso, distância do bico de contato à peça, distância do bocal à peça, ângulo de inclinação da tocha, entre outros. O processo SAW geralmente é empregado com arames de diâmetros acima de 2,4mm ou fitas, como metal de adição (MA) quando da soldagem similar (composição química do metal de base é similar à do MA). Na literatura existem várias sugestões de parâmetros de soldagem para essas condições a fim de se desempenhar uma excelente soldagem. No entanto, existe um problema de ausência de experiência (dados consolidados) na literatura quando se utiliza MA com diâmetro menor que 2,4mm e a soldagem é dissimilar (composição química do Metal de Base muito diferente daquela do MA). A soldagem SAW de superliga de níquel, como revestimentos anticorrosivos dentro de tubos de aço carbono, se constitui um exemplo de soldagem dissimilar.

Os revestimentos contra corrosão devem apresentar uma composição específica para o que se destinam, como é o caso da deposição por soldagem de ligas de níquel sobre um substrato de aço C-Mn. Neste caso a composição química do revestimento deve se aproximar ao máximo da composição do MA, ou seja, deve-se manter o mínimo de diluição do ferro no substrato. Quanto menor a diluição, menor a probabilidade de formação de microestruturas frágeis e susceptíveis à corrosão. No entanto, atualmente, existem MA bem projetados – tais como as ligas Ni-Cr-Mo – capazes de gerar um metal de solda que suporte níveis de diluição de um aço carbono cada vez maiores, sem grandes impactos metalúrgicos (trincas a quente, etc). Porém, apesar da boa qualidade destes MA, a resistência à corrosão dos metais de solda, obtidos a partir desses MA, sob condições severas em serviço pode tornar-se dependente dos parâmetros de soldagem que governam a diluição e os fenômenos que ocorrem durante o ciclo térmico e solidificação da poça de fusão (microsegregações, precipitação de fases secundárias, zonas parcialmente diluídas, volatilização de elementos de liga na poça de fusão).

Logo, é necessário o estabelecimento de parâmetros de soldagem adequados a fim de que solda (resultado da soldagem) não apresente problemas de natureza metalúrgica e/ou mecânica e a resistência à corrosão do revestimento seja garantida.

Metodologia

Inicialmente foram realizados levantamentos bibliográficos sobre os seguintes temas: soldagem de revestimento, revestimentos nobres, ligas de níquel, processo de soldagem SAW, metalurgia da soldagem das ligas de níquel.

Em seguida, houve a preparação dos corpos de prova para revestimento por soldagem, ou seja, foram avaliadas as dimensões e formas mais adequadas para os corpos de prova de aço C-Mn de modo a obter resultados mais representativos. Decidiu-se, portanto, realizar soldagens de revestimento dentro de um segmento de tubo, com o mesmo em rotação.

Posteriormente, é realizado as soldagens de revestimento, utilizando-se como material de adição o arame eletrodo de liga de níquel, Hastelloy C-276 (ERNiCrMo-4) de 1,12mm (0,044 polegadas) de diâmetro. A composição química do Hastelloy-C276 é de carbono, manganês, silício, cromo, molibdênio, níquel, cobalto, vanádio e tungstênio. Como substrato (metal de base) foi utilizado um tubo de aço ARBL de especificação API 5L Gr.B enviado pelo CENPES. As dimensões do tubo são: 290 mm de diâmetro interno e 18,0 mm de espessura da parede. carbono, manganês, silício, fosforo, enxofre, cromo, molibdênio e níquel.

Neste trabalho estudou-se a influência dos parâmetros de soldagem na geometria de cordões de solda visando a aplicação de revestimento interno ao tubo para transporte de petróleo. Para isso, empregou-se o processo de soldagem por arco submerso (SAW), mecanizado com eletrodo (ERNiCrMo-4) especificado acima e um fluxo neutro, básico e aglomerado para soldagem SAW, especialmente para soldagem de topo e soldagem de revestimento com arames de ligas de níquel (Ni). O equipamento de soldagem utilizado é do modelo DIGI Plus A7 800 fabricado pela IMC Soldagem, com fonte do tipo corrente contínua com capacidade de corrente máxima de 800 A.

Antes de realizar as soldagens de revestimento internas, a tocha de soldagem passou por uma adaptação. Para isso, algumas peças foram usinadas. Então, foi possível obter um maior avanço desta tocha no interior do tubo. O revestimento RT1, foi obtido com uma velocidade de alimentação $V_a=7,0$ m/min, voltagem $U=38$ volts, velocidade de soldagem $V_s=28$ cm/min e uma DBCP=20mm. Os parâmetros de soldagem para o RT2 foram de $V_a=7,0$ m/min, $U=37$ volts, $V_s=28$ cm/min e uma DBCP=28mm. E o RT3 $V_a=7,5$ m/min, $U=40$ volts, $V_s=28$ cm/min e uma DBCP=30mm

A partir das soldagens da nova configuração da tocha foram obtidos três revestimentos internos à tubulação. Todos os revestimentos foram compostos de três passes, e realizados de acordo com técnicas. Logo após foi realizada uma avaliação metalúrgica das superfícies revestidas pelo processo arco submerso, realizou-se a caracterização dos corpos de prova revestidos com liga de níquel, considerando tanto a análise da ZTA quanto do metal de solda (incluindo as interfaces) e os níveis de diluição e o teor de Fe na superfície do revestimento

através de microscopia ótica e eletrônica. Os testes de composição química (teor de Fe) foram realizados através da técnica de caracterização EDX. Estes testes foram conduzidos com um colimador de diâmetro 3mm e atmosfera à vácuo (30Pa).

Finalmente, os resultados da resistência à corrosão de cada revestimento foram avaliados com base nas curvas de polarização e nas curvas obtidas a partir da técnica de Espectroscopia Impedância Eletroquímica (EIE).

Resultados e discussão

Para começo das determinações dos parâmetros, começamos pela Figura 1, que apresenta as seções transversais para cada revestimento.

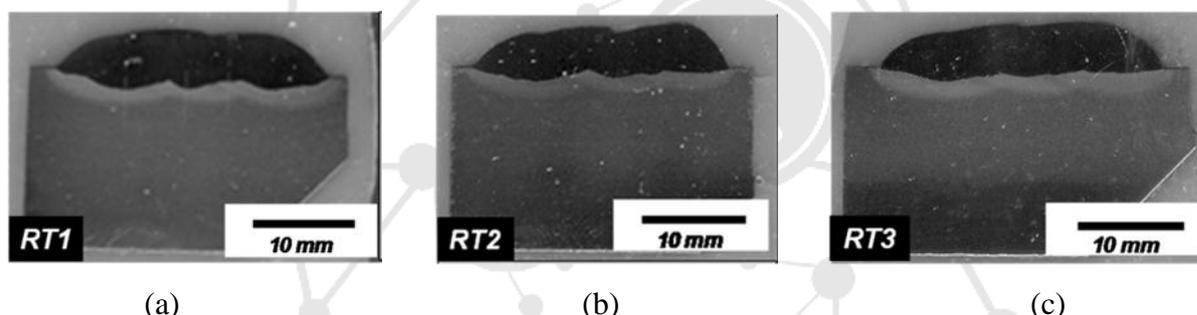


Figura 1: Seções transversais dos revestimentos obtidos através de soldagens circunferenciais RT1, RT2 e RT3.

A partir da Figura 2a é possível notar a influência da DBCP (distância bico contato-peça) nos valores de diluição. Isto é, quanto maior for a DBCP menor foi a diluição.

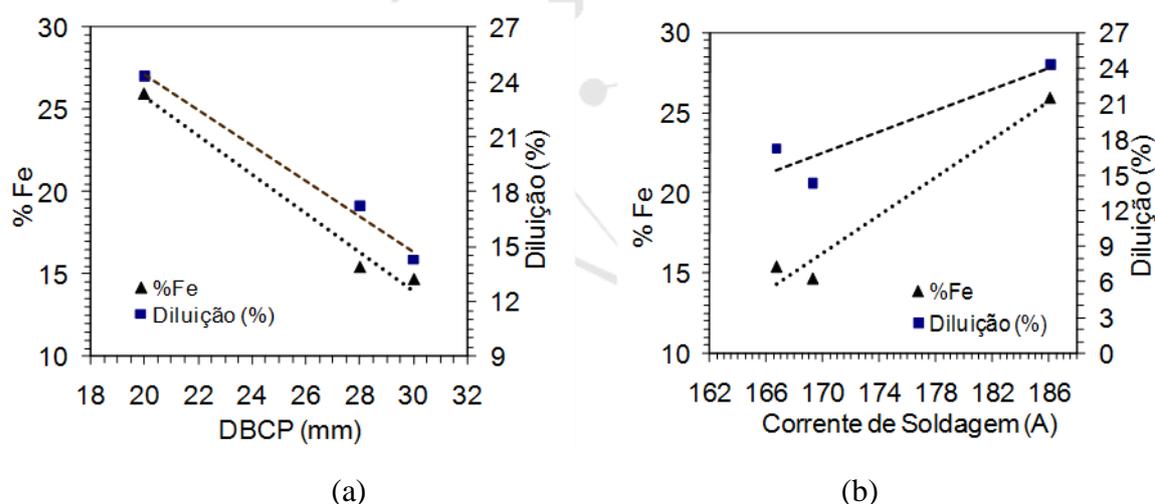


Figura 2: Dependência da diluição e do teor de Fe da (A) DBCP e da (B) Corrente soldagem

Esta influência da DBCP também pode ser visualizada através da Figura 2b. Este fenômeno ocorre devido a corrente de soldagem diminuir quando a DBCP é incrementada.

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 $T_V / (\eta_a \cdot U \cdot I)$, 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 a volume de metal depositado por unidade de energia. A Figura 3 mostra a influência desta razão sobre os níveis de diluição obtidos no corrente trabalho.

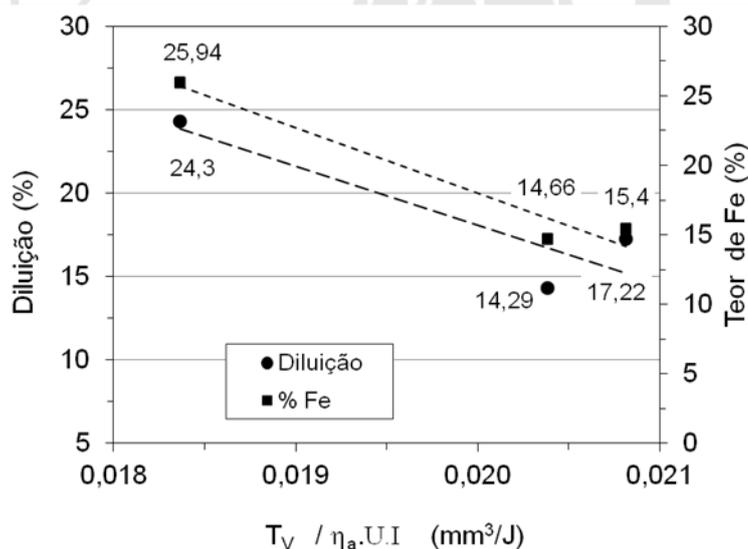


Figura 3: Níveis de diluição em função da razão entre a taxa de alimentação volumétrica do metal de adição (T_V) e a energia do arco ($\eta_a \cdot U \cdot I$) para os revestimentos internos.

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).

A Tabela 1 apresenta a composição química dos revestimentos obtidos. Estas composições foram obtidas numa área, na superfície do revestimento, correspondente a um círculo de 3 mm de diâmetro.

	RT1	RT2	RT3
Ni	46,23%	50,99%	52,72%
Fe	24,30%	16,38%	15,30%
Mo	13,86%	15,41%	15,46%
Cr	11,27%	12,85%	12,66%
W	3,27%	2,89%	2,54%
Mn	0,94%	1,28%	1,14%
V	0,33%	0,18%	0,15%

Tabela 1: Composição química numa área de 3 mm de diâmetro na superfície dos revestimentos internos.

Nota-se que quando o teor de Fe aumenta no revestimento, devido ao aumento da diluição, há uma redução nos teores de Ni, Mo e Cr. Estes elementos são considerados relevantes para proporcionar uma boa resistência à corrosão de uma liga de Ni. Observa-se também que o W sofre uma leve alteração. Outra informação que se pode obter destas composições químicas é que houve uma redução mais acentuada nos teores de Cr nos revestimentos, quando comparados com os teores de Mo, já que os mesmos possuem teores equivalentes no metal de adição, isto é, 15,30%Cr e 15,30%Mo. Este fenômeno pode ser devido a uma possível evaporação de óxidos de Cr expostos ao arco elétrico. Menores teores de Ni, Cr, Mo e W em ligas de níquel podem reduzir a resistência à corrosão destas ligas.

A partir da Tabela 1 observa-se que o revestimento RT3 apresentou os maiores níveis de Ni, Mo e Cr, e menores níveis de teor de ferro.

A Figura 4 mostra as curvas obtidas a partir dos testes EIE, das quais é possível obter os valores de Rp dos revestimentos. Por este gráfico pode-se confirmar nitidamente a diferença da resistência à polarização nos 3 revestimentos, onde é possível afirmar que o revestimento RT3 apresentou a maior resistência a polarização (71,54 % em relação ao Rp da amostra RT1). Este fato pode ser facilmente explicado pela taxa de diluição do cordão e o percentual de Fe na superfície, a 3 mm do substrato, confirmando assim o melhor comportamento deste revestimento com relação à resistência à corrosão e conseqüentemente a influência significativa das variáveis analisadas. As figuras 5, 6(a) e 6(b) apresentam as microestruturas dos revestimentos RT1, RT2 e RT3, respectivamente.

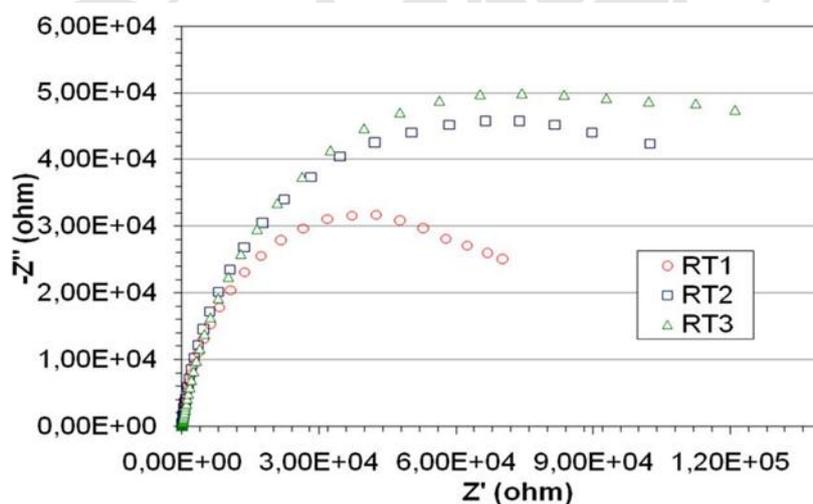


Figura 4: Resistência à polarização (Rp) dos revestimentos RT1, RT2 e RT3.

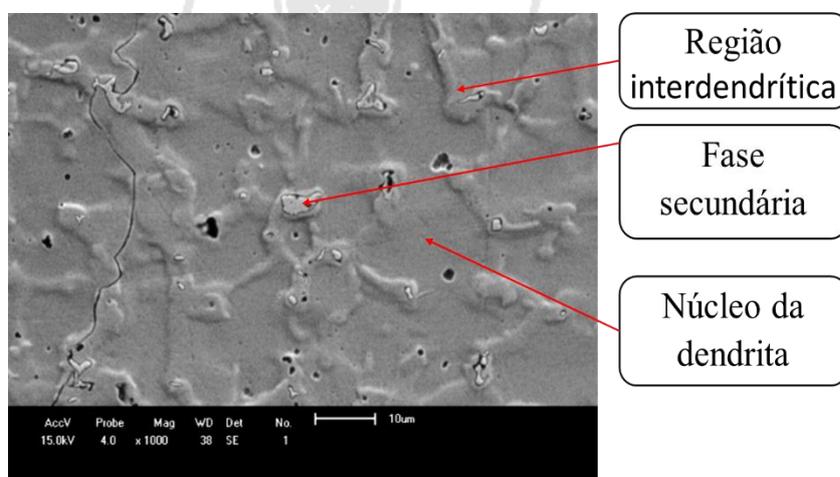
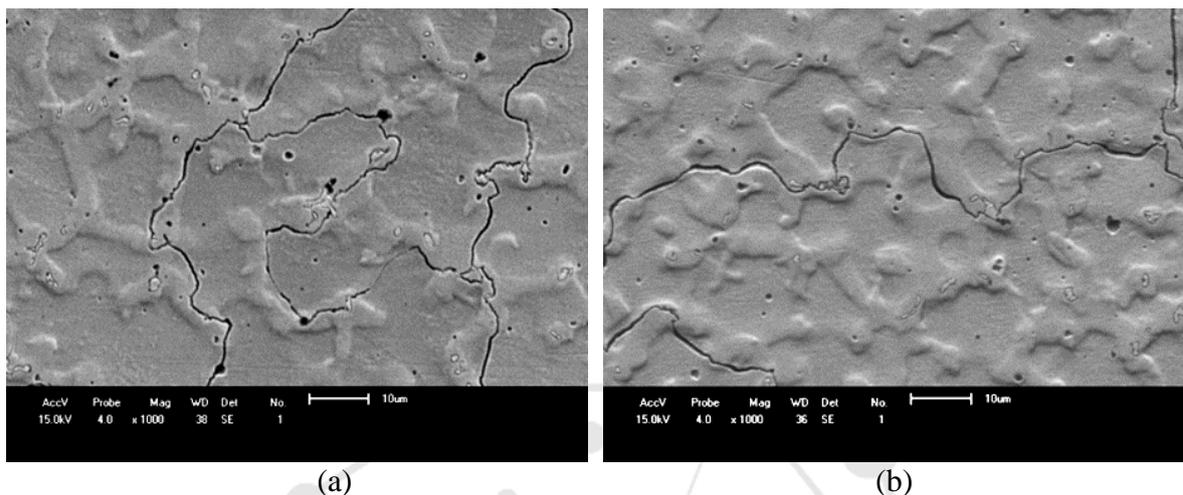


Figura 5: Revestimento RT1 (1000x).



(a) (b)
Figura 6: (a) Revestimento RT2 (1000x) e (b) revestimento RT3 (1000x).

O primeiro procedimento para a quantificação de fase foi realizado conforme o procedimento da Figura 7, empregando uma malha com 1161 nós, por conseguinte, em todas as outras microestruturas (cruzamento de uma linha horizontal com uma vertical). O resultado do percentual de fases se deu pela divisão entre o total de nós que continha fases secundárias dividido pelo total de nós da malha (Tabela 2).

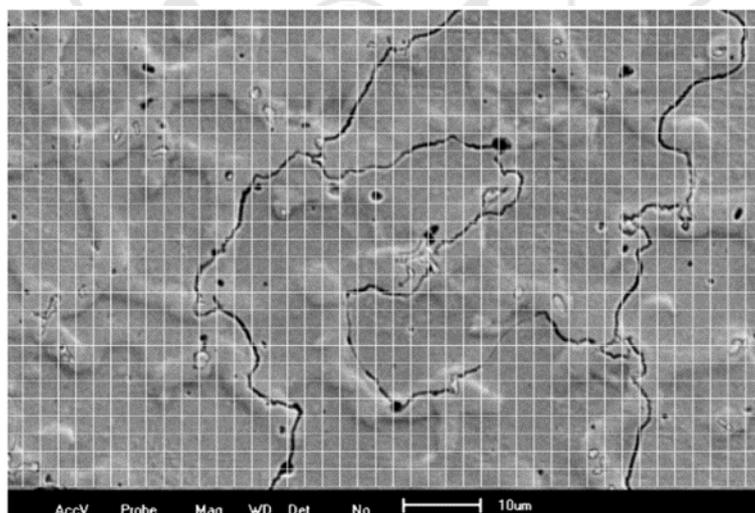


Figura 7: exemplo da quantificação de fases pelo método da malha no RT1.

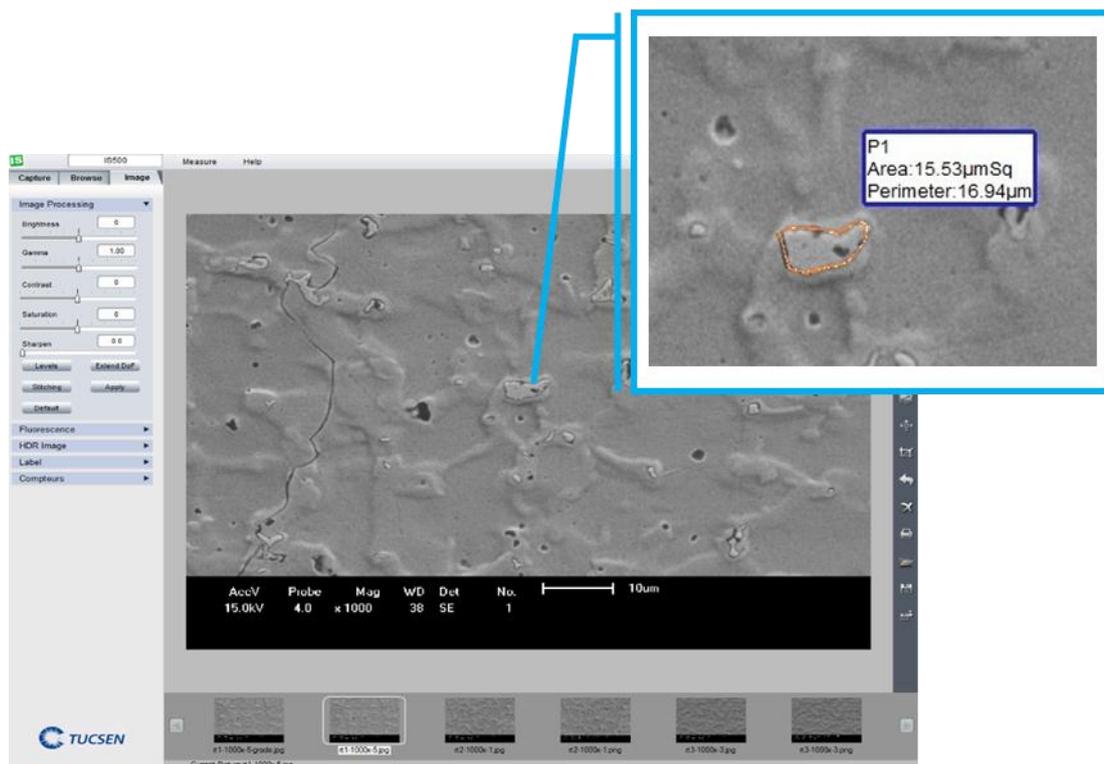


Figura 8: software ISCapture - Tucsen câmera.

Porém, outro método adotado para a quantificação de fases foi através do software ISCapture (Figura 9), pelo método das áreas, mais confiável e preciso, proporcionou uma melhor contagem, pois o mesmo oferece a medida das áreas na sua própria forma. O percentual de fases secundárias, que se deu através da soma das medidas das áreas das fases secundárias, essa soma é dividida sobre a área total da microestrutura do revestimento (Tabela 2).

Revestimento	% Fe	Percentual (método da malha)	Percentual (método das áreas)
RT1	25,94	5,43%	2,86%
RT2	15,40	4,48%	1,99%
RT3	14,67	4,22%	1,58%

Tabela 2: Quantidade de fases secundárias ricas em Mo para os revestimentos RT1, RT2 e RT3.

Nota-se que no revestimento RT1 além de apresentar um maior teor de Fe, os dois métodos de quantificação (malha e áreas) indicaram que este mesmo revestimento apresentou

uma maior quantidade de fases secundárias ricas em Mo (Tabela 2). Isto pode indicar que o nível de microsegregação no revestimento RT1 foi maior quando comparado com os demais revestimentos aplicados através das soldagens internas ao duto.

Por outro lado, o revestimento RT3 (Figura 6b) foi o que apresentou a menor quantidade de fases secundárias (ricas em Mo) nos espaços interdendríticos, embora a microestrutura deste revestimento seja quase equivalente à do revestimento RT2 (Figura 6a). Além disso, comparando a Figura 5 com a Figura 6a e a Figura 6b, observa-se que o revestimento RT3 apresentou uma menor área de regiões de núcleos dendríticos corroídas pelo ataque químico.

Fases	RT1	RT2	RT3
>8 μm^2	6	1	0
>5 μm^2	10	5	1
>2 μm^2	25	16	12

Tabela 3: quantidade de fases para cada revestimento em função de dimensões.

Nota-se que no revestimento RT3 além de apresentar uma menor quantidade de fases secundárias (Tabela 2), também apresenta fases com menores dimensões (Tabela 3). Ou seja, a Tabela 3 mostra que o revestimento RT3 não apresentou nenhuma fase com dimensão maior que 8 μm^2 . Além disso, foi o revestimento que apresentou a menor quantidade de fases com dimensões maiores que com 5 μm^2 . Um comportamento análogo ocorreu para as fases maiores do que 2 μm^2 . Por outro lado, o revestimento RT1 apresentou fases secundárias com maiores dimensões.

Diante do que foi exposto, verifica-se que o revestimento RT3 foi o que apresentou a melhor resistência à corrosão, já que o mesmo apresentou menores valores de diluição e teor de Fe associados menores quantidades de fases secundárias ricas em Mo e W.

Quando o teor de Fe aumenta no metal de solda austenítico, implica no aumento do potencial de segregação de elementos tais como Mo. Isto é atribuído à diminuição da solubilidade de Mo na austenita quando o teor de Fe aumenta. Desde que o teor de Fe do metal de solda é controlado pela diluição – que por sua vez é controlada pelas variáveis do processo de soldagem – os parâmetros de soldagem influenciam indiretamente o potencial de segregação de Mo (BANOVIC et al., 2002).

Conclusão

Para os revestimentos com três passes aplicados internamente ao duto, com a tocha estática e o duto girando, foi possível chegar às seguintes conclusões de que, um incremento de 8 mm na DBCP proporcionou um decréscimo em torno de 20 A na corrente de soldagem, o que por sua vez reduziu a diluição de 24,30% para 17,22%. 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, assim como também, um aumento de 50 % na DBCP proporcionou um aumento de 71,54 % na resistência à polarização do revestimento. Além disso, dos dois métodos para a quantificação de fases – método da malha e das áreas – o método das áreas proporcionou melhores resultados, já que o mesmo além de quantificar as fases também revelou informações sobre as dimensões (em μm^2) das mesmas. Ou seja, o RT3 apresentou menores quantidades (com as menores dimensões) de fases secundárias ricas em molibdênio e tungstênio. Por fim, o revestimento RT3 aplicado com $V_a = 7,5$ m/min, DBCP = 30 mm, $V_s = 28$ cm/min, $I_M = 169,3$ A e $U_M = 40,6$ volts apresentou a melhor resistência à corrosão quando comparado com todos os revestimentos, já que apresentou os menores valores de diluição, teor de Fe e menores quantidades de fases secundárias.

Referencias

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.

MARQUES, Paulo; MODENESI, Paulo; BRACARENSE, Alexandre. **Soldagem: fundamentos e tecnologia.** 3º Edição. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 363p.

CUNHA, M. C. D.; MELO, R. H. F.; BATISTA, V. R.; SILVA, M. M.; MACIEL, T. M. **Avaliação dos parâmetros de Soldagem sobre Revestimentos de Liga de Níquel em Duto de Aço API 5L Gr B.** XXXVII Congresso Nacional de Soldagem – Consolda. Natal-RN, 2011.

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.** Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia dos Materiais – CBECiMat. Campos do Jordão-SP, 2010.

