



AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS COM LIGAS DE NÍQUEL UTILIZADOS NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS¹

*Francisco de Assis Souza Neto²
Fernando da Silva Araújo³
Theophilo Moura Maciel⁴
Marco Antonio dos Santos⁴*

Resumo

Este trabalho teve por objetivo avaliar a influência dos parâmetros de soldagem, sobre a microdureza, a microestrutura e o nível de diluição de revestimento de ligas à base de níquel aplicados em chapas de aço API 5L Gr B utilizando processo MIG. Como consumível foi utilizado o arame ER NiCrMo-3 (Inconel 625) protegido com Ar (Argônio) puro. Foram aplicados 3 passes de revestimento, sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 423 K (150 °C), tensão de soldagem de 22 e 24 V e velocidade de alimentação do arame de 5 e 7 m/s resultando em variações de corrente de 123 a 150 A. Os resultados indicaram a presença de regiões na interface do revestimento com o substrato com valores de dureza superiores a 300 HV e diluições variando de 5,2 a 12,28%

Palavras-chave: Inconel 625; Revestimento; Microdureza; Microestrutura.

EVALUATION OF WELD PARAMETERS FOR CLADDING APPLICATION WITH NICKEL ALLOY USED IN OIL AND GAS INDUSTRY

Abstract

The objective of this work was to evaluate the influence of welding parameters on microhardness, microstructure and dilution level of nickel-based alloys cladding deposited on API 5L Gr B steel using MIG process with AWS ER NiCrMo-3 (Inconel 625) wire and pure Ar (Argon) as consumable. For this welds without and with preheat 423 K (150 °C), 22 V and 24 V tension, 5 and 7 m/min wire feed speed resulting in welding current range from 123 to 150 A were done. The results indicated the presence of regions at the interface between the base and weld metal with microhardness values above 300 HV and dilutions varying from 5,2 to 12,8%.

Key words: Inconel 625; Cladding; Microhardness; Microstructure

¹ *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Aluno de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFCG.*

³ *Aluno de Graduação em Engenharia Mecânica - UFCG.*

⁴ *Engº Mecânico, Prof. Doutor, Deptº. de Engenharia Mecânica, UFCG.*

1 INTRODUÇÃO

O petróleo, devido a sua composição química e a presença de diversas impurezas, apresenta um elevado grau de corrosividade. O processo de corrosão, principalmente por corrosão naftênica, que ocorre no interior dos dutos, que transportam óleo ou gás, é um problema de relevância na indústria do petróleo e pode afetar de forma significativa a vida útil dos mesmos, causando aumento de custos de manutenção, interrupção da tubulação para a substituição de alguma parte da mesma e até vazamento das tubulações, causando danos irreparáveis ao meio ambiente.

Uma das soluções empregadas para a correção dos equipamentos degradados seria a utilização de revestimentos metálicos, os mais importantes são cladeamento, galvanização, revestimentos não-integrais diversos (*lining*) e os revestimentos por deposição de solda.^(1,2)

Na indústria de petróleo e gás o revestimento por deposição de solda pode ser aplicado em tubulações, vasos de pressão, reatores, tanques de armazenamento ou qualquer equipamento que requer proteção contra corrosão.^(3,4)

Há um interesse por soldagem de metal dissimilar em ambientes sulfurosos, pois estas juntas exibem pequenas zonas localizadas ao longo da linha de fusão que podem ter dureza acima de 400 HV. Estas zonas podem ser susceptíveis à fissuração por corrosão sob tensão. Lundin citado por Doody⁽⁵⁾ descreve as zonas duras como zonas enriquecidas de carbono que podem conter muitos constituintes tais como martensita, mas predominância de carbonetos. Essas zonas são muito finas, de camadas descontínuas, tipicamente de 0,025 mm.

Podem apresentar dezenas de microns de largura, diversas morfologias e composição química de baixa liga, ou seja, uma composição intermediária entre o metal de base (substrato) e o metal de solda.⁽⁴⁻⁸⁾ Devido a estas características, as ZPD tornam-se susceptíveis a ataques corrosivos por pitting, fragilização por hidrogênio e corrosão sob tensão.⁽⁶⁾

No revestimento de tubulações com ligas de Ni aplicados por soldagem, o surgimento destas zonas na interface e o nível de dureza na superfície do revestimento podem ser fortemente influenciados pelo nível de diluição que por sua vez dependerá dos parâmetros de soldagem. A NACE (*National Association of Corrosion Engineers*) MR0175 recomenda uma dureza máxima de 22 HRC (250 HV). Entretanto, não há limites de dureza definidos com relação às ZPDs devido sua microestrutura e elevada dureza.

Além da dureza, um fator importantíssimo e decisivo sobre a resistência à corrosão dos revestimentos aplicados por soldagem é o nível de diluição do substrato no revestimento já que isto implica diretamente no teor de Fe na superfície do revestimento e conseqüentemente na sua resistência à corrosão. Quanto menor a diluição, menor a probabilidade de formação de microestruturas frágeis e susceptíveis à corrosão.⁽⁹⁾ A norma ISO 10423,⁽¹⁰⁾ adotada pela Petrobras para as soldagens de revestimento em equipamentos com revestimentos metálicos, exige o teor de ferro máximo de 5% a 10%.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da variação dos parâmetros de soldagem sobre o nível de diluição, a presença de ZPDs e sobre os valores de dureza na interface e próximo à superfície de cordões de solda de Ligas de Ni (Inconel 625) aplicados por soldagem em aços ARBL utilizados em tubulações para transporte de petróleo e gás.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo utilizou-se para a confecção dos corpos de provas um segmento de duto de aço API 5L GR B de 323 mm de diâmetro e 18 mm de espessura fornecido pelo Cenpes-Petrobrás. Para a deposição das soldas foi utilizado o metal de adição ER NiCrMo-3 (Inconel 625) com diâmetro de 1,2 mm. As composições químicas destes materiais são mostradas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Composição Química (% em peso) nominal do metal de base⁽¹⁾

Materiais	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
API 5L GR B ⁽¹⁾	0,19	0,24	0,7	0,018	0,02	0,06	0,008	0,07

Tabela 2. Composição Química (% em peso) nominal do metal de adição⁽¹⁾

Materiais	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	Fe
ER NiCrMo-3 ⁽¹⁾	0,03	0,2	0,2	0,015	0,01	22,0	9,0	60,0	3,4	0,5

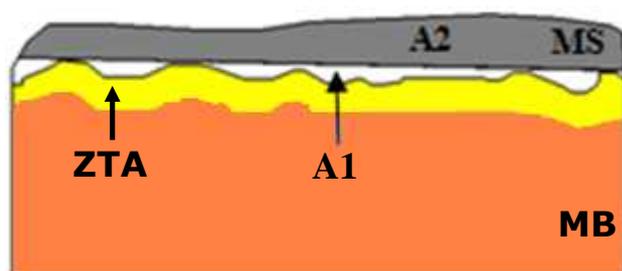
Foi utilizado o processo de soldagem *Metal Inert Gas* (MIG) com proteção de Argônio (100 %) cuja vazão foi de 20 L/min e polaridade inversa. Os revestimentos consistiram de três passes sobre o substrato de aço API 5L grau B. Para isso utilizou-se uma sobreposição dos passes de 50% em relação à largura do primeiro cordão tendo o cuidado de manter a temperatura de interpasse igual a temperatura de pré-aquecimento utilizada. A deposição foi realizada com tensões de 22 e 24 V, e velocidade de alimentação (V_a) de 5 e 7 m/min proporcionando energias de soldagem que variaram de 5,6 a 7,2 kJ/mm. Todos estes parâmetros foram utilizados para soldagem na condição sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 423 K (150 °C) (T_0). A nomenclatura dos corpos de prova e os valores dos parâmetros de soldagem são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Nomenclatura dos corpos de prova e parâmetros de soldagem utilizados

CP	T_0 (K)	Corrente (A)	Tensão (V)	V_a (m/min)	H (kJ/cm) $\eta=80\%$
22-5-C	423	123	22	5	5,6
22-7-C	423	150	22	7	5,8
24-5-C	423	123	24	5	6,0
24-7-C	423	150	24	7	6,0
22-5-S	300	123	22	5	6,3
22-7-S	300	145	22	7	6,4
24-5-S	300	123	24	5	7,2
24-7-S	300	150	24	7	6,5

Após o revestimento dos substratos realizou-se ensaio metalográfico (corte, lixamento, polimento e ataque químico “nital a 3%”) para se fazer o cálculo da diluição, ensaio de microdureza Vickers e em seguida microscopia óptica, em

espécimes de cada condição de soldagem. Para a determinação das diluições foram realizados cortes na seção transversal das amostras (Figura 1) e determinado o seu valor conforme a Equação 1.



$$D(\%) = \frac{A1}{A1 + A2} \quad (1)$$

Figura 1. Áreas para o cálculo da diluição.

Em seguida foi realizado o ensaio de microdureza Vickers ao longo de seis linhas verticais no revestimento, localizadas no ponto médio de cada passe e na região de interseção entre passes (Figura 2). Para este ensaio, utilizou-se a carga de 0,1 kgf aplicada por um tempo de 15 s e também uma carga de 0,025 kgf durante um tempo de 15 s para medir a dureza das Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD's), devido às suas reduzidas dimensões. As distâncias entre a linha de fusão, ZTA e MS foram de 0,04 e 0,1 mm, respectivamente. As distâncias entre as identações foram de 0,2 mm na ZTA e 0,4 mm para o Metal de Solda (MS) e Metal de Solda da superfície do revestimento (MS_{SR}).

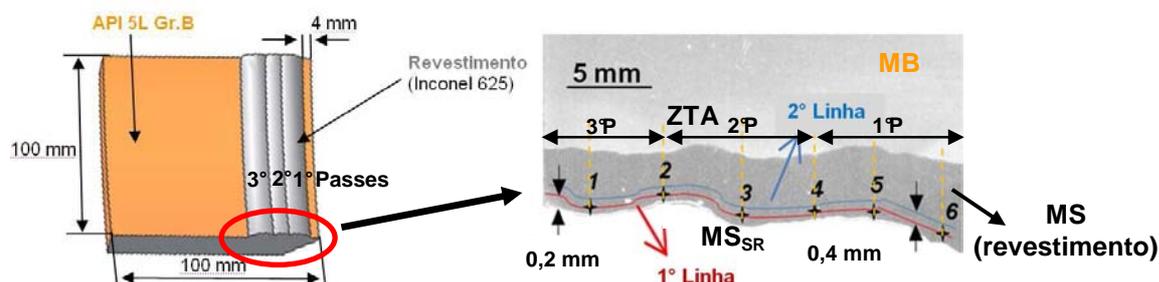


Figura 2. Corpo de prova revestido com Inconel 625 e ilustração das linhas de microdureza no revestimento.

3 RESULTADOS

Os gráficos da Figura 3 apresentam os valores da diluição em função das condições de pré-aquecimento (300 e 423K) e da velocidade do arame de 5 m/min e 7 m/min. Observa-se um efeito bastante significativo do pré-aquecimento de 423 K na diluição do substrato (Aço API 5L Gr B).

Os gráficos da Figura 4 apresentam os perfis de dureza ao longo da interface MS-ZTA, respectivamente, sem e com pré-aquecimento de 423 K (150°C) com tensão de 22 V e velocidade de alimentação do arame de 7 m/min. Nos gráficos está assinalado o nível exigido pela NACE para evitar riscos de corrosão.

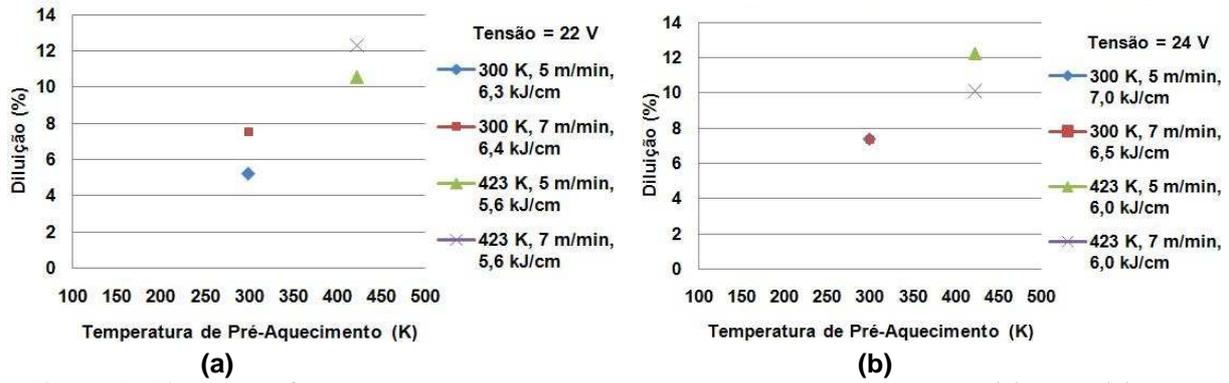


Figura 3. Efeito do pré-aquecimento e da velocidade do arame para a condição: (a) 22 V, (b) 24 V.

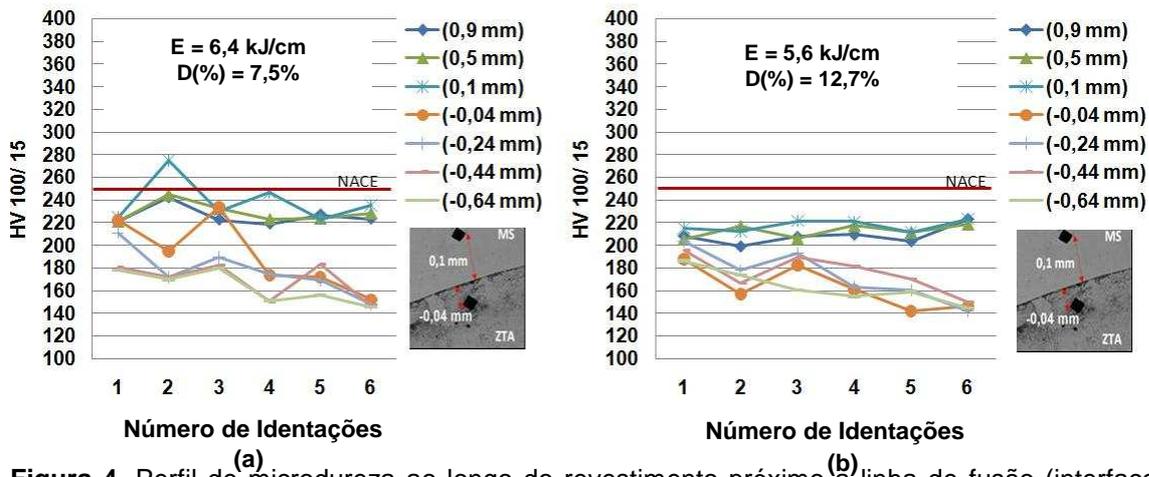
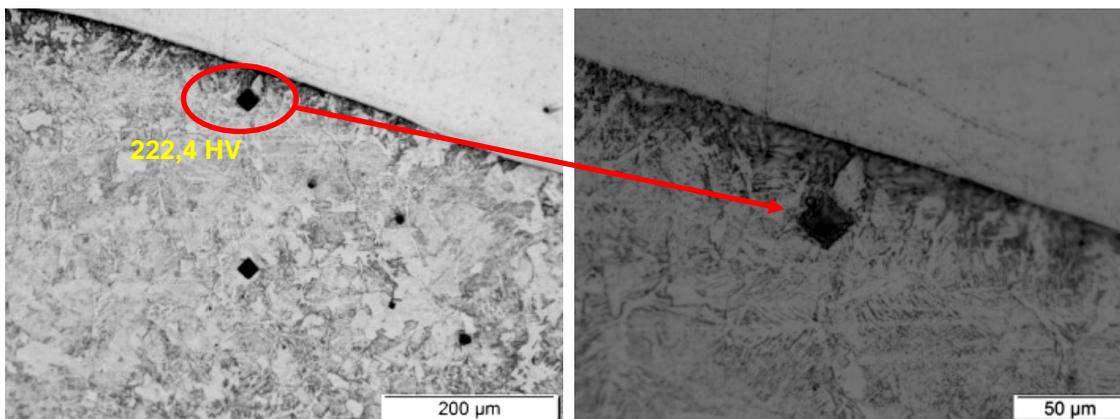


Figura 4. Perfil de microdureza ao longo do revestimento próximo à linha de fusão (interface) com tensão de 22 V, velocidade de alimentação de 7 m/mim. (a) Sem pré-aquecimento e (b) Com pré-aquecimento 423 K (150°C).

A Figura 5(a-c) apresenta às microestruturas obtidas para a condição com 22 V e 7 m/min, sem pré-aquecimento.



(a)

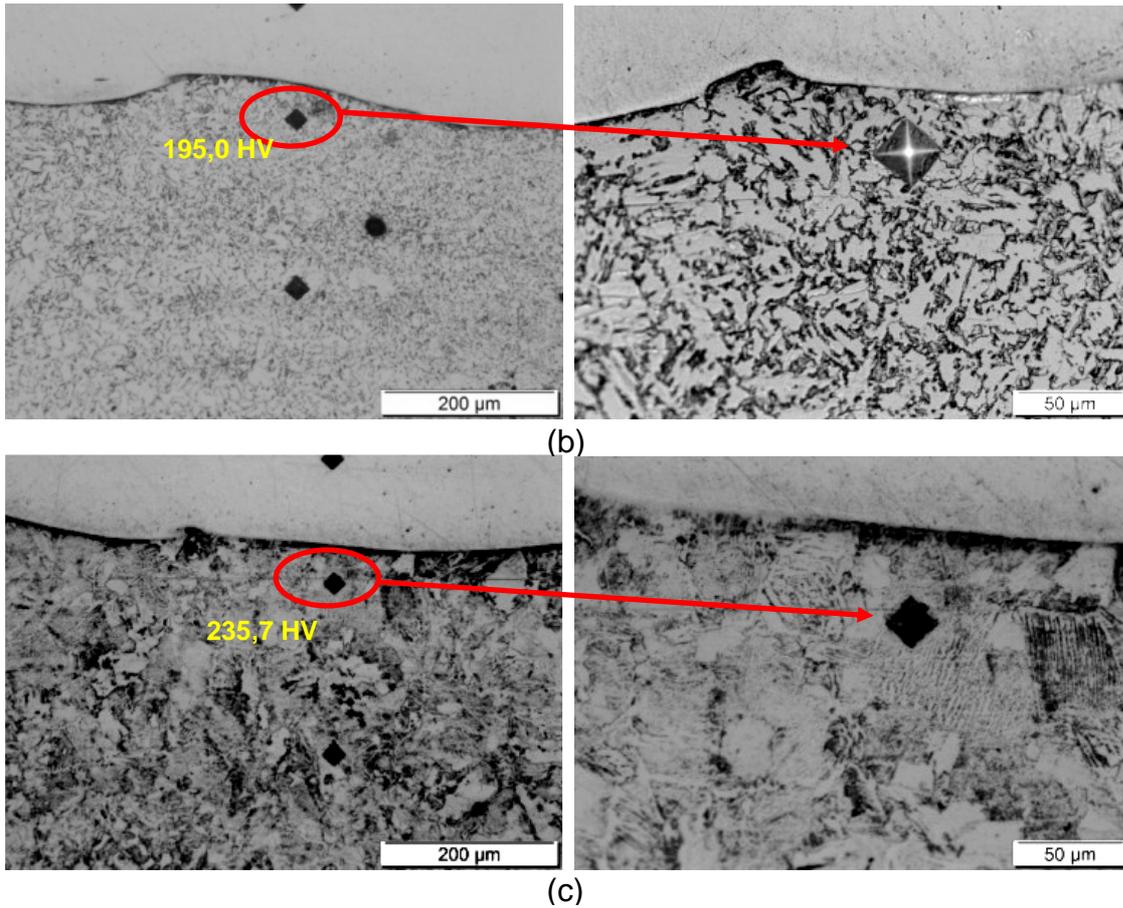


Figura 5. Microestrutura da ZTA na condição 22 V, 7 m/min e sem pré-aquecimento com indentação a 0,04 mm da linha de fusão com 6,4 kJ/cm. (a) Região do 3º passe do revestimento; (b) Interseção entre o 2º e 3º passe; (c) Região do 2º passe do revestimento.

Os gráficos da Figura 6 apresentam os perfis de dureza ao longo da interface MS-ZTA, respectivamente, sem e com pré-aquecimento de 423 K (150°C) com tensão de 24 V e velocidade de alimentação do arame de 7 m/min.

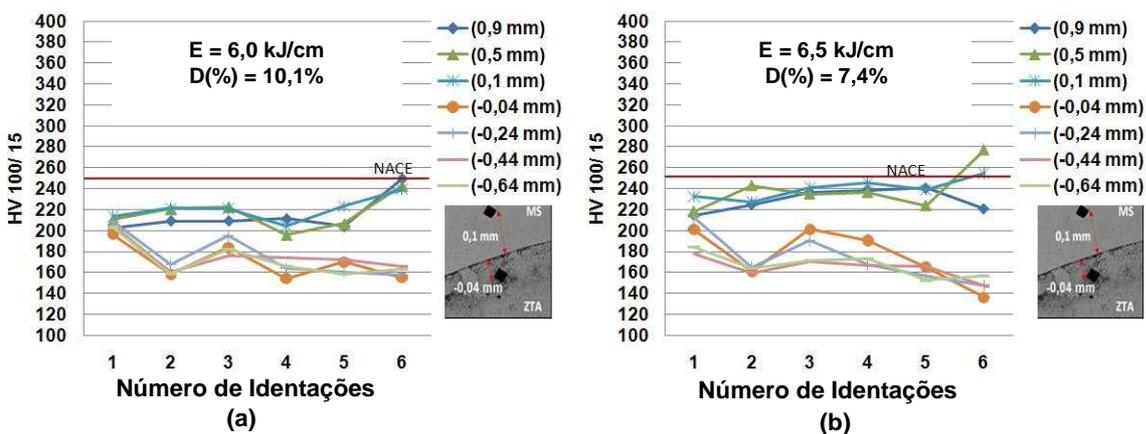


Figura 6. Perfil de microdureza ao longo do revestimento próximo a linha de fusão (interface) com tensão de 24 V, velocidade de alimentação de 7 m/min. (a) Com pré-aquecimento 423 K (150°C) e (b) Sem pré-aquecimento.

Observa-se nas Figuras 7 e 8 as microestruturas obtidas para as condições 24 V e 7 m/min sem e com pré-aquecimento de 423 K (150°C), respectivamente, mostrando assim morfologia acicular para elevados valores de dureza.

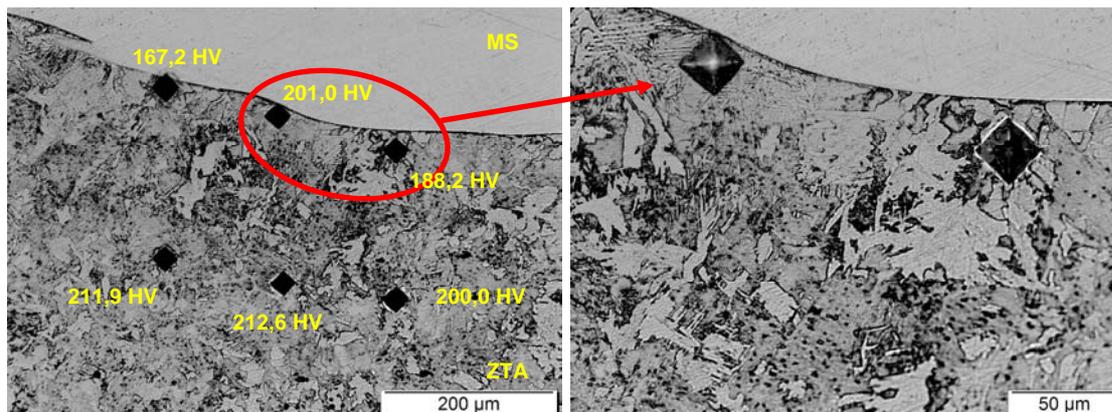


Figura 7. Microestrutura da ZTA próximo a região do 3º passe do revestimento na condição 24 V, 7 m/min, sem pré-aquecimento com H = 6,5 kJ/cm.

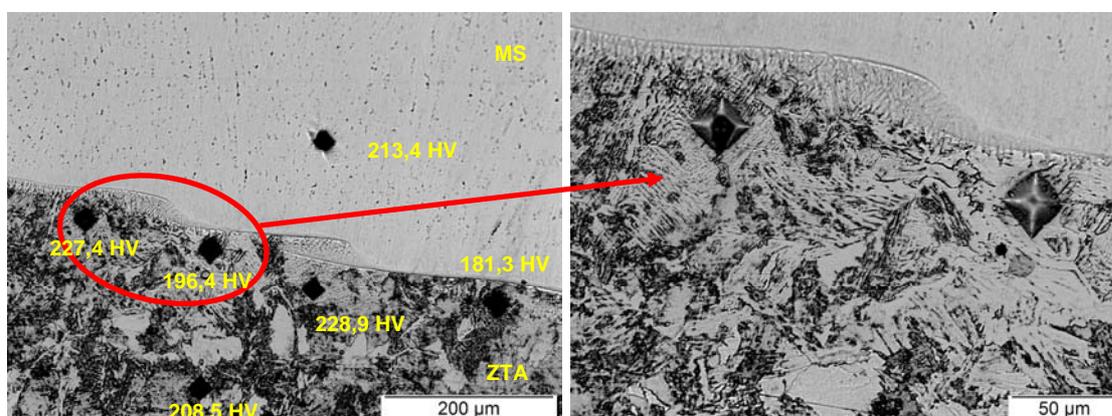


Figura 8. Microestrutura da ZTA próximo a região do 3º passe do revestimento na condição 24 V, 7 m/min, com pré-aquecimento de 423 K (150 °C) e H = 6,0 kJ/cm.

A

Tabela 4 apresenta os valores médios de dureza HV na superfície do revestimento MS_{SR}, no metal de soda (MS) do revestimento e na ZTA e os respectivos valores de diluição (D%) e energia de soldagem (H).

Tabela 4. Valores médios de dureza HV máxima, energia de soldagem e de diluição dos corpos de prova com suas respectivas nomenclaturas

CP's	22-5-C	22-5-S	22-7-S	22-7-C	24-5-C	24-5-S	24-7-S	24-7-C
MS _{SR} (HV)	230,20	244,48	235,47	216,83	234,1	244,3	236,6	220,25
MS (HV)	227,42	233,0	239,0	217,42	222,22	229,38	240,	220,5
ZTA (HV)	177,55	198,68	196,03	175,48	161,5	196,6	175,8	175,63
H (kJ/cm)	5,60	6,30	6,40	5,60	6,00	7,00	6,50	6,00
D(%)	10,56	5,20	7,52	12,28	12,24	7,40	7,35	10,11

A Erro! Fonte de referência não encontrada. 9 e Erro! Fonte de referência não encontrada. 10 apresentam as microestruturas das ZPD's ao longo da linha de fusão (interface) para diferentes condições de soldagem.

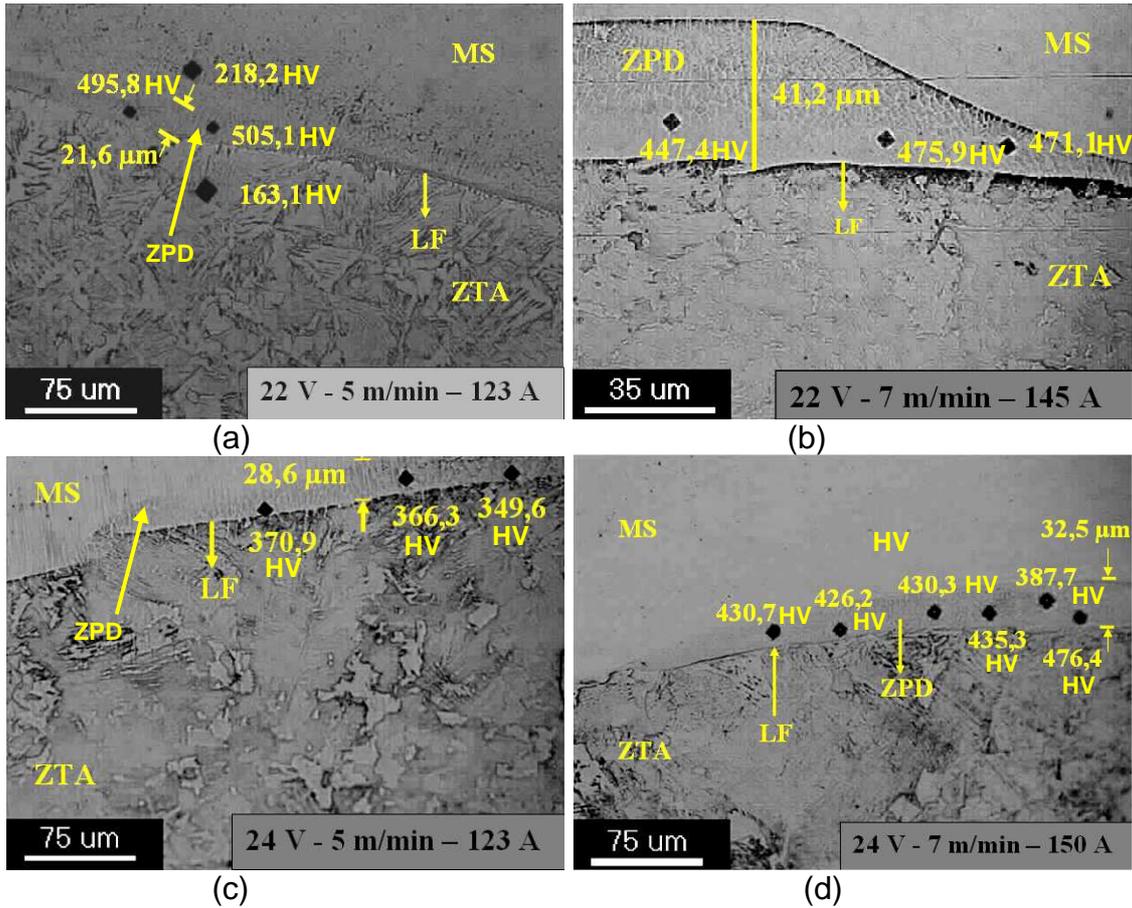
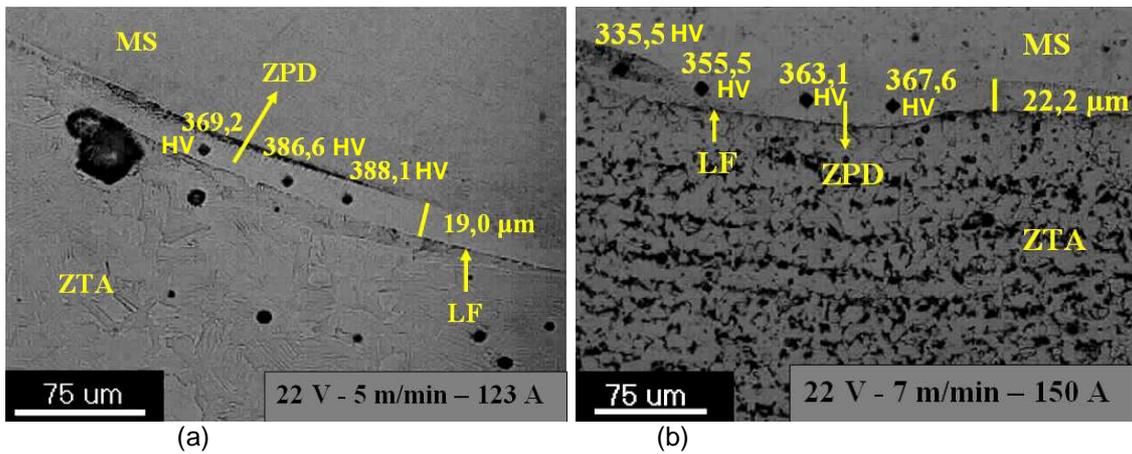


Figura 9. Interface da linha de fusão de soldas dissimilares depositadas em diferentes condições de tensão e velocidade de alimentação e sem pré-aquecimento para (a) $H = 6,52$ kJ/cm, (b) $H = 6,37$ kJ/cm, (c) $H = 7,18$ kJ/cm e (d) $H = 6,43$ kJ/cm.



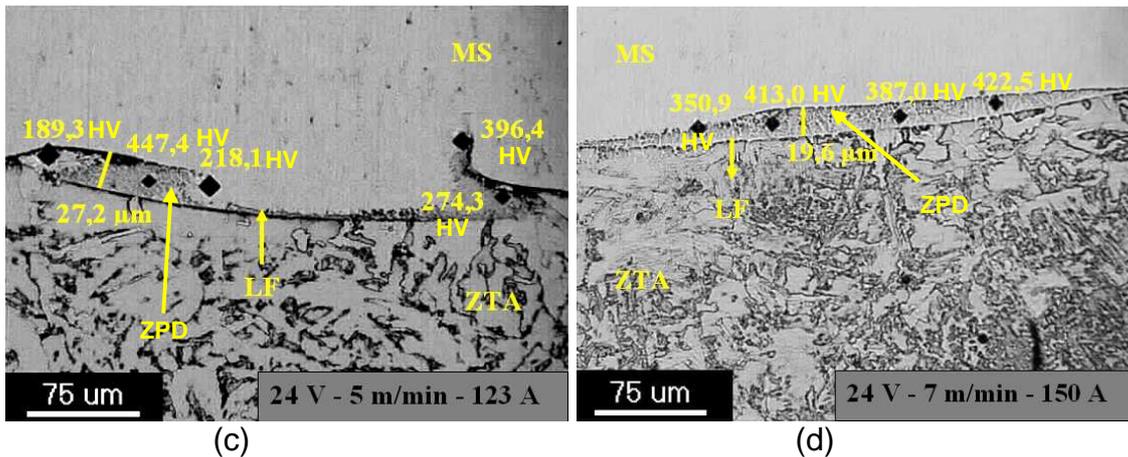


Figura 10. Interface da linha de fusão de soldas dissimilares depositadas em diferentes condições de tensão, velocidade de alimentação e pré-aquecimento $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ para (a) $H = 5,59\text{ kJ/cm}$, (b) $H = 5,56\text{ kJ/cm}$, (c) $6,09\text{ kJ/cm}$ e (d) $5,97\text{ kJ/cm}$.

A Tabela 5 apresenta o máximo valor da espessura das “praias”, a quantidade de “baías ou península”, a quantidade de “ilhas”, a quantidade de ZPD’s e os valores médios de dureza encontrados nas ZPD’s para cada corpo de prova.

Tabela 5. Dimensão, quantidade e dureza das ZPD’s ao longo do revestimento

CP	Espessura (µm)	Nº Praias	Nº Penínsulas	Nº Ilhas	Total de ZPD’s	HV _{Max}
22-5-S	21,6	3	5	0	8	500,4 _{+6,6}
24-5-S	28,6	1	5	1	7	362,3 _{+11,2}
24-7-S	32,5	2	3	2	7	431,1 _{+28,2}
22-7-S	41,2	1	3	1	5	464,8 _{+15,2}
22-5-C	19,0	3	1	1	5	382,0 _{+11,1}
24-5-C	27,2	2	2	1	5	372,7 _{+61,4}
24-7-C	19,6	1	5	0	6	393,4 _{+32,0}
22-7-C	22,2	2	6	0	8	355,4 _{+14,2}

4 DISCUSSÃO

Observa-se na Figura 3a que na condição de soldagem com tensão de 22 V e velocidade de alimentação do arame de 5 m/min houve um aumento de diluição em aproximadamente 50,75% com o uso do pré-aquecimento de 423 K (150°C), já na condição 22 V e 7 m/min o aumento foi de 38,76%.

Verifica-se também que mesmo os corpos de prova com energia de soldagem menor apresentaram maior diluição devido ao pré-aquecimento, verificando-se assim que o pré-aquecimento de 423 K (150°C) prevaleceu como uma variável significativa para a diluição. Para o corpo de prova na condição 24 V verifica-se também o aumento da diluição com o uso do pré-aquecimento no gráfico da Figura 3b. Com relação ao efeito da velocidade de alimentação do arame observa-se que nas soldagens com 22 V o aumento do seu valor proporcionou um discreto aumento no valor da diluição. Entretanto ao se utilizar a voltagem de 24 esta influência não pode ser confirmada.

Com relação às medidas de dureza máxima na interface entre o substrato (ZTA) e o revestimento (MS) verifica-se uma maior uniformidade nos seus valores para a

soldagem com pré-aquecimento (Figura 4b). Observa-se também que todas as medidas de dureza ficaram abaixo da norma NACE MR0175.

Verificou-se que com o pré-aquecimento de 423 K (150°C) obteve-se uma redução no valor da dureza média máxima de 10,48 e 9,03% na ZTA e no metal de solda, respectivamente. (Figura 4).

Na Figura 5a pode-se observar a região do 3º cordão, ou seja, último passe do revestimento na condição 22 V e 7 m/min sem pré-aquecimento, o qual apresenta uma estrutura bainítica inferior, que provavelmente formou-se devido a uma maior taxa de resfriamento, pois a energia de soldagem foi de 6,4 kJ/cm e na Figura 5b observa-se a influência do 3º passe depositado sobre o 2º passe do revestimento com a mesma energia de soldagem, onde nesta região entre os passes de revestimento (interseção) a microestrutura se apresentou refinada e conseqüentemente obteve-se um valor de dureza menor. Entretanto, na região mostrada na Figura 5c que fica fora dessa interseção (ponto médio do 2º passe) apresenta uma microestrutura semelhante a do último passe (3º cordão). Este mesmo comportamento foi verificado nas demais condições de soldagem realizada neste estudo.

Na região da ZTA-GG, o metal base se transforma em uma estrutura principalmente bainítica (superior e inferior), com ferritas de Widmanstätten, como se mostra na Figura 5a, na qual aparece uma micrografia da ZTA-GG formada pela execução do terceiro passe de revestimento a qual não sofreu nenhuma influência de outro cordão de solda. Por outro lado, a região da ZTA-GG formada entre passes teve influência da ZTA do passe posterior provocando um refino dos grãos, Figura 5b. Santos Neto⁽¹¹⁾ trabalhando com soldagem em aços ARBL, encontrou os mesmos resultados apresentados e afirma que este fato provoca melhores propriedades mecânicas nesta região.

Os corpos de prova sem pré-aquecimento na condição 22 V e 7 m/min por apresentarem o valor da energia de soldagem mais elevado em torno de 0,75 kJ/cm em relação aos corpos de prova com pré-aquecimento de 423 K (150°C) não apresentaram efeito tão significativo na redução dos valores de dureza.

Ao comparar a variação da velocidade de alimentação do arame de 5 m/min para 7 m/min na condição 22 V sem e com pré-aquecimento, verificou-se que os corpos de prova sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento não obtiveram alteração no perfil de dureza na região do metal de solda (MS) e da ZTA.

Para a condição com 24 V e 7 m/min, o corpo de prova com pré-aquecimento de 423 K (150 °C) apresentou uma redução da dureza em aproximadamente 6,91% na região próxima a superfície do revestimento. Próximo a linha fusão (interface) verificou-se uma redução no valor da dureza média máxima de 8,0% no metal de solda e uma redução de aproximadamente em 6,1% na ZTA próximo as regiões entre os passes 1 e 2 do revestimento (identações de número 3 a 5) para a condição com pré-aquecimento de 423 K (150°C). (Figura 6a). Percebe-se também mais claramente o aumento da dureza ao se aproximar da interface do substrato. É nesta região próxima a linha de fusão, onde ocorre a diluição dos prováveis elementos formadores de precipitados, resultando assim em maiores valores de dureza. Na ZTA observam-se microestruturas bainíticas. (Figura 7 e Figura 8).

Como se pode observar na Tabela 4 o pré-aquecimento de 423 K (150°C) obteve o efeito predominante no processo de soldagem, ou seja, o alto valor da energia de soldagem para condições sem pré-aquecimento não foram suficientes para aumentar a diluição e nem para diminuir a taxa de resfriamento. Com isso pode-se observar que os valores da diluição não apresentaram uma relação direta com os



valores de dureza. Isto pode ser explicado devido ao fato das menores diluições terem sido obtidas sem pré-aquecimento, pois provavelmente sua taxa de resfriamento foi maior em relação à condição com pré-aquecimento, o que conseqüentemente resultou em uma microestrutura mais dura próxima a linha de fusão (interface).

Ao aumentar a tensão de 22 V para 24 V na condição 5 m/min com pré-aquecimento foi obtido uma redução de dureza na região da ZTA devido ao aumento da energia de soldagem que conseqüentemente diminuiu a taxa de resfriamento resultando assim em uma microestrutura menos dura. Este mesmo fato foi observado na condição 7 m/min sem pré-aquecimento. Para a condição 22 V não houve influência nos valores de dureza ao alterar a velocidade de alimentação do arame. No entanto, ao analisar os corpos de prova na condição de 24 V verificou-se a influência nos corpos de prova sem e com pré-aquecimento de 423 K (150°C) ao alterar a velocidade do arame de 5 para 7 m/min, reduzindo assim os valores da dureza em 10,58% e 8,04% na ZTA para os corpos de prova sem e com pré-aquecimento, respectivamente, mantendo suas energias de soldagem aproximadamente iguais.

Ao se fazer as comparações dos perfis de dureza dos corpos de prova nas condições 22 V e 24 V com 7 m/min, respectivamente, observou-se que foram influenciados com o pré-aquecimento, reduzindo assim sua dureza no metal de solda em 9,0% e 8,1%, respectivamente. Além disso, com o parâmetro de 22 V e velocidade do arame de 7 m/min com pré-aquecimento conseguiu-se também uma redução no valor da dureza na ZTA de 10,5% em relação ao processo sem pré-aquecimento na mesma condição.

Neste trabalho observou-se que o nível de dureza na ZTA de grão grosseiro (ZTA-GG) não ultrapassou 250 HV, limite estabelecido pela NACE para todas as condições de soldagem realizadas. Resultado este bastante significativo, visto que Kejelin⁽⁸⁾ ao realizar revestimento com eletrodo revestido (Inconel 625) em aço API 5L X60 obteve valores de dureza variando de 380 HV a 440 HV ao variar a energia de soldagem no intervalo de 5 a 8 kJ/cm.

Ao longo da interface do revestimento foram encontrados valores muito elevados de dureza de até 505,1 HV (Figura 9a) indicando a formação de zonas parcialmente diluída (ZPD's).

Verifica-se que para as soldagens com corrente de 123 A, o pré-aquecimento não se mostrou eficaz na redução do tamanho das zonas de elevada dureza. Quando se obteve um decréscimo de 12 % (**Erro! Fonte de referência não encontrada. 9a e Erro! Fonte de referência não encontrada. 10a**).

Pode-se observar também que na condição sem pré-aquecimento, para uma tensão de 22 V, ao variar a velocidade de alimentação de 5 para 7 m/min resultou em corrente de soldagem de 123 A e 145 A, respectivamente. Logo, a extensão das "praias" aumentou praticamente o dobro ao se elevar a corrente de soldagem. (**Erro! Fonte de referência não encontrada. 9a e Erro! Fonte de referência não encontrada. 9b**).

Na condição sem pré-aquecimento, para uma tensão de 24 V, ao variar a velocidade de alimentação de 5 m/min para 7 m/min resultou em corrente de soldagem de 123 A e 150 A, respectivamente. Assim, com aumento da corrente, verificou-se que um aumento na dimensão da ZPD foi de 12%. Este pequeno aumento ocorreu devido à menor energia de soldagem na condição com 150 A que contribui para uma menor espessura de ZPD. Todavia, com este parâmetro, os valores da dureza foram bem mais elevados do que na condição com 123 A. (**Erro! Fonte de referência não encontrada. 9c e Erro! Fonte de referência não encontrada. 9d**).

A variação da largura da ZPD é atribuída ao fluxo de convecção do metal fundido na parte superior e inferior, resultando em uma melhor mistura dos materiais de adição e base para formar o metal de solda. No entanto, o fluxo do líquido ou a convecção no metal de solda não é suficiente para eliminar estas regiões, pois há sempre uma camada limite laminar na frente se solidificando. Nesta camada laminar limite, a mistura dos metais é controlada pela difusão no líquido⁽¹²⁾.

A utilização de pré-aquecimento de 423 K (150°C) neste estudo colaborou para redução dos níveis de dureza obtidos nas ZPD's, mas não se apresentou como uma alternativa satisfatória no que diz respeito à obtenção de uma interface livre de ZPD, ou seja, não reduziu a quantidade de ZPD's como também não contribuiu de forma significativa para a redução da espessura das mesmas, conforme mostra a Tabela 5, fato este verificado também por Kejelin et al⁽⁸⁾ que utilizou pré-aquecimento de 473 K (200°C).

Observou-se que as ZPD's são formadas em regiões individuais ao longo do revestimento, enquanto que a maior parte da interface entre o metal de solda e metal de base não apresenta qualquer heterogeneidade. Este fato também foi relatado por Kejelin.⁽⁷⁾ Em relação aos valores de dureza obtidos acima de 350 HV nestas regiões, Doody⁽⁵⁾ afirma que estas zonas podem ser susceptíveis à fissuração por corrosão sob tensão e que estas durezas estão dentro da faixa de dureza característica das microestruturas martensíticas (acima de 340 HV).⁽⁴⁾

Kejelin et al.⁽⁸⁾ afirmam que o principal problema metalúrgico encontrado em soldas de metais dissimilares é a formação, ao longo da interface da linha de fusão, de regiões que podem atingir durezas superiores a 400 HV, o que indicam estarem constituídas de martensita e, portanto, serem frágeis e estas regiões apresentam largura de dezenas de micrometros. Neste trabalho foram obtidas diversas formas de ZPD's, além de espessura da mesma de até 41,2 µm, estando, portanto, dentro dos valores encontrados na literatura.

Doody⁽⁵⁾ encontrou ZPD's com variedade de formas (ilhas, penínsulas e praias) e tamanhos, espessuras de ZPD's de até 50 µm, que ocorrem numa frequência bastante irregular. A largura da ZPD poderá ter uma influência significativa sobre o início de defeitos na interface, pois a ZPD pode tornar uma solda dissimilar susceptível ao ataque localizado de corrosão por pitting, fragilização por hidrogênio, trincas de corrosão sob tensão em meios ácidos e ruptura por fadiga.⁽⁵⁾

Silva et al.⁽¹³⁾ ao realizar soldagem dissimilar de aço AISI 317L em substratos de aço ASTM A516 Gr 60 com processo de soldagem Mig/Mag com duplo arame verificou a presença de ZPD's de estrutura acicular, confirmando a presença de martensita, e espessura da ZPD de aproximadamente 48 µm de largura.

5 CONCLUSÕES

- 1 O pré-aquecimento apresentou-se como uma variável de influência significativa sobre os valores de diluição. O menor valor de diluição com pré-aquecimento de 423 K (150°C) obtido foi de 10,6% e para a aplicação do revestimento sem pré-aquecimento obteve 5,2%.
2. Utilizando os parâmetros de soldagem com 22 V e 24 V e velocidade de alimentação do arame de 5 e 7 m/min com e sem pré-aquecimento obteve-se os resultados de dureza abaixo do limite da norma NACE MR0175.
3. Com a utilização do pré-aquecimento de 423 K (150°C) observou-se neste estudo a redução dos valores de dureza da ZTA e ZPD. Entretanto, não reduziu a

quantidade das ZPD's como também não contribuiu de forma significativa para a diminuição da extensão das mesmas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a Rede Multitarefa de Materiais Avançados do Norte e Nordeste (REMULT) através do Núcleo de União e Revestimentos de Materiais (UNIREV), ao CNPq e a Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM-UFCG).

REFERÊNCIAS

- 1 TELLES, P.C.S. Materiais para Equipamentos de Processo. 6. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- 2 KOU, S.; YANG Y. K. Fusion-Boundary Macroseggregation in Dissimilar-Filler Welds. Fundamental solidification and macroseggregation in welds made with filler metals different in composition from the workpiece are presented. *Welding journal*, v. 86, p. 303-312, Oct. 2007.
- 3 LIPPOLD, John C.; KOTECKI, Damian J. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Hoboken: Wiley Interscience, 2005. p.357.
- 4 PARANHOS, R.. Revestimento de Aço Carbono com Aço Inoxidável Austenítico. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/download/12ddc.pdf>>. Acesso em: 26 mai. 2008.
- 5 DOODY, Thomas. Intermediate Mixed Zones in Dissimilar Metal Welds for Sour Service. *Welding Journal*, March 1992.
- 6 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.
- 7 KEJELIN, N.Z, Influência dos parâmetros de soldagem na formação de zonas parcialmente diluídas em soldas de metais dissimilares, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 127 p. Dissertação (Mestrado).
- 8 KEJELIN, Norton Zanette; BUSCHINELLI, Augusto José de Almeida; BOHÓRQUEZ, Carlos Enrique Niño. Soldagem Dissimilar do Aço X-60 com Inconel 625. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/soldagem_dissimilar.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2008
- 9 WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. *SOLDAGEM: Processos e Metalurgia*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.
- 10 ISO 10423. Petroleum and natural Gas Industries - Drilling and Production Equipment - Wellhead and Christmas Tree Equipment. Switzerland: ISO 2003.
- 11 SANTOS NETO, Norival Ferreira dos, Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 87 p. Dissertação (Mestrado).
- 12 DEHMOLAEIB R, SHAMANIANA M, KERMANPURA A. Effect of electromagnetic vibration on the unmixed zone formation in 25Cr–35Ni heat resistant steel/Alloy 800 dissimilar welds. *Materials characterization*, 2008; vol.59: p.1814-1817.
- 13 SILVA, Marcos Mesquita da *et al.* Avaliação de revestimentos de aços AISI 317I depositados por soldagem em aços astm a 516 gr 60 para utilização no setor de petróleo e gás. In: 64^o Congresso Anual da ABM, 2009, Belo Horizonte-MG. Anais, 2009.