

SOLDAGEM MULTIPASSE DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S31803 POR ELETRODO REVESTIDO.

Eng. Ricardo Fedele, MSc.

*Engenheiro de Aplicação da Boehler Thyssen Técnica de Soldagem Ltda
Prof. do Dep. de Eng. Mecânica e Metalúrgica da Escola de Engenharia Mauá
engenhar@btwbr.com.br*

Eng. Sérgio Duarte Brandi, DSc.

Professor associado do Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

Enga. Susana Giampietri Lebrão, DSc.

Professora associada do Dep. Eng. Mecânica e Metalúrgica da Escola de Engenharia Mauá

**(Trabalho apresentado no XXV CONSOLDA Congresso Nacional de Soldagem Belo Horizonte/1999)
(Artigo publicado na Revista Soldagem & Inspeção – Ano 6. Nº 1 – Suplemento Técnico BR)**

RESUMO

A indiscutível resistência à corrosão e a excelente combinação de propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex podem ser prejudicadas se os corretos procedimentos de soldagem não forem respeitados. A soldagem por eletrodo revestido é a técnica de junção mais difundida no Brasil e pode ser aplicada aos aços inoxidáveis duplex. Porém, a quantidade de artigos técnicos a respeito deste assunto é bastante reduzida. Visando preencher esta lacuna de informações, estudou-se a influência das energias de soldagem 0,6 e 1,0 kJ/mm nas propriedades de juntas soldadas do aço inoxidável duplex UNS S31803 por eletrodo revestido. Foram caracterizadas as mudanças microestruturais, as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão das juntas soldadas. Os resultados mostraram que a energia de soldagem de 0,6 kJ/mm é a mais indicada para a soldagem, em comparação à energia de 1,0 kJ/mm.

Palavras-Chave: aço inoxidável duplex; soldagem multipasse; eletrodo revestido.

ABSTRACT

The superior corrosion resistance and the excellent mechanical properties combination of duplex stainless steels can be severely impaired if the suitable welding procedures are not taken into account. Shielded metal arc welding process is the most popular joining technique in Brazil and can be applied to duplex steels. However, the amount of technical papers about this subject is very reduced. With the aim to fulfil this lack of information, the influence of the heat input on the properties of the duplex stainless steel UNS S31803 welded joints has been studied. Two heat inputs are considered (0,6 and 1,0 kJ/mm). The microstructural changes, the mechanical performance, the corrosion resistance and the thermal cycles evolution of the welded joints were characterized. The results showed that the higher heat input was responsible to produce a greater deterioration on the properties of the welded joints, principally on the heated affected zones, in comparison with 0,6 kJ/mm.

Key-Words: duplex stainless steel; multipass welding; shielded metal arc welding.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são os materiais mais utilizados na construção de peças e equipamentos que devam combinar boas propriedades mecânicas à elevados valores de resistência à corrosão. Este grupo de ligas pode ser dividido quanto a sua microestrutura em cinco subgrupos⁽¹⁾: aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos, endurecíveis por precipitação e duplex. Cada uma destas ligas tem propriedades e aplicações específicas. A Figura 1 corresponde à representação esquemática das diversas classes de aços inoxidáveis no diagrama de Schaeffler.

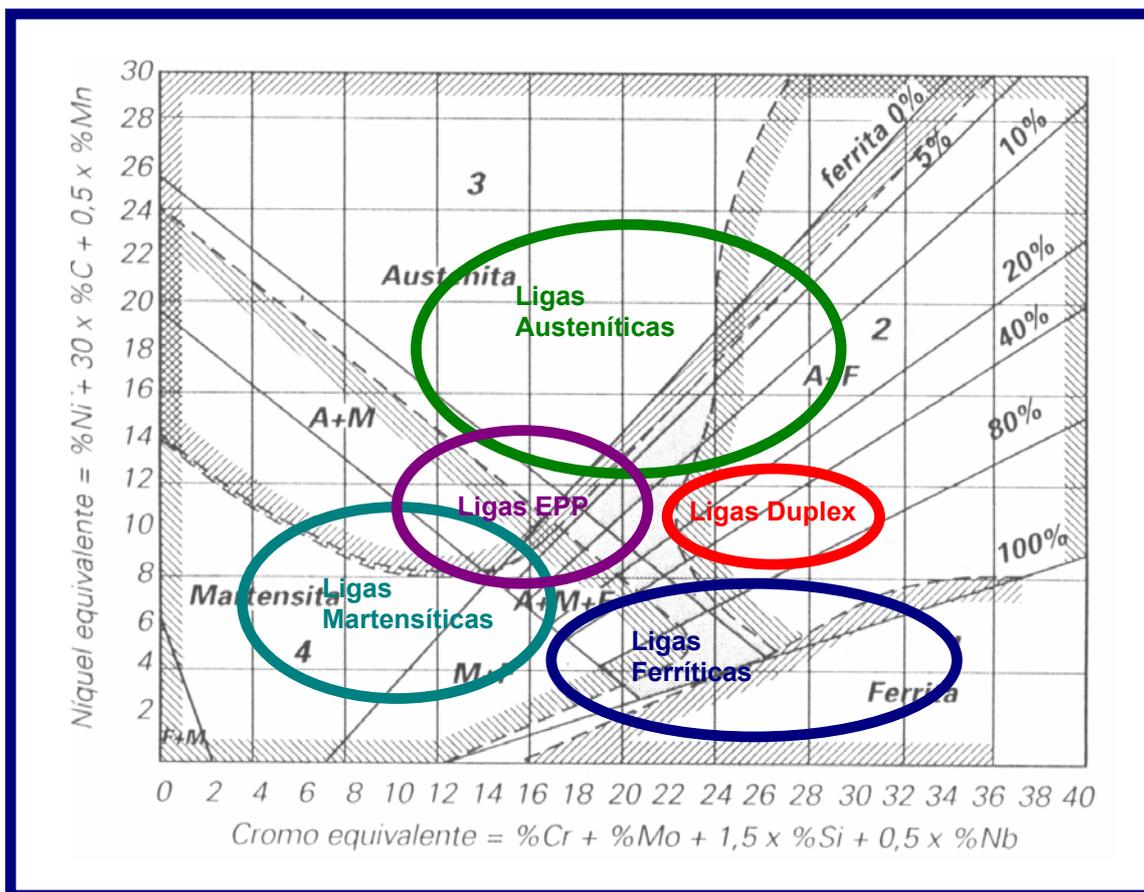


Figura 1- Representação esquemática dos grupos de aços inoxidáveis no diagrama de Schaeffler.

1.1 Aços Inoxidáveis Duplex

Dentre o amplo conjunto dos aços inoxidáveis, destaca-se o grupo dos duplex, constituído por ligas Fe-Cr-Ni-Mo-N que possuem uma microestrutura composta basicamente de ferrita

e austenita, em frações volumétricas próximas à 50%⁽²⁾. A formação desta microestrutura ocorre a partir da solidificação ferrítica do metal líquido na faixa de temperatura de 1440 a 1490°C, seguida pela precipitação de austenita, no estado sólido (1200°C), por nucleação e crescimento⁽³⁾.

Caso o resfriamento seja rápido, entre 1200 e 800°C, a precipitação de austenita é suprimida e acaba precipitando nitretos de cromo na matriz ferrítica. Se o aço for aquecido abaixo de aproximadamente 1000°C, sua microestrutura não é estável⁽⁴⁾ e pode ocorrer a precipitação de fase sigma ou nitreto de cromo, com pequena alteração da microestrutura. O aparecimento destas fases pode prejudicar o desempenho dos aços inoxidáveis duplex, principalmente em termos de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e soldabilidade⁽²⁾. A Tabela 1 relaciona as principais fases secundárias que podem precipitar nos aços inoxidáveis duplex.

Tabela 1- Principais fases secundárias dos aços inoxidáveis duplex.⁽⁵⁾

Fase	Estrutura Cristalina	Temp. de precipitação (°C)	Composição química (%)				
			Fe	Cr	Ni	Mo	Outros
Nitreto (Cr ₂ N)	hexagonal	550-1000	4,6	85,5	-	4,8	5,1 V N
Carboneto (M ₂₃ C ₆)	CFC	550-900	35	60	2	3	C
Sigma (FeCr)	tetragonal	650-1000	55	29	5	11	-
α' (alto Cr)	CCC	350-750	12	72	3	10	3 Si
Austenita Secundária	CFC	600-1000	56,8	25,3	11,2	2,4	0,19

A composição química e a microestrutura são os fatores responsáveis pela excelente combinação de propriedades mecânicas e resistência à corrosão apresentada por estes aços. Como exemplo, o limite de escoamento dos aços inoxidáveis duplex é aproximadamente o dobro do valor para os aços austeníticos, além de possuírem tenacidades muito próximas⁽²⁾.

Na resistência à corrosão, observa-se que os aços duplex apresentam PRE (Pitting Resistance Equivalent) da ordem de 35-45 enquanto que os aços inoxidáveis tradicionais atingem apenas 20-25.

A aplicação dos aços inoxidáveis duplex está concentrada em cinco setores industriais principais: indústrias de óleo e gás, químicas, papel e celulose, petroquímicas e produção de energia nuclear⁽⁵⁾. As aplicações específicas em cada um destes setores estão apresentadas na Tabela 2.

Nestes setores, a utilização dos aços duplex quase sempre envolve processos de soldagem. Portanto, o estudo da metalurgia da soldagem está diretamente ligado à qualidade das juntas soldadas.

Tabela 2- Principais aplicações dos aços inoxidáveis duplex⁽⁵⁾

Setor Industrial	23Cr-4Ni-0,1Mo PRE = 25	22Cr-5Ni-3Mo PRE = 30-36	25Cr-duplex PRE = 32-40	25Cr superduplex PRE > 40
Químico	tubulações, instrumentação	serpentinhas para fusão de enxofre, tanques, trocadores de calor,	separadores de uréia, trocadores de calor, vasos de pressão	tubulações para evaporação de sal e resfriamento - água do mar
Petroquímico	reatores com carcaça de aço carbono	Unidades de dessalinização, dessulfuração	equipamento de dessulfuração, carcaça de bombas	tubulações para ambientes contendo Cl ⁻ e HCl
Papel e celulose	preaquecedores dos digestores	digestores em plantas de sulfato e sulfito, cilindros de pressão	digestores e preaquecedores dos digestores	equipamentos de branqueamento
Energia nuclear	aquecedores de água de alimentação, reaquecedores	tubulações de injeção em fontes geotérmicas	-	trocadores de calor, fontes geotérmicas, salinas marinhas
Óleo e gás	resfriadores, tubulações, sistemas de tensão, instrumentação	estrutura, cabos, tubulações de gás natural, vasos de pressão	campanas de mergulho, tubulações de gás,	tubulações contra incêndio, vasos de pressão, válvulas, perfuração marinha,

1.2 Metalurgia da Soldagem dos Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex podem ser soldados pela maioria dos processos de soldagem, tais como TIG, MIG, plasma, eletrodo revestido, arco submerso, resistência elétrica, feixe de elétrons entre outros⁽⁶⁾. A soldabilidade é boa e muito parecida à dos aços austeníticos^(2-3,6). Porém, deve-se tomar cuidados especiais com alguns tipos de fragilizações que podem ocorrer, principalmente em relação à precipitação de fases apresentadas anteriormente. Estas precipitações estão diretamente relacionadas à história térmica do material soldado, ou à energia de soldagem utilizada.

Nos aços inoxidáveis duplex, a energia de soldagem está diretamente associada às transformações microestruturais e ao desempenho da junta soldada. Assim, uma energia de soldagem elevada provoca uma baixa velocidade de resfriamento, favorecendo a precipitação de austenita e o equilíbrio microestrutural desejado. Porém, fases secundárias podem precipitar. Por outro lado, uma baixa energia de soldagem, resulta numa elevada velocidade de resfriamento, retardando a precipitação de austenita e o equilíbrio das fases na microestrutura⁽⁷⁾.

Além da busca de uma energia de soldagem ótima, deve-se ainda considerar o fato de que, na soldagem multipasse, a junta é submetida à vários ciclos térmicos. Isto significa que a região soldada passa por aquecimentos e resfriamentos consecutivos, comumente pouco controlados. Tais variações de temperatura podem modificar a microestrutura original e, conseqüentemente afetar o desempenho da junta.

Outro fator bastante relevante para a soldagem dos aços inoxidáveis duplex refere-se aos metais de adição. Os consumíveis de soldagem atualmente utilizados podem ser de dois tipos: ligados ao níquel e de mesma composição do metal-base⁽⁶⁾. A utilização dos consumíveis ligados ao níquel, evita toda a preocupação referente ao balanço de fases e controle microestrutural da zona fundida. Porém, a falta de nitrogênio e a presença

freqüente de nióbio nestas ligas contribuem para a ocorrência de reações metalúrgicas desfavoráveis como a formação de precipitados e regiões com elevado teor de ferrita na zona afetada pelo calor⁽⁶⁾.

Já os consumíveis de mesma composição do metal-base são empregados somente quando a aplicação de um tratamento térmico pós soldagem na faixa de 1050°C for possível. Este tratamento visa balancear a microestrutura, fornecendo energia e tempo necessários para a precipitação da quantidade ideal de austenita do aço duplex. Uma variação destes consumíveis refere-se àqueles de mesma composição do metal-base porém enriquecidos em níquel. O aumento de níquel é feito para melhorar o balanço de fases na condição como soldado, aumentando a quantidade de austenita no metal de solda. Desse modo, as soldas realizadas com estes consumíveis não necessitam de tratamento térmico pós soldagem, nem apresentam os problemas derivados da utilização dos metais de adição ligados ao níquel.

Portanto, nota-se que a soldagem dos aços inoxidáveis duplex envolve muitos detalhes e particularidades. Como exemplo tem-se: necessidade de controle do aporte de calor, risco de precipitação de fases fragilizantes, escolha do metal de adição correto, possibilidade de crescimento exagerado de grão na zona afetada pelo calor, etc. Além disso, informações sobre tipos de chanfro, preaquecimentos, tratamentos térmicos pós-soldagem, temperaturas interpasse e velocidades de resfriamento também são necessários e de vital importância para a qualidade da junta soldada. O processo de soldagem por eletrodo revestido é versátil, simples, barato, de tecnologia amplamente difundida e pode ser aplicado aos aços duplex. Porém, a quantidade de artigos técnicos sobre a soldagem multipasse dos aços inoxidáveis duplex por eletrodo revestido é bastante reduzida.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo estudar a influência da energia de soldagem na microestrutura, nas propriedades mecânicas e na resistência à corrosão da junta soldada do aço inoxidável duplex UNS S31803 por eletrodo revestido. A influência do segundo passe de solda nas propriedades do passe de raiz também foi analisada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas chapas de aço inoxidável duplex UNS S31803 de dimensões 250 x 120 x 6 mm, usinadas de modo a se obter chanfros em V com 60°. As juntas foram confeccionadas com cobre-juntas do mesmo aço, abertura de raiz de 2 mm e face de raiz de 2 mm. Os consumíveis de soldagem utilizados foram eletrodos revestidos FOX CN 22/9 N (AWS A5.4 E2209-17), de diâmetros 2,50 e 3,25 mm, respectivamente para a execução do 1° e 2° passe. A temperatura interpasse utilizada foi de 25°C. A Tabela 3 mostra a composição química dos materiais empregados. A Tabela 4 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 3- Composição química dos materiais utilizados

Material	Composição Química (%)									
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	N
Metal-base	0,017	1,450	0,025	0,001	0,430	22,120	5,580	0,210	3,080	0,160
Metal de adição	0,028	0,710	0,022	0,011	0,890	22,800	8,680	-	3,350	0,170

Tabela 4- Parâmetros de soldagem utilizados

Energia de soldagem (kJ/mm)	Passe de solda	Velocidade de soldagem (mm/s)	Corrente de soldagem (A)	Tensão de soldagem (V)
0,6	1°	3,380	78	26
	2°	4,463	103	26
1,0	1°	2,548	91	28
	2°	2,744	98	28

As microestruturas das juntas soldadas foram analisadas através de microscopia óptica (MO), metalografia quantitativa e detecção magnética de fases. O desempenho mecânico foi avaliado pelos ensaios de tração (ASTM E8) e impacto Charpy V a -40°C (ASTM E23), utilizando cp's reduzidos. A resistência à corrosão das juntas foi estudada através do ensaio de susceptibilidade à corrosão por pites a 50°C (ASTM G48). Os ciclos térmicos das zonas afetadas pelo calor das juntas foram obtidos através de dois termopares do tipo K soldados respectivamente a 2 e 4 mm da zona de ligação e acoplados a um micro computador. O sistema de aquisição de dados registrou 12 bites por dado, com velocidade de aquisição de 100 Hertz, por tempos de 300 segundos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Microestrutural

A análise microestrutural revelou um aumento da porcentagem de austenita na zona fundida (ZF) e na zona afetada pelo calor (ZAC) do passe de raiz das juntas soldadas com ambas as energias de soldagem, após a deposição do segundo passe. As Figuras 2 e 3 ilustram este fato. A sua comprovação foi obtida através da medição do número de ferrita da ZF e da ZAC. A Tabela 5 mostra os valores medidos.

Os dados da Tabela 5 também evidenciam que as quantidades de austenita da ZAC do passe de raiz da junta soldada com 1,0 kJ/mm são maiores do que aquelas da junta soldada com 0,6 kJ/mm, quando comparadas respectivamente as juntas com 1 e 2 passes. O aumento da porcentagem de austenita após a deposição do segundo passe provoca o aumento do número de interfaces ferrita/austenita, as quais são locais preferenciais de precipitação de fases secundárias fragilizantes⁽⁸⁾.

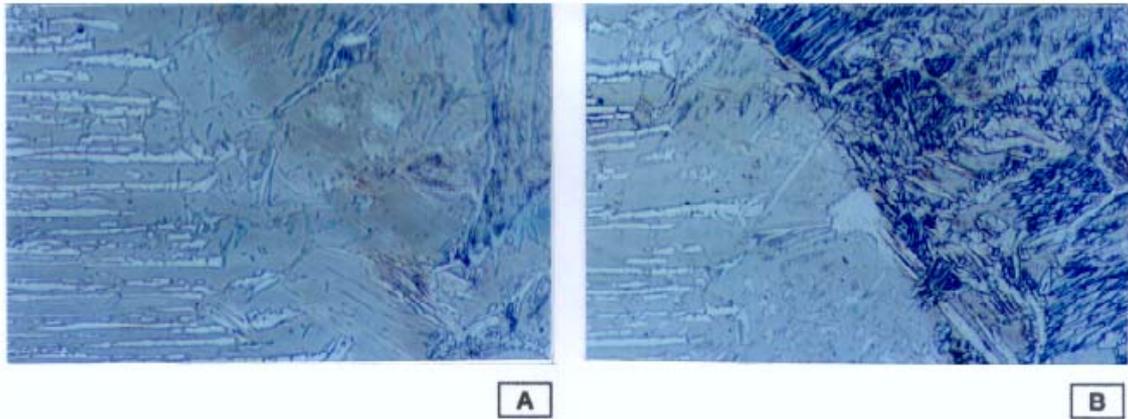


Figura 2- Microestruturas do passe de raiz das juntas soldadas com 0,6 kJ/mm. M.O. Aumento: 250x. Ataque eletrolítico: HNO₃. A=1 passe; B=2 passes.

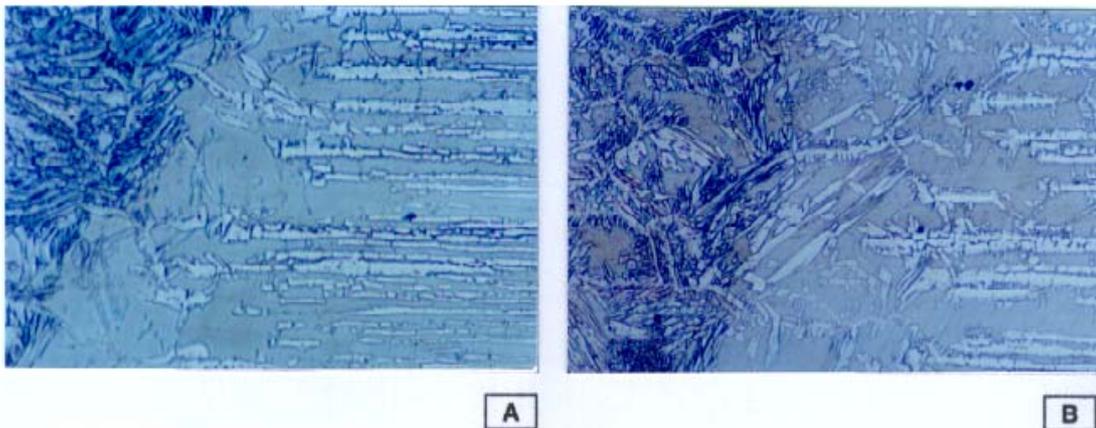


Figura 3- Microestruturas do passe de raiz das juntas soldadas com 1,0 kJ/mm. M.O. Aumento: 250x. Ataque eletrolítico: HNO₃. A=1 passe; B=2 passes.

Tabela 5- Número de ferrita das juntas soldadas.

Energia de soldagem (kJ/mm)		% Ferrita		% Austenita	
		ZF	ZAC*	ZF*	ZAC
0,6	1º passe	39,2 ± 1,2	62,7	60,8	37,2 ± 2,4
	2º passe	33,8 ± 0,6	53,3	66,2	46,7 ± 3,6
1,0	1º passe	41,5 ± 1,5	53,3	58,5	46,7 ± 3,8
	2º passe	37,2 ± 1,0	46,9	62,8	53,1 ± 0,9
Metal-base		46,2 ± 0,23		53,8 ± 0,23	
Metal de adição		29,5 ± 0,66		70,5 ± 0,66	

* Valores obtidos através da diferença em relação à 100%

4.2 Análise dos Ciclos Térmicos

O registro dos ciclos térmicos mostrou que as zonas afetadas pelo calor das juntas soldadas com ambas as energias de soldagem atingiram temperaturas na faixa de 800°C na distância de 2 mm da zona de ligação. A Figura 4 mostra os ciclos térmicos para as duas energias de soldagem. Calculando-se graficamente a velocidade de resfriamento entre 800 e 400°C, verificou-se que a junta soldada com 0,6 kJ/mm resfria mais rápido (25 %) quando comparada à soldagem com 1,0 kJ/mm. Este resultado mostra que a probabilidade de precipitar fases abaixo de 1000°C é maior para a soldagem com energia de 1,0 kJ/mm.

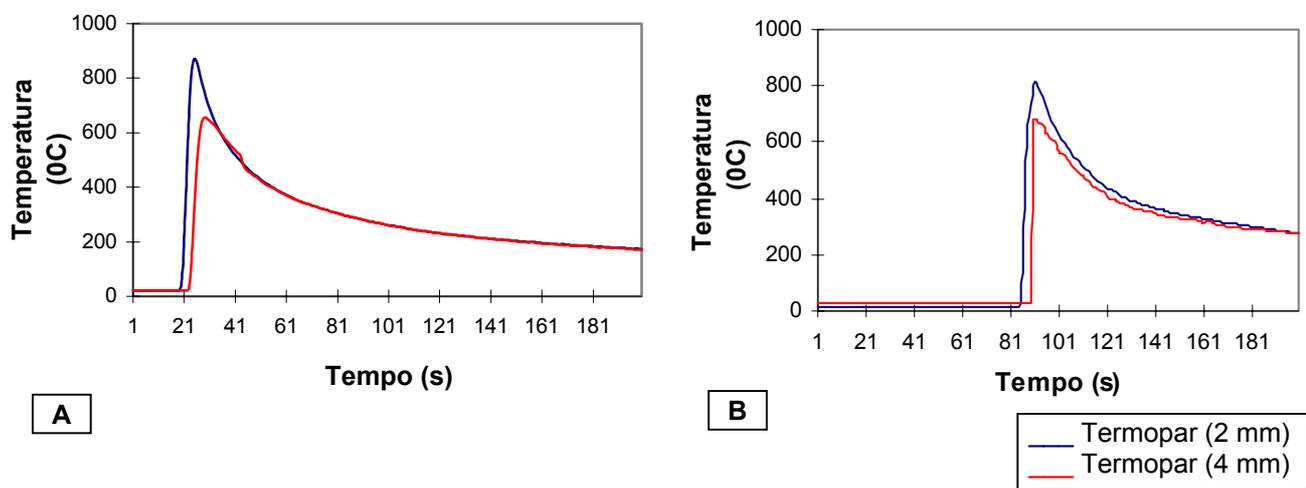


Figura 4- Ciclos térmicos das zonas afetadas pelo calor das juntas soldadas. A= 0,6 kJ/mm; B= 1,0 kJ/mm.

4.3 Desempenho Mecânico

Os resultados do ensaio de impacto Charpy revelaram uma queda dos valores de tenacidade das zonas afetadas pelo calor das juntas em relação ao metal-base de aproximadamente 55%. Esse fato pode ser explicado considerando as quantidades reduzidas de austenita das zonas afetadas pelo calor em relação àquelas do metal-base. Também, pode ter ocorrido a precipitação de fases fragilizantes, uma vez que os ciclos térmicos acusaram temperaturas suficientes para tal. Os valores de energia absorvida da zona fundida e da zona afetada pelo calor das juntas soldadas, com ambas as energias de soldagem, também foram comparados estatisticamente e não mostraram diferenças significativas. A Tabela 6 apresenta os valores obtidos no ensaio Charpy. Analisando-se os resultados dos ensaios de tração das juntas, notou-se que todos os corpos de prova romperam em regiões distantes à solda. Este fato indica que o procedimento de soldagem utilizado foi correto e que a zona fundida e a zona afetada pelo calor não podem ser consideradas as regiões menos resistentes da junta. Os valores obtidos no ensaio de tração das juntas estão relacionados na Tabela 7.

Tabela 6- Resultados do ensaio de impacto Charpy V a -40°C .

Energia de soldagem (kJ/mm)	Nr. de passes	Região da solda	Energia absorvida (J)	Expansão lateral (mm)
0,6	1	ZF	$11,67 \pm 0,62$	$0,40 \pm 0,14$
		ZAC	$14,16 \pm 2,05$	$0,56 \pm 0,14$
	2	ZF	$12,50 \pm 0,50$	$0,33 \pm 0,06$
		ZAC	$13,08 \pm 0,51$	$0,36 \pm 0,05$
1,0	1	ZF	$12,75 \pm 0,93$	$0,43 \pm 0,03$
		ZAC	$14,83 \pm 0,23$	$0,63 \pm 0,05$
	2	ZF	$12,50 \pm 0,71$	$0,40 \pm 0,06$
		ZAC	$18,62 \pm 3,93$	$0,70 \pm 0,19$
Metal-base			$45,0 \pm 0,99$	$1,41 \pm 0,02$

Tabela 7- Resultados do ensaio de tração.

Condição de soldagem	Limite de escoamento (N/mm^2)	Limite de resistência (N/mm^2)	Alongamento (%)
0,6 kJ/mm - 1º passe	615	790	29
0,6 kJ/mm - 2º passe	620	785	27
1,0 kJ/mm - 1º passe	630	785	33
1,0 kJ/mm - 2º passe	605	770	31
Metal-base	640	750	42
Metal de adição	750	870	30

4.4 Resistência à Corrosão

Os resultados do ensaio de susceptibilidade à corrosão por pites mostraram que a taxa de corrosão da ZAC do passe de raiz da junta de 0,6 kJ/mm é pequena e diminui ainda mais após a deposição do segundo passe. Já a junta soldada com 1,0 kJ/mm apresentou um comportamento contrário. A taxa de corrosão da ZAC do passe de raiz desta junta é maior do que a da ZAC do passe de raiz da junta de 0,6 kJ/mm, e aumenta bastante com a deposição do segundo passe. A Figura 5 ilustra esses fatos. Os resultados apresentados no ensaio de corrosão sugerem que tenha ocorrido a precipitação de fases fragilizantes, ricas em cromo, nas zonas afetadas pelo calor dos passes de raiz das juntas soldadas com ambas as energias. Porém, com maior intensidade na junta de 1,0 kJ/mm.

A análise microestrutural reforça esta suposição quando revela que a quantidade de austenita da zona afetada pelo calor do passe de raiz da junta de 1,0 kJ/mm é maior do que a da zona afetada pelo calor do passe de raiz da junta de 0,6 kJ/mm. Isso porque, conforme já comentado, as interfaces ferrita/austenita são os locais preferenciais de precipitação de fases secundárias. Os resultados do ensaio de impacto Charpy revelam uma queda de aproximadamente 55% da tenacidade das zonas afetadas pelo calor em relação a do metal-base. Esta informação reforça ainda mais a hipótese de precipitação de fases nas zonas afetadas pelo calor dos passes de raiz das juntas. As tenacidades das zonas afetadas pelo calor das juntas de 0,6 e 1,0 kJ/mm não apresentam diferenças estatísticas pois, mesmo que a quantidade de fases fragilizantes da zona afetada pelo calor da junta de 1,0 kJ/mm

seja maior do que a da junta de 0,6 kJ/mm e tenda a deteriorar os valores de tenacidade, a quantidade de austenita nesta região da primeira junta também é maior, compensando essa tendência.

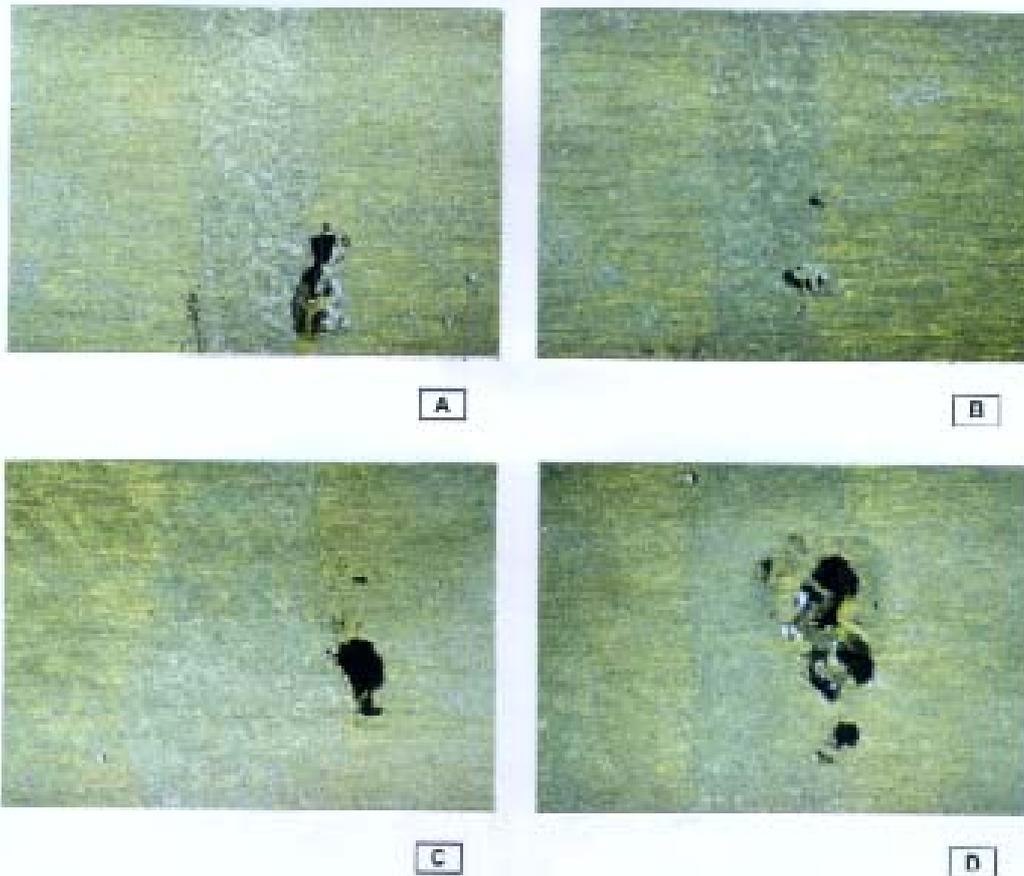


Figura 5 Resultados de ensaio de susceptibilidade a corrosão por picos. Aumento: 30x. A= 0,6 kJ/mm e 1 passe; B= 0,6 kJ/mm e 2 passes; C= 1,0 kJ/mm e 1 passe; D= 1,0 kJ/mm e 2 passes.

Sugere-se que a explicação para a inversão de comportamento da taxa de corrosão da junta de 1,0 kJ/mm em relação à junta de 0,6 kJ/mm, após a deposição do segundo passe, esteja nos ciclos térmicos. Com a deposição do segundo passe, os precipitados formados durante o resfriamento do primeiro dissolvem-se parcialmente devido às altas temperaturas atingidas. Porém, devido a menor velocidade de resfriamento da junta de 1,0 kJ/mm, a quantidade de novos precipitados tende a ser maior. Já a junta de 0,6 kJ/mm apresenta maior velocidade de resfriamento, portanto, tende a possuir uma menor quantidade de precipitados.

5. CONCLUSÕES

A partir dos materiais e das técnicas experimentais utilizadas, foram obtidas as seguintes conclusões:

- 1) O consumível de soldagem utilizado foi responsável por depositar um metal de solda com excelentes frações de austenita, na condição como soldado, devido ao elevado potencial austenitizante de sua composição química.
- 2) A porcentagem de austenita da zona fundida e da zona afetada pelo calor, das juntas soldadas com ambas as energias, aumenta após a deposição do segundo passe de solda.
- 3) As zonas afetadas pelo calor das juntas soldadas apresentam valores de tenacidade inferiores aos do metal-base, devido à quantidade reduzida de austenita destas regiões e a eventual presença de outras fases precipitadas.
- 4) A deposição do segundo passe de solda deteriora a resistência à corrosão por pites da zona afetada pelo calor do passe de raiz da junta soldada com 1,0 kJ/mm e melhora a da junta soldada com 0,6 kJ/mm.
- 5) A energia de soldagem de 0,6 kJ/mm é a mais indicada para a soldagem multipasse do aço inoxidável duplex UNS S31803 por eletrodo revestido, em comparação à de 1,0 kJ/mm.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho gostariam de agradecer à Empresa Böhler Thyssen Welding e ao Projeto FAPESP 98/02493-2 (RAF, SDB).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ⁽¹⁾ DAVIS, J.R. Preface. ASM Specialty Handbook-Stainless Steels, Estados Unidos, piii, 1994.
- ⁽²⁾ SOLOMON, H.D.; DEVINE, T.M. A tale of two fases. Conference Duplex Stainless Steel's82-Proceedings, St. Louis, Estados Unidos, p. 693-756, 1982.
- ⁽³⁾ FOLKHARD, E. Welding Metallurgy of Stainless Steels. Springer-Verlag, Áustria, p. 140-143, 179-196.
- ⁽⁴⁾ LULA, R.A. Stainless Steel, ASM, Estados Unidos, ed. 3, p. 71-80, 1989.
- ⁽⁵⁾ LONDOÑO, A,J,R. Estudo da Precipitação de Nitreto de Cromo e Fase Sigma por Simulação Térmica da Zona Afetada pelo Calor na Soldagem Multipasse de Aços Inoxidáveis Duplex. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Eng. Metalúrgica da Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, 151p., 1997.
- ⁽⁶⁾ CUNHA, J,A,R ; BRANDI, S,D Aços Inoxidáveis Duplex: considerações sobre sua soldagem e processos empregados. Núcleo Inox, ano IV, n. 7: p. 6-8, 1996.
- ⁽⁷⁾ KARLSSON, L; PAK, S. Welding of duplex stainless steels-properties of SMAW, FCAW and SAW welded joints. Conference Duplex Stainless Steel's91-Proceedings, Beaune, Bourcogne-França, p. 413-420, 1991.
- ⁽⁸⁾ BRANDI, S,D. Estudo da Soldabilidade do Aço Inoxidável Duplex DIN W. Nr. 1.4462 (UNS S31803). Tese (Doutorado) - Departamento de Eng. Metalúrgica da Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, 265p., 1992.