

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇOS INOXIDÁVEIS SUPERDUPLEX DA NORMA ASTM A890/A890M, GRAUS 5A E 6A*

Clélia Ribeiro de Oliveira¹

Marcelo Martins²

Paulo Roberto Mei³

Resumo

Os Aços Inoxidáveis Super Duplex (AISD) constituem sistemas termodinamicamente metaestáveis à temperatura ambiente, de elevada resistência à corrosão por pite em meios contendo cloreto e exibem moderada resistência mecânica. Os AISD possuem diversas aplicações industriais e a principal delas é no setor petroquímico, principalmente nas plataformas *offshore*. O propósito deste trabalho foi o de analisar a microestrutura e as propriedades mecânicas de juntas soldada por arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) em aços da norma ASTM A890/A890M graus 5A e 6A. As análises foram realizadas sem tratamento térmico pós-soldagem. Procedeu-se ensaios microestruturais (MO e MEV) e ensaios mecânicos (Charpy a -46 e 25 °C e microdureza) na zona fundida (ZF). Os parâmetros de soldagem foram bem definidos para que não ocorresse fragilidade no material. A microdureza na zona fundida ficou entre 330 e 340 Vickers, o que está de acordo com o valor especificado pela norma Norsok, que é menor que 350 Vickers. No ensaio de impacto Charpy a absorção de energia foi em torno de 86 J para temperatura ambiente e 54 J a -46°C para ambos os aços. A concentração de fases da austenita na zona fundida ficou em torno de 39%, dentro da faixa estabelecida pela norma ASTM A890/A890M que é de 35 a 65%. As fraturas mostraram-se predominantemente fibrosas, caracterizando elevada plasticidade do material, mesmo em temperaturas negativas.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis super duplex; Soldagem; Ensaio Charpy; Microestrutura.

MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF WELDED JOINTS IN SUPER DUPLEX STAINLESS STEEL ASTM A890/A890M GRADE 5A AND 6A

Abstract

The Super Duplex Stainless Steels (SDSS) are thermodynamically metastable at ambient temperature systems, with high resistance to pitting corrosion in media containing chloride ions and exhibit moderate strength. The SDSS have many industrial applications and the main one is in the petrochemical sector, especially on offshore platforms. The purpose of this study was to analyze the microstructure and mechanical properties of welded joints by Shielded Metal Arc Welding (SMAW) in steel ASTM A890/A890M, 5A and 6A grades. The analyzes were carried out without post-welding heat treatment. Microstructural observations and mechanical tests (Charpy impact -46°C and 25, hardness) were performed in the molten zone. The welding parameters were well defined to prevent material weakness. The hardness in the molten zone was between 330 and 340 Vickers, this is in accordance with the value specified by the standard Norsok, which is less than 350 Vickers. In Charpy impact test energy absorption was about 86 J to room temperature and 54 J at -46°C for both steels. The concentration of austenite phases in the melt zone was around 39%, within the range established by ASTM A890 / A890M which is 35-65%. Fractures showed predominantly fibrous, featuring high plasticity of the material, even in low temperatures.

Keywords: Super duplex stainless steel; Welding; Charpy test; Microstructure.

¹ Engenheira de Materiais, mestranda, aluna de pós-graduação, Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

² Engenheiro de Materiais, doutor, gerente industrial, Setor de Produção, Sulzer Brasil S/A, Jundiaí, São Paulo, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, professor titular, Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex surgiram na França por volta de 1933, a partir de um erro de formulação na liga Fe-Cr, e foram aprimorados no decorrer dos anos com balanceamento das fases através do controle dos elementos de liga [1]. Os aços inoxidáveis duplex (AID) e os superduplex (AISD) são sistemas Fe-Cr-Ni termodinamicamente metaestáveis à temperatura ambiente, com elevada resistência à corrosão por pite em meios contendo cloreto e exibem moderada resistência mecânica [2]. A microestrutura é bifásica, apresentado em torno de 50% de ferrita e 50% da austenita. A formação da estrutura duplex é promovida pelo equilíbrio entre elementos que estabilizam essas fases, como cromo, molibdênio, nitrogênio e níquel [3]. A resistência equivalente à corrosão por pite (*Pitting Resistance Equivalent Number* - PREN) é superior a 40. Os AISD possuem diversas aplicações industriais, sendo a principal delas no setor petroquímico, principalmente nas plataformas *offshore*.

Os elementos cromo e molibdênio elevam à resistência a corrosão por pites, estabilizam a ferrita e tendem a formar intermetálicos, como a fase sigma (σ) e a fase Chi (χ). O níquel estabiliza a austenita promovendo mudança na estrutura cristalina de CCC (ferrita) para CFC (austenita). O nitrogênio estabiliza a austenita, aumenta à resistência à corrosão, possui baixo custo, não evita a formação de intermetálicos, mas retarda a sua precipitação sendo aplicado em aços que possuem elevados teores de molibdênio e cromo [3].

Algumas fases secundárias indesejáveis podem se formar na faixa de temperatura de 300 a 1000°C nos AISDs durante o envelhecimento isotérmico ou no tratamento térmico. A formação de fase sigma (Fe-Cr) é um dos principais problemas nos AISD. Ela se forma nas interfaces ferrita/austenita a uma temperatura entre 600 e 1000°C e provoca fragilização e baixa resistência à corrosão [4-6].

A Figura 1 mostra o processo de formação das fases ferrita e austenita no aço superduplex. Os diagramas pseudobinário são representações de um corte do diagrama ternário Fe-Cr-Ni onde a composição do ferro é fixa. Quanto maior a quantidade de níquel mais favorável é a formação da austenita e quanto maior teor de cromo mais facilmente forma-se a ferrita. Na solidificação de aços inoxidáveis duplex a fase α (ferrita) solidifica totalmente a partir do líquido e a transformação de ferrita para γ (austenita) ocorre no estado sólido por difusão, na faixa de temperatura entre 1200 e 800°C por nucleação e crescimento. Em temperaturas mais baixas (650-300°C) a transformação é similar a uma reação martensítica. Em altas velocidades de resfriamento a austenita alotrópica precipita nos contornos de grãos da matriz ferrítica e cresce preferencialmente ao longo deles. Quando satura os sítios de nucleação nos contornos de grãos a austenita *Widmanstätten* precipita e cresce para o centro dos grãos da ferrita [4,7-9].

A maior dificuldade durante as operações de soldagem é a obtenção de quantidades de austenita perto de 50% e evitar a formação de fases deletérias durante aquecimento e resfriamento [10]. Para isso, os parâmetros de soldagem devem ser bem definidos para que não ocorra a fragilização na região soldada, propícia a sofrer corrosão, trincas e fissuras, dentre outros defeitos. Assim este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar a microestrutura e as propriedades mecânicas de juntas soldada por arco elétrico com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding* – SMAW) em aços da norma ASTM A890/A890M graus 5A e 6A.

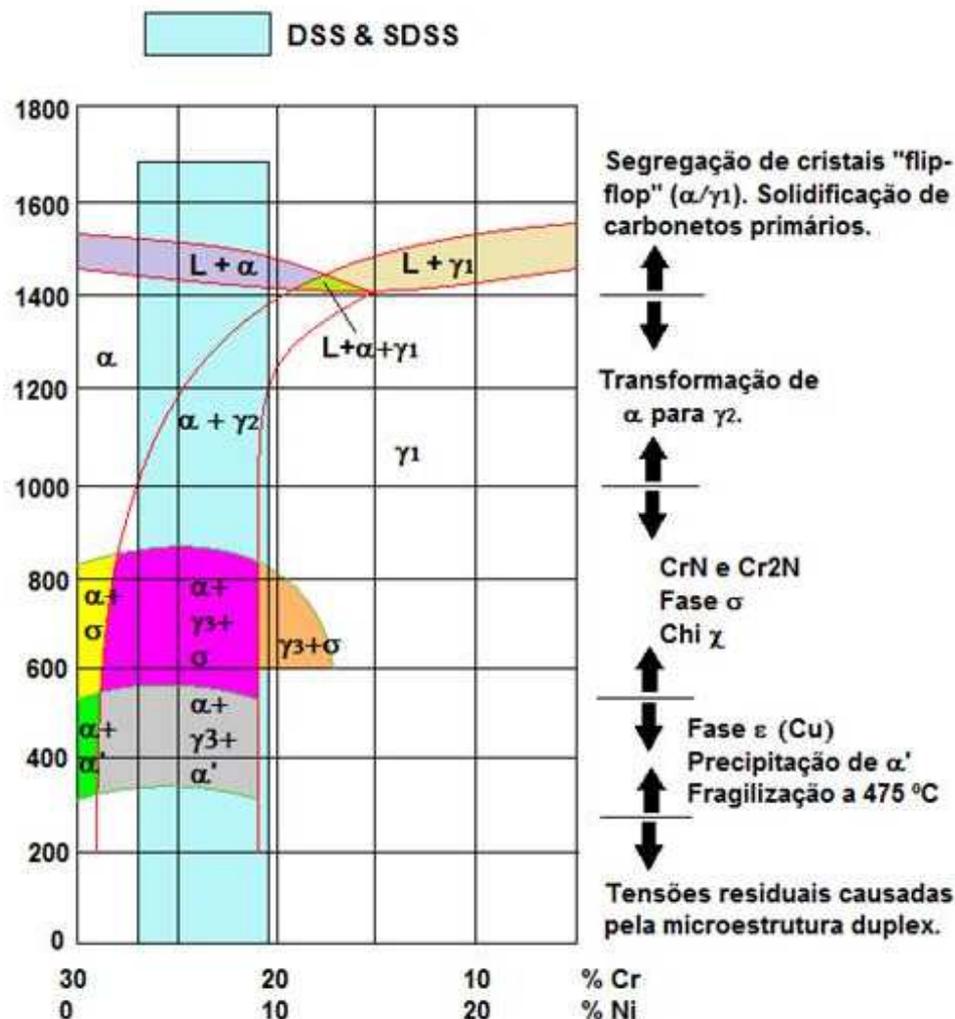


Figura 1: Diagrama pseudobinário da liga Fe-Cr-Ni, com teor de ferro fixado em 70%. Modificado de Pohl *et al* [9]. Legenda: L=líquido; α =ferrita; γ_1 = austenita primária; γ_2 = austenita secundária; γ_3 = austenita terciária; σ =sigma e α' =alfa linha ou fragilização a 475°C.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os aços utilizados neste trabalho foram produzidos na empresa Sulzer Brasil S/A em forno de indução com posterior desgaseificação a vácuo. As composições químicas (Tabela 1) foram determinadas na própria empresa com um espectrômetro de emissão óptica da ARL, modelo 3640, de 43 canais. Após a fundição e solidificação em molde de areia as placas foram tratadas termicamente de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM A890/A890M [11].

Tabela 1: Composição química dos aços utilizados e definidos pela norma ASTM A890/A890M [11]. A composição do eletrodo utilizado está descrita na última linha da tabela. (Porcentagens em massa).

	Cr	Ni	Mo	N	Si	Mn	C	S	P	W	Cu
Grau - 5A	24,94	7,51	4,17	0,249	0,98	0,76	0,022	0,005	0,034	-	-
Grau - 6A	24,08	8,14	3,3	0,258	0,91	0,78	0,021	0,004	0,026	0,68	0,9
Norma ASTM, grau 5A	24,0 a 26,0	6,0 a 8,0	4,0 a 5,0	0,10 a 0,30	1,00	1,50	0,03	0,04	0,04	-	-
Norma ASTM, grau 6A	24,0 a 26,0	6,5 a 8,5	3,0 a 4,0	0,20 a 0,30	1,00	1,50	0,03	0,025	0,03	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0
Eletrodo Zeron	25,1	9,4	3,66	0,21	0,46	0,91	0,03	0,007	0,022	0,52	0,64

Verifica-se que todos os elementos analisados estão dentro dos limites estabelecidos pela norma e a PREN está em torno de 40 tanto para o aço como para o eletrodo, índice característico do superduplex.

Aço grau 5A: PREN = (24,94) Cr + 3,3*(4,17) Mo + 16*(0,249) N = 42,68

Aço grau 6A: PREN = (24,08) Cr + 3,3*(3,3) Mo + 16*(0,258) N = 39,09

Eletrodo Zeron 100: PREN = (25,1) Cr + 3,3*(3,66) Mo + 16*(0,21) N = 40,54

O eletrodo revestido utilizado foi Zeron® 100XKS (superduplex). A soldagem ocorreu seguindo os parâmetros estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de soldagem utilizados.

Processo	SMAW
Tensão (V)	20 - 25
Tipo de corrente e polaridade	CC+
Corrente (A)	100 – 130
Velocidade de soldagem (mm/s)	0,005
Energia de soldagem (kJ/mm)	1,3
Temperatura de interpasse (°C)	150
Eletrodo (diâmetro - mm)	4
Posição de soldagem	1G

CC+ – Corrente contínua e eletrodo polarizado positivamente (polaridade inversa); 1G – placa na horizontal.

As placas de qualificação foram confeccionadas nas seguintes dimensões: 460 x 150 x 46 mm. Para análise metalográfica as amostras foram lixadas seguindo a sequência de granulometria: 320 a 2500 meshes e polidas com pasta diamantada de granulometria 6 e 3 µm. A obtenção de imagens foi realizada através de um microscópio ótico marca Zeiss, modelo Axiovert 40 Mat. O ataque eletrolítico foi realizado com auxílio de um aparelho da marca Struers Sultrade, modelo Lectropol-5, a solução utilizada foi de NaOH (10%) em água destilada, tensão de 3 V e tempo de imersão 13 s para análise macro e microestrutural. A análise quantitativa de fases deu-se por meio do software Axiovision 4.8.2 da Zeiss, selecionando-se dez regiões aleatoriamente. Todas estas atividades foram realizadas na própria Sulzer.

As medidas de microdureza Vickers foram realizadas em um aparelho marca Future-Tech, modelo FV 800, com carga de 0,3 kgf por 10 segundos, em 15 pontos na região de solda. Os testes de impacto Charpy foram realizados na seção transversal da solda com equipamento Otto Wolpert-Werke - GMBH, PW 30 K nas temperaturas de 25 e -46 °C, com 3 corpos de prova para cada condição. Os corpos de prova para o ensaio Charpy foram preparados segundo a norma ASTM A370 [12]. Os ensaios de tração foram realizados na temperatura ambiente nas placas antes da solda (metal de base) utilizando-se um equipamento Tinius Osen, com corpos de prova foram preparados segundo a norma ASTM A370 [12] com três corpos de prova para cada aço. Todos os ensaios foram realizados na Sulzer.

As imagens das fraturas foram obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, marca Zeiss, modelo EVO-MA15 e aquisição das imagens pelo software Smart-SEM em equipamentos do DEMM-FEM-Unicamp.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das propriedades mecânicas (Tabela 3) indica que os valores obtidos para o metal de base estão de acordo com o especificado pela norma ASTM A890 para ambos os aços.

Tabela 3: Propriedades mecânicas obtidas no metal de base e os especificados pela norma ASTM A890/A890M [11].

Aço	LR (MPa)	LE (MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)
Grau 5A	812	584	33,9	50,3
Grau 6A	819	537	33,9	57,5
Norma ASTM grau 5A (mínimo)	690	515	18	-
Norma ASTM grau 6A (mínimo)	690	450	25	-

LR: Limite de Resistência; LE: Limite de Escoamento.

Nas figuras 2 e 3 pode-se observar as regiões bem distintas de austenita (fase branca) e ferrita (fase azul) no metal de base (MB), com 58,73 % de ferrita e 41,27 % de austenita no aço 5A e 44,87 % de ferrita e 55,13 % de austenita no aço 6A.

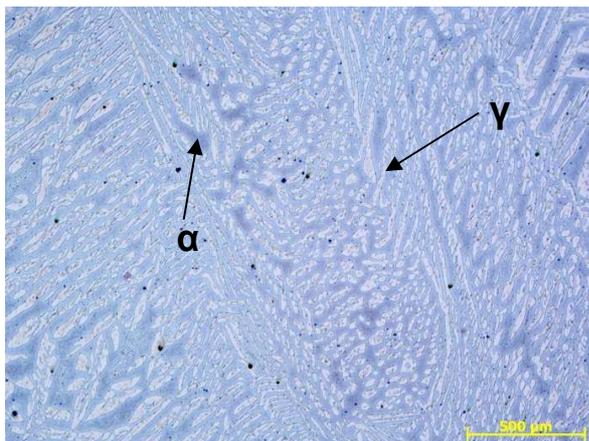


Figura 2: Microscopia ótica do metal de base, grau 5A.

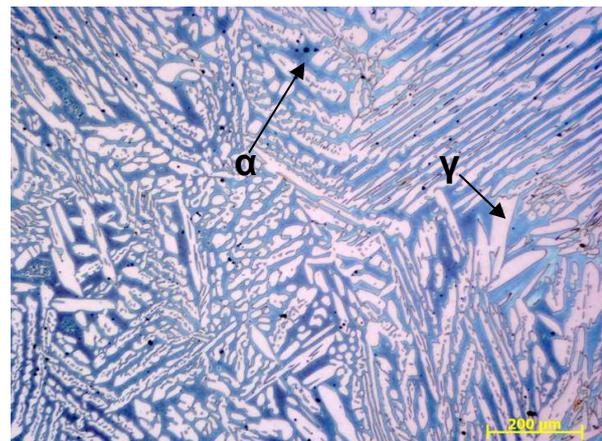


Figura 3: Microscopia ótica do metal de base, grau 6A.

Após a soldagem, na zona fundida de ambos os aços (Figura 4), a concentração de fases não ficou em torno de 50 %, mas ainda assim esta região pode ser considerada como um aço duplex, visto que a concentração de fases da austenita está dentro da faixa estabelecida pela norma ASTM A890/A890M [11], que é de 35 a 65%. Esses valores são próximos dos obtidos por Mohammed *et al* [13].

Contagem de fases na zona fundida (ZF)

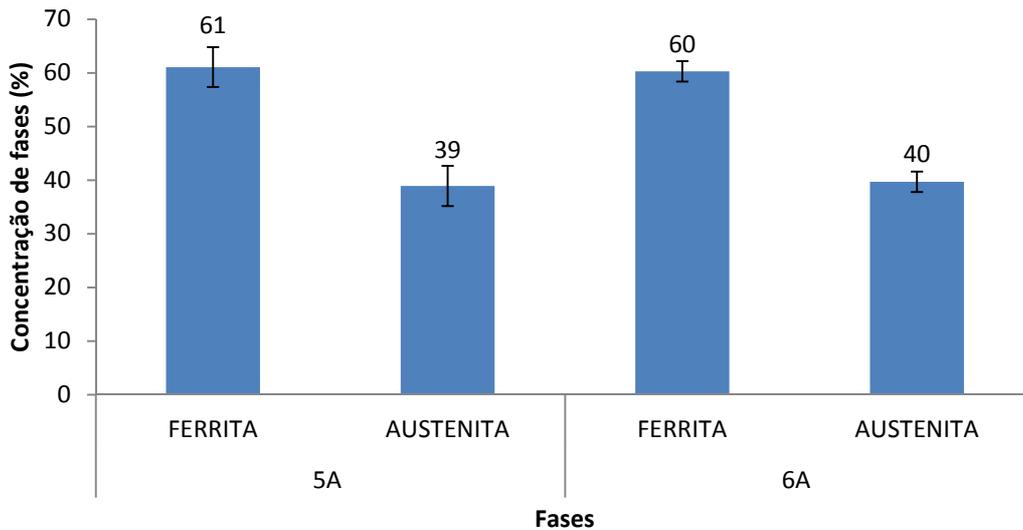


Figura 4: Concentração de fases na zona fundida (ZF).

Não foi observada na zona fundida (ZF) a precipitação de fases deletérias, apenas a austenita secundária (γ_2). Nas Figuras 5 e 6 podem ser observadas diferenças na morfologia e no tamanho da austenita precipitada, o que pode ser explicado pela diferença na velocidade de resfriamento entre os cordões de solda. Em altas velocidades de resfriamento a austenita se precipita nos contornos de grãos da ferrita e cresce preferencialmente ao longo deles. Quando ocorre a saturação dos sítios de nucleação nos contornos de grãos a austenita precipita e cresce para o centro dos grãos da ferrita.

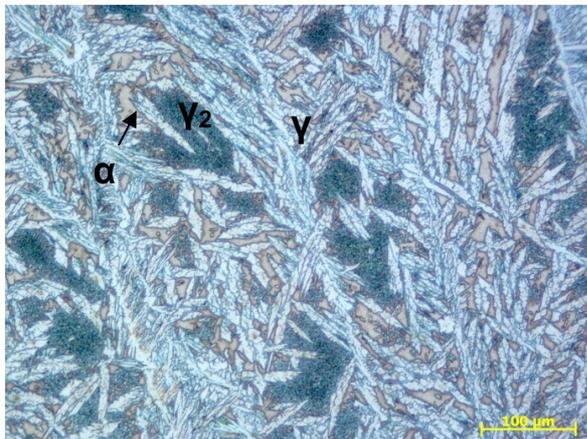


Figura 5: Microscopia ótica na ZF, grau 5A.

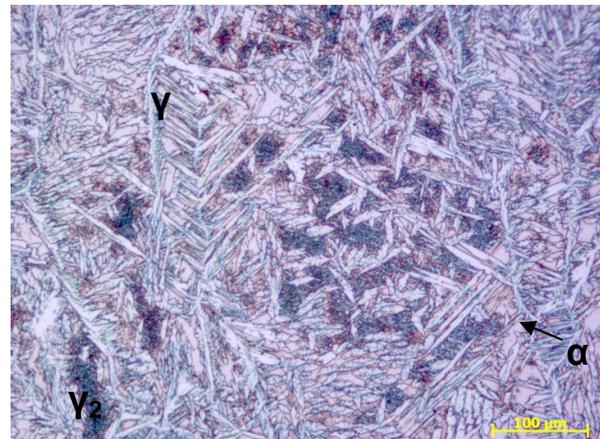


Figura 6: Microscopia ótica na ZF, grau 6A.

Nas Figuras 7 e 8 observa-se a austenita primária sendo consumida pela ferrita na Zona Afetada Termicamente (ZTA). Esta é uma região bastante delicada, pois quanto maior o teor de ferrita maior é a probabilidade de se formar intermetálicos como, por exemplo, a fase sigma, quando exposta ao calor. Não foi observada a precipitação de intermetálicos.

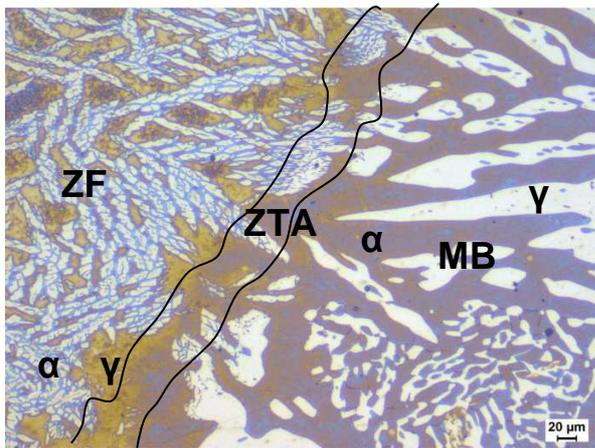


Figura 7: Microscopia ótica da ZTA, grau 5A.

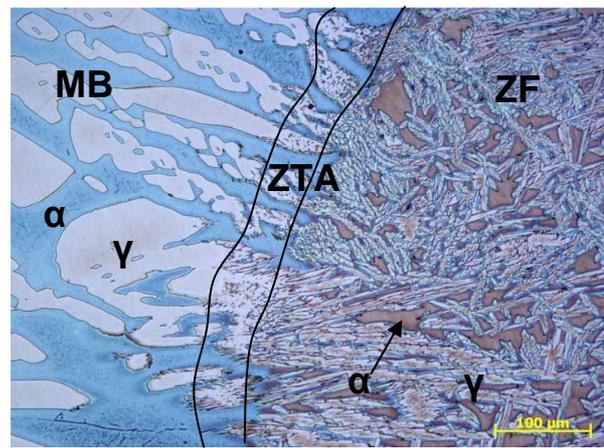


Figura 8: Microscopia ótica da ZTA, grau 6A.

As Figuras 9 e 10 mostram precipitados de austenita secundária na zona fundida, em solda multipasse a partir da seção transversal da solda. O reaquecimento devido aos passes posteriores permite um aumento da taxa de difusão, o que resulta no coalescimento da austenita primária e/ou na nucleação de novas partículas de austenita.

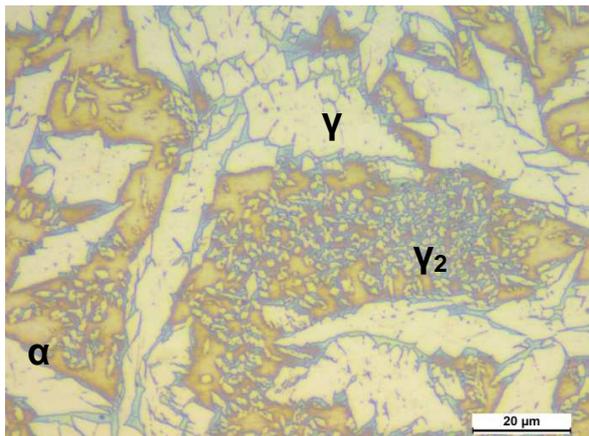


Figura 9: Microscopia ótica da ZF, grau 5A.

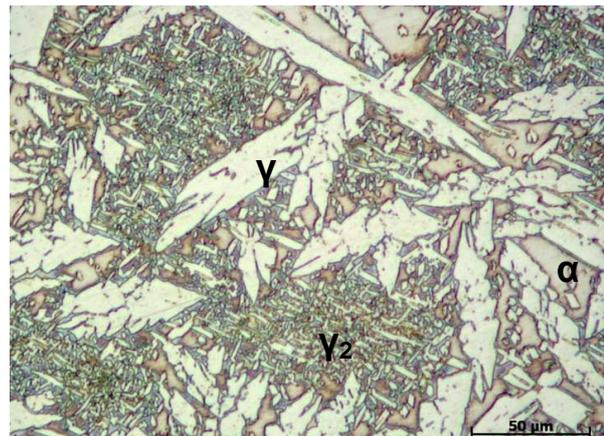


Figura 10: Microscopia ótica da ZF, grau 6A.

Na Figura 11 estão apresentados os valores de microdureza na zona de fusão. Segundo a norma Norsok [14], esse valor não pode ultrapassar a 350 HV e, neste caso, os valores estão atendendo a referida norma.

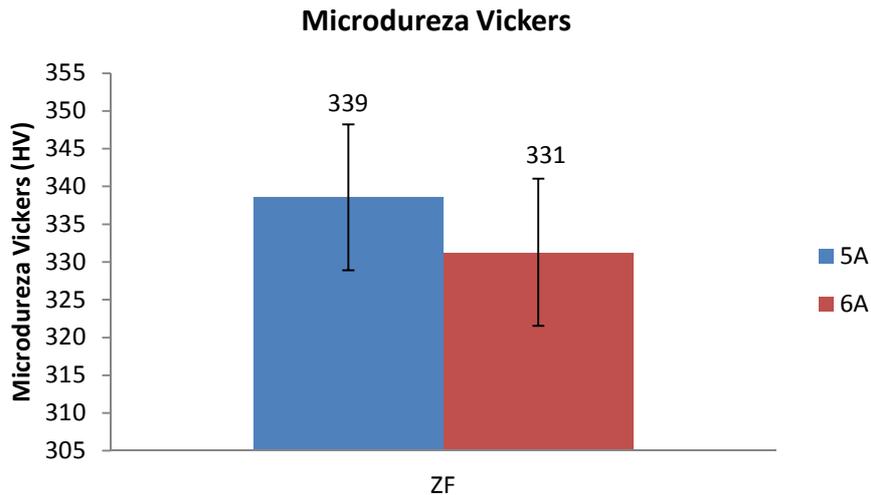


Figura 11: Microdureza Vickers realizada na zona fundida (ZF).

No ensaio de impacto Charpy (Figura 12) observou-se uma menor energia de absorção para ambos os aços na temperatura mais baixa, o que era de se esperar. Por outro lado não se observou diferenças significativas dos dados de Charpy para os dois aços nas duas temperaturas testadas. Esses valores são próximos dos obtidos por Mohammed *et al.*

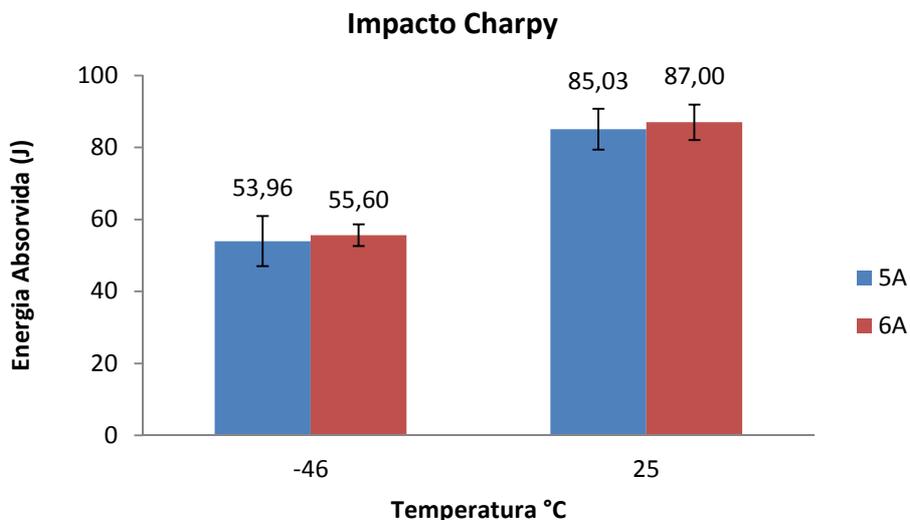


Figura 12: Energia absorvida no ensaio de impacto Charpy na zona fundida (ZF).

A morfologia da região de fratura (figuras 13 a 20) após o ensaio Charpy a 25°C, para ambos os aços na zona fundida, mostrou somente a presença de alvéolos (*dimples*) caracterizando o comportamento dúctil. No ensaio a -46 °C apareceram poucas facetas de clivagem, o que explica a redução na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy de 85 e 87 J para 53 e 55 J, para os aços grau 5A e 6A, respectivamente. O aspecto das fraturas para ambas as temperaturas foi predominantemente fibroso, característica de material dúctil.

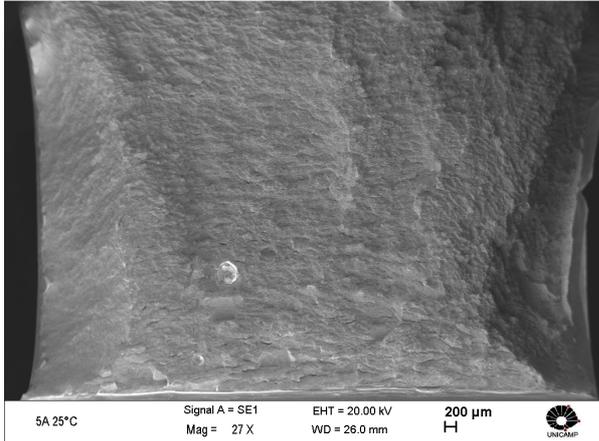


Figura 13: MEV da fratura na região da solda realizada a 25 °C, grau 5A.

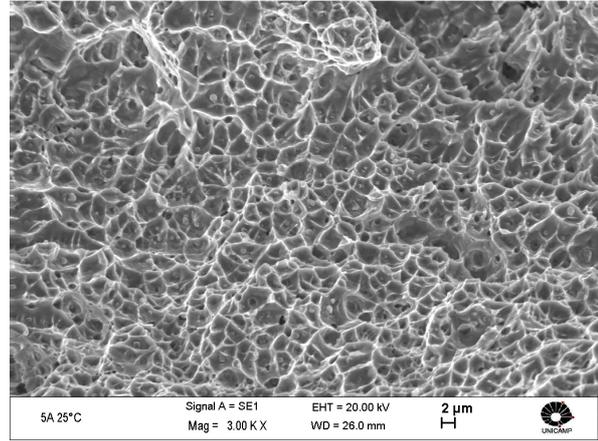


Figura 14: MEV da fratura na região da solda realizada a 25 °C, grau 5A.

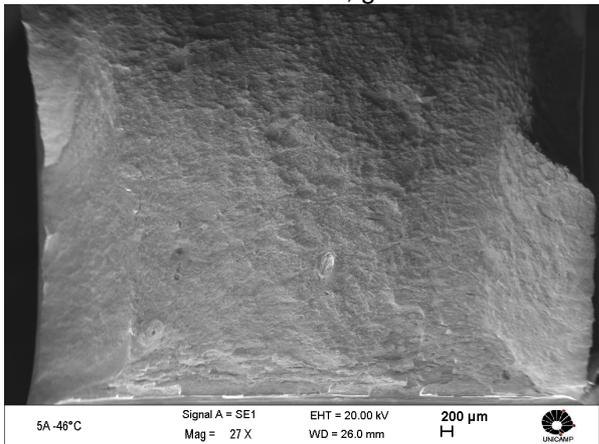


Figura 15: MEV da fratura na região da solda realizada a -46 °C, grau 5A.

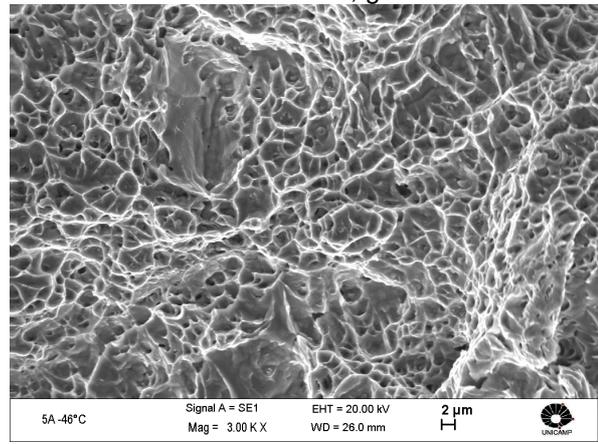


Figura 16: MEV da fratura na região da solda realizada a -46 °C, grau 5A.

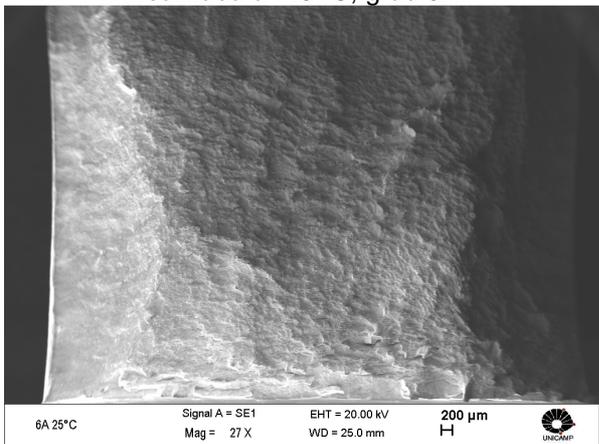


Figura 17: MEV da fratura na região da solda realizada a 25 °C, grau 6A.

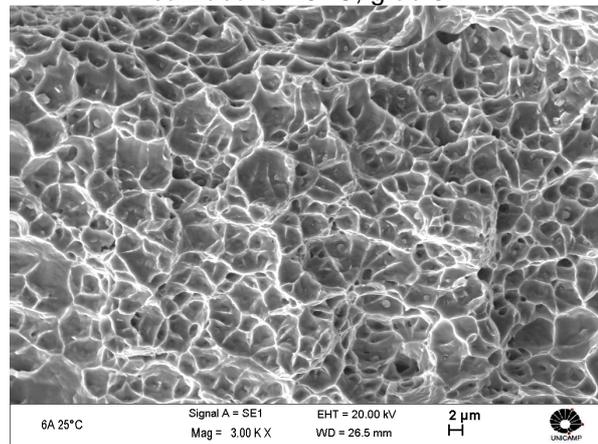


Figura 18: MEV da fratura na região da solda realizada a 25 °C, grau 6A.

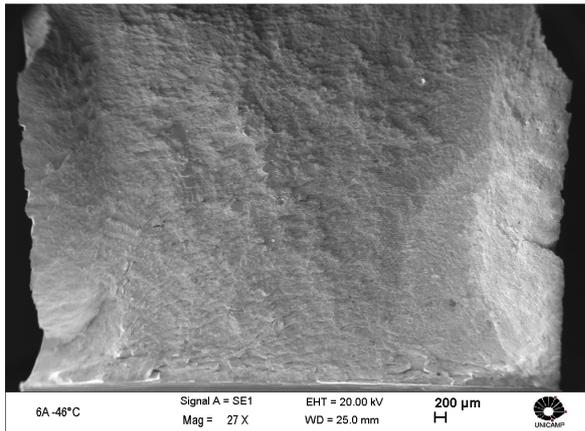


Figura 19: MEV da fratura na região da solda realizada a -46 °C, grau 6A.

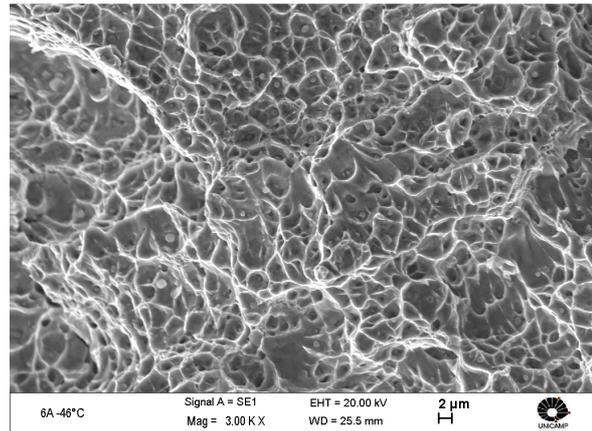


Figura 20: MEV da fratura na região da solda realizada a -46 °C, grau 6A.

4 CONCLUSÕES

A soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido de aços graus 5A e 6A da norma ASTM A890/A890M sem tratamento pós-soldagem permitiu as seguintes conclusões:

- A concentração de fases da austenita na zona fundida ficou em torno de 39%, dentro da faixa estabelecida pela norma ASTM A890/A890M que é de 35 a 65%.
- Na análise microestrutural foi observada a presença de austenita secundária (γ_2) no metal de adição.
- A microdureza na zona fundida ficou entre 330 e 340 Vickers, o que está de acordo com o valor especificado pela norma Norsok, que é menor que 350 Vickers.
- No ensaio de impacto Charpy a absorção de energia foi em torno de 86 J para temperatura ambiente e 54 J a -46°C para ambos os aços, o que está em acordo com os resultados obtidos por Mohammed *et al* [13].
- As fraturas mostraram-se predominantemente fibrosas, caracterizando elevada plasticidade do material, mesmo em temperaturas negativas.

Agradecimentos

À Sulzer Brasil S/A pelo fornecimento do material e suporte para a realização da parte experimental do trabalho à CAPES pela bolsa de mestrado recebida e à FEM-Unicamp pela participação no programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica.

REFERÊNCIAS

- 1 Charles, J. Super duplex stainless steels: structure and properties. In Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourcogne-France, Proceedings. 1991. Ed: Charles, J; Bernhardsson, S. Les Ulis, France, Les Éditions de Physique, Vol. 1, pag. 151 – 168.
- 2 Martins, M. Caracterização microestrutural-mecânica e resistência à corrosão do aço inoxidável super duplex ASTM A890 / A890M Grau 6A. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo. 2006, São Paulo, pag. 284.
- 3 IMO. Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis duplex. 2ª edição, 2009, atualização 2012, pag. 64.

- 4 Londono, 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 em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1997. São Paulo, Brasil, pag. 151.
- 5 Nilsson, J.O. Super duplex stainless steels. Materials Science and Technology. 1992, Vol. 8, pag. 685-700.
- 6 Lo, K.H.; Shek, C.H.; Lai, J.K.L. Recent developments in stainless steels. Materials Science and Engineering. 2009, Vol. 65, p. 39-104.
- 7 Garcia, E. R. V. Efeito da corrente de soldagem do processo TIG pulsado autógeno na microestrutura da zona fundida dos aços inoxidáveis duplex UNS S32304 e UNS S32101. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011, São Paulo, pag. 185.
- 8 Southwick, P. D.; Honeycombe, W.K. Decomposition of ferrite to austenite in 26%Cr-5%Ni stainless steel. Metal Science. 1980, Vol. 14, n. 7, pag. 253-261.
- 9 Pohl, M.; Storz, O.; Glogowski, T. Effect of Intermetallic Precipitations on the Properties of Duplex Stainless Steels. Materials Characterization. 2007, Vol. 58, pag. 65-71.
- 10 Ramkumara, K. D.; Mishra, D.; Vignesa, M.K.; Ganesh Raja, B.; Arivazhagana, N.; Shah Vitesh Narena, S. Suresh Kumar. Metallurgical and mechanical characterization of electron beamwelded super-duplex stainless steel UNS 32750. Journal of Manufacturing Processes. 2014. Vol. 16, pag. 527-534.
- 11 American Society for Testing and Materials - ASTM A890/A890M – 13. Standard specification for castings, iron-chromium-nickel-molybdenum corrosion-resistant, duplex (austenitic/ferritic) for general application. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- 12 American Society for Testing and Materials – ASTM A370 – 14. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- 13 Mohammed, Asif M; Kulkarni, Anup Shrikrishna; P. Sathiya; Sunkulp, Goel. The impact of heat input on the strength, toughness, microhardness, microstructure and corrosion aspects of friction welded duplex stainless steel joints. Journal of Manufacturing Processes. 2015, Vol. 18, pag. 92-106.
- 14 Norsok Standard M601-94. Welding and inspection of piping. Lysaker, Norway: Standards Norway; 2008; Edition 5, pag. 20.