

ESTUDO COMPARATIVO DE JUNTAS SOLDADAS POR FEIXE DE ELÉTRONS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS 304L E DUPLEX UNS S32304 EM COMPONENTES DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR

CARLOS JOSÉ DE MORAES FREIRE^{1*}, GLÁUCIO SOARES DA FONSECA²

¹Engenheiro de Processo da INB e Mestrando em Metalurgia, UFF, Volta Redonda-RJ, carlosfreire@inb.gov.br

² DSc em Engenharia Mecânica, Prof do PPGEM/UFF, Volta Redonda-RJ, glaucio@metal.eeimvr.uff.br

RESUMO

A célula de combustível nuclear é uma estrutura capaz de acondicionar um conjunto de varetas herméticas contendo compostos de material físsil e tubos com elementos controladores das reações. Embora o elemento combustível de um reator de potência seja projetado para uma vida útil curta, após sua utilização ele será estocado por longos períodos, devendo manter a integridade estrutural e a hermeticidade das varetas. Os aços inoxidáveis austeníticos tipo 304L apresentam excelente resistência à corrosão, alta resistência a tração, bom alongamento e soldabilidade, por isso, embora tenham o nível de resistência ao escoamento relativamente baixo no estado recozido, são muito utilizados. Nos últimos anos, tem-se dados do aumento de falhas em componentes acondicionados em piscinas de armazenamento de combustível gasto, causados por falhas estruturais da fixação e sustentação dessas células. Os aços inoxidáveis duplex, com microestrutura perto de 50% de austenita e 50% de ferrita, demonstram ser uma alternativa viável e econômica aos aços austeníticos clássicos, trazendo maiores limites de resistência mecânica combinada com elevada resistência à corrosão em meios agressivos. No estudo analisa-se o comportamento de juntas de canto (ângulo de 90° sem preparação adicional) de chapas de aço inoxidável 304L e *Lean Duplex* UNS S32304 soldadas por feixes de elétrons com taxas similares de energia em condições de alto vácuo.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis austeníticos, aços *lean duplex*, estudo comparativo de aços inoxidáveis.

COMPARATIVE STUDY OF ELECTRON BEAMS WELDED JOINTS BY 304L AND DUPLEX UNS S32304 STAINLESS STEEL IN NUCLEAR FUEL COMPONENTS

ABSTRACT

The nuclear fuel cell is composed by a structure enable to pack a group of hermetic rods containing compounds of fissile material and tubes with reaction control elements. Although the combustible element of a power reactor is projected to a short useful life, after its utilization it shall be stocked for long periods, willing to maintain the structural integrity and the hermetic characteristic of the rods. Austenitic stainless steels form 304L present excellent corrosion resistance, low yield strength, high tensile strength, good elongation and weldability. Therefore, though this material has yield strength level relatively low in the annealed state, they are widely used. For the recently past years, an increase in the failure of components conditioned in utilized fuel storage pools has been observed, caused by structural failure of the fixation and support system of these cells. Duplex stainless steels, with a microstructure around 50% austenite and 50% ferrite, have been established as a viable and economical alternative to the classic austenitic steels, guaranteeing greater limits of mechanical resistance combined with high corrosion resistance in aggressive environments. This study analyzes the performance of corner joints (90° angle without additional preparation) of stainless steel sheets 304L and *Lean Duplex* UNS S32304 welded by electron beams with similar rates of energy under high vacuum conditions.

Keywords: austenitic stainless steel, lean duplex stainless steel, stainless steel comparative study

1 - INTRODUÇÃO

Devido à sua boa combinação de resistência mecânica, alta resistência a corrosão e custos sistêmicos de construção e manutenção, os aços inoxidáveis (AI) são cada vez mais utilizados em aplicações industriais. Podem ser classificados com base na microestrutura a temperatura ambiente em

Martensíticos, Ferríticos, Austeníticos, Ferrítico-Austenítico (Duplex) e Endurecidos por Precipitação (Callister, 2008).

Os aços inoxidáveis austeníticos são os que apresentam maior aplicabilidade devido à boa resistência à corrosão combinada ao baixo limite de escoamento com alta resistência a tração, bom alongamento e soldabilidade. Devido à presença de elementos de liga como níquel, consegue-se estabilizar a austenita em temperatura ambiente, entretanto, o nível de resistência ao escoamento é relativamente baixo, cerca de 200 MPa no estado recozido.

Alguns aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma microestrutura metaestável, podendo se transformar em martensita quando deformados plasticamente em temperaturas abaixo da temperatura máxima de formação da martensita. Os aços austeníticos 304L, com teor de carbono máximo de 0,03%, são amplamente usados seja na construção civil, na indústria náutica ou na construção mecânica, em condições severas tais como tanques para produtos químicos, componentes do núcleo em reatores nucleares, indústria petrolífera e etc (Callister, 2008 e Modenesi, 2001).

Devido a suas propriedades, os aços austeníticos da classe 304 passaram a ser amplamente usados na fabricação dos bocais e itens estruturais de combustível nuclear para reatores de potência, entretanto atualmente tem-se reportado ocorrências de falhas estruturais de elementos com mais de 20 anos de estocagem, pelo desenvolvimento de corrosão e propagação de trincas na região do bocal de sustentação (bocal superior).

Em paralelo, novas ligas passaram a ser utilizadas na indústria devido a sua característica de reunir propriedades e características de diferentes classes de aços inoxidáveis. Os chamados aços inoxidáveis duplex apresentam microestrutura composta por frações variadas de austenita e ferrita, e combinam características de boa soldabilidade (como os austeníticos), limite de escoamento mais elevado (como alguns ferríticos) e resistência a corrosão elevada em diversos meios (Modenesi, 2001).

Segundo Schwartzman (2010), os materiais utilizados nos reatores nucleares estão expostos a condições predominantemente favoráveis ao desenvolvimento de corrosão sob tensão (CST), qual seja, a aplicação combinada de pressão, temperatura e solicitações mecânicas, além de tensões residuais resultantes dos processos de fabricação, como soldagem, conformação mecânica, tratamento superficial e etc.

Visando uma maior compreensão do comportamento desses aços o trabalho envolveu o estudo comparativo de um aço inoxidável austenítico 304L e um *lean duplex* UNS S32304 soldados por feixe de elétrons para aplicações em núcleo de reator numa usina termonuclear, analisando o comportamento mecânico e eletroquímico das regiões da solda. O uso dos aços duplex para essa aplicação abre um novo horizonte pela possibilidade de redução do peso do conjunto e ganhos de resistência mecânica.

2 – MATERIAIS E METODOS

Algumas variações dos aços inoxidáveis austeníticos , tendo como base o AISI 304, são obtidas a partir deste com a adição ou retirada de elementos de ligas com objetivos específicos (METALS HANDBOOK, 1990).

Por outro lado a combinação de composição química e processo de fabricação dos aços inoxidáveis duplex foi desenvolvida de modo a apresentar boa resistência à corrosão em diferentes condições, particularmente resistentes a fenômenos de corrosão localizada, solicitação sob tensão e corrosão por pite em presença de cloretos. (Senatore et al, 2013). Estudos revelaram que são estes os dois fenômenos responsáveis por mais de 50% das falhas no aço AISI 304 devido à corrosão.

Os materiais estudados são o aço inoxidável austenítico 304L processado pela Aperam Inox América do Sul S/A laminado na espessura de 6,35 mm e o duplex UNS S32304 designado pela Unified Numbering System (UNS) como aço *lean duplex*, na forma de chapa com 6,30 mm de espessura, cujas composições químicas são dadas na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço inoxidável austenítico 304 e lean duplex 32304

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
304L	0,024	1,260	0,430	0,0303	0,0015	18,17	8,02	0,036	0,0026
S32304	0,019	1,531	0,323	0,0242	0,0001	22,26	3,80	0,246	0,0037
Elemento	Cu	Co	V	Nb	Pb	B	Ti	Sn	W
304L	0,038	0,045	-	-	-	-	-	-	-
S32304	0,436	0,097	0,050	0,0040	0,001	0,002	0,0037	0,0052	0,0124

(Aperam Inox América do Sul S/A)

Suas propriedades mecânicas certificadas pelo fabricante/fornecedor apresentam dureza, limite de escoamento, limite de resistência e deformação total, conforme Tabela 2.

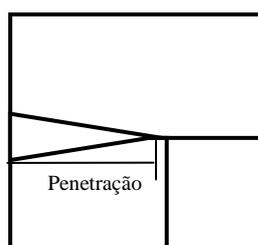
Tabela 2: Propriedades mecânicas do AISI 304 e Lean Duplex 32304 no estado recozido

Propriedades	304L	UNS S32304
	Media	Media
Dureza (HB)	82	98
LE 0,2%(MPa)	284	395
LR (MPa)	666	678
Alongamento %	50	35

(Aperam Inox América do Sul S/A)

As amostras, conforme Figura 1, foram produzidas via soldagem por feixe de elétrons em máquina Prazisionstechnik GmbH com corrente de 39 a 44 (mA) equivalente a um aporte térmico de 212 a 240 J/mm e submetidas a teste de dureza RB , dureza Vickers, ensaio de tração , análise metalográfica e ensaio de corrosão intercrystalina.

Figura 1: Vista geral esquemática da junta soldada



Para a identificação dos corpos de prova, foi adotada uma sequência de dados compreendendo a sequência inicial 304L ou LDSS respectivamente para o aço austenítico 304L e para o *lean duplex*, seguida da indicação do nível de corrente de soldagem (se máxima ou mínima da faixa estudada).

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de dureza combinados ao teste de tração confirmaram a propriedade do aço 304L de apresentar endurecimento por deformação citado por Costa e Silva e Mei (2006), seja durante o teste de tração, ou mesmo na usinagem e preparação da superfície do corpo de prova.

No ensaio de tração foi utilizada a velocidade de deformação de 0,5mm/min até que atingisse o valor de 0,2% de alongamento (LE) e a partir desse ponto, a velocidade foi alterada para 5,0 mm/min até a ruptura. Os resultados obtidos constam da Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do teste de tração e dureza

Identificação	Corrente (mA)	LE (N/mm ²)	LR (N/mm ²)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
304L recozido	-	284	661	47	85
304LMin	39	299	664	56	99
304LMax	42	272	572	50	97
LDSS recozido	-	394	678	35	98
LDSSMin	41	393	663	19	99
LDSSMax	44	358	668	17	98

Também foi realizado ensaio de microdureza ao longo do cordão e nas adjacências da solda, para definição de um perfil de dureza da estrutura resultante. A distribuição dos pontos (1 a 5 na parte superior e 6 a 8 próximo da raiz da solda) e os valores obtidos podem ser vistos na Figura 2.

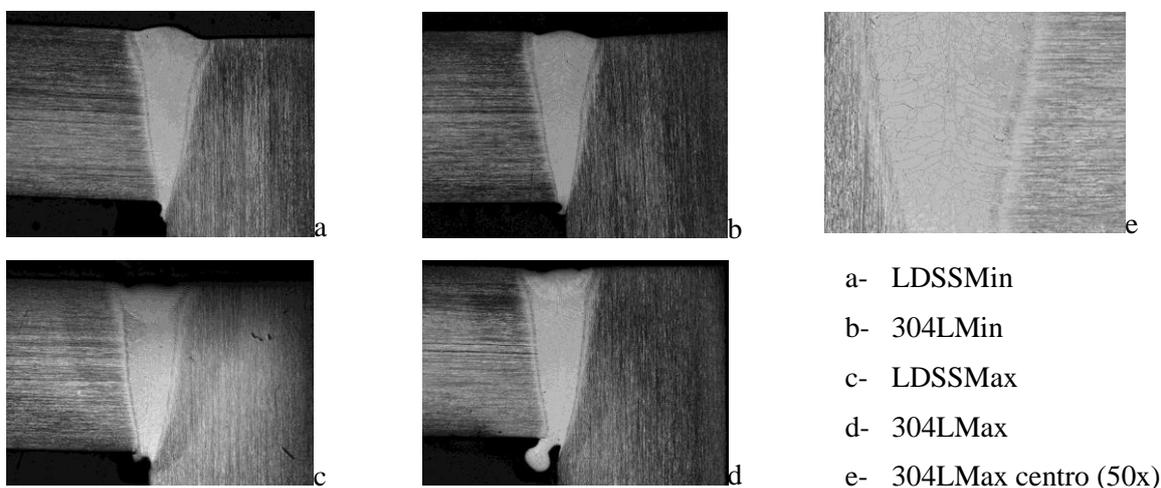
Figura 2 – Ensaio de dureza Vickers (ASTM E92)

CP	Posição							
	1	2	3	4	5	6	7	8
304LMin	242	245	255	269	257	243	248	244
304LMax	224	255	226	245	221	231	239	237
LDSSMin	249	239	255	234	251	241	226	231
LDSSMax	245	241	254	234	243	251	245	231

As amostras do aço *lean duplex* apresentaram uma maior estabilidade de valores, principalmente no que tange aos ensaios de dureza. O aço 304L apresentou uma acentuada queda nos valores de resistência a tração para a condição de mais elevado aporte térmico, o que implica numa faixa de trabalho mais estreita para não comprometer a resistência mecânica do componente.

A análise metalográfica revelou completa penetração da solda em todos os corpos de prova, conforme Figura 3, com formação de uma camada de grãos refinados cuja largura é de 70 a 80 μm , na interface do cordão com o metal base. Os corpos de prova foram avaliados em toda a extensão do cordão com aumentos de 12 a 500 vezes.

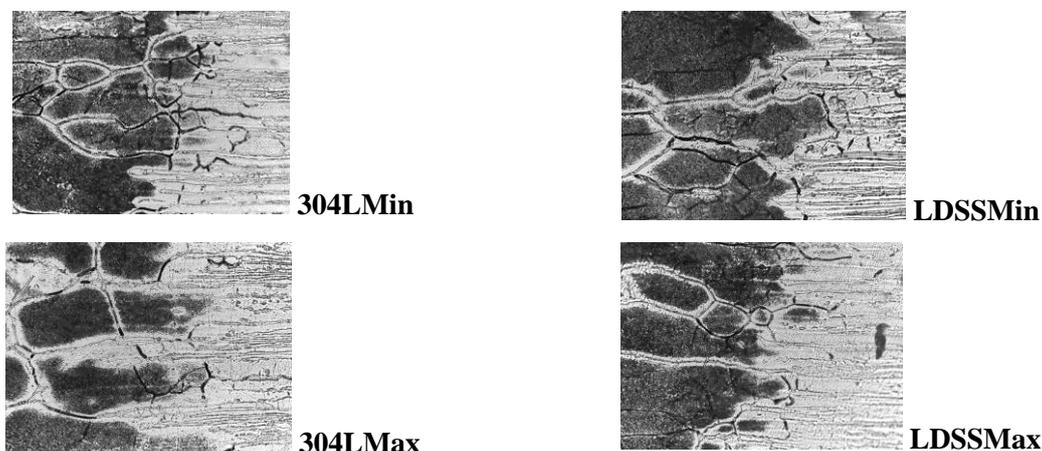
Figura 3 – Micrografia da região da solda (Aumento de 12x e 50x)



- a- LDSSMin
- b- 304LMin
- c- LDSSMax
- d- 304LMax
- e- 304LMax centro (50x)

Finalmente, para análise da estabilidade química, foi realizado o ensaio de corrosão intercrystalina segundo a norma ASTM A262 pratica A, em cujo CP é aplicada densidade de corrente de 1A/cm² durante um tempo de 1,5 minutos em solução de ácido oxálico a 10%. As amostras, inicialmente polidas, após o ataque são analisadas utilizando aumentos de 500 vezes como observado na Figura 4. O aspecto resultante do ensaio foi equivalente para ambos os materiais, sem desenvolvimento de poros ou trincas no metal base e com ataque nos contornos de grão do cordão.

Figura 4 – Aspecto das amostras na interface do cordão de solda (Aumento de 500x)



conforme relatado por Schwartzman (2010), na indústria nuclear as solicitações tendem a desenvolver trincas que podem ser transgranular ou intergranular (intercristalina). Ambas são resultantes de condições normais de operação, mas trincas intercristalinas são mais encontradas em componentes mecânicos de reatores e usinas nucleares, portanto os materiais utilizados para esses fins são rotineiramente analisados quanto a esse tipo de falha nas operações de fabricação na INB.

4 – CONCLUSÃO

De posse dos resultados, considerando as condições de fabricação, aplicação e armazenamento do combustível nuclear, o ambiente de conservação desses componentes no pós uso e em observância as normas de segurança, os aços duplex demonstram ser uma alternativa viável a ser explorada na fabricação de componentes e na montagem de instalações mecânicas de reatores e usinas term nucleares. Os valores de limite de escoamento do aço UNS S32304 mostraram um ganho de 35% em relação ao aço inoxidável 304L. O ensaio de corrosão intercristalina resultou em nível de estabilidade química equivalente entre os materiais, entretanto dados de literatura indicam que com ajustes de composição química essa propriedade pode ser consideravelmente majorada. A soldabilidade do aço inoxidável lean duplex no que tange a faixa de trabalho, se mostrou mais abrangente do que a do aço inoxidável austenítico classe 304L estudado.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Callister Jr, William D. – Materials Science and Engineering, An Introduction - 7ª reimpressão - John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991/2008. 817p.
- Costa e Silva A.L e Mei, P.R., Aços inoxidáveis, Aços e ligas especiais, 2ª edição, 2006.
- Metals Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys, v.1, 1990.
- Modenesi, Paulo J. - Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis - São Paulo, SENAI SP, 2001. 127p.
- Schwartzman, M., Matias, A., Cruz, J.R.B - Avaliação da Corrosão Sob Tensão em Aço Inoxidável AISI321 em Ambiente de Reator Nuclear, Revista Matéria, vol.15 n.1, p 040 – 049, 2010
- Senatore, M.; Finzetto, L.; Perea, E.; Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis duplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L – Revista Escola de Minas, vol 60 nº1 Ouro Preto, Março de 2007.
- Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, ASTM E92, reapproved 2003.