

Estudo estrutural da junta soldada dissimilar entre o aço inox austenítico AISI 347 e o aço carbono ferrítico ASTM A36**Structural study of the dissimilar welded joint between AISI 347 austenitic stainless steel and ASTM A36 ferritic carbon steel**

DOI:10.34117/bjdv6n9-098

Recebimento dos originais: 08/08/2020

Aceitação para publicação: 03/09/2020

Jorge Felipe da Conceição Ribeiro

Mestrando em Ciência e Tecnologia de Materiais

Fundação Centro Universitária da Zona Oeste do Rio de Janeiro (UEZO)

Endereço: Av. Gal. Euclides de Oliveira, 200 – Brisamar – Itaguaí - Rio de Janeiro - RJ – Brasil.

E-mail: jorge.ribeiro@nuclep.gov.br

Carlos Alberto Martins Ferreira

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Endereço: Av. Manuel Caldeira de Alvarenga, 1023 – Campo Grande – Rio de Janeiro – RJ Brasil

E-mail: professorcarlosferreira@gmail.com

Mauro Carlos Lopes Souza

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Endereço: Av. Manuel Caldeira de Alvarenga, 1023 – Campo Grande - Rio de Janeiro – RJ, Brasil

E-mail: mauroclsouza@hotmail.com

Vladimir Ivanovitch Monine

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Universidade Politécnica de São Petersburgo – Rússia

Endereço: Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

E-mail: monvlad@mail.ru

RESUMO

No presente trabalho investigou-se uma solda dissimilar, que são soldas feitas com a união entre materiais diferentes. Elas são utilizadas, em muitos segmentos da indústria, na construção de estruturas, das mais simples até as mais complexas. Nesse trabalho, foram usados o aço inoxidável austenítico AISI 347, soldado ao aço carbono ferrítico ASTM A36. A soldagem foi feita pelo processo a arco elétrico com eletrodo revestido, usando-se como metal de adição varetas de eletrodo E309L. O objetivo principal foi avaliar se a união desses metais atende aos requisitos de resistência mecânica e confiabilidade da junta soldada. Para se estudar essas propriedades, os corpos de prova tirados da junta foram submetidos a ensaios mecânicos de tração, dobramento, microdureza Vickers, macrografia e micrografias. Investigou-se também as tensões residuais geradas na junta soldada que podem influenciar na resistência e podem gerar o surgimento de trincas. Após análise dos resultados obtidos, permitiu-se concluir que a junta dissimilar soldada exibe boa confiabilidade na resistência mecânica e não comprometeram as características originais dos metais de base.

Palavras Chave: Soldagem dissimilar, aço austenítico AISI 347, aço ferrítico ASTM A36, junta soldada, eletrodo revestido

ABSTRACT

In the present work, a dissimilar weld was investigated, which are welds made with the union between different materials. They are used, in many industry segments, in the construction of structures, from the simplest to the most complex. In this work, AISI 347 austenitic stainless steel was used, welded to the ASTM A36 ferritic carbon steel. The welding was done by the electric arc process with coated electrode, using electrode rods E309L as the addition metal. The main objective was to evaluate whether the union of these metals meets the requirements for mechanical strength and reliability of the welded joint. To study these properties, the specimens taken from the joint were subjected to mechanical tests of traction, bending, Vickers microhardness, macrography and micrographs. It was also investigated the residual stresses generated in the welded joint that can influence the resistance and can generate the appearance of cracks. After analyzing the results obtained, it was concluded that the welded dissimilar joint exhibits good reliability in mechanical strength and did not compromise the original characteristics of the base metals.

Keywords: Dissimilar welding, AISI 347 austenitic steel, ASTM A36L ferritic steel, welded joint, coated electrode

1 INTRODUÇÃO

Na indústria contemporânea a soldagem é amplamente empregada, sendo considerada o mais importante processo de união de metais industrialmente utilizado. A soldagem pode ser usada para construção de estruturas simples, portas e grades, da mesma forma que pode ser utilizada em situações de elevada responsabilidade, como na indústria petrolífera e nuclear.

Quando os materiais são soldados, as propriedades do metal base são alteradas pela fusão do mesmo, produzida pelo alto ciclo térmico de soldagem, o que resulta em mudanças microestruturais na zona de fusão e da ZTA. Estas microestruturas na zona fundida e ZTA são significativamente diferentes tanto na aparência quanto nas propriedades quando comparados ao metal de base e podem comprometer a integridade da junta soldada.

A solda dissimilar entre aço inoxidável (AI) e aço carbono (AC) é largamente utilizada em linhas de vapor, em plantas de energia, em reatores nucleares e plantas petroquímicas ^[1]. Por suas diferentes propriedades mecânicas e corrosivas, a junta aço inox com aço carbono (AI-AC) não reúne somente requisitos ambientais mais também reduz custo. Juntas dissimilares são caracterizadas por mudanças microestruturais que produzem uma grande variação de características físicas e químicas através da junta. Dessa forma, existem alguns problemas que devem ser estudados em juntas AI-AC. O problema com solda dissimilar entre AI e AC é a formação de fase secundária devido ao maior teor de carbono do aço carbono do que no aço inoxidável.

Portanto, descarbonização e crescimento de grãos ocorrem na zona termicamente afetada (ZTA) no AC, alterando as propriedades mecânicas. Muitos recursos são utilizados na junta AC-AI, para resolver os problemas mencionados. Em geral, são aplicados metais de adição austeníticos na produção das juntas [2].

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a microestrutura da junta de materiais dissimilares, que no caso são eles: O aço inoxidável austenítico (**AISI 347**) e o aço carbono ferrítico (**ASTM A36**). O metal de adição que será utilizado no processo de eletrodo revestido será o consumível **E309-L**. Procura-se confirmar também a eficiência do consumível que, conforme recomendação do fabricante [3], é o mais apropriado para juntas nesta configuração.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para confecção da junta soldada foi utilizada uma chapa de aço inoxidável austenítico **AISI 347** (560 mm x 200 mm x 26 mm) e uma chapa de aço carbono **ASTM A36** de mesmas dimensões, soldadas de topo, com chanfro duplo “U”, com adição de eletrodo **E 309-L**, pelo processo **SMAW** e sem PWHT para alívio de tensões. As tabelas 1 e 2 a seguir apresentam a composição química dos aços.

Tabela 1 - Composição química do AISI 347 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Mo	Nb	Nb/C
0,030	0,42	1,45	0,026	0,001	17,20	9,11	0,036	0,35	0,58	19,3

Tabela 2 - Composição química do ASTM A36 (%)

C	Si	Mn	P	S
0,25	0,40	0.8-1.2	0,04	0,05

O metal de adição empregado foi o eletrodo revestido E309-L baseado na norma AWS A5.4/A5.4M:2006 [4] do fabricante “Böhler Thyssen”. O consumível foi selecionado por se tratar de um eletrodo para aço inoxidável de baixo teor de carbono e recomendado pelo fabricante entre outras aplicações para juntas de materiais dissimilares aço carbono e aço inoxidável com alta resistência à corrosão intercrystalina [3]. Os diâmetros utilizados foram os seguintes: Ø2,5mm, Ø3,25mm, Ø4,0mm. A composição química do consumível é mostrada na tabela 3 que segue:

Tabela 3 - Composição química do metal de adição (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	N
0,024	0,56	0,88	0,017	0,013	22,43	12,61	0,02	0,012	0,046	0,068

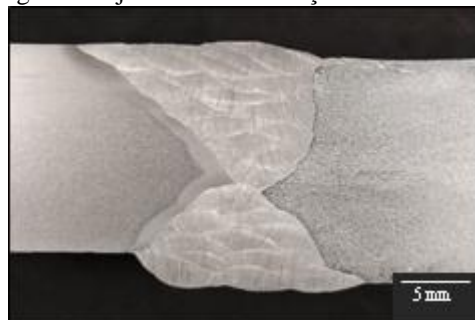
Foram preparados corpos de prova para ensaios de micrografia, ensaios de dureza, ensaios de tração, dobramento, e impacto, para fins de análise da resistência mecânica. Foi feita também análise de tensões residuais pelo método de difração de raios-x.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE METALOGRÁFICA

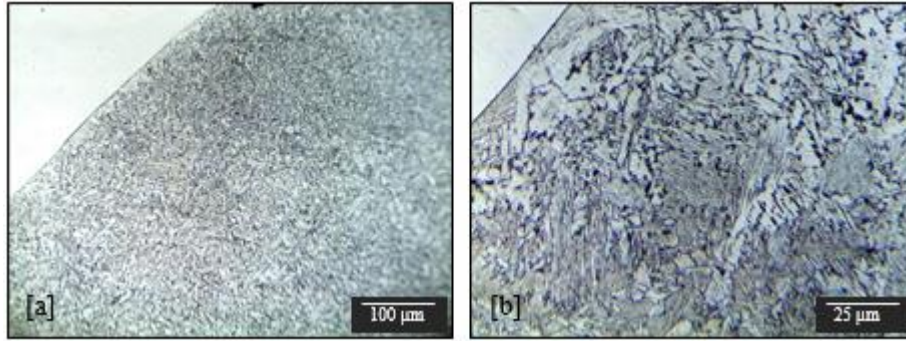
Inicialmente é mostrado na figura 1, o ensaio macrográfico da junta soldada, o mesmo examina a amostra com baixa ampliação de forma a observar o aspecto da superfície do metal devidamente polido e atacado por reagente químico (Nital 10% / Água régia). Dessa forma é possível ter ideia da homogeneidade do material, da natureza e distribuição de possíveis falhas e impurezas contidas. A amostra foi examinada com aumento de 10x e não apresentou descontinuidades no metal de adição, metal de base e zona termicamente afetada. Na imagem também é possível visualizar claramente a zona termicamente afetada no lado do aço carbono, o que não acontece do lado do aço inox, pois mesmo com a temperatura adjacente a poça de fusão não há alteração da estrutura cristalina predominantemente austenítica.

Figura 1 - Macrografia da junta soldada - Seção Transversal - Ampliação 10x



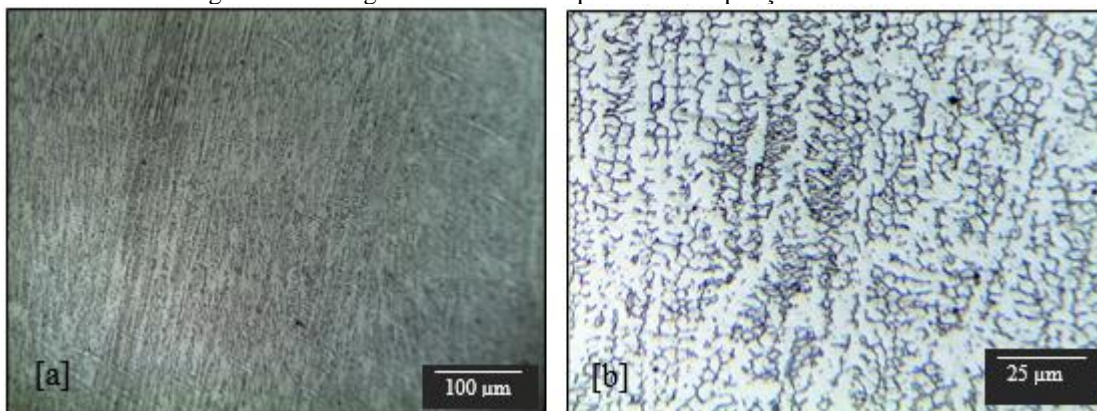
Na Figura 2 é apresentada uma micrografia da Zona Termicamente Afetada da solda, com aumentos de 100X(a) e 400X(b) respectivamente. Nestas imagens são observadas microestruturas semelhantes às do metal de base. Nessas imagens observa-se a heterogeneidade devido as diferentes microestruturas presentes no metal de solda e ZTA, com maior incidência dos seguintes microconstituintes: ferrita primária, perlita e ferrita de Widmanstätten (esta forma de ferrita tem, tridimensionalmente, formas entre ripas e placas) [5]. As imagens mostram também que não houve falta de fusão, o que caracteriza uma boa junta soldada.

Figura 2 - Micrografia da ZTA Lado Aço Carbono ASTM A36 Ataque Picral Ampliação: 100x/400



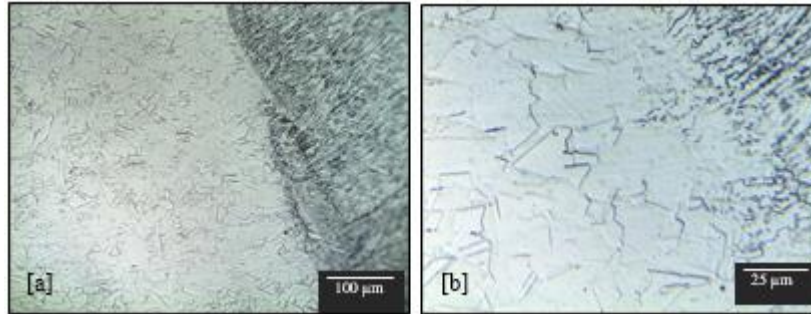
Na figura 3, a seguir, também com aproximações de 100x (a) e 400x (b), pode-se dendrita bruta de fusão e redes de ferrita. Na zona fundida com o metal de adição E309L constituída principalmente com estrutura dendrítica, ferrita vermicular ou em esqueleto e ferrita acicular são percebidas. Segundo Lippold e Kotecki [7], a formação de ferrita vermicular é possível devido a rejeição do Cr da austenita e Ni da ferrita [6], enquanto a ferrita acicular é formada observar a microestrutura da solda (ZF) constituída por matrix austenítica com devido a difusão limitada e/ou a taxa de resfriamento característica durante a solda.

Figura 3 - Micrografia da Solda Ataque Picral Ampliação: 100x/400x



Nas figuras 4 a e b, percebe-se claramente na micrografia da ZTA da parte entre a solda e o aço inoxidável as fases distintas, a transição não apresenta o aspecto “gradiente” conforme visto na solda com o lado do aço carbono.

Figura 4 - Micrografia da ZTA Lado Aço Inoxidável AISI 347 Ataque Picral Ampliação: 100x/400x



3.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS

3.2.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração transversal apresentou, baseada na norma DIN EN 895 [8], valores acima do limite mínimo especificado. Conforme tabela 4 a seguir: O local de ruptura foi fora da solda em ambos CP's no aço carbono ASTM A36.

O ensaio de tração transversal apresentou, baseada na norma DIN EN 895 [8], valores acima do limite mínimo especificado. Conforme tabela 4 a seguir: O local de ruptura foi fora da solda em ambos CP's no aço carbono ASTM A36.

Tabela 4 - Ensaio de Tração Transversal DIN EN 895

C.P.	Dimensões	Secção	Resistência		Limite mínimo especificado Mpa	Local de ruptura
			Carga Kgf	Limite Mpa		
TR 1	24,95 X 20,85	520,21	25744	485	400	Fora da solda (ASTM A36)
TR 2	24,50 X 21,00	514,50	25014	477	400	Fora da solda (ASTM A36)

3.2.2 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento lateral e transversal, baseados na norma DIN EN 910 [9], não apresentaram fissuras. A solda e a ZTA ficaram completamente inseridas no trecho dobrado. Ainda segundo a norma, trincas de origem desconhecida não devem exceder 3,0mm.

Tabela 5 - Ensaio de Dobramento Transversal de Face e Lateral DIN EN 910

C.P.	Dimensões mm	Cutelo Ø mm	Distância entre roletes mm	Ângulo de dobramento graus	Resultados obtidos
DF1	45,00 X 21,00	50,00	92,00	180°	Não apresentou fissuras
DF2	45,00 X 21,00	50,00	92,00	180°	Não apresentou fissuras
DL	25,00 X 10,00	50,00	70,00	180°	Apresentou fissura < 3,0mm.

3.2.3 Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto ^[10] realizado por meio do método Charpy com entalhe em “V” revelou diferenças significativas considerando as diferentes áreas de realização do ensaio. A tabela 6 a seguir contém os resultados do ensaio com os entalhes no centro da solda (CS), na ZTA AISI 347 e por fim na ZTA A36 respectivamente.

Conforme pode-se verificar na Tabela 6, é evidente a diferença na capacidade de absorver energia entre as três áreas estudadas. Os valores apresentados, segundo norma, são satisfatórios, porém observa-se uma maior discrepância nas medições do que no MS, isso deve-se pela falta de heterogeneidade da região da ZTA por se tratar de uma solda dissimilar. Nas amostras que apresentam resultados mais altos para o ensaio de impacto, provavelmente o entalhe está localizado sobre uma parcela maior do material de base.

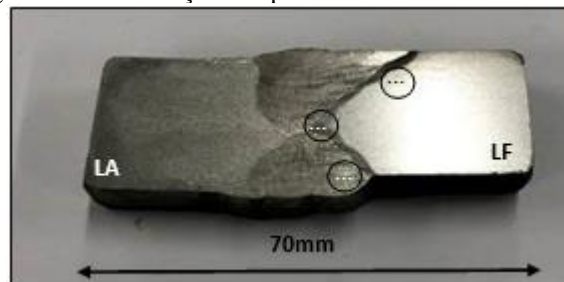
Tabela 6 - Ensaio de impacto (Energia absorvida) DIN EN 875:1995

Temperatura	Tipo de Entalhe	C.P.	ENERGIA ABSORVIDA	
			Valores Individuais (J)	Média (J)
+23°C (Ambiente)	V2 x 10 x 10	CS	69	73
			77	
		ZTA AISI347	105	86
			67	
		ZTA A36	142	123
			104	

3.2.4 Ensaio de Microdureza

O ensaio de dureza foi realizado no mesmo corpo de prova do ensaio macrográfico e conduzido de acordo com a norma DIN EN 1043-1 ¹¹. Foi utilizado o método Vickers HV10 Por intermédio da medição do perfil de microdureza, foi possível avaliar e comparar os valores de dureza no metal de base, na ZTA A36 e do metal de adição, conforme ilustrado na figura 5.

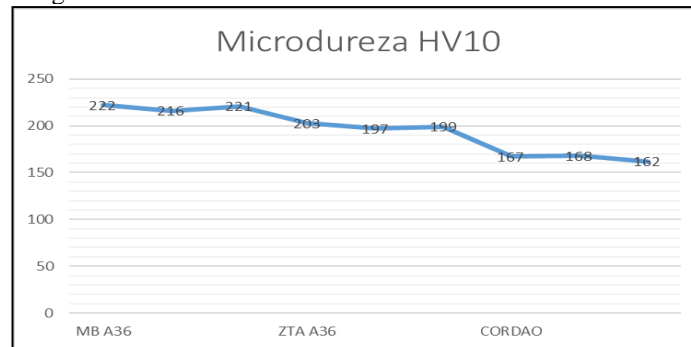
Figura 5 - Identificação dos pontos de leitura da microdureza



Fonte: Autor 2020

Na figura 6, os resultados mostraram que há um declínio da dureza desde o metal base (AC), passando pela ZTA, até à Zona fundida, comprovando-se com isso a influência direta do carbono como endurecedor do material, ou seja, quanto mais carbono, mais duro e resistente será o material [12]. Conforme tabelas 1, 2 e 3, o teor de carbono do metal de adição é bem menor do que o existente no metal base (AC).

Figura 6 - Resultado da leitura de microdureza HV10 no C.P.

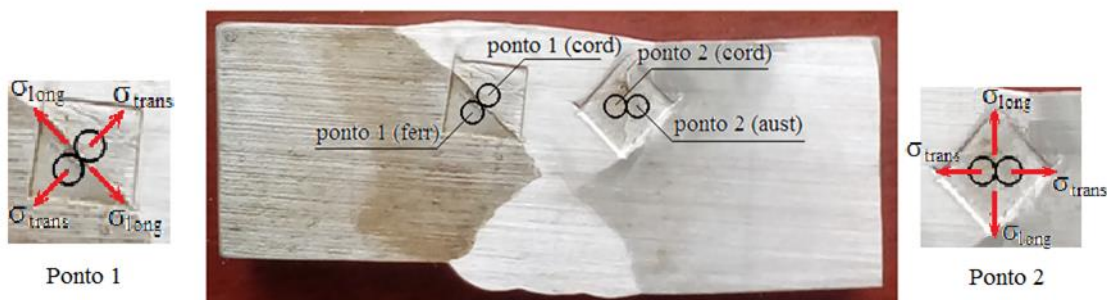


3.2.5 Análise de Tensões Residuais

Geralmente não se desejam tensões residuais de tração na superfície de um componente, uma vez que a sua presença pode contribuir para a falha por fadiga e para o aparecimento de trincas superficiais. Já as tensões residuais de compressão nas camadas da superfície são geralmente benéficas, pois aumentam a resistência à fadiga e a resistência à corrosão sob tensão (CALLISTER, 2012) [13].

A amostra mostrada na Figura 7 é uma peça (70 x 25 x 12) mm³. Os pontos de medições foram escolhidos nas fronteiras entre o metal de solda e o aço ferrítico (pontos 1a,b), e o outro é entre metal de solda e o aço austenítico (pontos 2a,b).

Figura 7 - A amostra para análise de tensões residuais por difração de raios X com locais 8 mm x 8 mm, para medidas de tensões residuais após remoção eletrolítica da camada de 0,2 mm de espessura: 1, 2 – pontos (áreas) das medidas nas fronteiras entre metal de solda e aço ferrítico e austenítico, respectivamente.



A escolha dos pontos das medidas de tensões residuais é associada à dois fatores. No primeiro os pontos estão localizados na fronteira da seção de dois diferentes metais. O aço ferrítico e cordão de solda com estrutura austenítica para região 1 e cordão de solda e aço austenítico para região 2. Na segunda, as fases têm a mesma estrutura cristalina, mas diferem na composição. O segundo fator é que tensões residuais nos componentes da região escolhida estão em equilíbrio.

Os resultados das medidas de tensões residuais na região de solda dissimilar do aço ferrítico com aço autenítico são apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 - Resultados das medidas de tensões residuais

Locais das medidas		Tensão residual, MPa	
		Longitudinal	Transversal
Ponto 1	Aço ferrítico	-25	-30
	Cordão de solda	+100	+50
Ponto 2	Aço inoxidável	-30	-20
	Cordão de solda	+180	+60

As Tensões Residuais são caracterizadas como trativas no cordão de solda e baixas compressivas tanto no aço ferrítico, quanto no austenítico. Com valores menores que o limite de escoamento dos aços analisados. Pode-se constatar também que tensões residuais no cordão de solda, no lado de aço austenítico, são maiores do que do lado ferrítico. Aparentemente, esse resultado se deve ao fato que a condutividade térmica do aço austenítico é menor que do aço ferrítico.

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a microestrutura predominante na região soldada é constituída de dendritas brutas de fusão, redes de ferrita e poucos precipitados intra e interdendriticos.

O ensaio de tração comprovou a resistência requerida satisfatoriamente acima do mínimo especificado e com o local de ruptura fora da solda. Os testes de dobramento, com ângulo de dobramento de até 180°, não mostram trincas ou mostram dentro do aceitável por norma, indicando que as condições de soldagem proporcionam boas propriedades mecânicas à junta soldada.

A microdureza não apresentou variações significativas. As leves variações deveram-se aos teores de elementos de liga em peso no metal depositado, sendo que a região da zona fundida

apresentou valores de microdureza ligeiramente menores do que ambos os metais base, o que se correlaciona com o teor de carbono constante na composição química do metal de adição.

O ensaio de difração de raios-x, para leitura de tensões residuais, deixou claro que, com os resultados obtidos, no cordão de solda LA, são maiores do que cordão LF. Isso deveu-se aos efeitos do aporte térmico do lado austenítico à diferença da condutividade térmica diferente entre os aços abordados.

No caso desta solda dissimilar era esperado que no lado da junta soldada do aço austenítico não houvessem muitos problemas microestruturais, mas através dos ensaios foi possível constatar que o consumível é sim o mais apropriado para a união com o aço carbono na peculiaridade da solda dissimilar.

REFERÊNCIAS

1. WENYONG, W.; SHENG SUN, H.; JUNQI, S. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of laser welded dissimilar joints between ferritic stainless steel and carbon steel. **Materials & Design**, Tianjin, v. 65, p. 855-861, Outubro 2014.
2. NETO, B. V. C. **Comparação de Junta Soldada Aço Carbono/ Aço Inox Utilizando como Metal de Adição Aço Carbono e Aço Inox**. Universidade Estadual Paulista - UNESP. Guaratinguetá, p. 67. 2011.
3. BÖHLER WELDING BY VOESTALPINE. **Böhler Welding Selection Guide SMAW / MMA**. [S.l.]. 2018.
4. AWS. **AWS A5.4/A5.4M - Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding**. [S.l.]. 2012.
5. COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4a. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
6. BROOKS, J. A.; WILLIAMS, J. C.; THOMPSON, A. W. Microstructural origin of the skeletal ferrite morphology of austenitic stainless steel welds. **Metallurgical Transactions**, v. 14, p. 1271-1281, 1983.
7. LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel**. **John Wiley & Sons**, p. 1-357, 2011.
8. DIN EN 895. **Destructive testing of welds in metallic materials - Transverse tensile test**. [S.l.]. 1995.
9. DIN EN 910. **Bend testing of welds in metallic materials**. [S.l.]. 1996.

10. DIN EN 875. **Welds in metallic materials - Impact tests.** [S.l.]. 1995.
11. DIN EN 1043-1. **Hardness Testing Of Welds In Metallic Materials - Hardness Test On Arc Welded Joints.** [S.l.]. 1996.
12. RODRIGUES, L. M. et al. Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais - Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. **Cadernos UniFoa**, Resende - RJ, Dezembro 2014.
13. CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais - uma Introdução.** 9a. ed. [S.l.]: LTC, 2012.