

TENACIDADE À FRATURA DE JUNTAS SOLDADAS EM ALUMÍNIO NAVAL 5083/H116

Bruna Savi Tonelli

Instituto Federal de Santa Catarina, Av. 15 de Novembro, 61 - Aeroporto, Araranguá - SC, 88905-112
bruna.savi@ifsc.edu.br

Jefferson Haag

Instituto Federal do Rio Grande do Sul, R. Avelino Antônio de Souza, 1730 - Nossa Sra. de Fátima, Caxias do Sul - RS, 95043-700
jefferson.haag@gmail.com

Keli Vanessa Salvador Damin

Fernando Michelin Marques

Instituto Federal de Santa Catarina, Av. Nereu Ramos, 3450 D - Seminário, Chapecó - SC, 89813-000
keli.salvador@ifsc.edu.br, fernando.marques@ifsc.edu.br

Tatiana Bendo

Universidade Federal de Santa Catarina, R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900
tatianabendo@yahoo.com.br

Resumo. Neste trabalho foi avaliada a tenacidade à fratura pelo ensaio CTOD (Crack Tip Opening Displacement) em ligas de alumínio naval 5083H/116 com 6 mm de espessura soldadas pelo processo Cold Metal Transfer (CMT) com dois diferentes arames de adição (ER 5183 e ER 5087). O ensaio foi realizado em temperatura ambiente, seguindo as normas ISO 12135 e BS EN ISO 15653, tanto no metal de base quanto na zona de fusão, para investigação e comparação da região de soldagem nas ligas de alumínio não tratáveis termicamente. Também se procurou comparar as propriedades das duas opções de metais de adição na soldagem naval. Os resultados obtidos atenderam os critérios mínimos de validação exigidos pela norma. Ainda, observou-se que a solda apresentou melhores resultados de CTOD em relação ao metal de base. Entre os dois arames utilizados, não se observou diferença significativa entre os valores de CTOD encontrados.

Palavras chave: ER 5183. ER 5087. Soldagem. Transferência metálica fria. CTOD.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por embarcações maiores e com baixo peso tornou o alumínio um material com alto potencial de aplicação. O interesse pelo alumínio na construção naval prende-se essencialmente ao fato de ser um material com baixa densidade desejável reduzindo até 50% o peso final, e por apresentar também boa resistência à corrosão, resistência mecânica e alta tenacidade, mesmo em baixas temperaturas. Mais precisamente, as ligas da série 5XXX, que possuem o magnésio como elemento de liga, são as mais indicadas nestas aplicações.

Uma vez que a construção naval é essencialmente produzida por soldagem, é importante analisar o comportamento das zonas soldadas e zonas afetadas pelo calor. O uso da variante do processo MIG denominado CMT (Cold Metal Transfer) é um desenvolvimento recente e de destaque na indústria, principalmente na soldagem do alumínio. Seu diferencial em relação ao processo convencional, é que este utiliza um movimento mecânico de recuo do arame e deposição de material por curto circuito com reduzidos níveis de energia nesse período, que proporcionam uma transferência metálica suave, com praticamente nenhuma formação de respingos (Pickin, *et al.*, 2011).

A liga 5083, registrada pela Aluminium Association, é considerada a liga-base da indústria naval e corresponde a liga utilizada neste trabalho (Alcan, 1993). Os consumíveis indicados para a soldagem destas chapas, também devem ser da mesma série, com composição química semelhante. Além disso, devem atender algumas propriedades necessárias para a integridade da junta com relação à trincas de solidificação, ductilidade, resistência mecânica da junta soldada, temperatura de serviço e resistência à corrosão. As ligas 5183 tem ampla utilização neste setor como arame de adição por atender tais requisitos. Mais recentemente, como proposta de melhoria da qualidade da solda, o arame ER 5087, utilizado nos estaleiros Europeus, torna-se uma boa opção e tem apresentado um crescimento de uso na indústria naval. Sua principal diferença para o arame ER 5183 é que este possui adição de zircônio em sua composição química. O zircônio adicionado como elemento de liga possui a função de controlar o tamanho de grão (refinar a microestrutura) atuando como retardador da recristalização. As consequências do refino de grão são a melhora da resistência mecânica, da resistência à fadiga, da resistência à corrosão sob tensão e da tenacidade.

Independente do processo, projeto ou procedimento de soldagem, o material fundido e suas adjacências são expostos ao ciclo térmico e transformações metalúrgicas que acarretam heterogeneidades (porosidade, trincas, falta de fusão). Estes fenômenos têm relação direta com a resistência mecânica, microdureza, tenacidade, aparecimento e propagação de trincas, exercendo grande influência na segurança de juntas soldadas. Assim, é fundamental uma breve avaliação da metalurgia da soldagem e dos possíveis efeitos de tais procedimentos sobre os campos de tensão na proximidade dos defeitos e na tenacidade de materiais empregados.

A mecânica da fratura prevê o comportamento do material através de três fatores combinados: tensão atuante no material, defeitos presentes e a tenacidade do material. Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação e a comparação de dois materiais de adição aplicados na indústria naval (ER 5183 e ER 5087) quanto a sua tenacidade a fratura utilizando o conceito de CTOD.

1.1. Fundamentação teórica CTOD (Crack Tip Opening)

Os primeiros conceitos de tenacidade propostos por Griffith (Griffith, 1921) são aplicáveis para materiais frágeis, que apresentam comportamento linear-elástico com deformação plástica limitada a uma região muito pequena. Mais tarde, com a inclusão de materiais de engenharia com elevada plasticidade que apresentam uma zona plástica grande na ponta da trinca, novos conceitos foram propostos. Para estes casos utiliza-se a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, onde o campo de tensão e deformação na frente de uma trinca estacionária pode ser descrito por um fator único denominado Integral J ou por CTOD (δ).

Há uma série de definições alternativas para o parâmetro CTOD, sendo a mais comum representada na Figura 1, denominada como sendo o deslocamento na ponta original da trinca. Devido à deformação plástica na região da ponta da trinca, a trinca que originalmente era aguda sofre cegamento (arredondamento). Irwin e Wells (Irwin & Wells, 1965) observaram que era proporcional a tenacidade do material, logo, os autores propuseram que o parâmetro CTOD era uma medida de tenacidade a fratura do material.

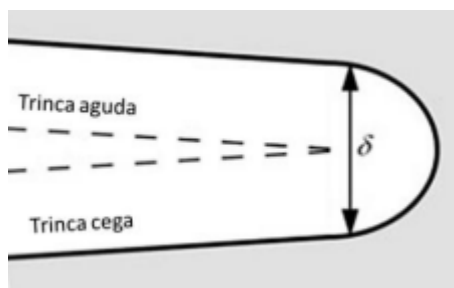


Figura 1. Conceito de CTOD (Adaptado de Haag, 2015)

Ainda, o valor de CTOD segue o modelo do eixo de rotação do deslocamento plástico, vide Figura 2. Fundamentalmente, o modelo divide o valor de CTOD em duas parcelas: uma plástica e uma elástica, conforme Equação 1, utilizada pela norma BS 7448:1991 e ISO 12135:2002. O ponto central do modelo do eixo de rotação é a hipótese de que o espécime SE(B) se deforma ao redor de um eixo de rotação aparente, também chamado de centro de giro, posicionado ao longo do ligamento da seção remanescente por um fator rotacional plástico (r). Tal hipótese permite que, por meio de semelhança de triângulos, a parcela plástica do CTOD seja diretamente obtida da abertura da ponta da trinca plástica.

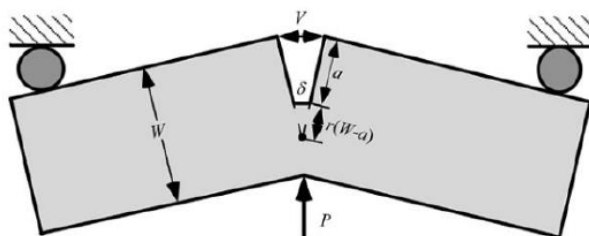


Figura 2. Modelo do eixo de rotação do deslocamento plástico (Anderson, 2005).

$$CTOD = \delta = \frac{K_I^2}{m\sigma_{YS} E'} + \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a)+a} \quad (1)$$

A determinação experimental de CTOD pode ser feito segundo algumas normas e a partir de vários tipos de corpos de prova e métodos padronizados. Este ensaio apresenta grande aplicabilidade para corpos de prova soldados, cujas

propriedades dos metais de base e adição apresentam dissimilaridades de propriedades mecânicas, além do processo induzir ao metal de solda defeitos do tipo trinca.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O ensaio de soldagem foi realizado com parâmetros que executassem um passe de solda com boa formação de raiz. Posteriormente, foi realizado um segundo passe para preenchimento do cordão de solda. Os ensaios foram realizados em chapas de alumínio 5083/H116 de 6 mm de espessura, dispostas em junta de topo com espaçamento de 2 mm, chanfro em V de 80° na posição vertical.

Foi utilizado a fonte TPS3200 da *Fronius*, modo MIG CMT 4043 sinérgico e um sistema de movimentação automático em dois eixos (Tartilope V2) com tocha com ângulo 5° empurrando. O material de adição foi o alumínio ER 5183 e ER 5087, ambos 1,2 mm de diâmetro. O gás de proteção utilizado foi argônio com vazão de 13 l/min, DBCP de 15 mm e altura do arco -5. Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros utilizados para o primeiro (raiz) e segundo (preenchimento) passe.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na soldagem de raiz e preenchimento.

	Passe de raiz	Preenchimento
VS (cm/min)	40	30
Amplitude (mm)	3,5	8,5
Frequência (Hz)	4	2
Corrente (A)	106	106

O ensaio de tenacidade à fratura foi realizado em uma máquina servohidráulica marca MTS modelo 810 a temperatura ambiente com a montagem apresentada na Figura 3(a). O ensaio foi conduzido conforme as normas ISO 12135:2002 e BS EN ISO 15653:2010, para o metal base e o metal de solda, respectivamente, e as amostras foram confeccionadas com dimensões especificadas para o corpo de prova do tipo SE(B) (Figura 3(b)), usinados pelo processo de eletroerosão com entalhe no metal de solda, já que se procura comparar a tenacidade dos diferentes eletrodos empregados. Foram confeccionadas amostras com o metal de base para servir como referência.

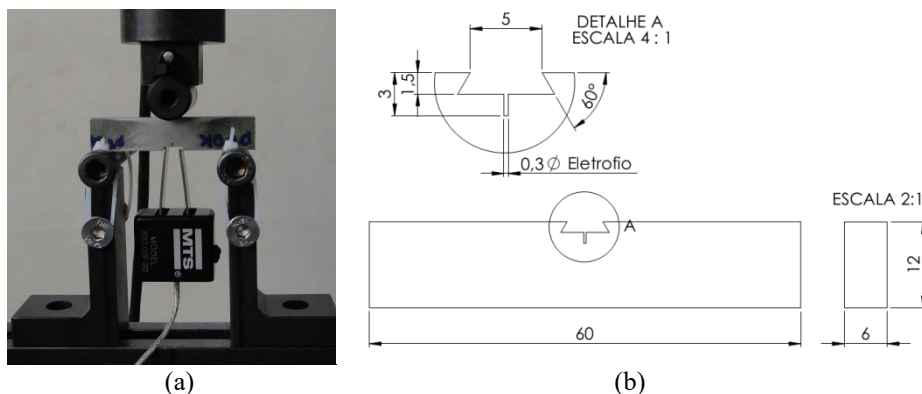


Figura 3. (a) Montagem dispositivo ensaio CTOD. (b) Representação esquemática do corpo de prova do tipo SE(B) com as dimensões em milímetros.

Antes do ensaio propriamente dito, procedeu-se o pré-trincamento por fadiga a partir do entalhe usinado no corpo-de-prova. A norma estabelece que a pré-trinca deva ter no mínimo 1,3 mm ou 2,5% da espessura W , a fim de evitar que qualquer deformação plástica gerada após usinagem do entalhe influencie o resultado de abertura da ponta da trinca. A trinca por fadiga se inicia na ponta do entalhe. A carga máxima aplicada (P_f) depende de alguns parâmetros dimensionais e metalúrgicos do material a ser avaliado. O teste foi realizado a temperatura ambiente e os dispositivos foram bem alinhados de forma que as distribuições das tensões fossem o mais homogêneas possíveis. A Equação (2) foi utilizada para o cálculo da carga máxima, onde, W = largura, B =espessura, a_0 =tamanho de trinca inicial, S =distância entre apoios e $R_{p0,2}$ = tensão de escoamento.

$$P_f = \frac{0,8.B(W-a_0)^2.R_{p0,2}}{S} \quad (2)$$

Na execução do ensaio, foi utilizado controle de deslocamento com taxa de carregamento de 1 mm/min e o valor do parâmetro CTOD foi calculado conforme a Equação 1. A determinação da componente plástica é realizada pela reta tangente a parte elástica da curva monitorada durante o ensaio (Carga x COD) e uma reta paralela a esta tangente passando pelo ponto de carga máxima, conforme Figura 4.

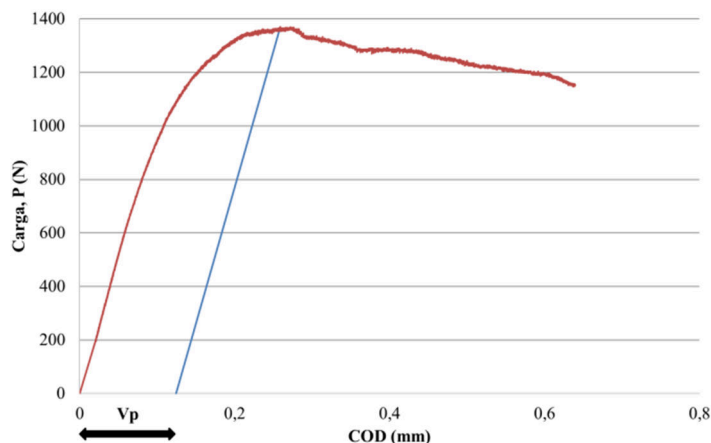


Figura 4. Método cálculo parte plástica CTOD.

Por fim as amostras foram fraturadas por fadiga, e por meio de um perfilômetro as trincas reais foram medidas, já que o valor de CTOD é determinado através do conhecimento do tamanho real da trinca. Além disso os valores críticos de CTOD foram validados atendendo às seguintes condições sugeridas pela norma: a_0/W entre 0,45 e 0,55, tamanho de pré trinca maior que 1,3mm ou 2,5% da profundidade da amostra (W).

3. RESULTADOS

Na Tabela 2 encontram-se as medidas dos ensaios para o metal de base (condição MB), solda com metal de adição ER 5183 (condição MB + 5183) e solda com metal de adição ER 5087 (condição MB + 5087), respectivamente.

Tabela 2. Valores ensaio CTOD (δ).

Condição	P_m [N]	V_p [mm]	δ [mm]
MB-1	1537	0,148	0,059
MB-2	1370	0,124	0,049
MB-3	1322	0,140	0,052
MB-4	1423	0,132	0,052
MB-5	1449	0,126	0,051
Média			0,05
DesPad			0,004
MB+5183-1	1086	0,495	0,140
MB+5183-2	1056	0,644	0,176
MB+5183-3	939	0,556	0,155
MB+5183-4	1139	0,718	0,197
MB+5183-5	1135	0,720	0,205
Média			0,17
DesPad			0,027
MB+5087	1021	0,647	0,173
MB+5087	1132	0,506	0,141
MB+5087	1128	0,654	0,186
MB+5087	1229	0,517	0,158
MB+5087	1061	0,499	0,137
Média			0,16
DesPad			0,021

O valor de P_m (N) encontrado é a carga máxima que o material suporta durante os ensaios, visto que os gráficos de COD das Figuras 5, 6 e 7 mostram que não houve instabilidade durante os ensaios, logo os valores de CTOD encontrados são todos de carga máxima. Aparentemente as curvas do ensaio do metal de base apresentam um decréscimo da força (pop-in) característico de uma instabilidade, mas, não ocorre pop-in já que a força máxima ocorre antes dessa queda. Os maiores

valores de CTOD foram encontrados para os materiais de solda, sendo que para os dois arames o valor encontrado foi muito próximo.

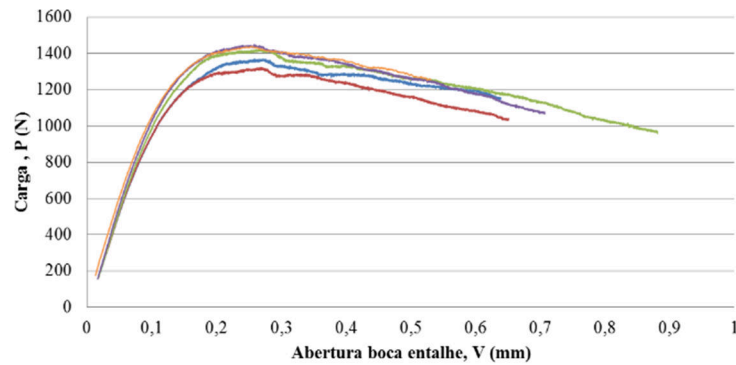


Figura 5. Curva carga versus abertura na boca do entalhe para as amostras do metal de base.

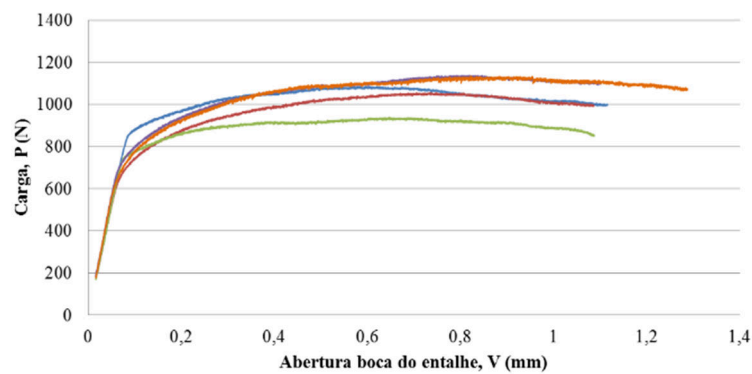


Figura 6. Curva carga versus abertura na boca do entalhe para as amostras com solda arame ER 5183.

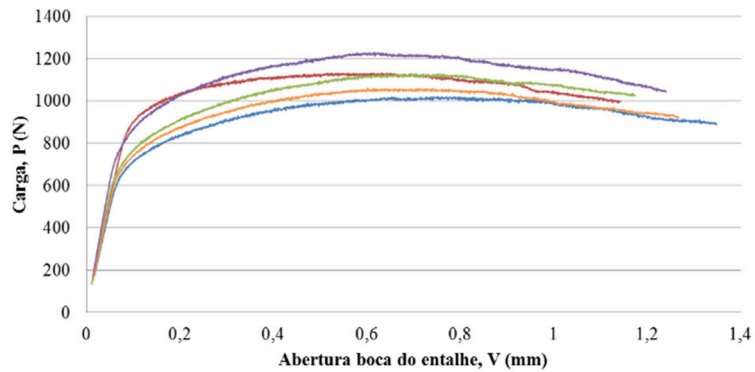
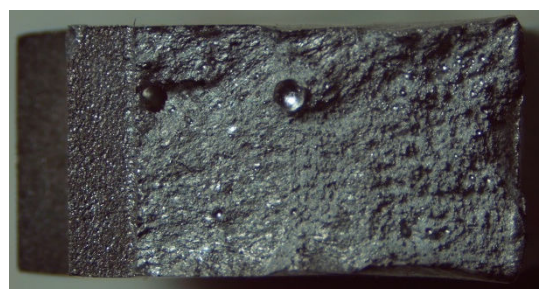


Figura 7. Curva carga versus abertura na boca do entalhe para as amostras com solda arame ER 5087.

A Figura 8 mostra as imagens da superfície fraturada após o ensaio CTOD, em que a região 1 corresponde ao entalhe usinado, região 2 a pré-trinca, região 3 a trinca do ensaio CTOD e a região 4 a fratura por fadiga. A medição da relação do tamanho da trinca inicial pela espessura (a_0/W) foi validada para todas as amostras com valor médio de aproximadamente 0,5 tanto para o metal de base quanto para as soldas.



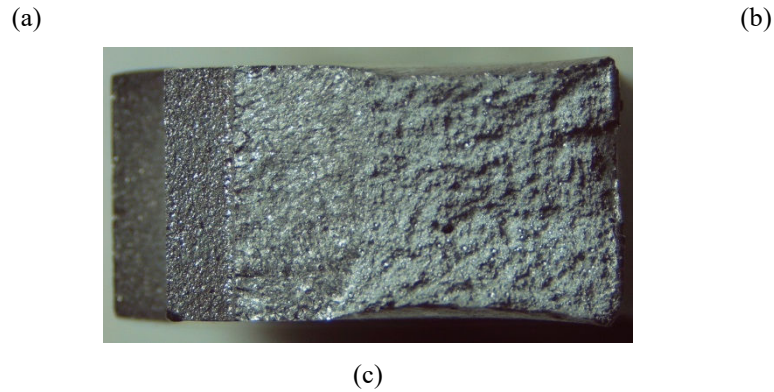


Figura 8. Superfície da fratura (a) metal de base (b) solda ER 5183 (c) solda metal ER 5087.

Uma ampliação da trinca induzida pelo ensaio, da região 3, é mostrada nas micrografias obtidas em MEV a seguir. Na Figura 9(a), condição MB, pode-se observar precipitados nas microcavidades (indicados por setas), que provavelmente originou uma quase clivagem, que justifica o baixo valor encontrado no ensaio. A presença de partículas de segunda fase (regiões mais escuras) foi observada também por microscopia ótica (Figura 9(b)) da liga 5083 H116, e correspondem ao precipitado Mg_2Al_3 .

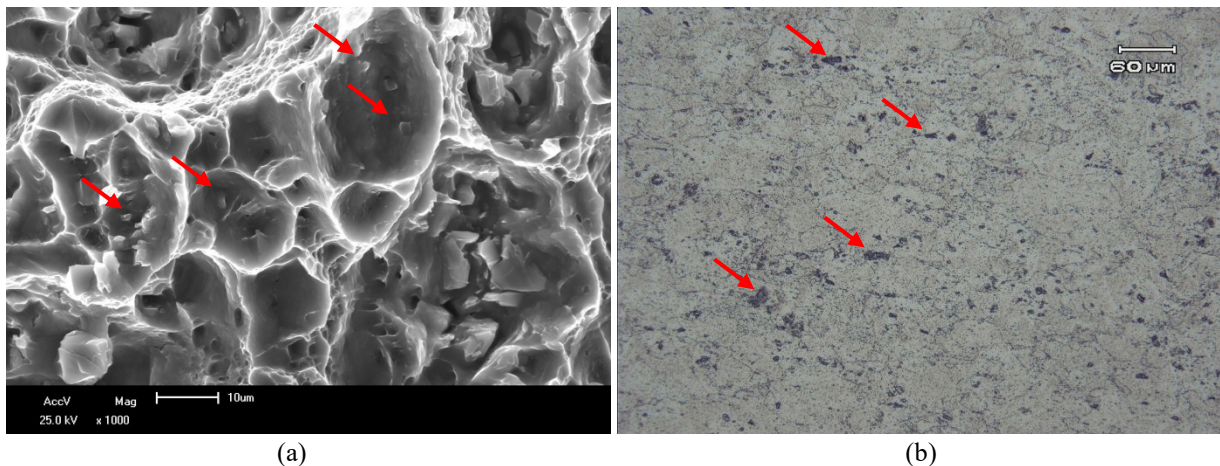


Figura 9. (a) micrografias obtidas em MEV da condição MB mostrando a superfície de fratura da trinca obtida no ensaio de CTOD com aumento de 1000x. (b) micrografia metal de base evidenciando, por meio de setas, a presença de precipitados de segunda fase.

Já nas imagens da Figura 10(a) e (b), que correspondem às condições MB + 5183 e MB + 5087 respectivamente, as microcavidades apresentam-se melhor distribuídas em relação ao metal de base e quase nenhum precipitado é encontrado. Observa-se também que os diâmetros das microcavidades são menores nas imagens do metal de solda, que sugere a presença de grãos mais finos e consequentemente maior resistência à tenacidade, mesmo observando-se a presença de defeitos tipo poros.

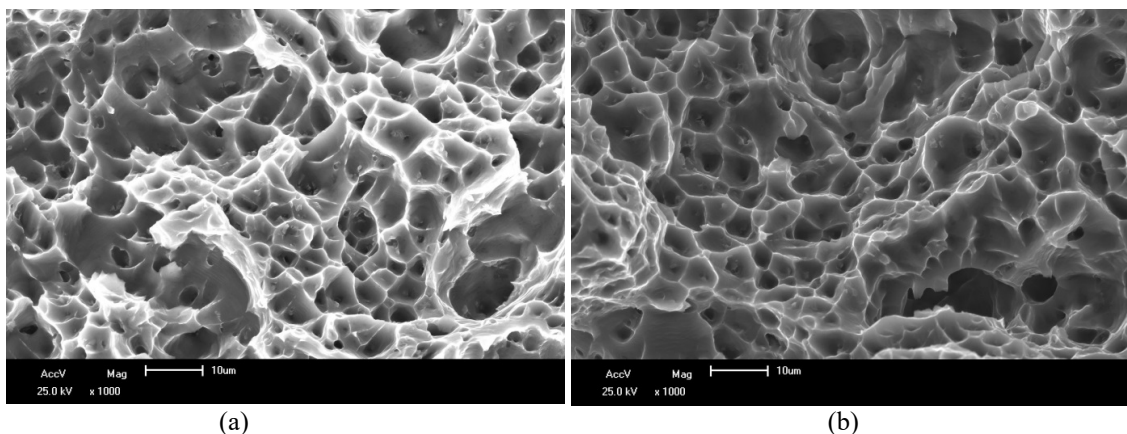


Figura 10. Micrografias obtidas em MEV mostrando a superfície de fratura da trinca obtida no ensaio de CTOD com aumento de 1000x. (a) condição MB + 5183, (b) condição MB + 5087.

Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores (Alcan, 1993; Marques, 2003; Ueyama, 2005), onde trabalhou-se com um metal de solda de menor resistência que o metal de base, já que a força cai para as amostras com soldas e nos ensaios se verifica um aumento de tenacidade, mesmo na presença de defeitos.

Uma vantagem do consumível de menor resistência que o metal de base, é minimizar a tendência à trinca, tanto no metal de solda, quanto no metal base o que coopera para redução do nível geral das tensões na junta soldada (Machado, 2012).

Mochizuki (2006) estudou o efeito da microestrutura na iniciação e propagação da trinca a fim de clarificar a diferença na resistência à tenacidade entre a zona soldada e o metal de base. O mesmo atribui a presença de grãos refinados na região de solda por aumentar a ductilidade na iniciação e propagação de trincas, que consequentemente, aumenta a tenacidade.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma abordagem sobre a soldagem do alumínio pelo processo por curto circuito, CMT. Nas condições testadas, o processo apresentou-se como uma boa solução para soldagem de raiz para os dois metais de adição utilizados neste trabalho (ER 5183 e ER5087). Ambas as amostras contendo os dois metais de adição atenderam satisfatoriamente as normas, comprovando a qualidade do processo. Comparativamente, observou-se pouca diferença metalúrgica entre as duas ligas utilizadas como opção de consumível.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, BNDES, FINEP e PRH-ANP pelo suporte financeiro

4. REFERÊNCIAS

- Alcan. 1993. *Manual de Soldagem do Alumínio e Ligas*. 27 Jan. 2020 <http://www.soldaautomatica.com.br/index_arquivos/Arquivos/MANUAL%20DE%20SOLDAGEM%20ALCAN.pdf>.
- Anderson, T. L. 2005. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York: CRC Press, 3rd ed.
- BRITISH STANDARD, 1991. BS 7448: *Fracture mechanics toughness tests – Part I: Method for determination of K_{IC}, critical CTOD and critical J values of metallic materials*. London, UK.
- BS EN ISO 15653, 2010. *Metallic materials - Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds*.
- Griffith, A.A., 1921. “The phenomena of rupture and flow in solids”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London - Series A*, Vol. 221, p. 163-198.
- Irwin, G.R., Wells, A.A., 1965. “A continuum-mechanics view of crack propagation”. *Metallurgical Reviews*, Vol.10, p. 223–270.
- ISO Standards, 2002. ISO: 12135 - *Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness*.
- Haag, J., 2015. *Influência da geometria do corpo de prova e do tamanho de trinca na tenacidade à fratura do aço API 5DP tool joint*. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre.
- Machado, I.G., 2012. “New Paradigms for Specification of Welded Joints”. *Soldagem e Inspeção*, Vol. 17, p. 278-288.
- Marques, C., 2013. *Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio*. Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis.
- Mochizuki, M; et al., 2006. “Fracture toughness of structural aluminium alloy thick plate joints by friction stir welding”. *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 11, p. 366-370.
- Pickin, C. G.; Williams, S. W.; Lunt, M., 2011. “Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, p. 496-502.
- Ueyama; et al., 2005. “AC pulsed GMAW improves sheet metal joining”. *Welding Journal*, Vol. 84, p. 40-46.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

FRACTURE TOUGHNESS OF AA 5083/H116 WELDED FOR SHIPBUILDING APLICATTIONS

Bruna Savi Tonelli

Instituto Federal de Santa Catarina, Av. 15 de Novembro, 61 - Aeroporto, Araranguá - SC, 88905-112
bruna.savi@ifsc.edu.br

Jefferson Haag

Instituto Federal do Rio Grande do Sul, R. Avelino Antônio de Souza, 1730 - Nossa Sra. de Fátima, Caxias do Sul - RS, 95043-700
jefferson.haag@gmail.com

Keli Vanessa Salvador Damin

Fernando Michelin Marques

Instituto Federal de Santa Catarina, Av. Nereu Ramos, 3450 D - Seminário, Chapecó - SC, 89813-000
keli.salvador@ifsc.edu.br, fernando.marques@ifsc.edu.br

Tatiana Bendo

Universidade Federal de Santa Catarina, R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900
tatianabendo@yahoo.com.br

Abstract. *In this work, fracture toughness was evaluated by the CTOD (Crack Tip Opening Displacement) assay in 5083H / 116 naval aluminum alloys with 6 mm thickness welded by the Cold Metal Transfer (CMT) process with two different addition wires (ER 5183 and ER 5087). The test was carried out at room temperature, following the ISO 12135 and BS EN ISO 15653 standards, both in the base metal and in the melting zone, for investigation and comparison of the welding region in non-heat-treatable aluminum alloys. We also compared the properties of the two options for addition metals in naval welding. The results obtained met the minimum validation criteria required by the standard. Still, it was observed that the weld presented better results of CTOD in relation to the base metal. Between the two wires used, there was no significant difference between the CTOD values found.*

Keywords: ER 5183. ER 5087. Welding. Cold Metal Transfer. Crack Tip Opening Displacement.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.