

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO CONTÍNUO NA TENACIDADE DE FRATURA DINÂMICA APARENTE DE UMA JUNTA SOLDADA DE UM AÇO ESTRUTURAL.** Vicente Gerlin Neto; Ruís Camargo Tokimatsu; Rodrigo Hirayama. – Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia Mecânica – Campus Ilha Solteira

A utilização do aço na construção civil vem ganhando espaço, por possibilitar aos projetistas soluções ousadas, eficientes e de alta qualidade. As estruturas metálicas podem ser encontradas sob duas opções de produto: perfis laminados e perfis soldados. A necessidade de se obter perfis diferentes dos laminados disponíveis no mercado e a maior liberdade dimensional é que tornam os perfis soldados, obtidos a partir de chapas planas, uma prática bastante comum embora tenham um custo de fabricação um pouco mais elevado quando comparado com o perfil laminado.

Propostas que visam à redução de custos na fabricação dos perfis soldados de modo a torná-los mais competitivos no mercado vem sendo pesquisadas. Sobre este aspecto, uma proposta que tem se mostrado muito interessante é a implementação de perfis soldados de um lado só. Entretanto, quando se solda de um lado só em um único passe dificilmente se consegue penetração total do cordão-de-solda. Esta falta de penetração origina um entalhe entre a aba e mesa do perfil. A combinação de uma complexa microestrutura formada após a solidificação do cordão-de-solda e a presença do entalhe torna esta região muito vulnerável, pois favorece a nucleação e a propagação de trincas que podem culminar em falhas mecânicas. O presente trabalho tem como principal objetivo estudar a influência da taxa de resfriamento contínuo na tenacidade a fratura dinâmica mecânicas de juntas soldadas de um lado só do aço COS Civil 300, soldado pelo processo arco submerso. O propósito é, por intermédio de ciclos térmicos, investigar formas de se obter uma microestrutura que possibilite melhorar a tenacidade do cordão-de-solda de modo a minimizar o efeito de entalhe sobre esta região da junta soldada.

O foco do estudo ficou restrito ao cordão-de-solda, já que está é a região mais crítica quando se solda de um lado só e ao fato do entalhe, resultante da falta de penetração, se posicionar exatamente nesta região. Para se julgar o mérito da alteração micro estrutural provocada no cordão-de-solda pelo ciclo térmico tomou-se como principal parâmetro à tenacidade medida no ensaio de impacto Charpy. Adotou-se este ensaio pela sua simplicidade e também por ter sido considerado bastante realista para auxiliar no estudo do efeito de entalhe na junta soldada. Considerando que, o entalhe usinado sobre o cordão-de-solda representa de forma satisfatória o entalhe decorrente da falta de penetração em juntas soldadas de um lado só. Das juntas soldadas foram retirados corpos-de-prova Charpy, sempre tomando cuidado para que o entalhe estivesse presente e bem posicionado no cordão-de-solda. Para simular a descontinuidade resultante da falta de penetração recorreu-se ao artifício de produzir entalhes usinados nos corpos-de-prova com auxílio de uma ferramenta de perfil apropriado. Só então os corpos-de-prova foram submetidos aos tratamentos térmicos. Os corpos-de-prova foram austenitizados em três temperaturas: 880, 1000 ou 1225°C, e depois submetidos a um resfriamento contínuo, sendo têmpera (água), normalizado (ar calmo) ou recozido (no interior do forno). A caracterização micro estrutural foi feita com auxílio de microscopia óptica e a caracterização mecânica por intermédio dos ensaios de impacto Charpy e dureza Vickers. O mérito micro estrutural foi avaliado, sobretudo, com base nos valores de tenacidade.

Os ensaios de impacto foram realizados à temperatura ambiente, em um sistema de ensaio PW30 instrumentado e informatizado de impacto Instron Wolpert. O sistema fornece a curva força x tempo, força x deslocamento, energia de impacto x deslocamento, deslocamento x tempo e velocidade x tempo, como também fornece de força, deslocamento, tempo e energia nos eventos de deslocamento global, carga máxima, no início de freamento de trinca frágil e instável. A velocidade inicial utilizada para o impacto do martelo no ensaio foi de 5,52 m/s com um fundo de escala de 300 J. Todos os dados são fornecidos de forma obscura, por isso através de uma rotina computacional desenvolvida na linguagem de programação do Matlab que suaviza o sinal obtido pela Instron Wolpert através da filtragem do sinal conhecendo as frequências, chamado de método de Fourier. Essa filtragem é feita porque fica difícil distinguir as origens dessas oscilações, pois na maioria das referências, esse tipo de comportamento dos sinais está associado a

oscilações inerciais. Segundo Rodrigues et.al. (2001), essas oscilações podem conter varias combinações, tais como avanço de trinca, efeitos do processo de deformação, ou mesmo originado pelo impacto das partes envolvidas.

A aplicação deste programa tem como objetivo a filtragem e a determinação dos valores de carga e energia de início de propagação da trinca, visando à análise das curvas força vs deslocamento, levantadas pela rotina computacional, das diversas microestruturas do cordão-de-solda, obtidas com os ciclos térmicos. Todas as microestruturas obtidas foram analisadas pelo critério elasto-plástico, onde se leva em consideração todas as características frágeis e dúcteis.

Como a rotina computacional na sua opção elasto-plástica detecta início de propagação de trinca dúctil, que ocorrem entre os pontos de escoamento generalizado e de carga máxima. Quanto ao número mínimo de filtragem, foram utilizadas para cada corpo-de-prova, cada tipo de microestrutura e cada tipo de entalhe, vários números de filtrações visando encontrar a resposta mais aproximada para a análise da compliance.

Os ensaios de dureza foram efetuados em equipamento da marca Heckert, modelo HPO-2550, utilizando carga nominal de 20kgf. A escala de dureza Vickers foi adotada para todos os ensaios de dureza. As impressões de dureza foram medidas em amostras retiradas da secção transversal ao eixo principal do cordão-de-solda devidamente polidas e atacadas com Nital 2%, para evidenciar a área de interesse e identificar os pontos para a realização das medidas de dureza sobre o cordão-de-solda.

Tabela 1. Valores da dureza Vickers do cordão-de-solda após realização dos tratamentos térmicos com resfriamento contínuo

Tipo de tratamento	Temperatura de austenitização [°C]	Energia Absorvida [J]	Dureza Vickers [Kgf/mm2]
Têmpera (resf. em água)	1225	44(2)*	192(3)*
	1000	30(3)*	217(3)*
	880	31(4)*	197(4)*
Normalização (resf. Ao ar)	1225	125(14)*	138(1)*
	1000	196(28)*	139(2)*
	880	135(18)*	139(2)
Recozimento (resf. no forno)	1225	122(20)*	120(2)*
	1000	201(111)*	131(2)*
	880	152(15)*	135(3)*

\*Desvio padrão.

Analisando os valores de dureza – Tabela 1 para as três condições de tratamento térmico com resfriamento contínuo é possível verificar que no recozimento, elevando-se a temperatura de austenitização há uma ligeira queda no valor da dureza do cordão-de-solda de 135kgf/mm2 a 880°C para 120kgf/mm2 a 1225°C. Nas amostras normalizadas os valores de dureza permaneceram praticamente inalterados, por volta de 139kgf/mm2. Entretanto, as amostras temperadas apresentaram um comportamento um pouco mais complexo. Os valores de dureza variaram da seguinte forma: para austenitização a 880°C o valor médio de dureza foi de 197kgf/mm2, aumentou para 217 kgf/mm2 na amostra austenitizada a 1000°C, e tornou a diminuir para a austenitização a 1225°C, para 192kgf/mm2.

Para a austenitização a 880°C e 1225 °C, tanto para a condição normalizado e como para recozido, os valores de tenacidade são muito próximos, respectivamente, 135 e 152J, à 880°C, e 125 a 131J à 1225°C. Entretanto, a austenitização a 1000°C produziu um forte efeito na tenacidade, para ambas as condições, normalizado e recozido. Na condição normalizada a tenacidade atingiu o valor médio de 196J.

Tabela 2 – Valores da Tenacidade à fratura elasto-plástica  $J_{ID}$  e  $K_{ID}$  do cordão-de-solda após a realização dos tratamentos térmicos com resfriamento contínuo

Tipo de tratamento	Temperatura de austenitização [°C]	$J_{ID}$ [J/m <sup>2</sup> ]	$K_{ID}$ [MPa.m <sup>1/2</sup> ]
Têmpera (resf. em água)	1225	213880(46970)*	211(24,58)*
	1000	191622(35813)*	200(19,49)*
	880	131414(19177)*	166(12,22)*
Normalização (resf. ao ar)	1225	119148(8765)*	158(5,77)*
	1000	114493(6483)*	155(4,27)*
	880	126062(12884)*	162(8,2)*
Recozimento (resf. no forno)	1225	96065(6182)*	142(4,29)*
	1000	114493(8668)*	155(5,83)*
	880	96065	152

Analisando os valores de tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica  $J_{ID}$  e  $K_{ID}$  – Tabela 2 também para as três condições de tratamento térmico com resfriamento contínuo é possível verificar que na normalização, elevando-se a temperatura se observa uma queda no valor da tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica  $K_{ID}$  de 126062 J/m<sup>2</sup> a 880 °C para 119948 J/m<sup>2</sup> a 1225 °C. Já os valores de  $K_{ID}$  tiveram uma pequena oscilação diminuindo de 162 MPa.m<sup>1/2</sup> a 880 °C para 155 MPa.m<sup>1/2</sup> a 1000 °C e aumentando depois para 158 MPa.m<sup>1/2</sup> a 1225 °C. Nas amostras temperadas os valores de  $J_{ID}$  aumentaram junto com o crescimento da temperatura, indo de 131414 J/m<sup>2</sup> a 880 °C para 213880 J/m<sup>2</sup> a 1225 °C e os valores de  $K_{ID}$  tiveram o mesmo comportamento, indo de 166 MPa.m<sup>1/2</sup> a 880 °C para 211 MPa.m<sup>1/2</sup> a 1225 °C. Nos tratamentos recozidos, o valor de  $J_{ID}$  foi de 96065 J/m<sup>2</sup> a 880 °C e a 1225 °C e variou apenas a 1000 °C indo para 114439 J/m<sup>2</sup>, já os valores de  $K_{ID}$  aumentaram de 152 MPa.m<sup>1/2</sup> a 880 °C para 155 MPa.m<sup>1/2</sup> a 1000 °C e depois diminuíram para 142 MPa.m<sup>1/2</sup> a 1225 °C.

Depois de analisadas as tabelas conclui-se que, para o tratamento temperado, a dureza Vickers é maior à temperatura mediana de 1000 °C e a energia absorvida é maior quanto menor a taxa de resfriamento, já a tenacidade à fratura elasto-plástica  $J_{ID}$  aumenta junto com a temperatura, assim como a tenacidade à fratura elasto-plástica  $K_{ID}$ . No tratamento normalizado a energia absorvida é maior na temperatura mediana de 1000 °C e o de dureza Vickers é melhor em duas temperaturas, a 880 e a 1000 °C, os valores de tenacidade à fratura elasto-plástica  $J_{ID}$  diminuem conforme a temperatura aumenta, comportamento também observado dos valores de tenacidade à fratura elasto-plástica  $K_{ID}$ . No recozimento, a energia absorvida é maior à temperatura mediana de 1000 °C e a dureza Vickers diminui com o aumento da temperatura, os valores de tenacidade à fratura elasto-plástica  $J_{ID}$  e  $K_{ID}$  tem o mesmo comportamento, sendo maiores a 1000 °C. Portanto as melhores temperaturas de austenitização são de 1225 °C para os tratamentos temperados, 880 °C para os normalizados e de 1000 °C para os recozidos.

O emprego das diferentes rotas de tratamento isotérmico de uma maneira geral, produziu variações nas propriedades, porém não muito pronunciadas. Visto que os valores de tenacidade, independentemente da rota de tratamento, variaram entre aproximadamente 113 e 154 J.

## Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. In: \_\_. Annual book of ASTM standards: metals test methods and analytical procedures. Danvers: ASTM, 1997. (ASTM E 399-90).

ANGAMUTHU, K.; GUHA, B.; Abd ACHAR, D. R. G. Investigation of dynamic fracture toughness (JId) behavior of strength mis-matched Q & T steel weldmenst using instrumented Charpy impact testing. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 64, p 417-432, 1999.

FORTES, C. Apostila de Soldagem a Arco Submerso. ESAB, 2004.

KOBAYASHI, T., TODA, H. & MASUDA, T., 2001, “Analysis of test data obtained from Charpy-V and impact tensile test”, In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v1. pp. 305-312.

NOGUEIRA, F. C. Influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura do aço estrutural ABNT – 4340. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

RODRIGUES, A. R. Charpy Instrumentado – Determinação da tenacidade à fratura dinâmica de materiais metálicos. Ilha Solteira, 2001. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

VILCHEZ, C. A. Z. Influência de Ciclos Térmicos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Junta Soldada do Aço COS CIVIL 300. 2005. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005.

ZIEDAS, S.; TATINI I. (org.). Soldagem. Coleção