Ensaios mecânicos com foco na tenacidade da fratura de um aço avançado de alta resistência mecânica conhecido como Complex Phase da família AHSS

Da Silva, D. Q.[1]; Silva, F. S.[1]; Diniz, P. P..[1]; Santos, T. L. S. [1,2]; Marques, G. I.[1]; Morais, W. A. [1,2]

[1] Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos – SP, Brasil
[2] Willy Ank Soluções para o setor metal mecânico, São Vicente-SP, Brasil

E-mail: engenheirodanielqueiroz@gmail.com

Resumo: Existe uma busca tanto do mercado interno quanto externo de siderúrgicas nacionais para desenvolvimento de aços AHSS - Advanced High Strength Steels, usados em indústrias automobilísticas para fabricação de amortecedores e suporte de pilar B de forma a minimizar as importações e atender a necessidade do mercado nacional. Este trabalho visa empregar ensaios mecânicos tradicionais com foco no ensaio de tração para a estimativa da tenacidade da fratura de um aço avançado de alta resistência mecânica conhecido como complex phase (CP) da família AHSS.

Palavras-chave: AHSS. Complex Phase. Tenacidade da fratura. Ensaios mecânicos.

Mechanical tests focusing on fracture toughness of an advanced high strength mechanical steel known as Complex Phase of the AHSS family

Abstract: There is a search of both the internal and external markets of national steelmakers for the development of AHSS steels, used in automotive industries to manufacture shock absorbers and B-pillar support in order to minimize imports and meet the needs of the domestic market. This work aims to use traditional mechanical tests with focus on the tensile test for the estimation of fracture toughness of an advanced high strength mechanical steel known as complex phase (CP) of the AHSS family.

Keywords: AHSS. Complex Phase. Fracture tenacity. Mechanical tests.

Introdução

O aço avançado de alta resistência mecânica conhecido como complex phase (CP) da família AHSS - Advanced High Strength Steels é um metal muito utilizado em amortecedores e suporte de pilar B no ramo automobilístico (1), teve sua utilização iniciada por volta da década de 90 e por meio de desenvolvimento tecnológico e aprimoramentos em sua fabricação suportam mais de 750MPa de resistência mecânica (2).

Segundo a Anafacer (2014) microestrutura de um produto é determinante na sua resistência mecânica e o complex phase é composto de microestruturas muito finas (3).

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma carga uniaxial num corpo de prova de geometria definida até sua ruptura fornecendo dados quantitativos das características mecânicas do material (4).

A tenacidade é a capacidade de um material absorver energia até sua ruptura dependendo de vários fatores (5), sendo a tenacidade da fratura o estudo da tenacidade num material com algum tipo de imperfeição.

Este trabalho tem o objetivo de empregar ensaios mecânicos tradicionais com foco no ensaio de tração para a estimativa da tenacidade da fratura do aço complex phase (CP).

Material e Métodos

O material utilizado neste estudo foi o aço Complex Phase da classe 800 MPa, com largura de 12,5 mm, 4mm de espessura, laminado a quente e decapado de acordo com especificação EN10338, sendo um liso e quatro com furos de 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm e 4,5 mm no centro respectivamente, produzido pela Usiminas – Cubatão.

Os ensaios de tensão foram realizados a uma temperatura ambiente de 24°C, com velocidade de 5mm/min como sugerido pela norma ASTM E8M.

Foi utilizada a máquina de ensaio de tração do fabricante EMIC, modelo DL 10000, com capacidade de 100 kN do laboratório de mecânica da Unisanta no bloco C. O corpo de prova foi fixado no equipamento e utilizado um extensômetro eletrônico a base de strain-gate.

Os softwares utilizados foram o SolidWorks e o TESC® da empresa EMIC, onde foi configurado os parâmetros de espessura, comprimento útil de ensaio e largura para realização do ensaio. Foi empregado o recurso de elementos finitos que é uma ferramenta moderna para cálculos estruturais (6).

Resultado e Discussão

A figura 1 representa as curvas de tensão por deformação gerada pela máquina de ensaio de tensão dos quatro corpos de prova com furos no centro e um sem furo (liso).

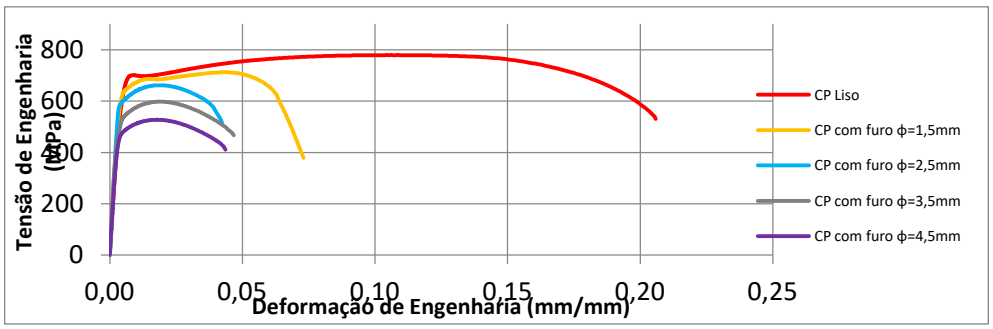


Figura 1 – Gráfico de tensão de engenharia por deformação de engenharia obtidos por ensaio de tração no material empregado.

Os dados do quadro 1 foram retirados dos ensaios de tração, cujas curvas estão ilustradas na figura 1 e o quadro 2 foi calculado com base na geometria dos corpos de prova, de acordo com equações conhecidas na literatura (7)(8)(9), com tensão do furo de Von Mises de 702 Mpa.

Quadro 1 – Dados extraídos do ensaio de tensão.

d (mm)	σ_E (Mpa)	σ_R (Mpa)	$\sigma_{ruptura}$ (Mpa)	ε (mm/mm)
Liso (sem furo)	702	780	530	5,29
1,5	630	720	386	2,19
2,5	580	683	533	0,964
3,5	535	602	470	0,941
4,5	470	535	416	0,903

Quadro 2 – Resultados calculados a partir da geometria dos CP's e resultados do ensaio de tensão.

Variáveis	1,5 mm	2,5 mm	3,5 mm	4,5 mm	Equações
K_t (7)	2,67	2,51	2,37	2,27	$3 - 3{,}140 * \left(\frac{d}{D}\right) + 3{,}667 * \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 1{,}527 * \left(\frac{d}{D}\right)^3$
K_{tn} (8)	2,68	2,52	2,39	2,28	$2 - 0{,}284 * \left(1 - \frac{d}{D}\right) + 0{,}6 * \left(1 - \frac{d}{D}\right)^2 - 1{,}32 * \left(1 - \frac{d}{D}\right)^3$
K_{tg} (8)	3,05	3,15	3,31	3,57	$0{,}284 * \left(\frac{2}{1 - \frac{d}{D}}\right) + 0{,}6 * \left(1 - \frac{d}{D}\right) + 1{,}32 * \left(1 - \frac{d}{D}\right)^2$
σ_{nom} (Mpa) (8)	261	279	294	307	$P/[(D - d) * t]$
σ_{max} (Mpa) (8)	699	699	699	699	$k_t * \sigma_{nom}$
P (N) (9)	11521	11171	10611	9852	$S_{prop} * (D * t)$

A presença de concentradores de tensão, representados pelos furos geram concentração de tensão quando aplicada determinada tensão (σ_m), que introduz um maior nível de tensão ($\sigma_{máx}$) na região quando o material é solicitado, como ilustrado na figura 2 (7). Com base nos fatores de tensão k_t, k_{tn} e k_{tg} e da razão do diâmetro do furo com o comprimento da chapa temos a concentração de tensão.

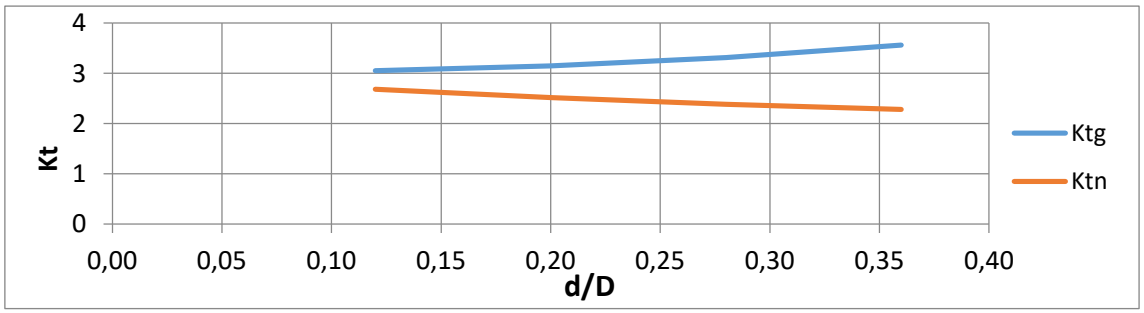


Figura 2 - Concentração de tensão local (ktn) e global (ktg).

Foi utilizado o simulador da Amesweb (2013) e o SolidWorks com a técnica de elementos finitos para comparar os dados calculados dos resultados dos ensaios com os simulados pelo software de acordo com quadro 3.

O maior valor de erro foi de 3,88% para o K_{tg} do CP com furo de 1,5 mm.

Quadro 3 – Erro (% ε).

Variáveis	Dados	1,5 mm	% ε	2,5 mm	% ε	3,5 mm	% ε	4,5 mm	% ε
Kt	Teórico	2,673	0,11	2,506	0,16	2,375	0,21	2,274	0,18
	Site	2,67		2,51		2,37		2,27	
Ktn	Teórico	2,685	2,76	2,519	0,75	2,386	0,42	2,282	0,22
	SolidWork	2,613		2,538		2,376		2,277	
Ktg	Teórico	3,051	3,88	3,149	1,81	3,314	1,16	3,566	0,68
	SolidWork	2,937		3,093		3,276		3,542	
δ_{nom} (Mpa)	Teórico	261,383	0,80	278,790	2,31	294,249	0,28	307,343	0,17
	SolidWork	259,32		272,5		293,44		306,81	
δ_{max} (Mpa)	Teórico	698,774	3,11	698,776	1,02	698,774	1,02	698,776	0,04
	SolidWork	677,68		691,74		697,37		698,5	

Usado os dados do ensaio de tração e charpy Diniz (1) determinou através da equação $k_{IC} = LE * \sqrt{0{,}646 * (\frac{E_C}{L_E} - 0{,}01)}$ que $K_{IC} = 187MPa\sqrt{m}$ ±3% em 20°C.

A figura 7 demonstra com base nos dados de Morais (2011) o valor estimado de K_{IC} para o CP liso utilizado neste trabalho.

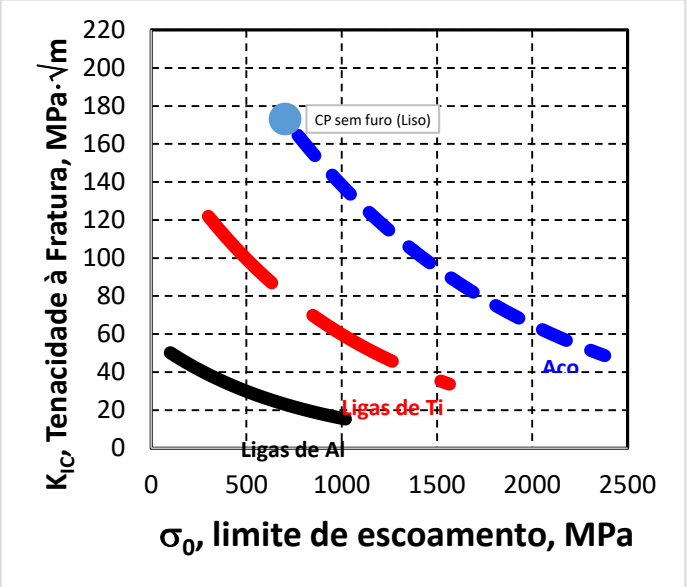


Figura 7 – Tenacidade da fratura do CP liso com limite de escoamento.

Conclusão

Diferente dos corpos de prova com entalhe lateral onde há um aumento do limite de escoamento e resistência por meio do fenômeno de endurecimento comparado aos corpos de prova lisos, na CP's com furo central o efeito é inverso. Houve uma redução gradativa dos limites de escoamento e de resistência de aproximadamente 10% e 7% do corpo de prova liso com o de furo de 1,5 mm e de 30% e 45% respectivamente entre os corpos de prova com furo central de 1,5 mm a 4,5 mm.

O corpo de prova sem furo possuí característica de material dúctil com patamar de escoamento, porém ao aplicar um furo ele começa a possuir características de material frágil de forma proporcional ao aumento do furo, da mesma forma que a tenacidade à fratura é diretamente proporcional ao aumento do furo na CP, enquanto o limite de escoamento é inversamente proporcional.

Referencias Bibliográficas

1. DINIZ, P. P. ADEQUAÇÃO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW PARA UM AÇO. Santos, SP, Brasil : s.n., 08 de 2017.
2. SILVA, E. A. Estudo do efeito springback em aços avançados de alta resistência aplicados a indústria automobilística. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Guaratinguetá.* 2012.
3. SARKAR, S. *Microstructural evolution model for hot strip rolling of a nb-mo complex-phase steel.* 2008.
4. INFOSOLDA. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E MECÂNICOS. [Online] INFOSOLDA. [Citado em: 26 de 08 de 2017.] http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/209-ensaio-mecanico-tracao.html.
5. CALLISTER JR, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. 7ª Edição.* Rio de Janeiro : LTC, 2008.
6. *MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E TÉCNICAS DE ENRIQUECIMENTO DA APROXIMAÇÃO APLICADOS À ANÁLISE DE TUBOS CILÍNDRICOS E CASCAS ESFÉRICAS.* NIRSCHL. 2008, Cadernos de Engenharia de Estruturas, Vols. v. 10, n. 47, pp. p. 17-51.
7. PILKEY, W. D. *Peterson`s Stress Concentration Factors. 2nd Ed.* s.l. : Wiley-Interscience, 1997. ISBN: 978-0-471-53849-3.
8. PETTERSON, J. *Peterson's Stress Concentration Factors," 2nd.* New York : W. D. Pilkey. P.256, 1997.
9. MORAIS, W. A., MAGNABOSCO, A. S. e NETTO, E. B. M. *METARLUGIA FÍSICA E MECÂNICA APLICA.* São Paulo : ABM, 2011. Vol. 1 E 2. doi: 10.4322/tmm.2011.034.
10. ANAFACER. O Mercado Brasileiro. [Online] 2014. http://www.anfacer.org.br/site..
11. POLIDO, J. Análise de Dados de Vida Usando Concorrentes Técnicas de Modos de Falha. *Apresentado no 61ª Reliability and Maintainability Symposium.* Jan de 2015.
12. LAFRAIA, J. R. B. *Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade.* Rio de Janeiro : Ed. Qualitymark, 2001.
13. TAMARELLI, C. M. *AHSS 101: The evolving use of advanced high- strength steels for automotive applications.* 2011.
14. PILKEY, W. D. *Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices. 2nd Ed.* s.l. : John Wiley & Sons, 2004. ISBN: 978-0-471-03221-2.
15. AMESWEB. Amesweb. *http://www.amesweb.info.* [Online] Amesweb.info, 2013. [Citado em: 23 de 08 de 2017.] http://www.amesweb.info/StressConcentrationFactor/CentralCircularHoleInFiniteWidthPlate.aspx.