

Tema: Iniciação científico-tecnológica

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURVAS J-R UTILIZANDO CORPOS DE PROVA COMPACTOS C(T)*

Artur Fernando de Vito Júnior¹

Maurício de Carvalho Silva²

Gustavo Henrique Bolognesi Donato²

Resumo

Caracterizar propriedades de resistência à propagação de trinca em aços é um elemento central em métodos de avaliação de integridade estrutural. Tal caracterização, normalmente se dá por meio da obtenção de curvas de resistência à propagação estável de defeitos (curvas J-R) do material. Sendo assim, para tornar este estudo mais amplo, serão obtidas curvas J-R de um aço estrutural com o objetivo de elaborar um roteiro metodológico para obtenção de curvas J-R. O ensaio de tenacidade à fratura para obtenção da curva J-R foi conduzido utilizando a técnica do corpo de prova único (*single specimen*) empregando o método da flexibilidade no descarregamento (*unloading compliance*), segundo a norma de ensaios ASTM E1820. Para este estudo, foram utilizados corpos de prova compactos C(T) de espessura $B=10,0$ mm, largura $W=2B$ e uma relação aproximada entre o tamanho de trinca (a) e a largura, $a/W=0,5$.

Palavras-chave: Mecânica da fratura; Tenacidade à fratura; Curvas J-R.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF JR CURVES USING COMPACT SPECIMENS C(T)

Abstract

Evaluate properties of crack resistance propagation in steels is a key element in structural integrity methods. Such characterization usually occurs by getting resistance curves of stable propagation defects (JR curve) of the material. So to make this larger study, JR curves of a structural steel will be obtained to developing a methodological sequence for achieving JR curves. The fracture toughness test to obtain the JR curve will be conducted using single specimen technique and unloading compliance, according to the standard ASTM E1820. For this study, a compact specimen C(T) thickness $B = 10.0$ mm, width $W = 2B$ and an approximate relationship between the crack size (a) and width, $a / W = 0,5$ was used.

Keywords: Fracture Mechanics; Fracture Toughness; J-R Curves.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

² Professor Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Um significativo aumento na demanda de estruturas cada vez mais seguras e confiáveis, tais como vasos de pressão, tubulações para transporte de óleo e gás, entre outros, tem conduzido a escolhas de aços com comportamento dúctil a temperaturas normais de operação, onde estão sujeitos a carregamentos que podem produzir uma significativa plasticidade. Sob tais condições, a avaliação da integridade estrutural de componentes contendo defeitos requer o emprego da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) para a correta caracterização da tenacidade à fratura destes materiais [1,2].

Observações experimentais demonstram que aumentos significativos na capacidade de carga, além dos limites elásticos e elasto-plásticos de uma estrutura contendo um defeito macroscópico (trinca), são possíveis sob condições de crescimento (propagação) estável de trinca. Devido à extensão de trinca por mecanismos de rasgamento dúctil que tende a absorver mais energia, o comportamento de fratura resulta em um crescimento lento e estável da trinca. Tal crescimento estável é comumente caracterizado pela curva de resistência J vs. a , denominada curva J - R do material [1-3].

Procedimentos convencionais utilizados para avaliação da integridade estrutural geralmente utilizam critérios simplificados incorporando mecanismos de colapso plástico e as propriedades mecânicas do material. Adicionalmente, estes métodos estabelecem critérios de aceitação de defeitos baseados em dados experimentais limitados a aços estruturais de baixa resistência, os quais não refletem necessariamente o mecanismo de falha real (por exemplo, crescimento estável de defeito macroscópico antes do colapso da estrutura) e nem consideram requisitos específicos para aços estruturais de alta resistência correntemente em uso [2]. De acordo com Jones [4], por muitos anos aceitou-se que a resistência à propagação de fratura dúctil dos aços utilizados em dutos era essencialmente relatada por uma tenacidade inerente ou por uma energia absorvida no teste de impacto. No entanto, a propagação de uma fratura em dutos envolve taxas de deformação e condições geométricas bem diferentes daquelas produzidas em corpos de prova *Charpy*, segundo a ASTM E23 [5].

O aumento da plasticidade na região da ponta da trinca com o aumento do carregamento da estrutura representa, em termos genéricos, a dissipação do trabalho das forças externas na forma de energia de deformação plástica. Conseqüentemente, uma estrutura dúctil contendo um defeito suporta elevados níveis de carga, mesmo após a iniciação e propagação estável da fratura [2]. Por isso, em muitos materiais é virtualmente impossível caracterizar o comportamento à fratura através da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL).

Sendo assim, uma abordagem alternativa é necessária. Por exemplo, a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) aplica-se a materiais com nível de plasticidade capaz de violar a MFEL [2,6-8]. Dentro do contexto da MFEP, os parâmetros de caracterização de fratura para os materiais plasticamente deformáveis como o parâmetro CTOD (escola inglesa) e a integral J (escola americana) apresentam larga aplicabilidade. A propagação estável de trinca é comumente mostrada pela curva J - R (curva de resistência J vs. a) do material.

Aplicando este tipo de metodologia é possível monitorar o crescimento da trinca através de inspeções periódicas por ensaios não-destrutivos até que ela atinja valores considerados críticos e a estrutura seja então condenada. Este crescimento estável pode, por outro lado, provocar plastificação de toda a seção resistente e

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

levar a estrutura ao colapso plástico. Desta forma, são muito importantes procedimentos de avaliação de integridade de estruturas trincadas que definam metodologias para estimar a capacidade da estrutura trincada de continuar em serviço de forma segura [7,8].

O comportamento a fratura para materiais dúcteis é bastante diferente dos materiais frágeis. Os materiais dúcteis geralmente exibem crescimento estável e lento de trinca, acompanhado de considerável deformação plástica, ou seja, existe uma resistência ao crescimento da trinca durante a extensão da mesma, devido à energia de deformação plástica na ponta da trinca [1]. Antes de atingir um estado de crescimento constante, a zona de plastificação na ponta da trinca aumenta durante a extensão da mesma. Esta expansão da zona plástica e a propriedade de encruamento do material requerem um aumento das forças externas para que o crescimento estável de trinca continue.

Este fenômeno é comumente expresso pela curva J-R e pode ser vista esquematicamente na Figura 1. Com o aumento de J, o material falha localmente na ponta da trinca o que, conseqüentemente, provoca um “rasgamento” localizado e seu crescimento [1]. Esta curva expressa a relação direta entre a propagação estável da trinca (a) e um parâmetro mecânico tal como a integral J. A resistência à propagação dúctil de trinca num aço também pode ser caracterizada pelo valor da inclinação dJ/da , definida como módulo de rasgamento. Para os metais, as curvas J-R são crescentes e normalmente estão associadas ao crescimento e coalescência de microcavidades [1-3].

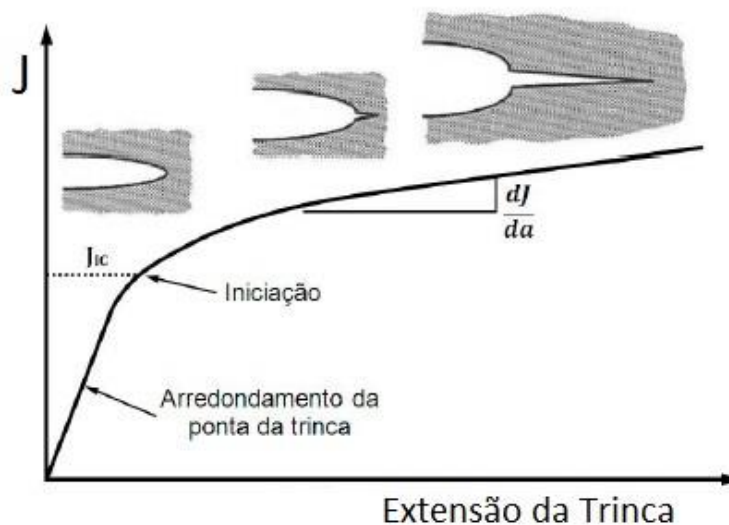


Figura 1: Esquema da curva J-R para materiais dúcteis [1].

Inicialmente, a curva J-R foi utilizada somente como uma maneira de se determinar o valor de J_{Ic} . O parâmetro J_{Ic} aparece na Figura 1 e representa a energia necessária (num material não-linear elástico) para iniciar a propagação estável de uma trinca (considerava-se trinca estacionária). Mas, logo se tornou claro que a curva J-R poderia ser interpretada como uma caracterização mais adequada do comportamento do material sob crescimento de trinca [9]. Ou seja, utilizar J_{Ic} como um critério de projeto é excessivamente conservativo, já que desta maneira não se considera a “reserva de segurança” devido ao aumento da resistência com o crescimento da trinca. E é por isso que existe uma tendência crescente na utilização de projetos que permitam a consideração do crescimento estável de trinca. No

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

entanto, o valor de J aplicado deve ser inferior ao da integral J capaz de promover crescimento instável de trincas [9]. Valores característicos de $J_{máx}$ para materiais dúcteis podem ser vistos no trabalho de Silva [10], sendo que para um aço API X60 e para o API X80 estes valores são respectivamente 370 kJ/m^2 e 850 kJ/m^2 .

O crescimento de trinca é acompanhado por descarregamento elástico e, portanto, deformação plástica não proporcional na vizinhança da ponta da trinca. No entanto, a implicação é que a integral J seja estritamente válida para análise de trincas estacionárias. Apesar de tudo, se carregamentos quase proporcionais ocorrem em qualquer lugar, exceto na pequena vizinhança da ponta da trinca, então J pode ser utilizado para analisar o crescimento de trinca. Contudo, deve-se fornecer as condições adicionais para que o crescimento de trinca controlado por J (dominância J) seja satisfeito [1,11].

A técnica de teste mais comum para obtenção experimental de uma curva J - R é a do corpo-de-prova único (*single specimen*), utilizando o método de flexibilidade no descarregamento (*unloading compliance method*), ilustrado na Figura 2 [1,12,13]. Este método consiste em pequenos descarregamentos (periódicos) do corpo-de-prova, enquanto se determina a curva de Carga vs. Deslocamento. A inclinação ($1/C$) das linhas geradas durante o descarregamento parcial representa as medidas da flexibilidade elástica do corpo-de-prova. Assim, o comprimento de trinca é calculado em intervalos regulares de teste, através da medição da flexibilidade da amostra após o respectivo descarregamento parcial.

Dado que o tamanho da trinca muda continuamente durante o teste de curva J - R , a integral J deve ser calculada incrementalmente. Para testes de flexibilidade, a forma mais lógica para atualizar o valor de J é a cada ponto de descarregamento (Figura 2), onde o tamanho da trinca também é atualizado.

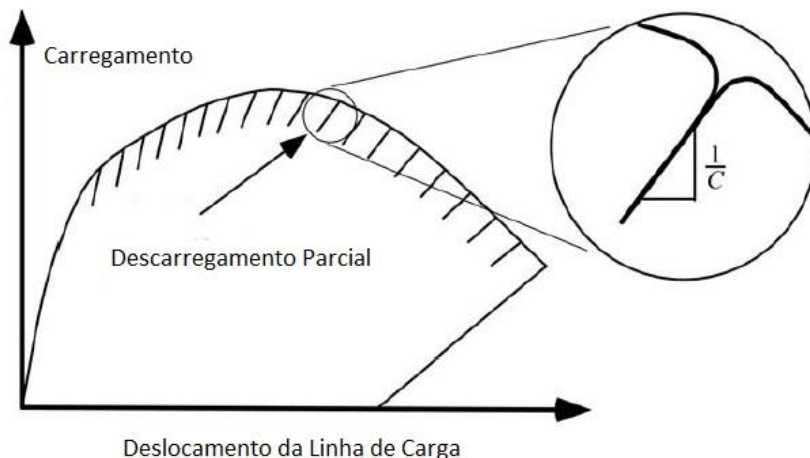


Figura 2: Método “unloading compliance” para monitoramento do crescimento da trinca [1].

Ao gerar a curva J - R utilizando o corpo-de-prova único, ao contrário do ensaio que objetiva somente o valor de J_{IC} , o valor de J deve ser corrigido com o tamanho da trinca. No entanto, mesmo que este procedimento não seja necessariamente usado para medição de J_{IC} , o mesmo pode ser utilizado para tal finalidade, pois no limite de uma trinca estacionária, as fórmulas dão resultados idênticos [1,12,13].

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi estudar as propriedades de fratura dúctil de um aço ASTM A36, através da obtenção da curva de resistência à propagação estável de defeitos (curvas J - R) do material. Adicionalmente, pretende-se elaborar um roteiro metodológico para determinação de curvas J - R . O ensaio de tenacidade à

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

fratura para obtenção da curva J-R será conduzido utilizando a técnica do corpo-de-prova único (*single specimen*) empregando o método da flexibilidade no descarregamento (*unloading compliance*), segundo a norma de ensaios ASTM E1820 (2013). Para este estudo, foram utilizados corpos de prova compactos C(T) de espessura $B=10,0$ mm, largura $W=2B$ e uma relação aproximada entre o tamanho de trinca (a) e a largura, $a/W=0,5$. O ensaio foi conduzido numa máquina universal de ensaios (MTS) servo-controlada e capacidade máxima de 250 kN, disponível no laboratório de materiais da FEI.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Corpos de Prova

Para este estudo, foram utilizados 3 corpos de prova compactos C(T) de aço ASTM A36 com propriedades mecânicas (limites de escoamento e de resistência, módulo de elasticidade e alongamento total em 50 mm) mostradas na Tabela 1. A norma ASTM E1820 [3] recomenda o ensaio de 5 corpos de prova, sendo que 3 deles devem atender todos os requisitos de validade. Este trabalho terá continuidade e a previsão é que sejam ensaiados 10 corpos de prova no total.

Tabela 1: Propriedades aço ASTM A-36

σ_{LE} [MPa]	σ_{LR} [MPa]	E [GPa]	AT ^{50mm} [%]
291	438	211,3	9,58

As dimensões tais como espessura $B=10,0$ mm, largura $W=2B$ e uma relação aproximada entre o tamanho de trinca (a) e a largura, $a/W=0,5$ foram determinadas a partir da chapa disponível (que tinha espessura de 12 mm) e seguiu-se as recomendações da norma ASTM E1820 [3]. A foto do corpo de prova usinado pode ser vista na Figura 3.

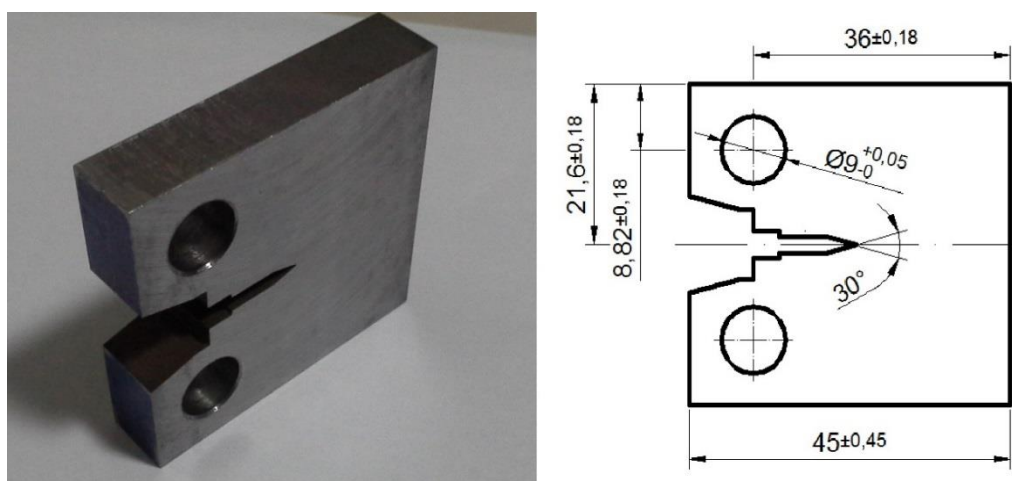


Figura 3: Corpo de prova utilizado para a realização do experimento.

2.2 Procedimento de ensaio

Os ensaios foram conduzidos numa máquina universal de ensaios (MTS) servo-controlada e capacidade máxima de 250 kN, disponível no laboratório de materiais

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

da FEI, mostrada na Figura 4. Os ensaios foram conduzidos seguindo a norma ASTM E1820 e também foi utilizado como base o trabalho de Silva [10].

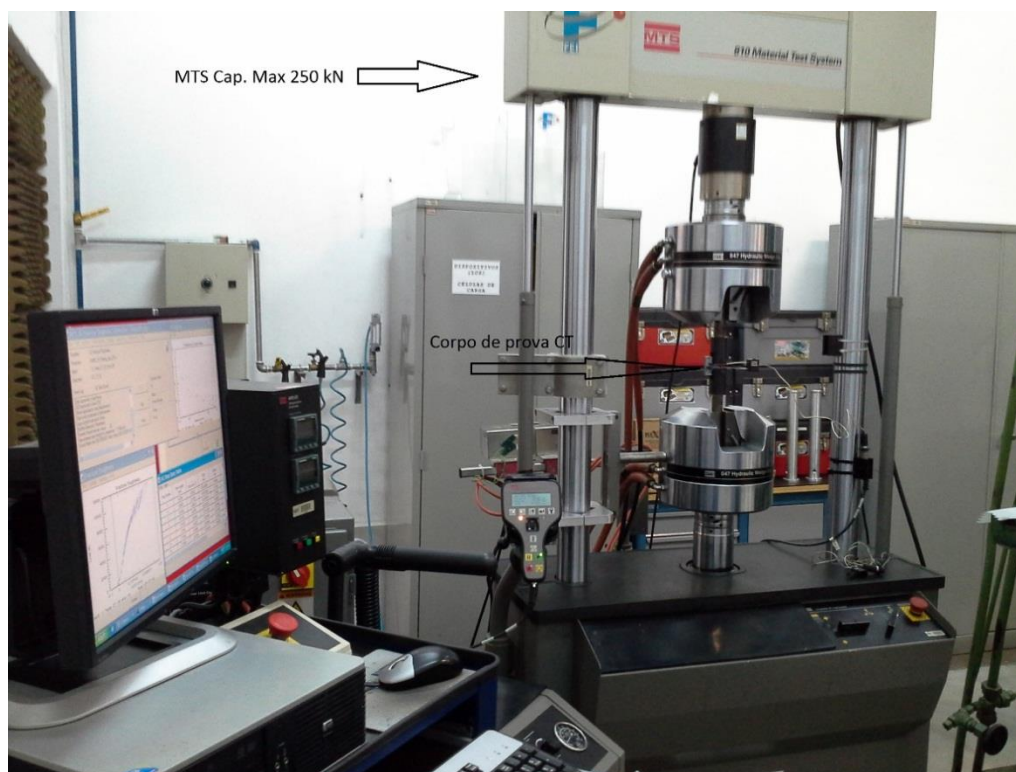


Figura 4: Foto da máquina MTS utilizada no ensaio.

Inicialmente, todos os corpos de prova foram pré-trincados seguindo recomendações da norma [3]. A carga máxima utilizada no pré-trincamento foi calculado utilizando a Equação 1 (sendo que b_0 é o ligamento remanescente e σ_y é a média entre as tensões limites de escoamento e de resistência). A carga mínima foi 10% da carga máxima e a frequência utilizada foi de 10 Hz.

$$P = \frac{0.4Bb_0\sigma_y}{2W + a} \quad \text{Eq. (1)}$$

O crescimento da trinca de fadiga foi feito por meio de clip gage com abertura máxima de 5 mm, conforme pode ser visto na Figura 5.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Figura 5: Foto da corpo de prova durante a pré-trinca.

Após a etapa de pré-trinca, os corpos de prova foram carregados para obtenção das curvas de Carga vs. COD (*Crack Opening displacement*). Neste caso, foi necessário utilizar um clip gage com capacidade de abertura de 12 mm devido à plastificação e consequentemente uma grande abertura dos corpos de prova durante o ensaio. A Figura 6 mostra esta etapa do ensaio.

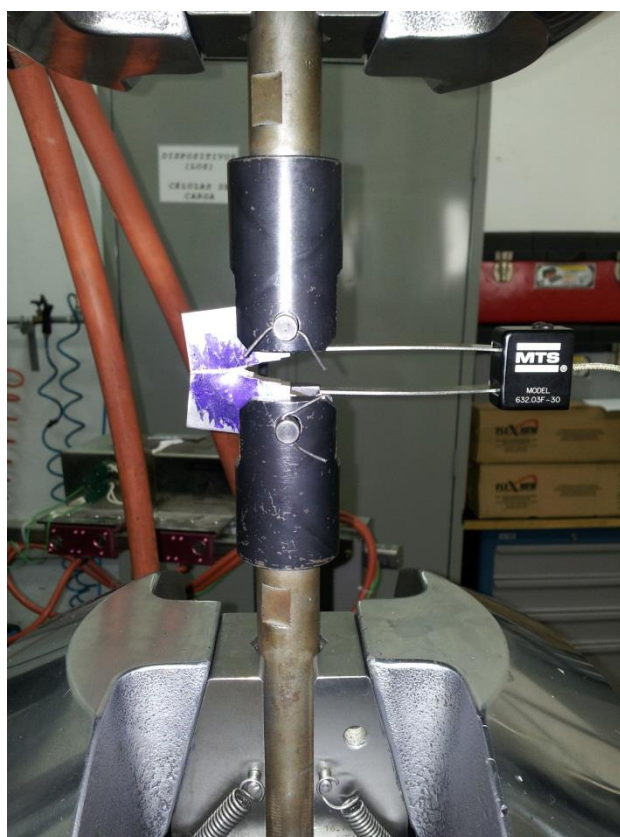


Figura 6: Foto do corpo de prova durante ensaio de mecânica da fratura.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

A partir dos dados apresentados no gráfico Carga vs. COD (ver figura 2) e das equações que serão apresentadas abaixo, será possível determinar o valor integral J e construir uma curva em função do crescimento de trinca a qual é denominada Curva J-R. Para cada valor de Carga P e COD, calcula-se um valor de J, que é composto pelas parcelas Jelástico e Jplástico, conforme Equação 2.

$$J_{(i)} = J_{el} + J_{pl} \quad \text{Eq.(2)}$$

Para o cálculo da parcela Jelástico, é necessário que seja calculado o valor de K (fator de intensificação de tensão) por meio da Equação 3, para um determinado ponto de força e o respectivo tamanho de trinca.

$$K_i = \frac{P_i}{\sqrt{W \cdot B \cdot B_N}} \cdot f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde $f\left(\frac{a_i}{W}\right)$ é um fator de forma e de carregamento para o corpo de prova C(T):

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \left[\frac{\left(2 + \frac{a_i}{W}\right) \cdot \left[0,886 + 4,64 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right) - 13,32 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right)^4\right]}{1 - \left(\frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \right] \quad \text{Eq.(4)}$$

O valor de K é substituído na Equação 5. Sendo que ν é o coeficiente de Poisson e o E é o módulo de elasticidade do material

$$J_{(i)} = \frac{K_i^2(1 - \nu^2)}{E} + J_{pl} \quad \text{Eq.(5)}$$

A parcela Jplástico pode ser calculada pelas Equações 6 e 7. A Equação 6 é aplicada quando $a = a_0$ e a Equação 7 quando $a = a_i$.

$$J_{(pl)} = \frac{\eta_{pl} A_{pl}}{B_n b_0} \quad \text{Eq.(6)}$$

$$J_{(pl)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{pl(i-1)}}{b_{0(i-1)}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_n} \right] \left[1 - \gamma_{(i-1)} \left(\frac{a_i - a_{(i-1)}}{b_{0(i-1)}} \right) \right] \quad \text{Eq.(7)}$$

Onde:

- $\eta_{pl} = 2 + 0,522 b_0/W$
- $\gamma_{(i-1)} = 1 + 0,76 b_0/W$
- A_{pl} Área da região plástica demonstrado na figura 7
- $b_0 = (w - a)$ Ligamento remanescente
- B_n Espessura com entalhe lateral

As equações apresentadas são aplicadas a cada sequência de descarregamento. A Figura 7 ilustra o cálculo da área plástica para um único descarregamento. Este procedimento deve ser replicado para os demais.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

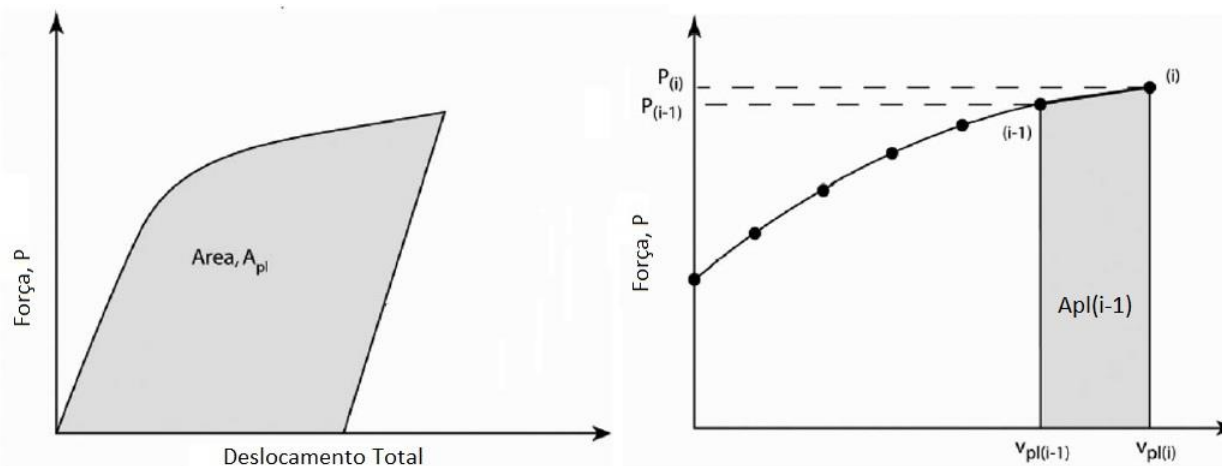


Figura 7: Exemplo para cálculo da área de região plástica [3].

Para garantir uma deformação predominantemente plana na frente da trinca são impostos alguns limites e linhas de exclusão pela norma ASTM E1820 [3]. Estes limites são representados nas Equações 8 e 9.

$$J_{max} = \frac{b_0 \cdot \sigma_y}{10} \quad \text{Eq.(8)}$$

A chamada linha de embotamento (que caracteriza o arredondamento da ponta da trinca) é determinada e traçada a partir da origem da curva experimental da integral J utilizando a Equação 9.

$$J = 2\sigma_y \Delta a \quad \text{Eq.(9)}$$

As linhas de exclusão são traçadas a 0,2mm e 1,5mm da linha de embotamento no eixo da abscissa. Os valores de Δa_{mim} e Δa_{max} são obtidos pela intersecção das linhas de exclusão com a curva experimental de J [1, 3].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do procedimento descrito no item anterior, foi obtida a curva de Carga vs. COD (Figura 8) para que fosse possível determinar a curva J-R a qual está apresentada na Figura 9. O material em estudo apresenta valor médio de $J_{máx}$ de 750 kJ/m² (com desvio padrão de 45 kJ/m²) e propagação superior a 5 mm. Isto mostra que o material em estudo tem comportamento dúctil, pois estes resultados são semelhantes aos apresentados no trabalho de Silva [10] conforme discutido na introdução. Nesta curva também foram inseridos os limites de validade da norma ASTM E1820 [3] e isto restringe a propagação a um número inferior a 4,6 mm, mesmo que o resultado mostre que o material continua ganhando resistência com a propagação de trinca.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

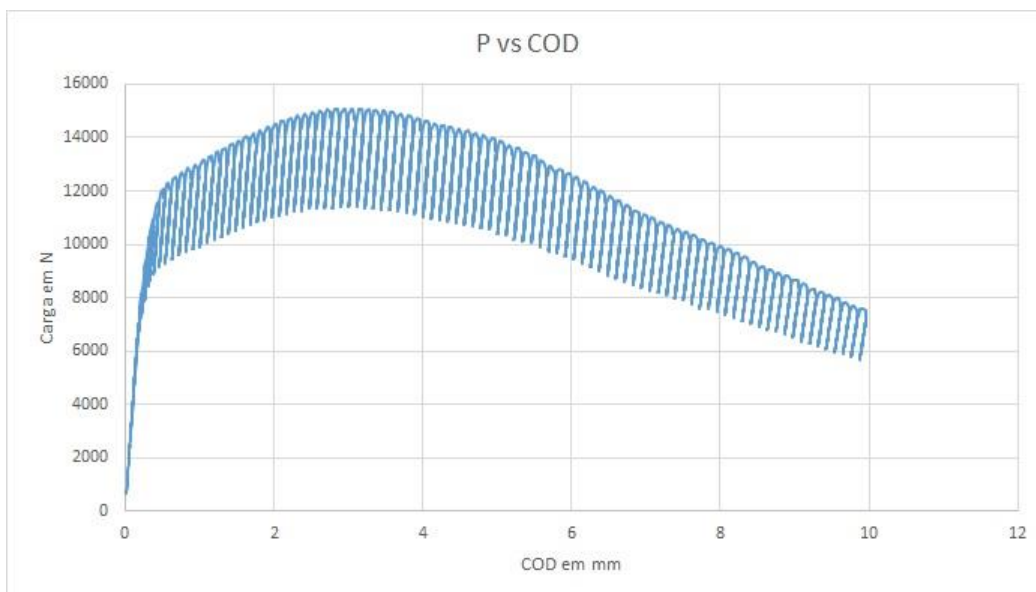


Figura 8: Carga vs. COD obtida no ensaio de mecânica da fratura.

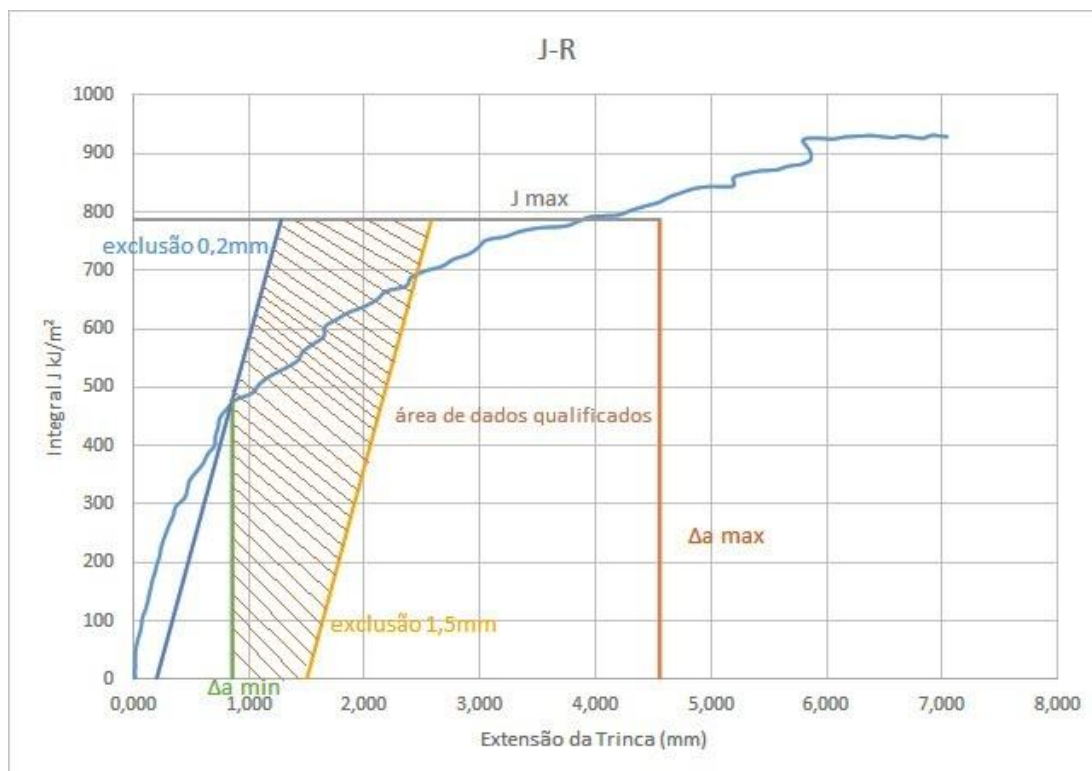


Figura 9: Curva J-R para o aço ASTM A36.

Outro requisito da norma para a validação dos ensaios de curva J-R é que a frente de trinca propague o mais uniforme possível. E isto significa que a trinca deve possuir uma frente reta e deve propagar no mesmo plano. Um artifício para se garantir tal uniformidade é usinar entalhes laterais (*side groove*) nos corpos de prova. Isto foi feito nos corpos de prova deste trabalho, entretanto, houve um problema na usinagem destes entalhes: a profundidade dos entalhes, ao se comparar o lado esquerdo com o direito, ficou diferente. Devido a isso, a concentração de tensão e, portanto, o estado de tensão no fundo dos entalhes ficou

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

desigual, gerando uma propagação não uniforme. Este fato pode ser constatado na Figura 10(b) ao se comparar a linha tracejada com a frente de trinca desigual. Este fato invalida o ensaio segundo a norma ASTM E1820 [3].

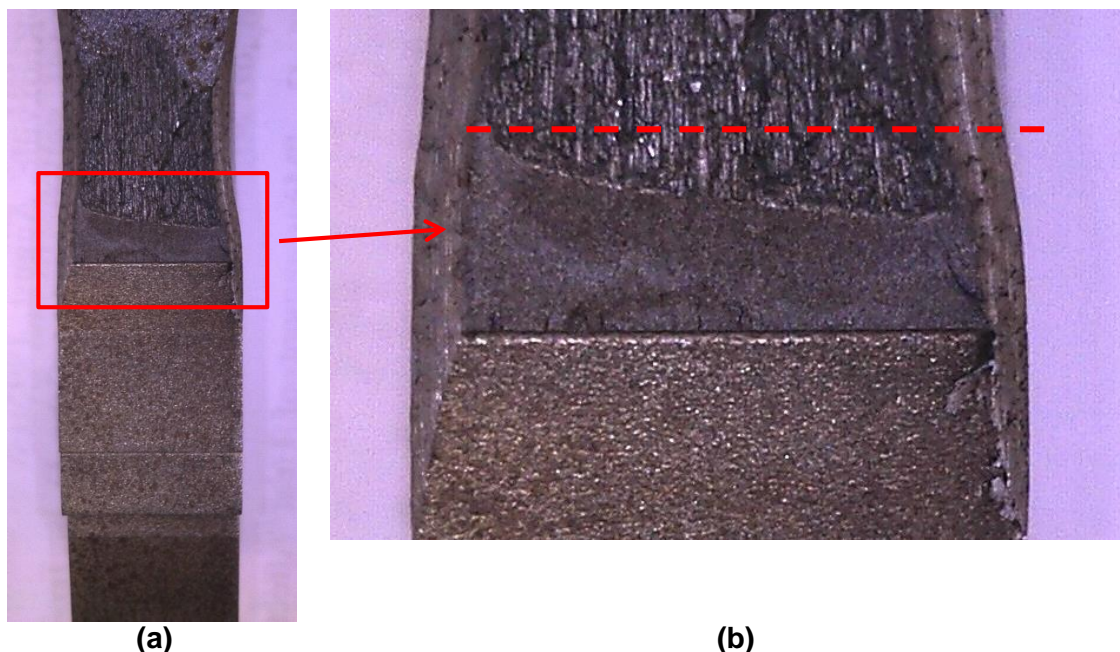


Figura 10: Superfície de fratura do corpo de prova C(T) após rasgamento dúctil.

4 CONCLUSÃO

O cálculo da integral J é de certa forma uma ferramenta recente, portanto, deve-se ainda evoluir muito nos próximos anos, uma vez que a tendência é sempre otimizar projetos mantendo a segurança. Neste trabalho, notou-se que a região destacada como pontos válidos pela norma, é uma região pequena, se comparada com a quantidade de dados obtidos. Sendo assim, conclui-se que ainda é possível expandir o estudo sobre resistência à propagação de trincas uma vez que o material suporta mais carregamento do que o estabelecido pela norma de ensaio.

Foi possível montar uma sequência de cálculo para obtenção da curva J-R e espera-se que isto contribua com futuros autores que pretendam determinar tais curvas.

É importante ressaltar que o controle de todos os detalhes deve ser minucioso para que não se produza resultados indesejados. Por exemplo, um problema de usinagem gerou uma frente de trinca muito irregular, invalidando o ensaio segundo a norma ASTM E1820.

Agradecimentos

Ao Centro Universitário da FEI pela disponibilização dos laboratórios, materiais e pela bolsa PBIC (Centro Universitário da FEI - PBIC057/13). Ao orientador Professor Maurício de Carvalho Silva e ao Professor Gustavo Henrique B. Donato pela ajuda nos ensaios e desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos técnicos do laboratório pelo incentivo e suporte.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

REFERÊNCIAS

- 1 Anderson TL. Fracture mechanics: Fundamentals and applications. 3.ed. New York: CRC Press, 2005
- 2 Ruggieri C. Modelagem micromecânica da fratura dúctil e aplicações à integridade estrutural. 2001. Tese apresentada para obtenção do título de Professor Livre Docente. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP. São Paulo.
- 3 American Society for Testing Materials. Standard test method for measurements of fracture toughness. ASTM E1820. New York, 2013.
- 4 Jones BL. Advances in alloy development and process technology in the production of high strength linepipe Steel. In: Proceedings of an International Conference at University of Wollongong, Wollongong–Austrália, Aug. 1984. p.210-214.
- 5 American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. ASTM E23. New York, 2012.
- 6 Dowling NE. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 912 p, 2007.
- 7 Hippert JrE. Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J- a para previsão de colapso em dutos. 2004. Tese apresentada para obtenção do título de doutor em engenharia. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP. São Paulo.
- 8 Hippert JrE, Ruggieri C. Experimental and Numerical Investigation of Ductile Crack Extension in a High Strength Pipeline Steel. In: ASME Pressure Vessel and Piping Conference, 2001.
- 9 Kanninem MF, Popelar CH. Advanced fracture mechanics. New York: Oxford University Press, 1985
- 10 Silva MC. Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curvas J-R para avaliação da tenacidade à fratura. 2004. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP. São Paulo.
- 11 Hutchinson JW. Fundamentals of the phenomenological theory of nonlinear fracture mechanics. Journal of Applied Mechanics, v.50, p.1042-1051, 1983.
- 12 Joyce JA. Manual on elastic-plastic fracture: Laboratory test procedures. Pensilvânia: ASTM manual series-MNL 27, 1996.
- 13 Zhu XK, Joyce JA. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization, Engineering Fracture Mechanics 85, 1–46, 2012.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.