



**Simpósio de Métodos
Numéricos em Engenharia**

25 a 27 de outubro, 2017

Tenacidade à Fratura e Integral J

Comparação entre K_{Ic} e J_{Ic} teóricos e valores gerados pelo ANSYS

Julia Nordio Appi

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Métodos
Numéricos em Engenharia – PPGMNE
Universidade Federal do Paraná – UFPR
Curitiba, Brasil
juliappi23@hotmail.com

Jean Lucas Esquivel

Graduando em Engenharia Civil, Departamento de
Infraestrutura e materiais – DIM
Universidade Tiradentes – Unit
Aracaju, Brasil
jean_esquivel@hotmail.com

A Mecânica da Fratura é a área da física que estuda a propagação das fissuras ao longo de estruturas, e que serve de base para gerar soluções para o dimensionamento estrutural. Neste contexto, a delaminação é um modo de falha particularmente grave para compósitos laminados de alto desempenho, reduzindo drasticamente a resistência à compressão e gerando fenômenos de flambagem localizados. O presente trabalho tem por objetivo comparar a teoria da Mecânica da Fratura com dados obtidos através da ferramenta computacional ANSYS, versão 17.2. Na ferramenta computacional, foi possível gerar um modelo a ser estudado e verificar a validade das equações disponíveis na literatura para a Tenacidade à Fratura e Integral J, testados para um modelo pré-definido. Para fazer a análise da propagação da fissura por delaminação, utilizou-se o teste DCB (Double Cantilever Beam), que consiste no teste de delaminação partindo do modelo de corpo de prova prismático e trações opostas. Após simulação no ANSYS, os gráficos gerados foram comparados a resultados obtidos através da aplicação das fórmulas clássicas, a fim de checar a metodologia de previsão de fraturas e possíveis diferenças entre valores para o modelo DCB.

Palavras-chave: DCB; ANSYS; Tenacidade à Fratura; Integral J.

I. INTRODUÇÃO

Durante a vida útil de uma estrutura, falhas em componentes ou equipamentos podem implicar no colapso da mesma. Tais danos à estrutura originam-se na deficiência de manutenção dos componentes ou no tempo de operação,

estes decorrentes de cálculos errôneos no que tange à fabricação das peças, à fadiga do material ou ainda sobrecargas não previstas. Correspondente à possível existência dos eventos danosos, o melhoramento de uma unidade estrutural se dá na análise de falha, que se utiliza tanto de embasamento teórico extenso quanto de técnicas de inspeção *in loco* e laboratoriais. Dentre tais embasamentos, a Mecânica da Fratura é utilizada de forma a prever possíveis falhas e obter dimensionamentos mais eficazes na prevenção destas. Os mecanismos de fratura na engenharia conduziram o desenvolvimento de técnicas de dimensionamento que compensassem as insuficiências dos projetos convencionais, estes baseados principalmente na resistência à tração do material, limite de escoamento e tensão de flambagem [1]. Porém, tais parâmetros são insuficientes quando há o surgimento de trincas ou defeitos, forçando a consequente evolução das técnicas de manutenção, através da adoção de novos métodos para garantir o funcionamento dos equipamentos. As técnicas atuais de inspeção física não são totalmente eficazes, devido à possibilidade de a falha não ser identificada em seu início, ou iniciar-se em seções críticas não expostas [2].

Neste contexto, a delaminação é um modo de falha particularmente grave para compósitos laminados de alto desempenho, reduzindo drasticamente a resistência à compressão e gerando fenômenos de flambagem localizados. A delaminação pode ocorrer em lâminas sujeitas a trações adversas, devido à eminente falha gerada

por eventuais sobrecargas contrárias, porém contidas no mesmo plano. Esta situação é caracterizada na Mecânica da Fratura como Modo I de fratura e pelo teste *DCB* (*Double Cantilever Beam*). O *DCB* consiste no teste de delaminação partindo do modelo de corpo de prova prismático e trações opostas, ilustradas na Fig. 1. A aplicação dos princípios do teste *DCB* é amplo na Engenharia Civil, sendo frequentemente utilizado para caracterizar a resistência à delaminação de laminados, a fim de prever seu comportamento diante do colapso dúctil de uma estrutura, até o rompimento do tecido ósseo decorrente de pequenas rachaduras [3]-[4].

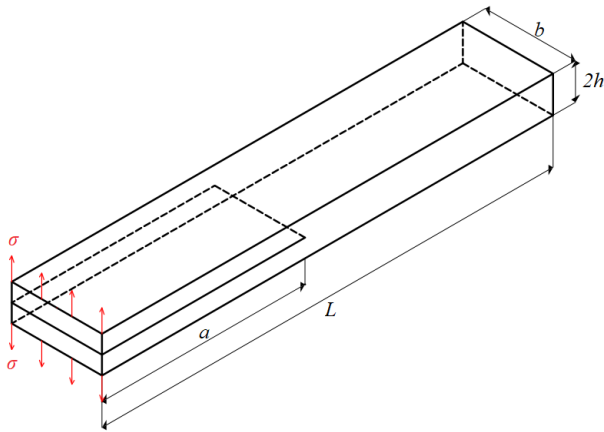


Figura 1. Corpo de prova do *DCB*.

O presente trabalho trata do cálculo dos valores do fator de intensidade de tensão relativos à sollicitação na ponta da trinca no caso específico descrito, referente ao Modo I de fratura de corpo laminado. Dito isto, a análise de propagação de trincas em componentes sujeitos à fadiga são embasadas na Mecânica da Fratura e comparadas com o ensaio digital por meio do programa computacional ANSYS para análise global da estrutura, a fim de dar um caráter mais prático e comprobatório ao embasamento teórico. ANSYS é uma ferramenta utilizada para analisar, explicar e prever o comportamento de trincas, utilizando as propriedades do material, geometria do componente, dados da trinca, e os valores máximo e mínimo do fator de intensidade de tensão correspondentes às situações extremas de carregamento.

II. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é conferir validade da Mecânica da Fratura na qualidade de disciplina teórica. Para tanto, comparar-se-ão os resultados obtidos através das equações fornecidas pela bibliografia disponível, referentes à fratura de corpos e dados obtidos por modelagem em ferramenta computacional.

A escolha da ferramenta, do modelo de teste e a fundamentação teórica do que se pretende comparar são objetivos específicos para o cumprimento do principal.

A ferramenta escolhida para a modelagem foi o ANSYS®, versão 17.2. O ensaio a ser analisado será o teste

DCB, fundamentado anteriormente no presente trabalho, tratando então quase que exclusivamente dos valores referentes à delaminação da viga a ser estudada.

Ainda, a verificação da validade das equações da Mecânica da Fratura para o modelo dar-se-á pela fundamentação teórica e comparação dos dados obtidos através de dois parâmetros: a Tenacidade à Fratura e a Integral *J*.

III. TENACIDADE À FRATURA K_{Ic}

A Tenacidade de Fraturamento foi conceituada a partir dos ensaios de faturamento para aços estruturais, a fim de prever limites de falha para vigas e chapas de aço, em 1961 [5]. Durante tais ensaios, observou-se que as faces das trincas tendem a divergir uma da outra [6]. A premissa básica da Mecânica da Fratura Linear Elástica é que a propagação instável de uma descontinuidade existente ocorrerá somente quando o valor de K_I atingir um valor crítico denominado K_{Ic} . Fortes [7] pontua que o K_{Ic} , geralmente chamado de Tenacidade à Fratura do material, é uma propriedade de cada material e que depende principalmente da temperatura a que este é exposta e da taxa de carregamento.

Para a fundamentação e cálculo do K_{Ic} , são necessárias as determinações das propriedades de tenacidade do material, utilizando-se de corpos de prova e condições adequados [8]. Além disto, é necessário determinar o tamanho de trinca real no componente e cálculo do valor limite de tensão que manterá o valor de K_I do componente menor que K_{Ic} . Pode ser aplicado um fator de segurança à tensão e pode também ser incorporada uma margem de segurança ao tamanho do defeito, escolhendo-se um tamanho de defeito de referência consideravelmente maior que o tamanho do defeito real. Existe uma relação entre a tenacidade à fratura, a tensão nominal de fratura e o tamanho do defeito.

$$K_I = \sigma(\pi a)^{1/2} \quad (1)$$

Para o presente trabalho, utiliza-se para via de cálculo uma das fórmulas do desenvolvimento da Lei de Paris, a fim de quantificar a vida residual (em termos de ciclos de carregamento) de um espécime, dado um tamanho de trinca. De forma simplificada, o Fator de Intensidade de Tensão K é calculado através de (1), onde σ é tensão uniforme perpendicular ao plano da trinca, e a é o comprimento inicial da trinca.

Como os materiais são sensíveis à triaxialidade, existe um efeito de tamanho em estruturas reais quando o estado de tensões muda de estado plano de tensões para estado plano de deformações em estruturas pesadas. Os valores limites para σ e K_I originam-se a partir dos fenômenos de escoamento ou fratura. E, para a consideração destes fenômenos, as características físicas dos materiais estruturais são necessárias, culminando na tensão limite de escoamento, σ_{LE} , e fatores de intensidade de tensões limite K_{Ic} .

IV. A INTEGRAL J

Para uma trinca em um corpo elástico sujeito a uma carga, a energia elástica armazenada no corpo é função de duas variáveis independentes: o deslocamento da carga e a área da rachadura, $U = U(A, A)$. Esta função pode ser determinada por dois métodos alternativos.

O primeiro seria o método experimental, que consiste em medir a curva de carga-deslocamento para um corpo contendo uma rachadura previamente dimensionada. Durante a medição, a trinca não se estende, e, portanto, deve-se integrar a curva de carga-deslocamento para obter a energia elástica para o corpo com o comprimento específico da rachadura. Tal processo deve ser repetido para o corpo com uma trinca dimensionada de um comprimento diferente. Este método não engloba nenhuma teoria de elasticidade de campo.

Já o Método computacional consiste na simulação digital de cargas e constantes físicas referentes aos materiais que constituem o corpo contendo uma trinca dimensionada de um determinado comprimento. É necessário que se repita o procedimento para o corpo com uma trinca pré-dimensionada de um comprimento diferente. Este método exige que o corpo seja modelado por uma teoria de elasticidade de campo.

Essa definição da taxa de liberação de energia pressupõe que o corpo é elástico, mas não invoca nenhuma teoria do campo. De fato, a taxa de liberação de energia pode ser determinada experimentalmente medindo as curvas de carga-deslocamento de corpos de carga idêntica com trincas de diferentes áreas. Neste caso, não há a real necessidade de medição de campo. Porém, muitos materiais podem ser modelados com uma teoria de elasticidade de campo, tornando possível a representação da taxa de liberação de energia em termos do campo no corpo [5]. Fundamenta-se como a Integral J uma integral de contorno independente do percurso, referente à taxa de mudança de energia potencial para um sólido elástico não linear durante a extensão, tratada neste caso como unitária, da trinca. Evidencia-se que a utilização da Integral J é muitas vezes melhor apreciada no contexto de aplicações individuais. A Integral J pode ser desenvolvida para teorias elásticas tanto lineares quanto não lineares [5]-[9].

A teoria de elasticidade de campo fundamenta que o corpo em análise deve ser observado como uma soma de muitas partes pequenas, no espaço tridimensional, como ilustrado na Fig. 2.

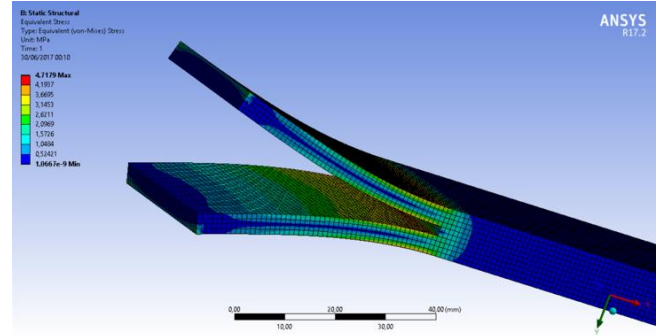


Figura 2. DCB tensionado no ANSYS.

Cada pequena parte desta soma sofre uma deformação pontual, sendo que a deformação do corpo é, em geral, não homogênea, isto é, a deformação varia de uma parte do corpo para outra. Isto embasa a escolha do aço como material a ser analisado, durante a concepção do presente trabalho, tendo em vista que o concreto não atenderia tais requisitos básicos por se tratar de um agregado heterogêneo. Já o aço, como é característico dos metais e ligas, é um material considerado homogêneo.

$$K_{Jc} = (J_{Ic} E / (1 - \nu^2))^{1/2} \quad (2)$$

$$J_{Ic} = K_{Jc}^2 (1 - \nu^2) / E \quad (3)$$

Posto isto, para a quantificação do valor referente à J_{Ic} , isto é, partir-se-á de (2) [9], para desenvolver (3). Em ambas as situações, K_{Jc} corresponde ao Fator Intensidade de Tensão, ou Tenacidade à Fratura, ν é o coeficiente de Poisson, e E é o Módulo de Elasticidade do material em questão.

O conceito da Integral J se aplica igualmente bem às estruturas que falham em condições elásticas e em condições totalmente plásticas. Logo, K_{Jc} , relaciona-se a J_{Ic} da forma exposta em (2). Porém, para fins de cálculo e de comparação com dados obtidos pelo ANSYS, a função foi desenvolvida até que K_{Jc} se torna-se variável da equação para obter J_{Ic} .

V. CORPO DE PROVA E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a análise do presente trabalho, o modelo foi calculado utilizando as equações dispostas na literatura e desenvolvidas ao longo do texto, e comparado com o modelo construído na ferramenta computacional ANSYS. Partindo do pressuposto da utilização de elementos infinitesimais de integração reduzida em 3D, a modelagem respeita certas condições de contorno, ilustradas na Fig. 3 [10]. Sejam u , v e w os deslocamentos direcionais nos eixos x , y e z , respectivamente. Considerando o deslocamento como a distância da face deslocada à borda inferior, deslocamentos nas direções x e z foram desconsiderados, isto é, $u = w = 0$ na borda inferior. Logo, considera-se o deslocamento w na direção z aplicado à borda superior, para qual $u = 0$. A fim de evitar o movimento do corpo na

direção x , $v = 0$ foi adotado sobre um nó da borda inferior (apoio engastado).

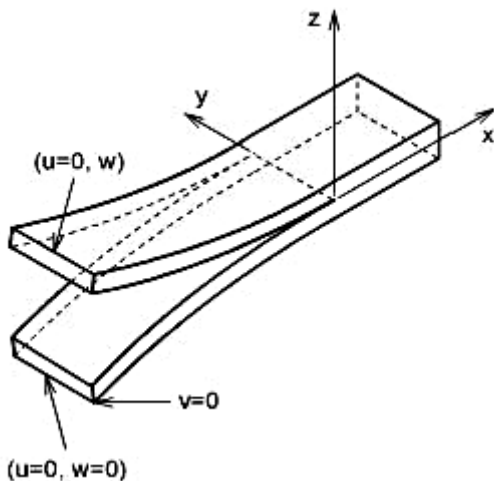


Figura 3. Condições de contorno.

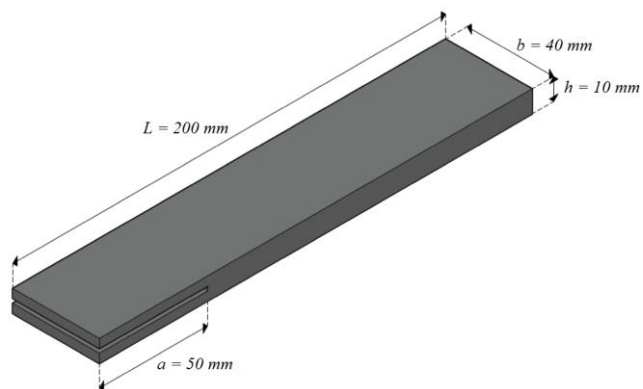


Figura 4. Dimensões e Layout do modelo DCB utilizado.

Após a criação e dimensionamento apropriado do modelo, exposto na Fig.4, definiu-se a malha do mesmo e programaram-se as condições de contorno já descritas. Por último, aplicou-se o carregamento, que no presente estudo trata-se da tração em cada lado da abertura da trinca, bem recorrente em testes DCB. Com estes dados, a ferramenta ANSYS gera os valores solução.

VI. RESULTADOS

Para os cálculos, adotaram-se o valor de 200 GPa para o módulo de Elasticidade (E_Y) e 0,3 para o coeficiente de Poisson (ν). A tensão máxima (σ) adotada foi de 4,7179 MPa. Substituindo estes valores em (1) e (3) encontram-se os valores máximos de K_{Ic} e de J_{Ic} apresentados na Tabela I. Por conseguinte, tais valores teóricos foram comparados com os valores máximos observados nos gráficos de K_{Ic} e de J_{Ic} gerados pelo ANSYS® 17.2. Os gráficos obtidos estão ilustrados nas Fig. 5 e Fig. 6, e seus valores relevantes também estão expostos na Tabela I, juntamente com o erro percentual calculado com base nos valores teóricos.

TABELA I. COMPARAÇÃO DE K_{Ic} E J_{Ic}

	Calculado	ANSYS® 17.2	Erro (%)
K_{Ic} (MPa.mm ^{1/2})	5,9130	5,9211	0,14
J_{Ic} (mJ.mm ²)	0,00015908	0,00016378	2,95

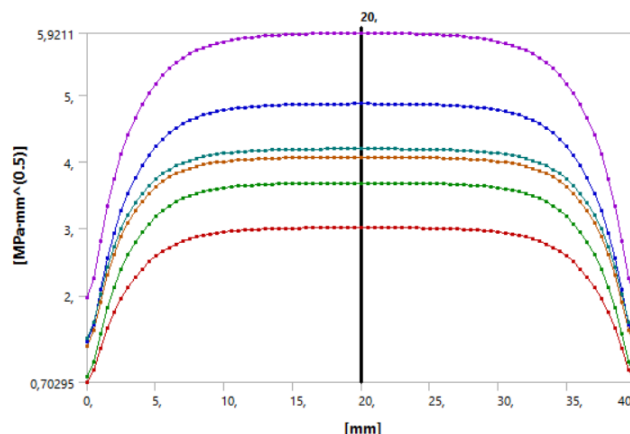


Figura 5. Tenacidade à Fratura K_{Ic} (MPa.mm^{1/2}) x Fissura da placa (mm).

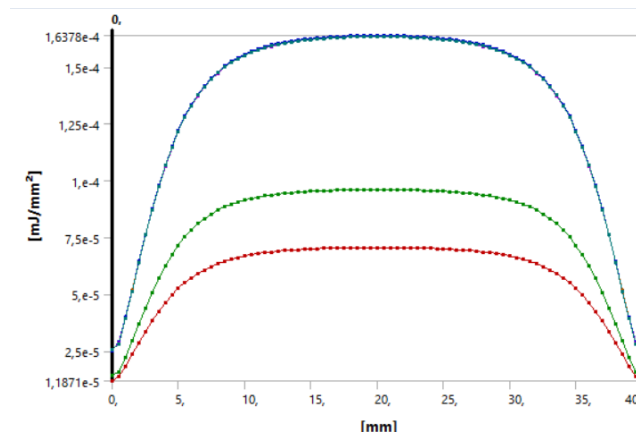


Figura 6. Integral J (mJ.mm²) x Fissura da placa (mm).

Os gráficos gerados pelo ANSYS® 17.2 são similares aos valores obtidos através das equações gerais fornecidas pela bibliografia consultada para os valores de K_{Ic} e J_{Ic} referente à Mecânica da Fratura.

VII. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados na Tabela I confirmam que os valores calculados pelo programa são próximos aos valores calculados por meio de (1) e (3), pois apresentam erros inferiores a 5%. O programa ANSYS gerou os gráficos do K_{Ic} e J_{Ic} que se assemelham com a teoria e os valores máximos da Tenacidade à Fratura e da Integral J gerados pelo programa mostraram a validade das equações da Mecânica da Fratura para esse modelo, havendo um erro inferior a 5%.

Cabe a ressalva de que o erro proveniente da comparação entre os valores da Integral J é consideravelmente maior que a da comparação da

Tenacidade à Fratura. Isto pode ser explicado pelo fato da equação, de cunho geral e que não considera as dimensões específicas do ensaio, devido à equação utilizada não contemplar a elasticidade de campo, em se tratando de teorias elásticas não lineares, já descritas ao longo do presente texto e bibliografia consultada [8]-[10]. Como já exposto, cada pequena parte da modelagem sofre uma deformação homogênea, sendo que a deformação do corpo é, em geral, não homogênea, o que é mais bem contemplado na modelagem computacional do que em equações generalistas.

Tais valores de erros comparados, apesar de pequenos, evidenciam que a simplificação provida pela bibliografia teórica e a ferramenta computacional ANSYS são satisfatórios quanto exatidão. Todavia, ambos devem ser utilizados de forma complementar.

REFERÊNCIAS

- [1] M. L. M. Borges. Análise de Propagação de Trincas Por Meio da Mecânica da Fratura. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8FAKXJ/241.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- [2] J. N. Appi. Estudo de Metodologias Experimentais com Nanotubo de Carbono para Potencial Desenvolvimento de Sensores para Monitoramento Estrutural. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPPF, 2016.
- [3] J. L. Esquivel and R. A. D. Moitinho. ANSI/AISC 360 e NBR 8800: Influência Americana Sobre A Normatização Brasileira e Projeto Ravi. Aracaju: Universidade Tiradentes – UNIT, 2016.
- [4] J. J. L. Morais, M. F. S. F. Moura, F. A. M. Pereira, J. Xavier, N. Dourado et. al. The double cantilever beam test applied to mode I fracture characterization of cortical bone tissue. Elsevier. Vila Real – Portugal: 2010. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b7a9/637758f8b818f73450a5ac6d85790363c087.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2017.
- [5] M. R. P. P. Nunes. Um novo Algoritmo para Modelagem de Mecânica da Fratura Usando O Método dos Elementos de Contorno. São Paulo: Universidade de São Paulo – USP, 2010. Disponível em: <file:///C:/Users/jean_/Desktop/Dis_2010_NUNES_M.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2017.
- [6] D. Broek. Elementary Engineering Fracture Mechanics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1986.
- [7] C. Fortes. Mecânica da Fratura. Brasil: ESAB BR. Disponível em: <http://www3.esab.com.br/literatura/apostilas/Apostila_Mecanica_da_Fratura_rev0.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2017.
- [8] Z. Xiang-Kui, J. Joyce and A. James. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) Testing and Standardization. Lincoln: University of Nebraska, 2012. Disponível em: <<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1048&context=usnavyresearch>>. Acesso em: 28 jun. 2017.
- [9] Zhigang S. The J Integral. iMechanica, web of mechanics and mechanicians. Disponível em: <<http://imechanica.org/files/J%20integral%202014%2004%2006.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2017.
- [10] A. B. Morais. Double cantilever beam testing of multidirectional laminates. Elsevier. Aveiro – Portugal: Universidade de Aveiro, 2003.