

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE A FRATURA DINÂMICA EM COMPRESSÃO DE COMPÓSITOS DE CARBONO POR CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS*

Rafael de Azevedo Cidade¹
Daniel Scanduzzi Valença de Castro²
Enrique Mariano Castrodeza³

Resumo

O trabalho propõe o uso de dados fornecidos por correlação digital de imagens para o cálculo da tenacidade à fratura de um compósito laminado submetido a compressão dinâmica. Foram realizados ensaios em uma barra de pressão Hopkinson utilizando corpos de prova de geometria DENC (duplo entalhe lateral) pintados com um padrão de manchas. As amostras foram filmadas durante o teste por uma câmera de alta resolução temporal. Com base nas imagens capturadas e na distribuição de manchas, foi proposto um modelo para determinação dos parâmetros de análise mais apropriados. A partir dos campos de deslocamento e deformação fornecidos pela correlação digital de imagem, a tenacidade foi estimada mediante o método da Integral-J, considerando os efeitos inerciais. Demonstrou-se que o método de integral-J integrando na área interna ao contorno possui boa aplicabilidade e é menos sensível aos parâmetros do método, apresentando uma discrepância máxima de 14 % entre os resultados para a mesma amostra. Já para resultados de amostras distintas da mesma classe não se observou consistência satisfatória, mas constatou-se, em certo nível, concordância com os valores encontrados por Kuhn *et al* [1] para o mesmo material utilizando outra metodologia. Paralelamente, conclui-se que o efeito inercial é irrisório, indicando um estado de equilíbrio dinâmico no qual abordagens quase-estáticas podem ser aplicadas.

Palavras-chave: Tenacidade a fratura dinâmica; Correlação digital de imagens; Integral-J; Materiais compósitos.

EVALUATION OF DYNAMIC COMPRESSION FRACTURE TOUGHNESS OF CARBON COMPOSITES BY DIGITAL IMAGE CORRELATION

Abstract

The work proposes the use of data provided by digital image correlation for the calculation of the fracture toughness of a laminated composite subjected to dynamic compression. Tests were performed on a Hopkinson pressure bar using DENC (double edge notched) geometry specimens painted with a speckles pattern. The specimens were recorded during the test by a high-resolution temporal camera. Based on captured images and speckles' distribution, a model was proposed to determine the most appropriate analysis parameters. From the displacement and deformation fields provided by the digital image correlation, the toughness was estimated using the Integral-J method, considering the inertial effects. It was demonstrated that the integral-J method integrating in area inside the contour has good applicability and is less sensitive to method parameters, presenting a maximum discrepancy of 14% between the results for the same sample. However, for the results of different samples of the same class, no satisfactory consistency was observed, but it was found, at a certain level, agreement with the values found by Kuhn *et al* [1] for the same material using another methodology. In parallel, it was concluded the inertial effect is negligible, indicating a state of dynamic equilibrium in which quasi-static approaches can be applied.

Keywords: Dynamic fracture toughness; Digital image correlation; J-Integral; composite materials.

¹ Engenheiro de Materiais, D.Sc., Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro de Materiais, Mestrando, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, D.Sc., Departamento de Engenharia Mecânica, Politecnico di Milano, MI, Itália

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os materiais metálicos tradicionais vêm sendo gradualmente substituídos por materiais compósitos nas mais diversas aplicações. Nesse contexto, para garantir estabilidade estrutural sob condições de carregamentos dinâmicos, surgiu uma demanda por maior entendimento das propriedades mecânicas destes materiais nesse regime, incluindo a tenacidade à fratura em compressão. Diferentemente da maioria dos materiais metálicos, os materiais compósitos reforçados por fibras são anisotrópicos, variando seu comportamento mecânico segundo a direção considerada, em função do seu arranjo estrutural. Adicionalmente, a taxa de carregamento pode ter grande influência nessas propriedades. Alguns pesquisadores [1] [2] buscaram compreender melhor tal sensibilidade, mas nenhum consenso foi ainda alcançado, abrindo espaço para pesquisas e discussões.

A falha por compressão de compósitos reforçados por fibras contendo entalhes foi exaustivamente estudada nas últimas décadas [3] [4], começando pelo entendimento de seu mecanismo de falha através da nucleação e propagação de *kink-bands* [4] [5]. Esses defeitos podem ser representados como trincas, sendo sua propagação associada à tenacidade a fratura, cuja determinação experimental deu origem ao desenvolvimento de inúmeras técnicas e discussões. Uma destas discussões envolve a consideração de modelos mecânicos quase estáticos para análises dinâmicas, seguindo a premissa de que o equilíbrio dinâmico foi atingido, fato demonstrado por Jiang e Vecchio [6] como plausível para o cálculo de tenacidade à fratura dinâmica. Kunh *et al* [1] estudaram a resistência à compressão dinâmica utilizando as relações entre a o tamanho de amostra [7] e a taxa de liberação de energia em fratura [7], sob uma suposição quase-estática, relatando um aumento significativo na tenacidade à fratura para taxas de carregamento de 100s^{-1} em comparação ao ensaio com carregamento quase-estático.

No que se refere ao cálculo das propriedades mecânicas, a medição de deslocamentos e deformações em compósitos submetidos a altas taxas de deformação (por exemplo impactos ou explosões) se torna complicada pelos métodos tradicionais e metodologias alternativas vêm sendo utilizadas, com destaque para a correlação digital de imagens (DIC). O cálculo de J-Integral a partir de medições de campo total fornecidos por DIC foi proposto por alguns autores [8] [9], os quais demonstraram a confiabilidade dessa metodologia para o cálculo da tenacidade à fratura. Em sequência, o mesmo cálculo utilizando a área interna ao contorno de integração foi relatado por como uma alternativa vantajosa quanto à dependência do domínio de integração e à redução de erros [10] [11]. Todavia, este método é bastante sensível a diversos parâmetros, exigindo estudos prévios para que a escolha destes ocorra de forma apropriada.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a tenacidade à fratura translaminar em modo I de compósitos reforçados por fibras de carbono submetidos a altas taxas de compressão, sugerindo uma estratégia computacional para interpretação de dados baseada nas técnicas de correlação digital de imagens (DIC) e Integral-J. Para tal propósito, realiza-se ensaios mecânicos de compressão sob altas taxas de carregamento em amostras de compósitos reforçados por fibra de carbono, com todo o ciclo de carregamento filmado por uma câmera de alta resolução temporal. Baseado nos campos de deslocamentos e deformações calculados pela análise das imagens pelo método DIC, calcula-se a integral-J considerando dois modelos de integração. Isto posto, avalia-se a robustez do método, tanto em relação aos seus

parâmetros quanto aos componentes energéticos envolvidos no processo de fratura dinâmica, discutindo a consideração de um termo inercial no cálculo de J.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Corpos de Prova

Foram utilizados corpos de prova do tipo bi entalhado nas laterais (DENC) de material compósito pré-impregnado de fibra de carbono com resina epóxi, de especificação HEXCEL IM7-8552 [12]. Estes eram compostos por 32 camadas formando um laminado simétrico $[0/90]_{16s}$ com espessura de 4mm. A preparação destes é descrita por Kuhn et al [1]. Foram utilizadas 4 classes de amostras (A, B, C e D) com distintos tamanhos, porém seguindo as mesmas proporções geométricas entre o entalhe e as dimensões, conforme demonstrado na Figura 1. Os valores das dimensões estão expostos na Tabela 1. A superfície das amostras foi coberta por uma camada de manchas aleatórias em preto e branco para posterior análise e pós-processamento por correlação digital de imagem (DIC), como mostrado nas Figuras 2 e 3.

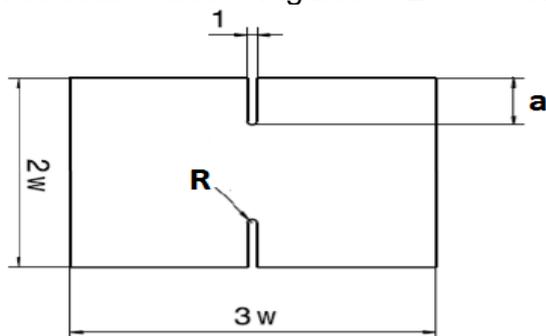


Figura 1. Modelo dos corpos de prova DENC utilizados

Tabela 1. Dimensões dos corpos de prova

Tipo de CP	A	B	C	D
R (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5
W (mm)	5	7,5	10	12,5
a (mm)	2,5	3,75	5	6,25

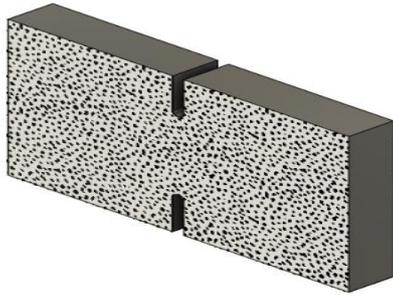


Figura 2. Superfície de uma amostra pintada

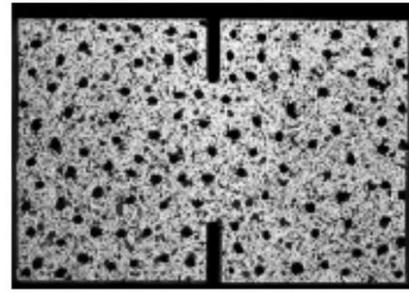


Figura 3. Foto da amostra B com pintura

2.2 Ensaios de Carregamento Dinâmico e Aquisição de Imagem

Para os testes de carregamento dinâmico, foi utilizada uma barra de pressão Hopkinson, composta por um projétil, uma barra incidente e uma barra de transmissão. Na metade da barra incidente, assim como na barra de transmissão próximo ao corpo de prova, são instalados extensômetros para medir a deformação momentânea. O aparato é esquematizado na Figura 4. O projétil é impulsionado e se choca com a barra incidente, gerando uma onda mecânica compressiva, que se propaga pela barra incidente até o corpo de prova. A taxa de deformação é de 100s^{-1} para todas as amostras. Para capturar as imagens, uma câmera de alto desempenho, com aquisição de $300.000\text{quadros}\cdot\text{s}^{-1}$ e resolução de $256 \times 128\text{pxls}^2$ foi utilizada. Para cada tamanho de amostra testado, a câmera teve sua distância ajustada para manter um padrão de captação da peça na imagem. Para a seleção do frame de iniciação de falha, considerou-se o momento de tensão máxima detectada.

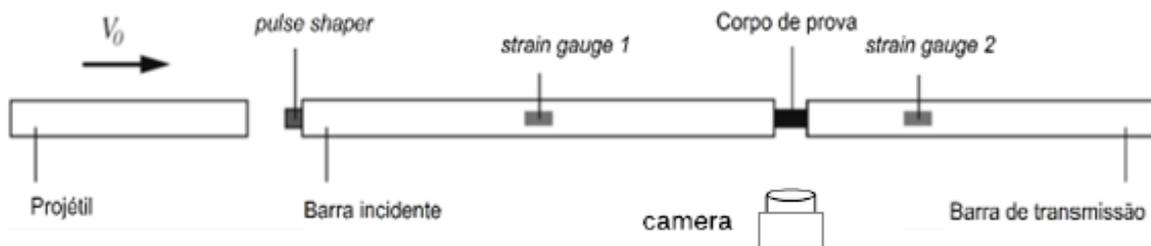


Figura 4. Esquema do funcionamento da barra de Hopkinson de pressão dividida.

2.3 Seleção dos Parâmetros para a Correlação Digital de Imagem

O método DIC se baseia em comparações matemáticas das mudanças locais de intensidade de cinza das imagens em momentos antes e após a deformação. Para tal, seleciona-se uma região de interesse, a qual é dividida em uma rede de pequenos pedaços denominados subconjuntos. Desta forma, utiliza-se algoritmos de correlação para obter os deslocamentos através da identificação de áreas de correspondência de valores de escala de cinza em cada subconjunto (otimização do algoritmo de correlação). Para tal, subconjuntos suficientemente distintos são exigidos. Ademais, sabe-se que um subconjunto maior fornece um resultado menos local, mais diluído, com menor ruído, mascarando concentrações de tensões.

Visando estimar o raio de subconjunto necessário, foi seguida a proposta de Sutton *et al* [13], que recomenda a presença de ao menos 3 manchas por subconjunto. Assim sendo, constrói-se um modelo geométrico, consideradas as

manchas perfeitamente circulares e que seus centros estão localizados nos vértices de um triângulo equilátero, sendo o subconjunto a circunferência circunscrita a este triângulo, conforme representado na Figura 5. O espaço entre os centros dos círculos é o valor de caminho livre entre as manchas e os diâmetros dos círculos equivalem ao diâmetro de Feret das manchas. Para garantir que a maioria absoluta dos subconjuntos satisfaça a condição proposta considera-se o diâmetro de Feret até o qual estão contidos 95% dos valores ($D_{95\%}$) e o valor de caminho livre até o qual estão contidos 95% dos valores ($NND_{95\%}$). Dessa forma calcula-se que o raio do subconjunto é aquele exposto pela equação 1.

$$R_{sub} = \frac{D_{95\%}}{2} + NND_{95\%} * \frac{\sqrt{3}}{3} \quad (1)$$

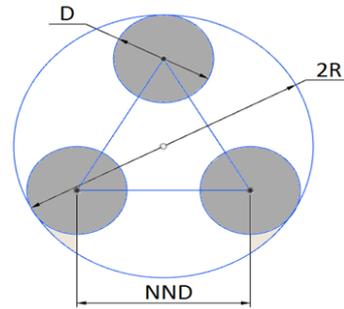


Figura 5. Representação do modelo geométrico proposto para os subconjuntos

A distribuição de diâmetros de Feret e do caminho livre das manchas, foi obtida com uso do software ImageJ após processamento das imagens de referência. Esta etapa seguiu ajuste de histogramas de intensidade para aumento de brilho e contraste, binarização por filtro adaptativo de Bernsen [14] de $15 \times 15 \text{ pxl}^2$, separação os objetos que se tocam para não superestimar o tamanho das partículas, remoção de partículas menores que 4 pxls^2 e suavização de regiões pontudas.

Outro parâmetro importante, o tamanho de passo, é o intervalo entre dois pontos nos quais é realizada a correlação do subconjunto. Assim sendo, quanto menor o tamanho de passo, maior será a precisão de cálculo das deformações. Devido à baixa resolução das imagens, o valor escolhido para este parâmetro foi 0.

2.4 Processamento de Dados

A correlação digital de imagem foi realizada pelo software NCORR [15], que funciona através do MATLAB e mapeia os deslocamentos e deformações. Os valores das deformações são calculados baseados no tensor de deformação de Green-Lagrange, que utiliza as derivadas dos deslocamentos. Para diminuir o ruído, realiza-se um ajuste linear considerando o plano que melhor ajusta os valores dentro de uma superfície limitada por raio definido pelo usuário. Valores maiores de janela tendem a gerar resultados com menor ruído e suavizados, porém podem mascarar resultados em locais com concentração de tensões [16]. Destaca-se também que o valor de deformação de cisalhamento gerada pelo software é a simples. Para a formulação da integral-J será utilizada a deformação de cisalhamento de engenharia, calculada pela equação 2. Os campos de tensão são calculados, a partir dos utilizando a Lei de Hook Matricial (equação 3). A matriz de rigidez C_{ij} é calculado através da aplicação da Teoria Clássica dos Laminados [17], para as propriedades mecânicas e estruturais das amostras empregadas.

$$\gamma_{xy} = 2 \epsilon_{xy} \quad (2) \quad ; \quad \sigma_i = C_{ij} \epsilon_j \quad (3)$$

Para o cálculo da variação dos deslocamentos com o tempo (du/dt e dv/dt) e das acelerações (a_x e a_y , segundas derivadas) foram considerados os dados gerados pelo NCORR e o intervalo temporal entre os frames. Em seguida aplica-se um filtro de Savitzky-Golay utilizando um polinômio de ajuste de ordem 3 e raio de 5 pontos. Os dados suavizados pelo processo de filtragem foram considerados para a expressão da integral.

2.5 A Integral J para Fratura Dinâmica

O cálculo da tenacidade à fratura através da integral J se baseia na avaliação dos campos de tensão e deformação sob um caminho fechado em torno de uma trinca. Esta modelagem clássica nem sempre é completa para casos onde há carregamento em alta velocidade, visto que o equilíbrio dinâmico pode não ter sido alcançado [18]. Para estas ocasiões, foi proposta a adição de um termo inercial em sua expressão [19]. Neste termo, leva-se em conta a aceleração presente e integra-se na área C limitada pelo contorno considerado. A expressão se modifica para a equação 4, cuja dedução é detalhadamente explicada por Kuna [20].

$$J = \int_{\Gamma} (W \delta_{1j} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x}) n_j ds + \int_C \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dC \quad (4)$$

Os algoritmos para o cálculo de J foram desenvolvidos na forma de uma função que depende das propriedades do material, dos dados importados do NCORR e do corpo de prova considerado. Assumindo que apenas as camadas longitudinais ao carregamento (0°) contribuem significativamente para a tenacidade a fratura, constata-se que apenas metade do volume possui contribuição efetiva. Por conseguinte, a tenacidade à fratura das camadas longitudinais ($J_{Ic}^{0^\circ}$) equivale ao dobro da tenacidade a fratura do laminado (J_{Ic}).

2.6 Método da Integral de Contorno

Primeiramente, insere-se na função o valor das tensões presentes e da densidade de energia acumulada W (equação 5). Em seguida, os termos calculados são organizados em um somatório discretizado que engloba todos os pixels do contorno. Cada um destes fornece sua contribuição para a soma total de J, definida pela equação 6 para o contorno, que é subdividido em partes e cujos limites são definidos pelos parâmetros c e h (largura e altura), conforme representado na Figura 6. O centro geométrico do contorno é considerado como a ponta do entalhe. Para o termo inercial, utiliza-se a área interna ao contorno, ocorrendo também de forma discretizada de acordo com a equação 7.

$$W_{xy} = \frac{1}{2} \sigma_{xx} \epsilon_{xx} + \frac{1}{2} \sigma_{yy} \epsilon_{yy} + \sigma_{xy} \epsilon_{xy} \quad (5)$$

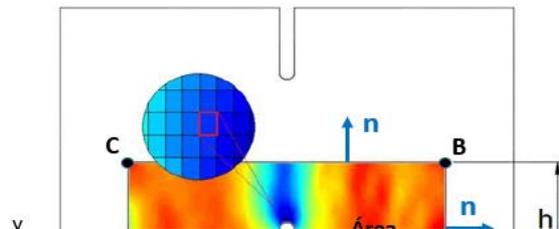


Figura 6. Representação do contorno utilizado e suas faces componentes

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{A-B} + \mathbf{J}_{B-C} + \mathbf{J}_{C-D} + \mathbf{J}_{D-A}$$

$$\mathbf{J}_{\text{Clássico}} = \sum_D^A \left(\sigma_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + \sigma_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} - W \right) dx + \sum_A^B \left(-\sigma_{xx} \frac{\partial u}{\partial y} - \sigma_{xy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) dy + \sum_B^C \left(W - \sigma_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} - \sigma_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx + \sum_C^D \left(\sigma_{xx} \frac{\partial u}{\partial y} + \sigma_{xy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) dy \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_{\text{Inercial}} = \sum_{x_i}^{x_f} \sum_{y_i}^{y_f} \rho \left(a_x \frac{\partial u}{\partial y} + a_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) dA \quad ; \quad dA = dx \cdot dy \quad (7)$$

2.7 Método da integral de Área

Paralelamente, utilizou-se a metodologia da integral de área, considerando todos os pontos contidos em uma região interna ao contorno Γ . Para tal, deve-se empregar uma função de ponderação q que deve ser suave, variando de 0 na região limite exterior do contorno até 1 para o limite interior do mesmo. Foi escolhida uma equação bi quadrática (equação 8), definindo os limites de integração, através de c e h , e os pesos de cada ponto no cálculo de J total. O parâmetro γ controla o contorno interno, centrado na ponta do entalhe e que define uma região onde a derivada de q é nula, não havendo contribuição para o cálculo de J . Analogamente, a Integral- J é calculada discretamente, somando a contribuição de cada pixel contido na área ponderado pela função q , conforme explicitado pela equação 9.

$$q(x, y) = \gamma \left(\frac{c^2 - x^2}{c^2} \right) \left(\frac{h^2 - y^2}{h^2} \right) \quad (8)$$

$$\mathbf{J}_{\text{Área}} = \sum_{dA} \left[W \delta_{2i} - \sigma_{i2} \frac{du_i}{dx_2} \right] \frac{dq}{dx_j} + \rho \frac{du_i}{dx_j} \frac{d^2 u_i}{dt^2} q] dA \quad ; \quad dA = dx \cdot dy \quad (9)$$

2.8 Suavização dos Resultados

A tenacidade a fratura J_{Ic} geralmente é calculada no ponto a partir do qual ocorre propagação instável de trinca, que no presente trabalho é considerado como o frame correspondente ao momento em que a carga máxima é alcançada. Entretanto, o valor de tenacidade foi calculado para todos os frames até a carga máxima, com os valores posteriormente ajustados a um polinômio de grau 3. O valor do polinômio para o tempo de iniciação da falha é considerado como a tenacidade a fratura J_{Ic} . O processo é feito para ambos os entalhes, registrando como oficial o maior valor observado dentre os dois.

2.9 Parâmetros Utilizados

Quatro parâmetros independentes são utilizados na análise. A janela de deformação é analisada juntamente com as dimensões do domínio (largura e altura), e o tamanho do contorno interno. Quatro cenários foram testados para avaliar a influência dos parâmetros no valor J_{Ic} . Para cada cenário, o coeficiente de variação

é tomado como a medição da variabilidade. Para os dois últimos cenários, a variabilidade também mede a independência do caminho.

O primeiro cenário considera a variação de todos os fatores, em um plano fatorial completo, enquanto o segundo cenário considera o contorno interno nulo e uma variação de pleno fatorial para os fatores restantes. Para o terceiro cenário, a janela de deformação possui raio fixo de 9 pontos, variando completamente os parâmetros de contorno. Finalizando, um último cenário considera as condições citadas anteriormente, a largura do contorno fixa em 90% e a altura variando em todas as possibilidades. O primeiro cenário se aplica somente ao método de área. Os valores dos parâmetros estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros variados nas análises

Parâmetro	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Janela Deformação (pixels)	5	7	9	11	13
Largura Contorno – c (% de 3W)	50%	60%	70%	80%	90%
Altura Contorno – h (% de 2W)	50%	60%	70%	80%	90%
Contorno Interno (γ)	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cálculos de Tamanho dos Subconjuntos

O resultado do cálculo de tamanho do subconjunto é exposto na Tabela 3. Os valores de diâmetros de subconjunto, em pixel, diminuíram com o aumento do corpo de prova. Isto ocorre dado que, para amostras maiores, a câmera está mais distante e, como o tamanho real das manchas não se altera, corpos de prova com maior razão mm/pxl utilizam menos pixels para representa-los. A mudança nos valores reais (mm) se deve ao processamento de imagem e os limiares utilizados que podem desconsiderar manchas em alguns tamanhos de amostra outros devido ao zoom distinto.

Tabela 3. Resultados do cálculo de tamanho do subconjunto utilizado

Amostra	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	D3
$2R_{sub}$ (pxl)	15	15	15	11	14	13	12	12	11	11	11
(em mm)	1.3	1.3	1.3	2.2	1.8	1.7	2.1	2.1	2.5	2.5	2.5

3.2 Cálculo de Tenacidade a Fratura

Os valores de J ao longo de todo o ciclo de carregamento, para um dado conjunto de parâmetros, para os métodos de contorno e área estão dispostos, respectivamente, nas Figura 7 Figura 8. Já considerando análises variando os parâmetros de forma distinta, conforme explicitado na seção 2.9, é possível avaliar a variabilidade dos métodos e também a dependência do contorno utilizado para o resultado final. Os resultados de J_{IC} calculados por contorno e área variando os parâmetros estão, respectivamente, dispostos nas Tabela 4.

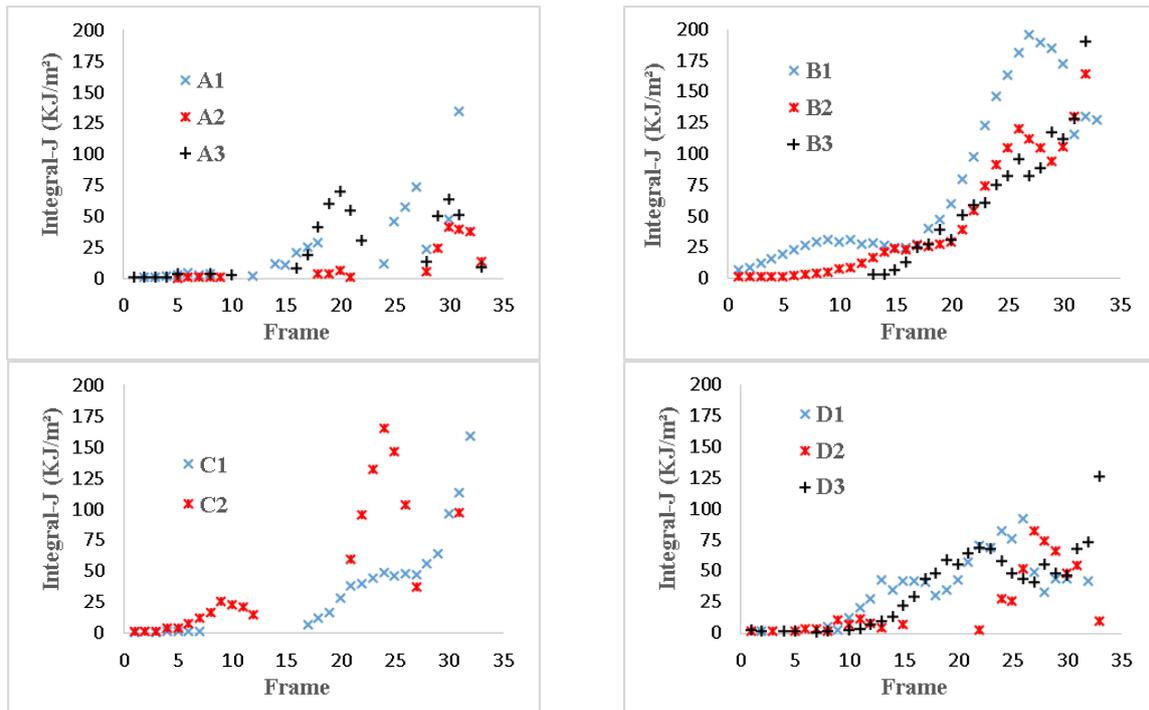


Figura 7. Variação da Integral-J no ciclo de carregamento (Método do Contorno)

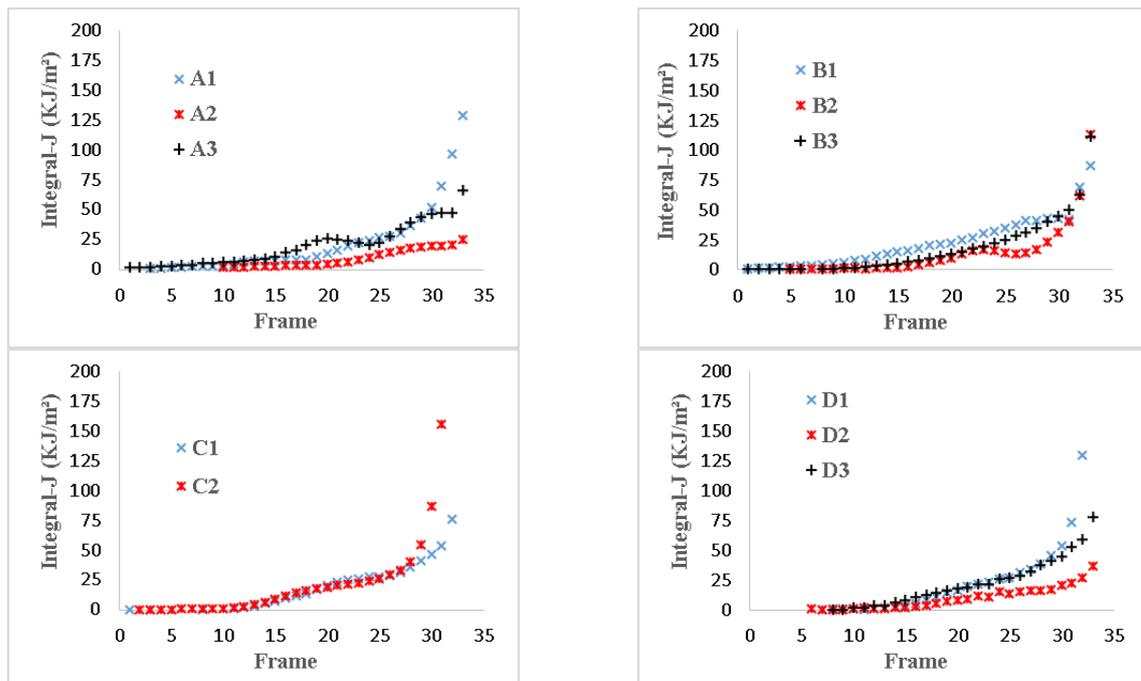


Figura 8. Variação da Integral-J no ciclo de carregamento (Método da Área)

Nota-se alta irregularidade e ausência de continuidade dos resultados de contorno, o que pode ser explicado pela diferença de captação de dados perante a o carregamento dinâmico, para o qual os campos de tensão ocorrem pela superposição das ondas elásticas se movendo e refletindo no material até o alcance do equilíbrio dinâmico. O contorno captura as ondas elásticas passando através dele, o que explica a grande heterogeneidade dos resultados ao longo do tempo. Já para a área o comportamento oscilatório é homogeneizado e a dispersão reduzida, gerando resultados mais consistentes e um ajuste polinomial mais coerente.

Tabela 4. Coeficientes de variação para o cálculo da Integral-J de área (%).

Amostra	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	D3
4 Par.	4.0	4.8	9.4	14.0	6.1	4.9	6.3	1.9	5.4	8.8	10.9
3 Par.	4.8	3.7	8.4	12.5	5.6	5.7	5.7	3.3	6.0	9.2	9.4
2 Par.	4.4	3.6	8.0	12.0	4.9	5.6	6.0	1.1	5.8	7.4	8.9
1 Par.	5.2	3.5	0.4	9.8	4.5	5.5	1.0	1.2	3.7	0.7	5.1

Tabela 5. Coeficientes de variação para o cálculo da Integral-J de contorno (%).

Amostra	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	D3
3 Par.	50.8	70.8	42.7	28.6	38.2	59.4	15.2	7.9	19.9	48.2	37.3
2 Par.	127.7	143.5	114.1	140.9	136.3	144.8	141.1	185.8	138.0	152.4	120.6
1 Par.	5.7	45.6	42.8	36.3	54.6	30.9	19.0	16.5	21.9	143.3	11.2

Os elevados coeficientes de variação associados aos resultados da integral de linha demonstram que este método não possui robustez em relação aos parâmetros utilizados para cálculos de J dinâmicos. Em contrapartida, a integral de área mitiga a influência dos parâmetros, incluindo a minoração drástica da dependência dos contornos. Para este caso, os maiores valores de coeficiente de variação estão associados à amostra B1, que possui uma baixa resolução peculiar, possivelmente devido a menor homogeneização dos campos de energia elásticos.

3.3 Efeitos do Termo Inercial

Os resultados calculados para os termos inerciais são apresentados na Tabela 6. Estes são extremamente pequenos, com médias que não ultrapassam 1.5% do valor total de J_{ic} . Isto demonstra que mesmo uma taxa de deformação de 100 s^{-1} não foi suficiente para gerar um termo energético inercial considerável.

Tabela 6. Resultados do termo Inercial da Integral-J pelo método de área

Amostra	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2	D3
Valor (J/m^2)	40.0	7.9	34.9	159.5	67.7	68.6	289.2	246.7	371.1	375.2	418.0
Des. Pad (J/m^2)	4.8	2.7	7.6	55.7	12.1	13.6	26.5	39.1	23.2	42.3	60.6
% de J	0.05	0.04	0.09	0.22	0.11	0.10	0.24	0.12	0.30	1.49	0.85

3.4 Comparações com outros valores obtidos

Os valores de tenacidade obtidos em outros estudos, para as mesmas amostras, em carregamento dinâmico e quase estático estão dispostas na Tabela 7. Os valores encontrados, com exceção do corpo de prova C, são, em média, próximos daqueles obtidos por Kuhn *et al* [1], mostrando aplicabilidade de ambas as metodologias. A defasagem encontrada em uma amostra ocorre devido a um erro na consideração do frame de iniciação da fratura, provavelmente causado por desajustes entre as medições dos extensômetros e da câmera. Complementarmente, nota-se um aumento de J quando comparado ao caso quase estático. Conforme discutido, tal fato não se deve a efeitos inerciais, visto que o

termo inercial é desprezível, e sim a mudanças estruturais no comportamento mecânico do material em altas taxas de carregamento.

Tabela 7. Comparativo dos Valores Médios de Integral J (KJ/m²) obtidos com outros estudos.

Tamanho de Amostra	A	B	C	D
Presente Trabalho	100.0	120.2	312.6	131.9
Kuhn <i>et al</i> [1]	117.0	136.8	146.7	153.3
Quase-Estático [21]	76.1	88.1	94.0	96.3

4. CONCLUSÃO

Foi apresentada uma estratégia experimental para avaliar a tenacidade à fratura em compressão dinâmica de compósitos de fibra de carbono a partir de correlação digital de imagem e cálculo de Integral-J. O uso da integral de área demonstrou-se mais apropriado para estimar J_{IC} dado a sua robustez em relação aos parâmetros de cálculo. Ao mesmo tempo, revelou-se que o termo inercial é ínfimo perante o total, apontando que o equilíbrio dinâmico já havia sido alcançado para o momento de colapso considerado.

Todavia, a abordagem utilizando DIC demonstra-se altamente dependente da acurácia de captação do momento de início da falha, levando a resultados inconclusivos quando esta informação é inexata. Assim sendo, é recomendado maior foco na melhoria da resolução temporal para obter resultados mais coerentes em ocasiões onde precisões espaciais e temporais são compensatórias. Por último, embora não haja consistência entre amostras da mesma classe, os resultados obtidos são, em média, compatíveis com os obtidos por Kuhn *et al* [1], com tendência crescente da tenacidade com o aumento do corpo de prova e da trinca inicial, o que sugere uma possível existência de uma curva-R.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado sanduíche na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (com o número de concessão 206575/2014-9), quanto para a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida a Rafael de Azevedo Cidade.

REFERÊNCIAS

1. KUHN, P. et al. Fracture toughness and crack resistance curves for fiber compressive failure mode in polymer composites under high rate loading. **Composite Structures**, v. 182, p. 164–175, 2017.
2. CANTWELL, W. J.; BLYTON, M. Influence of Loading Rate on the Interlaminar Fracture Properties of High Performance Composites - A Review. **Applied Mechanics Reviews**, v. 52, n. 6, 1999.
3. VOGLER, T. J.; KYRIAKIDES, S. On the axial propagation of kink bands in fiber composites: Part I experiments. **Int J Solids Struct**, v. 36, n. 47, p. 557-574, 1999.
4. BUDIANSKY, B.; FLECK, N. A. Compressive failure of fibre composites. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 41, n. 1, p. 183-211, 1993.

5. A.S.ARGON. Fracture of Composites. **Treatise on Materials Science & Technology**, v. 1, p. 79-114, 1972.
6. JIANG, F.; VECCHIO, K. S. Hopkinson Bar Loaded Fracture Experimental Technique: A Critical Review of Dynamic Fracture Toughness Tests. **Applied Mechanics Reviews**, v. 62, p. 1-39, 2009.
7. BAZANT, Z. et al. Size effect on compression strength of fiber composites failing by kink band propagation. **International Journal of Fracture**, v. 95, p. 103-141, 1999.
8. JIANG, Y. et al. Measurement of J-integral in CAD/CAM dental ceramics and composite resin by digital image correlation. **Journal of mechanical behavior of biomedical materials**, v. 62, p. 240-246, 2016.
9. GONZALES, G. L. G. et al. A J-integral approach using digital image correlation for evaluating stress intensity factors in fatigue cracks with closure effects. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 90, p. 14-21, 2017.
10. LI, F. Z.; SHIH, C. F.; NEEDLEMAN, A. A comparison of methods for calculating energy release. **Eng Fract Mech**, v. 21, n. 2, p. 405-421, 1985.
11. BECKER, T. H. et al. An approach to calculate the J-integral by digital image correlation displacement field measurement. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, v. 35, p. 971-984, 2012.
12. Material Data Sheet. HexPly 8852 Product Data. [S.I.]. 2013.
13. SUTTON, M. A.; ORTEU, J. J.; SCHREIER, H. W. **Image correlation for shape and deformation measurements: basic concepts, theory and applications**. New York, NY: Springer, 2009.
14. BERNSEN, J. **Dynamic thresholding of gray-level images**. Proceedings - International Conference on Pattern Recognition. [S.I.]: [s.n.]. 1986.
15. BLABER, J. DIC Algorithms. **NCORR V1.2**. Disponível em: <<http://ncorr.com/index.php/dic-algorithms>>.
16. ENFEDAQUE, A.; GALVEZ, J. C.; CIVIL, F. S. Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 472-487, 2015.
17. GIBSON, R. F. **Principles of Composite Materials Mechanics**. Third Edition. ed. [S.I.]: CRC Press.
18. NISHIOKA, T.; SHEN, S.; YU, J. Dynamic J integral, separated dynamic J integral and component separation method for dynamic interfacial cracks in piezoelectric bimaterials. **International Journal of Fracture**, v. 122, 2003.
19. NISHIOKA, T.; ATLURI, S. N. Path-independent integral, energy release rates and general solutions near-tip fields in mixed mode dynamic fracture mechanics. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 1, p. 1-22, 1983.
20. MEINHARD, K. Dynamic Fracture Processes. In: GLADWELL, G. M. **Finite Elements in Fracture Mechanics: Theory—Numerics—Applications**. [S.I.]: Springer, 2013. Cap. 3, p. 133-146.
21. CATALANOTTI, G.; XAVIER, J.; CAMANHO, P. P. Measurement of the compressive crack resistance curve of composites using the size effect law. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 56, p. 300-307, 2014.