

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO FATOR FORMA EM JUNTAS DE CISALHAMENTO SIMPLES

Ranulfo Martins Carneiro Neto¹ – ranulfocarneiro@macae.ufRJ.br

Eduardo Martins Sampaio² – edu.msampaio@gmail.com

Joaquim Teixeira de Assis² – joaquim.iprj@gmail.com

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Mecânica, Macaé, RJ, Brazil

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico – Nova Friburgo, RJ, Brazil

Resumo. *As uniões adesivas de materiais metálicos com adesivos epóxis vêm se tornando uma tecnologia cada dia mais difundida, sendo o tipo de junta colada mais utilizada a de cisalhamento simples. Este trabalho tem como objetivo a avaliação numérica de juntas de cisalhamento simples utilizando o método dos elementos finitos, sendo os resultados numéricos obtidos comparados com os valores dos experimentos realizados nas mesmas configurações. As análises consideraram o fator forma nas áreas coladas em nove configurações distintas, sendo modificados tanto o comprimento de sobreposição como a largura da junta. Foram utilizados os modelos de dano coesivo (MDC) na análise numérica. Para a medição das propriedades coesivas relacionadas a energia, foram realizados os ensaios DCB (double cantilever beam) e ENF (end notched flexure), medindo-se assim as energias críticas de fratura em modo I e II (normal e cisalhamento, respectivamente). Tanto na análise numérica como na experimental, os resultados mostraram que a resistência mecânica de juntas coladas com mesma área colada, porém com dimensões diferentes, é distinta, demonstrando a existência do fator forma. De maneira geral, houve boa concordância numérica e experimental nos diversos grupos avaliados, o que demonstra a eficiência dos modelos de danos coesivos nas condições estudadas.*

Palavras chaves: *Epóxi, Elementos finitos, Modelo de dano coesivo, Junta de cisalhamento simples.*

1. INTRODUÇÃO

A utilização de adesivos estruturais vem obtendo cada dia mais importância nas uniões entre diferentes tipos de materiais. As juntas coladas, que são as uniões de materiais através de adesivos, são projetadas para obtenção de elevada resistência ao cisalhamento, oferecendo diversas vantagens em relação aos meios convencionais de uniões, tais como parafusos, rebites

e soldas. A distribuição mais uniforme das tensões, redução do peso da estrutura e elevada resistência a fadiga são algumas das vantagens obtidas por esse meio de ligação. Apesar de apresentar também algumas desvantagens, como a impossibilidade de desmontagem e condições de temperaturas limitadas, as juntas coladas possuem áreas de aplicações abrangentes, sendo utilizadas de maneira significativa na indústria aeronáutica, construção civil e indústria petrolífera.

O modelo de dano coesivo (MDC), associado aos elementos finitos, tem sido muito utilizado na previsão da resistência de juntas coladas, permitindo a simulação do crescimento do dano considerando princípios de energia (Campilho *et al.*, 2013). A dificuldade da determinação das propriedades da interface da junta colada, que são diferentes daquelas dos substratos e do adesivo, é uma das principais dificuldades na modelagem de uniões adesivas. Assim, para aplicação do MDC associado ao MEF, são necessárias as medições das propriedades coesivas, caracterizando as energias liberadas no início da propagação das trincas nas direções normais e de cisalhamento (G_{IC} e G_{IIC} , respectivamente). Para o cálculo de G_{IC} o ensaio DCB (*double cantilever beam*) é um dos mais utilizados devido a sua simplicidade. Já para o cálculo de G_{IIC} o ENF (*end notched flexure*) é o mais utilizado.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a resistência mecânica de juntas de cisalhamento simples (JCS) com substratos metálicos (aço A1020) e adesivo epóxi ARC 858, fazendo-se um comparativo entre a análise experimental, previamente realizada por Da Silva (2010), e a análise numérica. O efeito de mudanças geométricas nas juntas foi investigado, tanto na largura quanto no comprimento de sobreposição. Foram realizados os ensaios DCB e ENF para medição das energias críticas de fratura em modo I e II. Os trabalhos numéricos foram realizados utilizando o programa de elementos finitos ABAQUS.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Experimentos com juntas de cisalhamento simples

O arranjo básico de uma junta de cisalhamento simples está representado na Fig. 1. A força (F) é exercida pela máquina de ensaio. O comprimento de sobreposição é representado por L , w a largura da junta, t_p e t_a as espessuras do substrato e do adesivo, respectivamente.

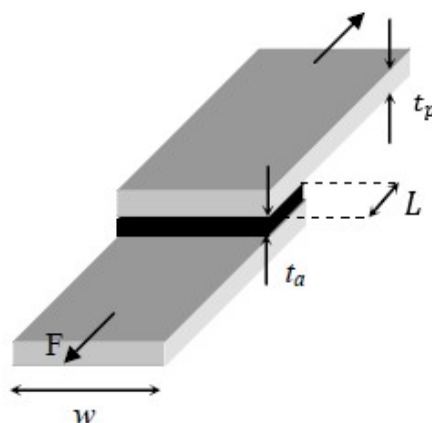


Figura 1 – Junta de cisalhamento simples (Da Silva, 2010).

Os experimentos das JCS foram realizados no trabalho de Da Silva (2010), que considerou dois cenários para a área colada: largura (w) constante, variando-se o comprimento de sobreposição (L), e comprimento constante, variando-se a largura, conforme Tabela 1. Os resultados mostraram que, de maneira geral, é desejável que a maior dimensão da área seja posicionada ortogonalmente a solicitação mecânica, pois o aumento no comprimento produz juntas com resistência a ruptura inferior às juntas aumentadas em largura. Foi tomado como padrão os valores das JCS definidos pela ASTM D1002 (grupo 3).

Tabela 1 – Força na ruptura (Da Silva, 2010).

Grupo		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)	força na ruptura (kN)*
Análise da Influência da variação do comprimento da região colada	1	25,0	25,0	625,0	6,16 ± 1,03 (16,74%)
	2	18,8	25,0	470,0	5,45 ± 0,96 (17,58%)
	3*	12,5	25,0	312,5	3,70 ± 0,58 (15,75%)
	4	9,4	25,0	235,0	3,62 ± 0,40 (11,04%)
	5	6,3	25,0	157,5	2,97 ± 0,45 (14,99%)
Análise da Influência da variação da largura da região colada	6	12,5	50,0	625,0	6,96 ± 0,86 (12,33%)
	7	12,5	37,5	468,8	6,43 ± 0,63 (9,79%)
	8	12,5	19,0	237,5	3,40 ± 0,44 (12,82%)
	9	12,5	12,5	156,3	2,26 ± 0,25 (10,86%)

* Corpo de prova padrão ASTM

A comparação entre as forças de ruptura dos grupos com mesma área está apresentada na Tabela 2, onde são mostradas as diferenças da força de ruptura para grupos de mesma área. Os únicos grupos com mesma área cujo estudo estatístico de Da Silva (2010) que mostrou que a mudança nas dimensões não tem grande influência na força de ruptura foram os grupos 4 e 8.

Tabela 2 - Comparação entre os grupos de mesma área (Da Silva, 2010).

Área	grupos Comparados e Relação L:w						Conclusão	Diferença (kN) (ΔF)
	grupos variados em Comprimento			grupos variados em Largura				
2A	1	L	w	6	L	W	distintos	-0,80
		2	1		1	2		
1,5A	2	L	w	7	L	W	distintos	-0,98
		1,5	1		1	1,5		
0,75A	4	L	w	8	L	W	semelhantes	0,23
		0,75	1		1	0,75		
0,50A	5	L	w	9	L	W	distintos	0,71
		0,50	1		1	0,50		

2.2. Caracterização do adesivo

A modelagem computacional das juntas coladas exige a realização de alguns ensaios para medição das propriedades coesivas do adesivo. Dessa forma, procedeu-se com os ensaios de tração, DCB e ENF, medindo-se assim as propriedades do adesivo essenciais a modelagem numérica.

Foram fabricados os corpos de prova do adesivo ARC 858 de acordo com as dimensões da norma ASTM D638. Conforme orientação do fabricante (Chesterton), foi utilizada a proporção 4 x 1, sendo utilizado para cada três corpos de prova cerca 60 gramas do componente A e 15 gramas do componente B do adesivo.

Procedeu-se também com o ensaio de tração para medição do módulo de Young (E), módulo de Poisson (ν) e tensão normal máxima (t_s) do ARC 858. Com os valores de E e ν calculou-se o valor do módulo de elasticidade ao cisalhamento (G).

A tensão máxima de cisalhamento (t_c) do ARC 858 foi considerada através da concordância das simulações numéricas com os experimentos. Considerou-se como entrada no Abaqus uma determinada tensão de cisalhamento, e foi verificado se a respectiva força de ruptura numérica da junta colada era igual ao valor experimental (grupo 4). O valor da tensão máxima cisalhante foi sendo variado até que a força de ruptura numérica fosse aproximadamente igual ao valor obtido nos experimentos.

Foram realizados os ensaios DCB e ENF para medição das energias de fratura nos modos normal e de cisalhamento, respectivamente, sendo utilizado o método CBBM (*compliance based beam method*) no tratamento dos dados. Esse método se baseia no conceito de trinca equivalente, tendo a vantagem de depender apenas da flexibilidade dos corpos de prova durante o teste, não dependendo, portanto, da medição exata do tamanho da trinca propagada (De Moura, 2008). O método considera a zona de processo de fratura (FPZ – *fracture process zone*) que ocorre a frente da trinca em consequência da nucleação de múltiplas micro trincas através de processos inelásticos.

Os quatro corpos de prova do ensaio DCB foram fabricados em conformidade com as recomendações da norma ASTM D3433-99, com exceção do comprimento total ($2L$), que foi ajustado para 250 mm, valor considerado em conformidade com diversos trabalhos publicados que consideraram comprimentos menores que 356 mm, como Carvalho (2016) e Andresen (2006). Para os corpos de prova do ensaio ENF foram utilizadas as mesmas dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios DCB, sendo também testados quatro corpos de prova. A Fig. 3 mostra registros dos ensaios DCB e ENF.



Figura 3 - Ensaio DCB e ENF. Espessura adesiva de 0,4 mm.

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaio universal Shimadzu modelo Autography AG-X Plus 100 kN.

2.3. Análise numérica

Para a análise numérica adotou-se a abordagem da mecânica do dano, onde duas técnicas estão disponíveis: a abordagem local e a abordagem contínua. Na abordagem local o dano é considerado com área ou volume nulo, permitindo a simulação da falha interfacial entre os materiais, ou seja, entre o adesivo e o aderente, já na abordagem contínua o dano é considerado com espessura finita, podendo ser modelado através dos modelos de materiais convencionais no programa de elementos finitos (Da Silva, 2012). O presente trabalho utilizou a abordagem contínua na análise numérica das juntas coladas.

O modelo de dano coesivo (MDC) explora as vantagens da MFEL, e ultrapassaram as suas limitações. Esses modelos consideram que uma ou múltiplas interfaces ou regiões de fratura podem ser artificialmente introduzidas nas estruturas, o que é feito através de leis de tração separação, onde a resposta inicial é elástica. Enquanto os elementos volumétricos tradicionais representam as deformações dos meios contínuos, os elementos coesivos representam o comportamento das fraturas (Espinha, 2011). Inicialmente proposto por Berenblatt (1959 e 1962) e Dugdale (1960), o MDC considera o conceito de zona coesiva, região localizada a frente da ponta da fenda (Azevedo, 2014). Assim, o fenômeno da fratura é considerado como um fenômeno gradual, ocorrendo a propagação da trinca na zona coesiva, sendo a mesma resistida por trações coesivas.

As leis coesivas (ou leis de tração-separação), base dos MDC, podem ser descritas pelas formas: triangular, exponencial e trapezoidal. A escolha dependerá do comportamento do material e da interface a ser simulada. O modelo triangular, utilizado nesse trabalho, é representado graficamente através da relação entre as tensões e deslocamentos relativos entre os nós emparelhados dos elementos coesivos (Fig. 4). A reta crescente simula o comportamento elástico linear nos modos puros (t_n^0 e t_s^0). O subsequente amolecimento (reta decrescente) representa a degradação das propriedades dos materiais até a fratura completa. Os valores de G_I e G_{II} representam a área sobre a curva de tração separação nos carregamentos puros de tração e cisalhamento, respectivamente. A definição dos máximos deslocamentos em tração e cisalhamento (δ_n^f e δ_s^f , respectivamente) é realizada fazendo-se $G_I = G_{IC}$ and $G_{II} = G_{IIC}$. O pico das curvas representa o início do dano, quando ocorre redução da rigidez do elemento coesivo.

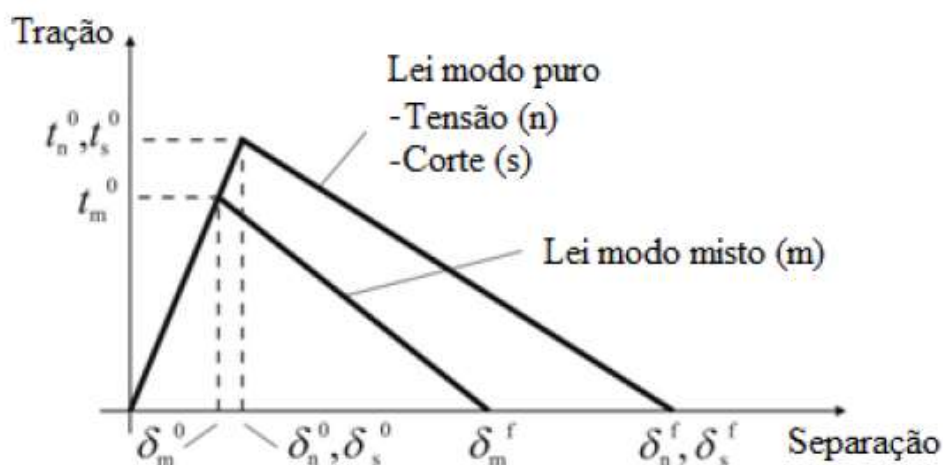


Figura 4 – Modelo de dano coesivo: forma triangular (Nascimento, 2013).

No modo de carregamento misto (ocorrente na maioria das situações práticas), identificado na curva pelo índice ‘m’ (Fig. 4) nas tensões (t) e deslocamentos (δ), critérios de energia são usados através da combinação dos modos puros.

Considerando uma análise tridimensional, o vetor tensão nominal t , cujas componentes são t_n (normal), e as tensões de cisalhamento t_s e t_t , está relacionado com a matriz deformação (ϵ) através da matriz rigidez (E) (Campilho *et al.*, 2013), (Abaqus, 2014):

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{ns} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{nt} & E_{st} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \\ \epsilon_t \end{Bmatrix} = E\epsilon \quad (1)$$

Onde a matriz de rigidez contém os parâmetros da união adesiva, que no caso da abordagem contínua considera-se a aproximação $E_{nn} = E$ (módulo de Young), $E_{ss} = E_{tt} = G$ (módulos de elasticidade ao cisalhamento).

Diante da lei triangular do MDC deve-se definir os critérios que serão utilizados para modelagem do início e da evolução do dano. As representações t_n^o , t_s^o , t_t^o se referem aos picos do gráfico tensão versus separação sobre carregamento puro, seja o carregamento normal (prefixo n) ou de cisalhamento (prefixos s e t).

Para o início do dano foi utilizado o critério da tensão nominal quadrática, onde o início do dano é considerado quando a soma das razões quadráticas entre as tensões de carregamento com as tensões dos picos resulta no valor um (Oionem, 2013). Esse critério pode ser representado como:

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^o} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^o} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^o} \right\}^2 = 1 \quad (2)$$

A evolução do dano é descrita nos MDC considerando-se a taxa na qual a rigidez do material é degradada (Abaqus, 2014), sendo utilizado nesse trabalho a análise baseada no critério energético, que é implementada considerando como entrada do programa de elementos finitos a energia de fratura (G_C). Diante da lei de comportamento escolhida, no caso linear, o programa garante que a área sobre a curva será igual a energia de fratura (Abaqus, 2014). Para um modo misto de carregamento, algum critério baseado na energia necessariamente deve ser utilizado.

O critério de fratura da lei de potência (*power law fracture criterion*), utilizado no presente trabalho, considera que a fratura é governada pela energia necessária para causar a fratura nos modos individuais (normal ou cisalhamento). A equação que representa esse critério é (Moreno, 2015), (Abaqus, 2014):

$$\left\{ \frac{G_I}{G_{IC}} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_{II}}{G_{IIC}} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_{III}}{G_{IIIC}} \right\}^\alpha = 1 \quad (3)$$

Onde o critério linear ($\alpha = 1$) e o quadrático ($\alpha = 2$) são os mais utilizados. (Araújo, 2016). As entradas necessárias são as energias críticas de fratura requeridas para causar falha no material, considerando-se o modo normal (G_{IC}), e os modo de cisalhamento (G_{IIC}) e (G_{IIIC}).

A análise numérica das juntas de cisalhamento simples com espessura adesiva de 0,4 mm apresentou em diversos casos problemas de convergência no Abaqus, sendo então realizados refinamentos nas malhas, ou mudança dos deslocamentos impostos em uma das extremidades.

Foram consideradas duas condições de contorno (*boundary conditions*): um engastamento em uma extremidade, e uma imposição de deslocamento na outra, incluindo a limitação do deslocamento vertical (Fig. 5).

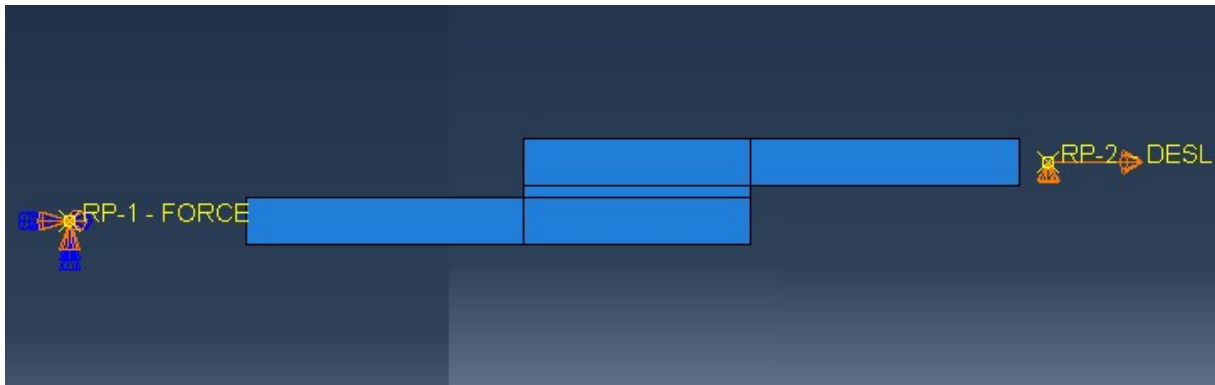


Figura 5 – Condições de contorno para as juntas de cisalhamento simples (grupo 1).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores das propriedades do adesivo ARC 858 obtidos no presente trabalho estão listados na Tabela 3. Os valores médios dessas propriedades foram utilizados como dados de entrada no programa ABAQUS, e assim pôde-se executar a modelagem computacional das juntas coladas.

Tabela 3 – Propriedades do ARC 858 medidas através dos testes de tração, DCB e ENF.

Propriedades

Módulo de Young - E	7073,03 ± 64,02 MPa
Módulo de cisalhamento - G	2660,82 MPa (<i>calculado</i>)
Coefficiente de Poisson - ν	0,33 ± 0,01
Tensão normal máxima - t_n	28,96 ± 1,10 MPa
Tensão de cisalhamento máxima - t_s	18 MPa (<i>estimado</i>)
Energia crítica de fratura normal - G_{Ic}	0,135 ± 0,05 N/mm
Energia crítica de fratura em cisalhamento - G_{IIc}	2,025 ± 0,351 N/mm

Os dados experimentais e numéricos das juntas de cisalhamento simples para os 9 grupos avaliados estão mostrados graficamente na Fig. 6, incluindo o desvio padrão dos experimentos. Dos nove grupos estudados, seis deles apresentaram diferenças de até 20% entre os resultados numéricos e experimentais, sendo que quatro deles estão situados dentro do desvio padrão obtido nos ensaios experimentais (grupos 2, 4, 8 e 9). A maior diferença percentual encontrada entre os valores numéricos e experimentais ocorreu para o grupo 3, sendo de cerca de 30%.

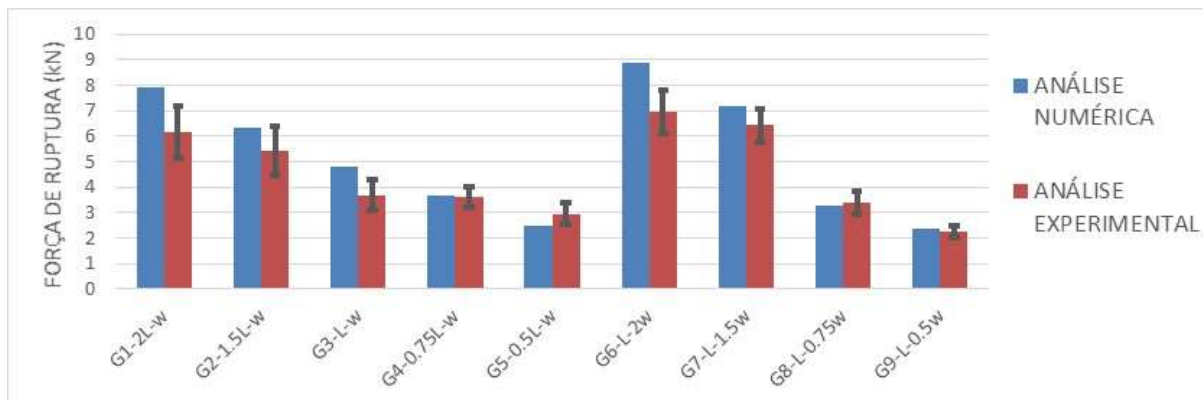


Figura 6 - Gráfico de barras comparando os valores experimentais e numéricos das JCS.

Os dados experimentais mostraram que as JCS com a mesma área, porém com dimensões diferentes, possuem de maneira geral resistências distintas, conforme estudo de Da Silva (2010). Os resultados numéricos também apresentaram esse comportamento. Por exemplo, para os grupos 1 e 6, ambos com mesma área colada, a força de ruptura numérica do grupo 1 foi de 7,9 kN, cerca de 13% maior que a força da JCS do grupo 6 (8,9 kN), ou seja, para essa configuração de JCS com mesma área, é preferível ter uma maior largura ao invés do comprimento da junta colada. Esse mesmo aumento percentual (13%) foi observado nos valores experimentais. Esse perfil de aumento da resistência para larguras maiores também ocorre para os grupos 2 e 7.

Para o par de grupos 4 e 8 a diferença experimental foi de apenas 6%, não caracterizando o fator forma devido a pequena variação obtida, conforme análise estatística realizada por Da Silva (2010). Já o par de grupos 5 e 9 apresentaram experimentalmente um significativo decréscimo de 24%, ou seja, a força de ruptura da JCS do grupo 9 é 24% menor do que a do grupo 1, tendo a análise numérica obtido um decréscimo de 4%, existindo nesse caso uma preferência por juntas com maior comprimento de sobreposição ao invés da largura. A Tabela 4 mostra a diferença percentual numérica e experimental entre os pares de grupos com mesma área, considerando a variação do grupo maior em relação ao grupo menor. Por exemplo, o grupo 6 possui força de ruptura 13% maior que o G1, tanto na análise numérica como na análise experimental.

Tabela 4 – Diferenças experimentais e numéricas de grupos com mesma área colada nas JCS.

PARES DE GRUPOS COM MESMA ÁREA COLADA	DIFERENÇA % EXPERIMENTAL DOS VALORES DA FORÇA DE RUPTURA	DIFERENÇA % NUMÉRICA DOS VALORES DA FORÇA DE RUPTURA
G1 E G6	13%	13%
G2 E G7	18%	13%
G4 E G8	-6%	-11%
G5 E G9	-24%	-4%

Assim como ocorrido nos experimentos, a força simulada cresce linearmente, consequência da imposição do deslocamento no Abaqus em uma das extremidades da junta. A Fig. 7 mostra um gráfico extraído do Abaqus, relacionando força e deslocamento. O momento de início do decréscimo da força no gráfico indica o início do processo de ruptura na junta.

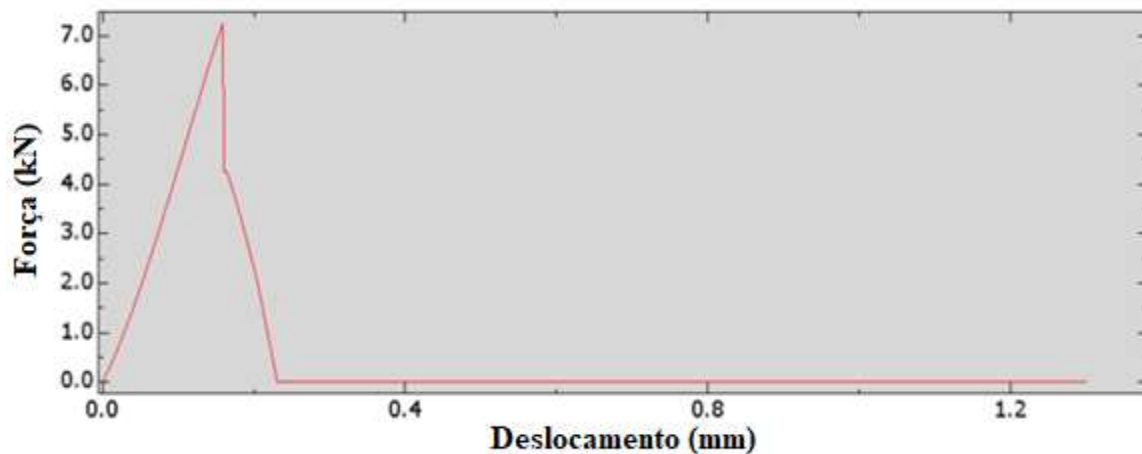


Figura 7 - Gráfico força versus deslocamento para a junta de cisalhamento simples do G7 extraído do Abaqus.

4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho propiciou ao Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) o início da implantação da ferramenta computacional na análise do comportamento mecânico de juntas coladas. Para isso, foram desenvolvidos novos procedimentos de preparação de juntas coladas para o levantamento de propriedades coesivas através dos ensaios DCB e ENF, utilizando o método CBBM para cálculo das energias críticas de fratura em modo I e II.

A análise numérica das juntas de cisalhamento simples (JCS) apresentou boa concordância com os resultados experimentais na maioria dos grupos, sendo que em seis dos nove grupos testados a diferença máxima entre essas análises foi de 20%. Assim como ocorrido nos ensaios experimentais, foi verificado numericamente em alguns pares de grupos com mesma área a ocorrência do fator forma, ou seja, a preferência por uma das dimensões para obtenção de maiores resistências. Devido a não linearidade total das curvas de carregamento dos corpos de prova no ensaio ENF (força versus deslocamento), fator que é considerado na aplicação do método CBBM, o valor da energia de fratura em modo II pode ter algum erro associado. Adicionalmente, fatores intrínsecos ao ensaio como os mecanismos de danos complexos que ocorrem na extremidade da fenda, ou ainda os efeitos de atrito entre os substratos na zona sem adesivo (trinca inicial), podem ter contribuído para algumas divergências encontradas entre os valores numéricos e experimentais.

Agradecimentos

Agradeço a toda equipe do LAA que auxiliou no financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Abaqus, *Analysis user's guide volume IV: elements*, Dassault Systems, 2014.
- Andresen, H.W., Echtermeyer, A.T. (2006), Critical energy release rate for a CSM reinforced carbon fibre composite/steel bonding, Science Direct, p. 742-751.
- Araújo, R.V.C. (2016), “Validação numérica de leis coesivas triangulares para previsão de resistência de juntas adesivas em tração e corte puros, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.

- Azevedo, J.C.S. (2014), “*Determinação da tenacidade a fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Campilho, R. D. S. G. et al. (2013), Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer, *International Journal of Adhesion & Adhesive*, 44, 48-56.
- Carvalho, U.T.F. (2016), “*Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Da Silva, A.H.M.F.T. (2010), “*Critério de falha para juntas coladas submetidas a carregamentos complexos*”, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense.
- Da Silva, L. F. M., Campilho, R. D. S. G. (2012), “*Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*”, Springer Briefs in Computational Mechanics.
- De Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G., Gonçalves, J.P.M. (2008), Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading, *Composites Science and Technology*, p. 2224-2230.
- Espinha, R.S.L. (2011), “*Suporte topológico em paralelo para malhas de elementos finitos em análises dinâmicas de fratura e fragmentação*”, Tese (Doutorado em Informática), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Moreno, M.C.S. et al. (2015), Adhesively bonded joints as a dissipative energy mechanism under impact loading, *Applied Mathematical Modelling*, 39, p. 3496–3505.
- Nascimento, A.N.S. (2013), “*Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples na ligação materiais compósitos*”, Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Ramo de Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel), Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal.
- Oinonen, A, Marquis, G. (2013), Shear damage simulation of adhesive reinforced bolted lap-connection interfaces, *Engineering Fracture Mechanics*, 109, p. 341–352.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SHAPE FACTOR IN SINGLE LAP JOINTS

Abstract. *Adhesive joints of metallic materials have become an increasingly widespread technology, being the bonded joint type most commonly the single lap joint. This paper has the objective of numerically evaluating the single lap joints behavior using the finite element method, comparing it results with the experimental values performed in the same configurations. The analyzes considered the bonded area form factor areas in nine different configurations, both the overlap length and the joint width were modified, with the proposed configuration in ASTM D1002 being the standard measure. The cohesive zone models (CZM) were used in the numerical analysis. For the measurement of cohesive properties related to energy the DCB (double cantilever beam) and ENF (end notched flexure) tests were performed, thus measuring the critical energy release in I and II modes (normal and shear, respectively). Both in numerical and experimental analysis, the results showed that the bonded joints mechanical strength with the same bonded area, but different dimensions, are distinct, demonstrating the shape factor existence. In general, there was good numerical and experimental agreement in the different configurations studied, which demonstrates the cohesive zone model's efficiency in the studied conditions.*

Keywords: *Epoxy, Finite elements, Cohesive zone model, Single lap joint.*