



ELEMENTOS FINITOS DE INTERFACE APLICADOS AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS

M. F. S. F. DE MOURA¹, J. P. M. GONÇALVES¹, A. G. MAGALHÃES²,
P. M. S. T. DE CASTRO¹

¹DEMEGI - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto - Portugal

²DEM - Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto - Portugal

(Recibido 17 de marzo de 2004, para publicación 2 de abril de 2005)

Resumo – O objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de modelos numéricos que permitam prever com rigor o comportamento mecânico de juntas coladas. Os modelos baseiam-se no uso de elementos finitos de interface, para problemas tridimensionais, que são colocados entre os substratos e o adesivo. Numa primeira fase são determinados os campos de tensões com o intuito de definir zonas críticas precursoras da iniciação do dano. Posteriormente é também incluído um modelo de dano progressivo que permite simular a iniciação e a propagação do dano. Foram realizados ensaios experimentais em juntas de alumínio/epóxico de sobreposição simples. A simulação numérica para a previsão da resistência da junta, foi feita tendo por base análises linear elástica e elastoplástica, considerando três comprimentos de sobreposição. A carga de rotura prevista na análise elastoplástica apresentou boa concordância com os resultados experimentais.

Palavras chave – Juntas coladas, elementos finitos de interface, comportamento mecânico.

1. INTRODUÇÃO

As aplicações estruturais de juntas coladas têm aumentado nos últimos anos. Relativamente às juntas aparafusadas, as juntas coladas apresentam a vantagem de possuírem menor concentração de tensões, boa distribuição de cargas e bom desempenho à fadiga, tornando-se assim atractivas para aplicações nas indústrias automóvel, aeronáutica e de engenharia civil. Consequentemente, inúmeros estudos têm sido realizados com o intuito de melhor descrever o seu comportamento mecânico. Todavia, a grande maioria das publicações promove unicamente a análise tensorial, não prevendo o modo de rotura [1-9]. Existem, no entanto, alguns estudos que incluem a análise de dano progressivo, como é o caso de Pradhan et al. [10], [11] que apresentam um modelo de elementos finitos que inclui a determinação das taxas críticas de libertação de energia na descoesão. Os autores consideram que as interfaces entre o substrato e o adesivo são zonas críticas para a iniciação da descoesão, a qual origina a rotura. Nas interfaces é considerada a existência de pares de nós inicialmente ligados, e que vão sendo libertados conforme se dá a propagação de dano. Após a análise de diferentes materiais e geometrias, os autores concluíram que o modelo apresentava bom desempenho na previsão da carga de rotura das juntas coladas. Num outro trabalho de Bogdanovitch et al. [12], foi usado um modelo tridimensional para prever diferentes hipóteses de propagação de dano em juntas de materiais compósitos: coesiva, adesiva ou interlaminar. O processo de rotura progressiva é despoletado, uma vez detectado o ponto crítico relativo à iniciação do dano que pode ocorrer no interior do adesivo, na interface adesivo/substrato ou no compósito. Os autores concluíram da boa aplicabilidade do modelo na previsão da trajectória de propagação do dano em juntas de sobreposição dupla de material compósito.

O objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo numérico para, numa primeira fase, obter o campo de tensões numa junta colada de sobreposição simples e, posteriormente, a previsão da

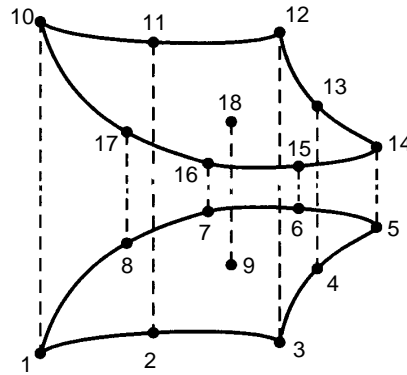


Fig. 1. Elemento de interface.

resistência à rotura de juntas coladas de sobreposição simples. O método baseia-se no uso de elementos finitos tridimensionais e de interface e inclui um modelo de dano progressivo baseado no uso indirecto da Mecânica da Fractura. Deste modo, é possível simular a iniciação e a propagação de dano evitando a definição de fendas iniciais. Devido ao complexo estado de tensão, típico deste tipo de problemas, considera-se um modelo de modo misto (I, II) e efectua-se análises elástica e elastoplástica, verificando-se que esta última apresenta boa concordância com os resultados experimentais.

2. TEORIA

2.1. Elemento de interface

A formulação do elemento finito de interface, detalhada por Moura et al. [13], [14], pode ser considerada como um problema de contacto. Basicamente, a solução das equações de um problema de contacto consiste na minimização da energia potencial sujeita a certas restrições cinemáticas. Isto é conseguido considerando o método variacional incorporando uma formulação baseada na função penalidade. O elemento de interface desenvolvido contém 18 nós e está representado na Figura 1.

O vector dos deslocamentos relativos entre dois pontos homólogos é obtido a partir dos campos de deslocamentos das faces do elemento (superior e inferior)

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_s \\ u_t \\ u_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_s \\ v_t \\ v_n \end{Bmatrix}_{\text{sup}} - \begin{Bmatrix} v_s \\ v_t \\ v_n \end{Bmatrix}_{\text{inf}} \quad (1)$$

onde s e t representam as direcções tangenciais e n a direcção normal. As tensões resultantes dos deslocamentos relativos são dadas por,

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (2)$$

onde

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_s & 0 & 0 \\ 0 & d_t & 0 \\ 0 & 0 & d_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

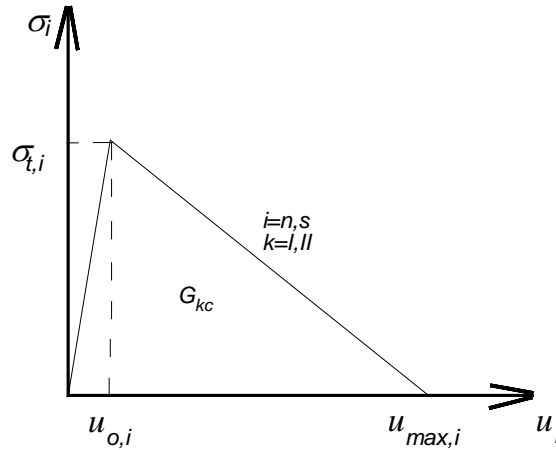


Fig. 2. Relação tensão/deslocamento relativo para modos puros (I, II).

sendo d_i os parâmetros de rigidez tangencial (d_s, d_t) e normal (d_n). Os parâmetros de rigidez óptimos são os maiores valores que não conduzem a problemas numéricos, uma vez que valores baixos originam interpenetrações e muito altos induzem perturbações numéricas.

2.2. Modelo de dano

Quando as tensões num ponto satisfazem o critério adoptado, o processo de rotura deve ser gradual pois a anulação abrupta das tensões provoca instabilidades numéricas. Fisicamente, isto significa que a rotura não ocorre instantaneamente e que a energia associada se dissipa com o crescimento da fenda. Isto é feito considerando um modelo de dano baseado no uso indirecto da Mecânica da Fractura, caracterizado por uma relação de relaxação das tensões/deslocamentos relativos (ver Fig. 2). Considerando unicamente a existência de um modo de propagação (modo puro I, II), a área definida pela curva tensão/deslocamento relativo pode ser igualada à energia crítica de fractura. Como a tensão limite ($\sigma_{t,i}$) e a taxa crítica de libertação de energia (G_c) são propriedades do material determinadas experimentalmente, pode-se obter o deslocamento relativo máximo ($u_{max,i}$). A equação 2 representa a relação entre tensões e deslocamentos relativos até se atingir a tensão limite ($\sigma_{t,i}$). Os pontos ($u_{o,i}, \sigma_{t,i}$) e ($u_{max,i}, 0$) correspondem à iniciação e rotura completa, respectivamente. A relação de relaxação entre estes dois pontos é dada por

$$\sigma = (\mathbf{I}-\mathbf{E}) \mathbf{D} \mathbf{u} \quad (4)$$

onde \mathbf{I} é a matriz identidade e \mathbf{E} é a matriz diagonal contendo na posição i o parâmetro de dano

$$e_i = \frac{u_{max,i}(u_i - u_{o,i})}{u_i(u_{max,i} - u_{o,i})} \quad (5)$$

correspondente à direcção i . Nos modos puros, as outras duas componentes das tensões são desprezáveis e podem ser anuladas abruptamente igualando a 1 os respectivos valores de e_i .

O modelo de modo misto é uma extensão do modelo de modo puro e baseia-se numa superfície de dano que se desloca entre duas situações limite (ver Fig. 3). A superfície de dano inicial (IDS) é definida pelos deslocamentos relativos críticos ($u_{o,s}, u_{o,n}$) e a superfície de dano final (FDS) pelos deslocamentos relativos máximos ($u_{max,s}, u_{max,n}$). Entre estes extremos, a propagação de dano é simulada por sucessivas posições da superfície de dano, que são função do vector deslocamento relativo \mathbf{u}_j . É necessária a definição de uma nova superfície num ponto sempre que os deslocamentos relativos ultrapassam a superfície actual. A nova superfície é então obtida a partir da actual e dos incrementos dos deslocamentos relativos fazendo

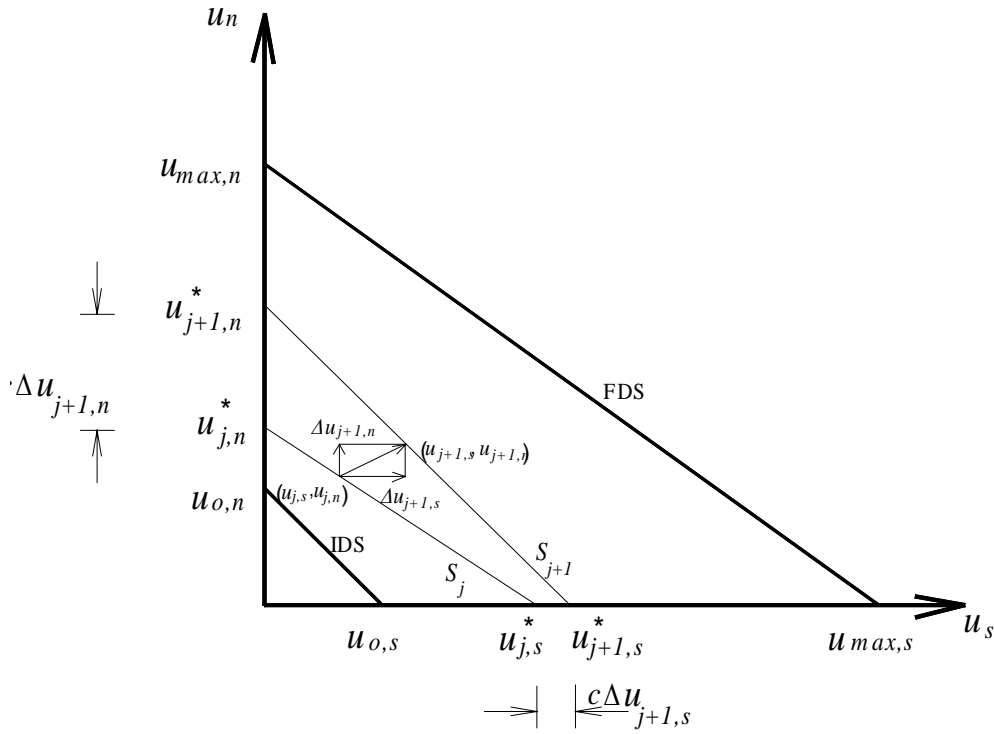


Fig. 3. Modelo de modo misto (I, II).

$$\frac{u_{j+1,s}}{u_{j,s}^* + c \Delta u_{j+1,s}} + \frac{u_{j+1,n}}{u_{j,n}^* + c \Delta u_{j+1,n}} = 1 \quad (6)$$

onde $u_{j,i}^*$ ($i = s, n$) representam as intersecções da superfície de dano com os eixos coordenados e $\Delta u_{j+1,i}$ os incrementos do deslocamento relativo. Após determinação da incógnita c na equação (6), obtêm-se os novos valores $u_{j+1,i}^*$,

$$u_{j+1,i}^* = u_{j,i}^* + c(u_{j+1,i} - u_{j,i}) \quad (7)$$

Os elementos da diagonal da matriz \mathbf{E} (e_s e e_n) podem ser obtidos a partir de

$$e_{j+1,i} = \frac{u_{\max,i} (u_{j+1,i}^* - u_{o,i})}{u_{j+1,i}^* (u_{\max,i} - \delta_{o,i})} \quad (8)$$

3. EXPERIMENTAÇÃO

Foram ensaiadas juntas de sobreposição simples com substratos de alumínio e um adesivo epóxico cujas propriedades mecânicas se apresentam nas tabelas 1 e 2.

Os três comprimentos de sobreposição considerados (ver Fig. 4) pretendem retratar situações típicas. O modo de rotura característico está representado na Figura 5. Como se pode constatar o dano propagou-se

Tabela 1. Propriedades dos substratos.

E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)
62088	124,1	14,0

Tabela 2. Propriedades do adesivo.

E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	τ_{max} (MPa)	G_{Ic} (N/mm)	G_{IIc} (N/mm)
437,4	12,7	15,0	11,3	20	0,6	1,8

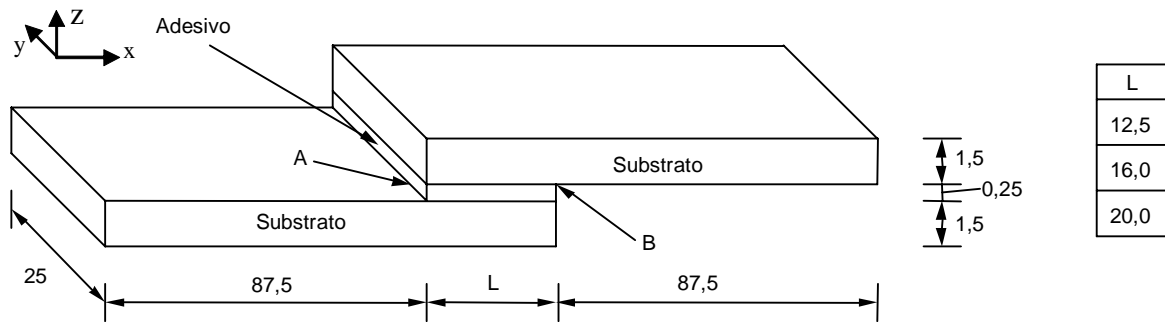


Fig. 4. Geometria da junta.

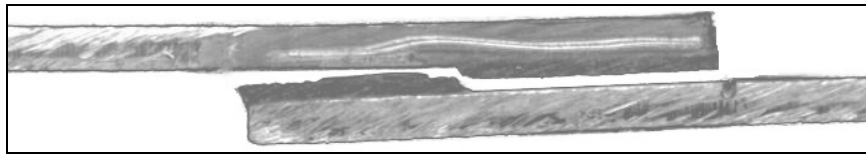


Fig. 5. Ruptura típica observada experimentalmente.

junto às interfaces. Todavia, foi sempre possível observar uma fina película de adesivo nas superfícies do substrato, o que sustenta a consideração de uma ruptura de carácter coesivo.

4. RESULTADOS

4.1. Análise de tensões

Numa primeira fase recorreu-se a uma análise tridimensional com elementos de interface nas interfaces substrato-adesivo (ver Fig. 6), com o intuito de determinar o campo de tensões que se gera neste tipo de juntas [15]. Devido às condições de simetria existentes, o modelo usado contempla somente metade da

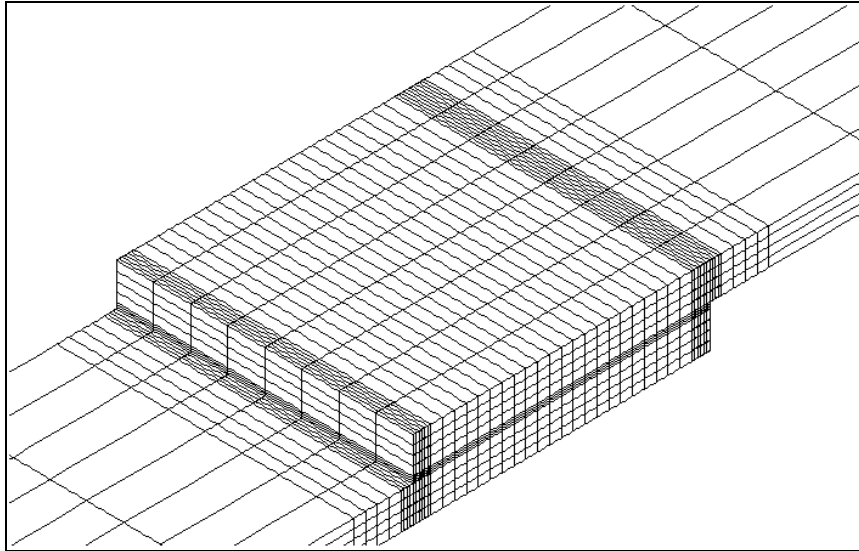


Fig. 6. Pormenor da malha utilizada.

junta, tendo sido considerada uma análise não linear geométrica com comportamento linear do material. Na Figura 7 apresentam-se as tensões a meio da espessura do adesivo normalizadas pela tensão de corte média na junta. O referencial usado apresenta o eixo x orientado na direcção longitudinal da junta, o eixo y segundo a espessura da mesma e o eixo z ao longo da largura, sendo que $x=0$ corresponde ao início da zona de sobreposição, $y=0$ corresponde ao plano médio do adesivo e $z=0$ corresponde ao eixo de simetria longitudinal da junta. As componentes normais e a tensão de corte τ_{xy} apresentam valores mais elevados junto ao plano médio da junta ($z=0,176$ mm), ao passo que as tensões de corte τ_{xz} e τ_{yz} apresentam valores máximos junto ao bordo livre ($z=12,324$ mm). Constata-se assim a existência de distribuição tridimensional do campo das tensões. Na Figura 8 apresenta-se a distribuição das tensões na interface adesivo-substrato superior. Para além dos efeitos já referidos, verifica-se ainda que os valores dos picos no final da zona de sobreposição das componentes σ_{yy} e τ_{xy} são substancialmente superiores aos respectivos valores no plano médio do adesivo. Este efeito de concentração de tensões é indiciador de que estas interfaces são zonas críticas no que concerne à iniciação do dano.

4.2. Previsão da resistência da junta

Considerando os resultados obtidos pela análise tensorial e o tipo de rotura experimentalmente verificada, foi considerado um modelo com possibilidade de propagação de dano, constituído por elementos finitos tridimensionais de 20 e 27 nós e elementos finitos de interface compatíveis [16]. Os elementos de interface, que incluem o modelo de dano progressivo em modo misto, são colocados entre os substratos e o adesivo (ver Fig. 9), de modo a simular o tipo de rotura experimentalmente observada (ver Fig. 5).

Foram realizadas dois tipos de análises considerando comportamento elástico e elastoplástico dos materiais. As respectivas curvas força-deslocamento são comparadas com a curva experimental na Fig. 10. Constata-se que a curva correspondente ao comportamento elastoplástico apresenta melhor concordância relativamente aos resultados experimentais. Na Tabela 3 regista-se a comparação para a carga máxima sustentada pela junta durante o processo de rotura. Cada resultado experimental corresponde a uma média de 5 ensaios. Verifica-se que para um comprimento de sobreposição de 12,5 mm, o modelo linear elástico é concordante com os resultados experimentais. Todavia, para comprimentos de sobreposição superiores os erros não são desprezáveis, o que se explica pela plastificação dos materiais que não é contabilizada.

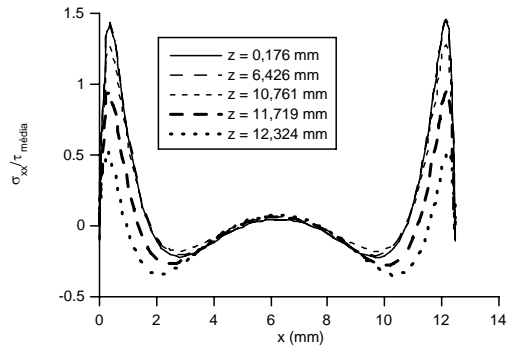


Fig. 7. (a) Distribuição da tensão σ_{xx} normalizada no plano médio do adesivo.

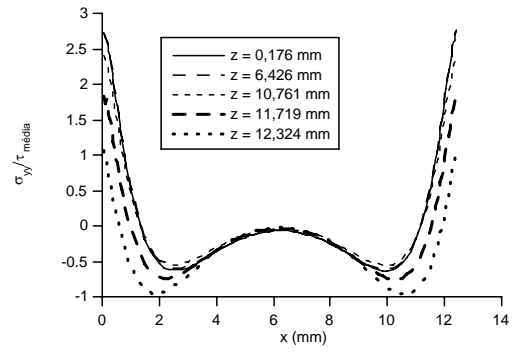


Fig. 7. (b) Distribuição da tensão σ_{yy} normalizada no plano médio do adesivo.

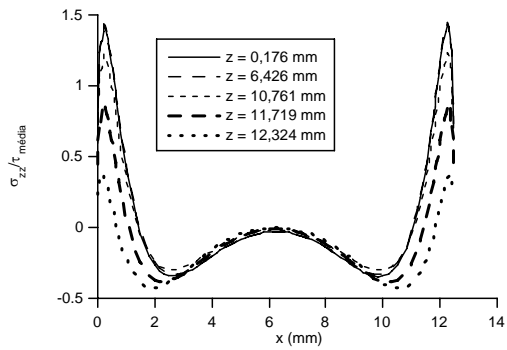


Fig. 7. (c) Distribuição da tensão σ_{zz} normalizada no plano médio do adesivo.

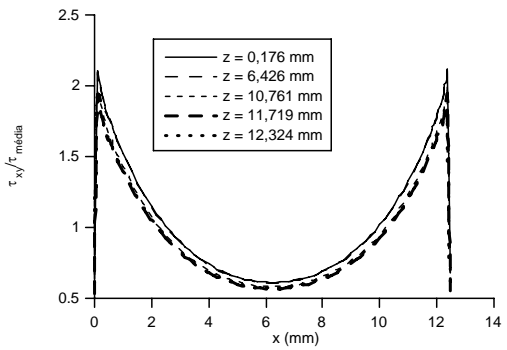


Fig. 7. (d) Distribuição da tensão τ_{xy} normalizada no plano médio do adesivo.

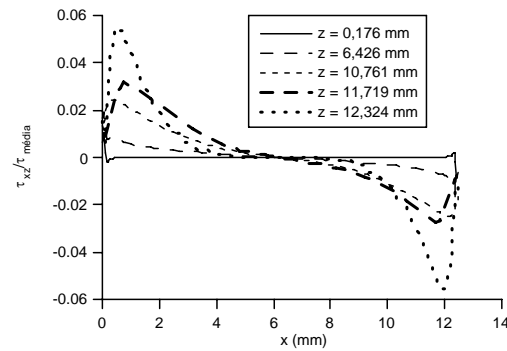


Fig. 7. (e) Distribuição da tensão τ_{xz} normalizada no plano médio do adesivo.

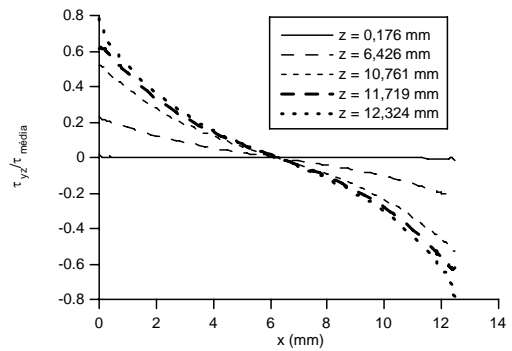


Fig. 7. (f) Distribuição da tensão τ_{yz} normalizada no plano médio do adesivo.

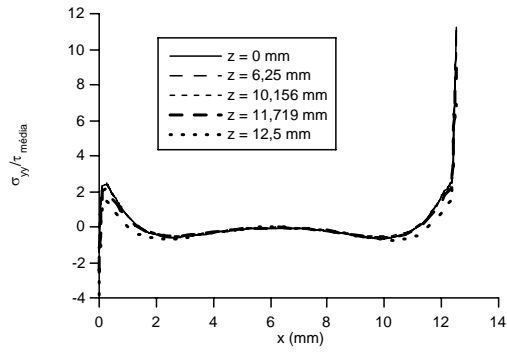


Fig. 8. (a) Distribuição da tensão σ_{yy} normalizada na interface $y = 0,125$ mm.

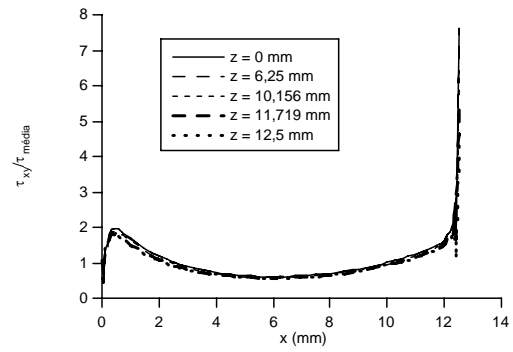


Fig. 8. (b) Distribuição da tensão τ_{xy} normalizada na interface $y = 0,125$ mm.

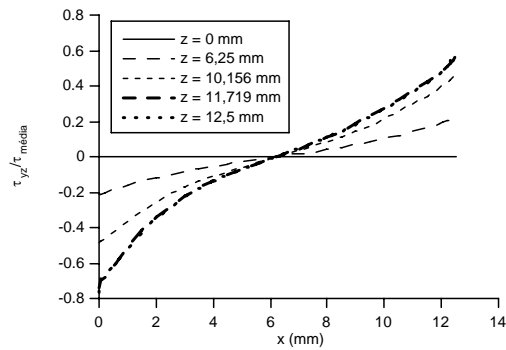


Fig. 8. (c) Distribuição da tensão τ_{yz} normalizada na interface $y = 0,125$ mm.

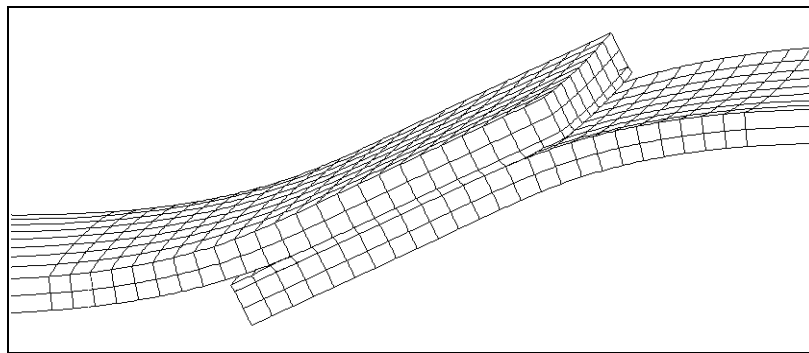


Fig. 9. Propagação de dano.

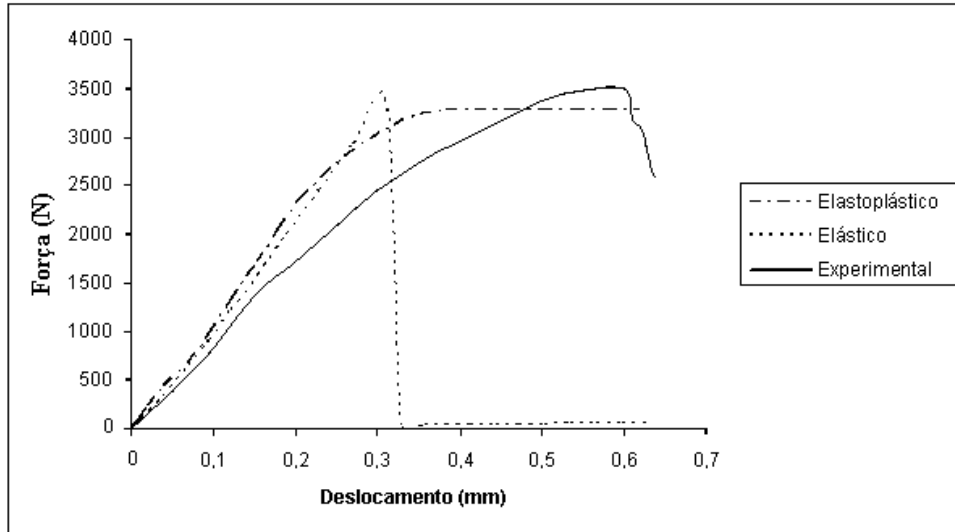


Fig. 10. Curvas força-deslocamento obtidas numérica e experimentalmente para uma junta de 12,5 mm de sobreposição.

Tabela 3. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para a carga máxima sustentada pela junta.

		Comprimento de sobreposição (mm)		
		12,5	16	20
Experimental	P_{\max} (N)	3390	3544	4218
Numérico	P_{\max} (N)	3385	3850	4641
Materiais Elásticos	Erro %	0,25	8,0	10,0
Numérico	P_{\max} (N)	3287	3550	4014
Mat. Elastoplásticos	Erro %	3,1	0,17	4,8

De facto, os maiores comprimentos de sobreposição (16 mm e 20 mm) implicam cargas de rotura mais elevadas, que por sua vez induzem maiores tensões normais que contribuem para a plastificação dos componentes. Este problema de sobredimensionamento das cargas de rotura, não surge no modelo elastoplástico que globalmente apresenta boa concordância com os resultados experimentais.

5. CONCLUSÕES

As juntas coladas adquirem cada vez maior importância em aplicações estruturais em diversas indústrias. Nesse contexto, a existência de modelos que permitam prever com rigor a sua resistência e comportamento mecânico, adquire especial relevo. Assim, numa primeira fase, foi apresentado um

modelo numérico com elementos finitos tridimensionais e de interface que permitiu a obtenção do perfil das tensões. Verificou-se a existência de um estado tridimensional de tensões e de concentração de tensões na extremidade da zona de sobreposição nas interfaces substrato-adesivo, o que indicia que as interfaces são zonas críticas no que respeita à iniciação do dano. A análise da resistência das juntas inclui um modelo de dano progressivo. Realizaram-se análises linear elástica e elastoplástica e foram considerados três comprimentos de sobreposição diferentes em juntas de sobreposição simples.

Os resultados obtidos permitem concluir que o modelo retrata com rigor o modo de rotura e apresenta um bom desempenho no que respeita à previsão da carga de rotura das juntas, nomeadamente quando se utiliza o modelo elastoplástico.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Goland, E. Reissner, "The stresses in cemented joints", *Journal of Applied Mechanics*, **66**, A17-A27 (1944)
- [2] G. R. Wooley, D. R. Carver, "Stress concentration factors for bonded lap joints", *Journal of Aircraft*, **8**, 817-820 (1971)
- [3] T. R. Guess, R. E. Allred, F. P. Gerstle, "Comparison of lap shear test specimens", *Journal of Testing and Evaluation*, **5**, 84-93 (1977)
- [4] N. L. Harrison, W. J. Harrison, "The stresses in an adhesive layer", *Journal of Adhesion*, **3**, 195-212 (1972)
- [5] R. D. Adams, N. A. Peppiatt, "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints", *Journal of Strain Analysis*, **9**, 185-196 (1974)
- [6] P. A. Cooper, J. W. Sawyer, "A critical examination of stresses in an elastic single lap joint". Report No. TP-1507, NASA, (1979)
- [7] M. Y. Tsai, J. Morton, "An evaluation of analytical and numerical solutions to the single-lap joint", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 31, pp. 2537-2563, 1994.
- [8] P. C. Pandey, S. Narasimhan, "Three-dimensional nonlinear analysis of adhesively bonded lap joints considering viscoplasticity in adhesives", *Computers and Structures*, **79**, 769-783 (2001)
- [9] R. H. Andruet, D. A. Dillard, S. M. Holzer, "Two- and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **21**, 17-34 (2001)
- [10] S. C. Pradhan, N. G. R. Iyengar, N. N. Kishore, "Parametric Study of Interfacial Debonding in Adhesively Bonded Composite Joints", *Composite Structures*, **29**, 119-125 (1994)
- [11] S. C. Pradhan, N. G. R. Iyengar, N. N. Kishore, "Finite Element Analysis of Crack Growth in Adhesively Bonded Joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **15**, 33-41, (1995)
- [12] A. E. Bogdanovich, S. P. Yushmanov, "3-D Progressive Failure Analysis of Bonded Composite Joints", *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, **2**, 1616-1626, (1998)
- [13] M. F. S. F. de Moura, J. P. M. Gonçalves, A. T. Marques, P. M. S. T. de Castro, "Modeling Compression Failure After Low Velocity Impact on Laminated Composites Using Interface Elements", *Journal of Composite Materials*, **31**, 1462-1479, (1997)
- [14] M. F. S. F. de Moura, J. P. M. Gonçalves, A. T. Marques, P. M. S. T. de Castro, "Elemento Finito Isoparamétrico de Interface Para Problemas Tridimensionais", *Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, **12**, 447-466, (1996)
- [15] J. P. M. Gonçalves, M. F. S. F. de Moura, P. M. S. T. de Castro, "A Three-Dimensional Finite Element Model for Stress Analysis of Adhesive Joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **22**, 357-365, (2002)
- [16] J. P. M. Gonçalves, M. F. S. F. de Moura, A. G. Magalhães, P. M. S. T. de Castro. Application of Interface Finite Elements to Three-Dimensional Failure Analysis of Adhesive Joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **26**, 479-486 (2002)

MODELLING THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF BONDED JOINTS USING INTERFACE FINITE ELEMENTS

Abstract – The objective of this work is to develop numerical models for the accurate prediction of the mechanical behaviour of adhesive joints. The model is based on using interface finite elements for three-dimensional problems that are placed between the adhesive and the adherends. Firstly, stress fields are evaluated in order to identify critical regions leading to damage initiation. Later, a damage model for predicting damage initiation and propagation is also included. Experimental tests were performed in single-lap adhesive joints of aluminium/epoxy. The numerical simulation to predict joint strength was performed, considering elastic and elastoplastic analyses and three overlap lengths. Good agreement was obtained between the elastoplastic analysis and the experimental results.

Keywords – Bonded joints, interface finite elements, mechanical behavior.

