

# MODELO DE INTERFACE PARA A REPRESENTAÇÃO DE JUNTAS COLADAS

**Silvio DE BARROS**

Bolsista da CAPES

[silvio.debarros@meca.uvsq.fr](mailto:silvio.debarros@meca.uvsq.fr)

Université de Versaille LEMA/CNRS

45, Av. Des Etats Unis 78035 Versailles Cedex

**Laurent CHAMPANEY**

[laurent.champaney@meca.uvsq.fr](mailto:laurent.champaney@meca.uvsq.fr)

Université de Versaille LEMA/CNRS

45, Av. Des Etats Unis 78035 Versailles Cedex

**Resumo.** Esse artigo propõe um modelo de interface para representar o comportamento de juntas coladas. Este modelo baseado na mecânica do dano foi usado anteriormente para representar a degradação interlaminar em materiais compósitos. O envelhecimento do adesivo é considerado através da introdução de um parâmetro inicial de dano. Ensaios de flexão do tipo (ENF) em colagens alumínio/epóxi são utilizados para mostrar comparações entre resultados experimentais e numéricos.

**Palavras-chave:** colagem, dano, interface.

## 1. INTRODUÇÃO

A colagem é cada vez empregada na industria tanto para união de peças metálicas quanto para matérias compósitos. Contudo, os mecanismos de adesão assim como os mecanismos de envelhecimento na colagem ainda são pouco conhecidos.

Neste trabalho, nós propomos um modelo de interface para a previsão de resistência de colagens baseado na mecânica do dano. Esse modelo, originalmente utilizado para representar a degradação interlaminar nos materiais compósitos (Allix *et al.* (1995)), permite o estudo da degradação da colagem durante toda a fase de carregamento. O envelhecimento da colagem é considerado utilizando-se um valor inicial de dano.

Os parâmetros do modelo são determinados através de ensaios acústicos para verificar as características iniciais da colagem (rigidez e dano inicial) e de ensaios mecânicos (taxa de restituição de energia critica, parâmetros ligados à plasticidade).

O modelo foi implementado num software de elementos finitos industrial e uma parte do trabalho se concentrou no desenvolvimento de técnicas específicas para a resolução de problemas numéricos gerados pela consideração do dano.

Nós apresentamos, para exemplos de colagens entre placas metálicas, os resultados dos ensaios mecânicos de identificação além das simulações numéricas associadas.

## 2. MODELO DE INTERFACE ELÁSTICA COM DANO

Nesse modelo a cola é considerada como um material elástico suscetível ao dano. Utiliza-se avariação da rigidez elástica do material como indicador do dano. A idéia de usar esse indicador vem dos trabalhos de Kachanov (1958) e Rabotnov (1968). A utilização de um indicador desse tipo foi desenvolvida em Lemaitre e Chaboche (1985) para o estudo de materiais metálicos e em Mazars e Pijaudier-Cabot (1989) para o estudo do concreto.

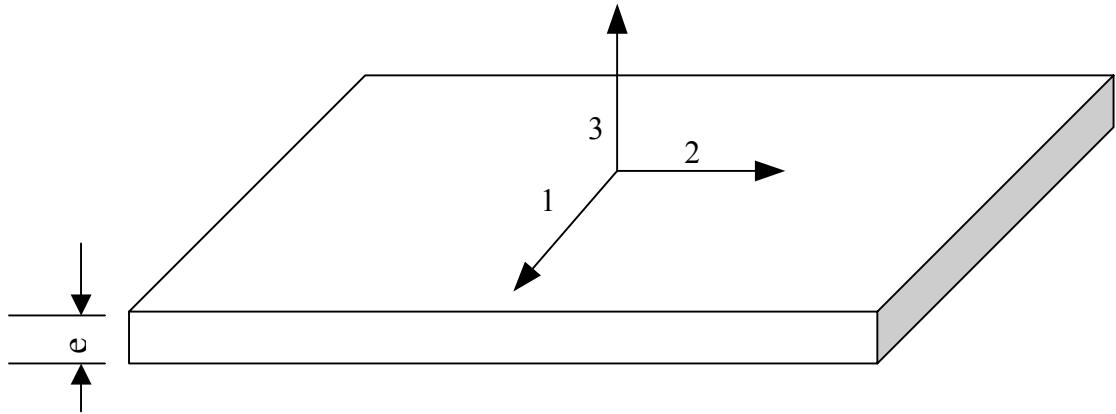


Figura 1. Camada de cola de espessura pequena.

Tendo em conta a fina espessura da camada de adesivo, esta será representada por um modelo de interface, Fig. (1).

Introduzimos as variáveis de dano  $d_i$  para descrever a evolução da rigidez elástica da interface:

$$k_i = k_i^0(1-d_i), \text{ para } i = 1,2,3. \quad (1)$$

Onde  $k_i^0$  são os valores de rigidez iniciais da cola não danificada.

O valor do dano pode variar entre 0 e 1. Um dano igual a 1 representa a ruptura completa da cola.

A relação de comportamento da interface se escreve na base ortotrópica.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{31} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1^0(1-d_1) & 0 & 0 \\ 0 & k_2^0(1-d_2) & 0 \\ 0 & 0 & k_3^0(1-d_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde  $\sigma_{31}$ ,  $\sigma_{32}$  e  $\sigma_{33}$  são as tensões na interface e  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$  são os deslocamentos.

A energia superficial da interface danificada  $Ed$  se escreve:

$$Ed = \frac{1}{2} \left[ \frac{\langle \sigma_{33} \rangle_+^2}{k_3^0(1-d_3)} + \frac{\sigma_{31}^2}{k_1^0(1-d_1)} + \frac{\sigma_{32}^2}{k_2^0(1-d_2)} \right] \quad (3)$$

Não é considerado dano em compressão.

Utilizamos aqui uma lei de evolução do dano dita “isotrópica”, nos supomos que as diferentes variáveis de dano estão fortemente ligadas e governadas por uma taxa de restituição de energia única que se escreve:

$$Y(t) = \sup_{\tau < t} \left[ \left( Yd_3^\alpha + (\gamma_1 Yd_1)^\alpha + (\gamma_2 Yd_2)^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right] \quad (4)$$

onde  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  são parâmetros que relacionam as energias cisalhantes e a energia normal e  $\alpha$  é um outro parâmetro que permite descrever o lugar de ruptura em modo mixto relacionado a mecânica da ruptura.

A lei de evolução do dano é então definida pela escolha de uma função material  $\omega$  tal que:

$$\begin{cases} d_1 = d_2 = d_3 = \omega(Y) \Rightarrow \text{se } d_3 < 1 \\ d_1 = d_2 = d_3 = 1 \text{ senao} \end{cases} \quad (5)$$

A função material  $\omega$  sendo definida como:

$$\omega(Y) = \left[ \frac{n}{n+1} \frac{\langle Y - Y_0 \rangle_+}{(Y_c - Y_0)} \right]^n \quad (6)$$

O parâmetro  $n$  caracteriza a maior ou menor fragilidade da interface, Fig (2).

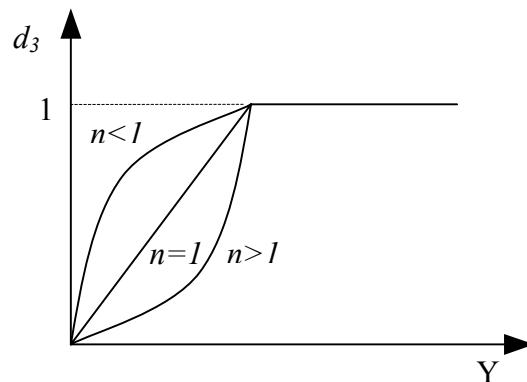


Figura 2. Influência do parâmetro  $n$

$Y_0$  é a energia necessária para fazer avançar a fissura e  $Y_c$  é a energia necessária até a ruptura total, Fig (3).

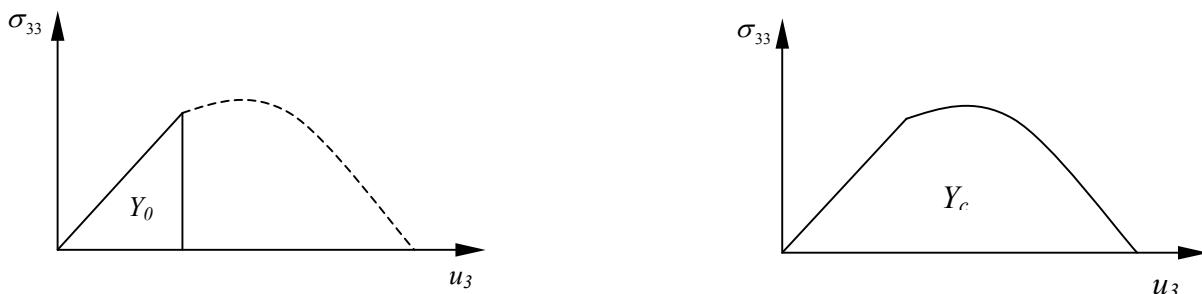


Figura 3. Significado dos parâmetros  $Y_0$  e  $Y_c$

Para melhor representar as condições iniciais da colagem em relação ao dano, é preciso considerar-se a possibilidade de se levar em conta o dano existente antes do carregamento mecânico. Esse dano inicial pode ser associado a defeitos de colagens ou mesmo a um envelhecimento da cola.

O dano inicial pode ser medido através de ensaios acústicos. Os modelos utilizados por De Barros (2003) e por Vlasie (2002) permitem avaliar os valores de rigidez elástica. Comparando-se essa rigidez àquela de uma cola não danificada, pode-se estimar o valor do dano inicial.

### 3. MODELO NUMÉRICO

Esse modelo de interface com dano foi implantado no software industrial de elementos finitos CAST3M. As simulações podem ser feitas através de pilotagem clássica dos deslocamentos ou através de uma pilotagem sobre o avanço da fissura utilizando um método de controle local. Este último foi inspirado nos trabalhos de Alfano e Crisfield (2003).

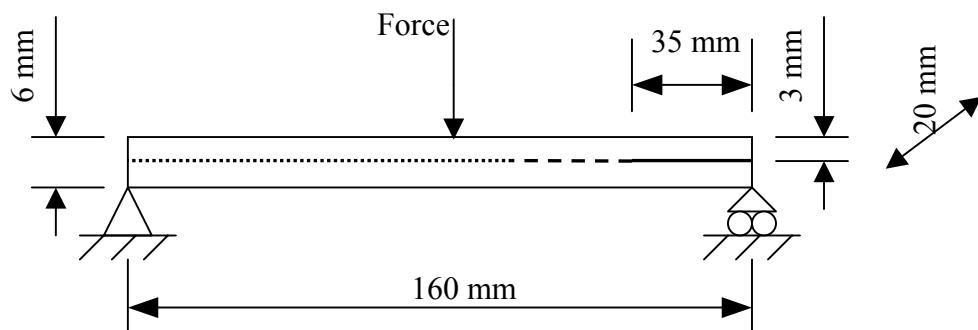


Figura 4. Ensaio ENF

Nosso objetivo é de representar numericamente ensaios mecânicos baseados na propagação de uma fissura inicial. Entre os tipos de ensaios existentes, o ENF foi escolhido porque ele é o mais simples a realizar. A Figura (4) mostra duas placas de alumínio coladas utilizadas nas simulações numéricas e nos ensaios mecânicos. O modelo numérico em 2D do ensaio ENF descrito na Fig (4) foi feito com elementos a oito nos em deformação plana.

A existência de uma fissura pode levar a uma diferença de valor do dano inicial ao longo da camada de cola. O dano inicial observado na região mais próxima da frente da fissura pode ser maior que o observado no resto da camada. Nesse modelo foi imposto que o dano na região próxima à frente da fissura varia de maneira linear. A Figura (5) ilustra um dano inicial igual a 0,2 na interface colada que sofre uma variação, na região próxima a fissura, até o valor máximo 1.

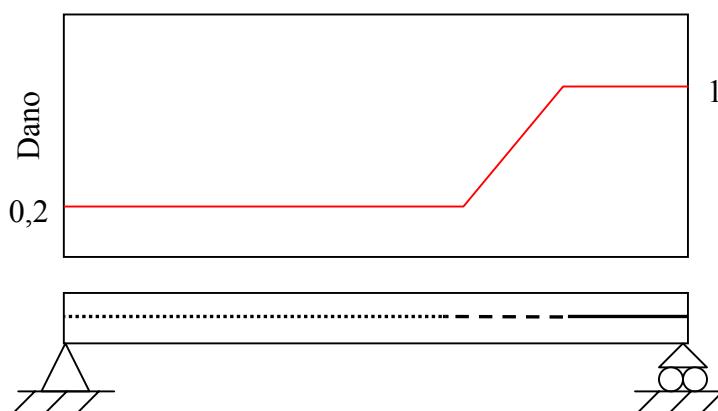


Figura 5. Exemplo de perfil do dano inicial

O modelo numérico foi testado para vários valores de dano inicial. No gráfico da Fig. (6) nos podemos ver a influência do dano inicial no comportamento do modelo. À medida que nos aumentamos o valor do dano, a energia para fazer propagar a fissura diminui. O deslocamento medido é o do ponto de aplicação da força, nesse caso, o ponto médio entre os apoios.

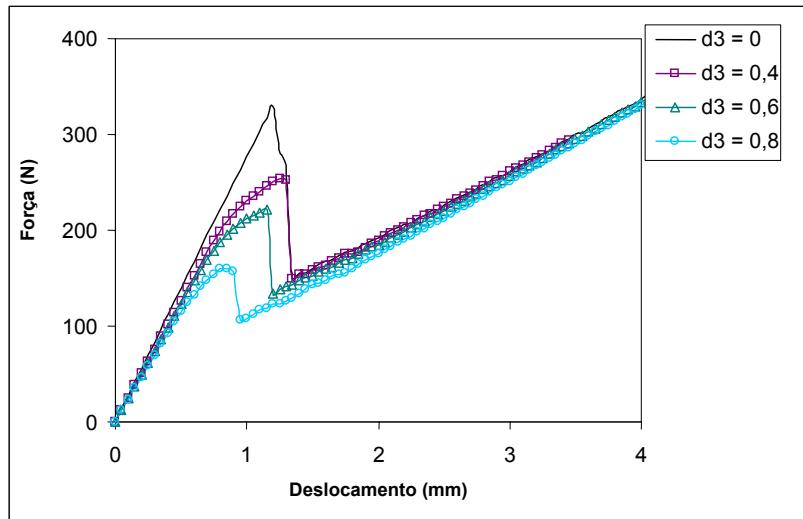


Figura 6. Comportamento do modelo

#### 4. ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios foram realizados no *Laboratoire de Physico-Chimie des Polymères* - LPCP da ESPCI (*Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de Paris*).

Uma maquina de tração/compressão, modelo MTS 816 (Material Test System), com uma capacidade de carga de 7500 Kgf foi utilizada. As placas de alumínio com 20 mm de largura foram coladas com uma cola epóxi fabrica no próprio laboratório. A Figura (7) mostra o tipo de montagem utilizado para um ensaio ENF.

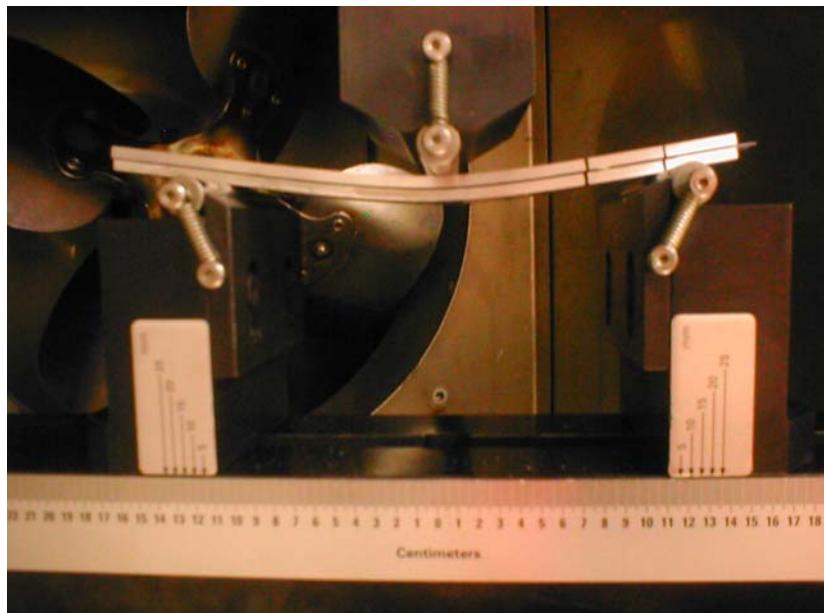


Figura 7. Ensaio ENF

Os primeiros resultados desse tipo de ensaio são mostrados na Fig (8).

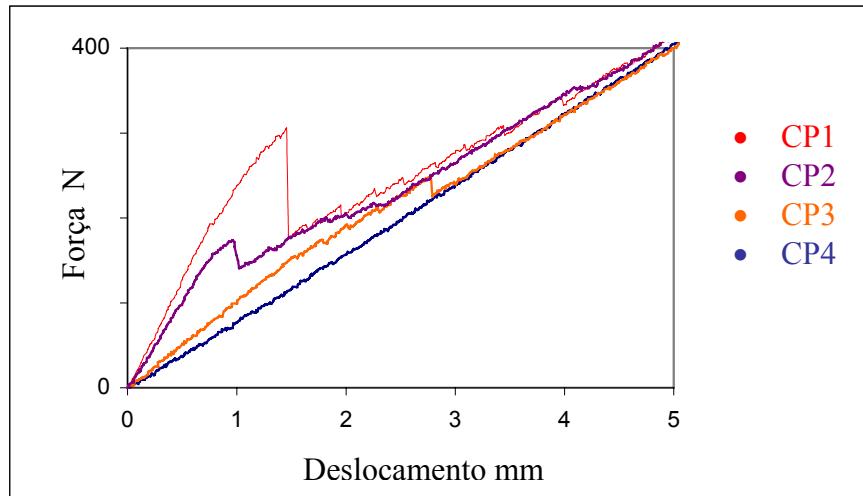


Figura 8. Resultados dos ensaios mecânicos

Nessa primeira série de ensaios, foram encontradas dificuldades para reproduzir uma boa qualidade na colagem. Apenas os corpos de prova CP1 e CP2 forneceram resultados como desejado. O corpo de prova CP3 foi levado a maquina de ensaios já praticamente descolado e o CP4 foi ensaiado literalmente descolado. Tratamentos na superfície das placas de alumínios e mudanças na composição da cola estão sendo estudados a fim de melhorar a qualidade da colagem em futuras series de ensaios.

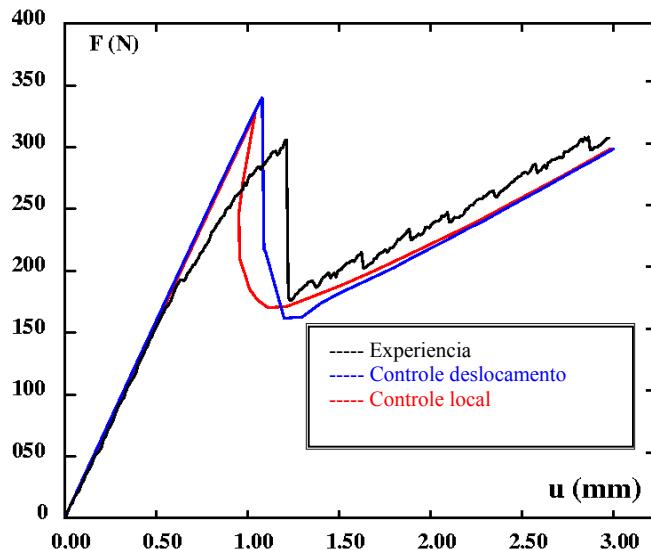


Figura 9. Comparação de resultados

A Figura (9) apresenta a comparação dos resultados de um ensaio e da simulação numérica. As duas curvas simuladas correspondem aos dois tipos de pilotagem utilizados. Os dois resultados são similares, porém a simulação obtida com uma pilotagem do deslocamento é mais difícil e pode apresentar problemas de convergência. Esses problemas são explicados pela forte descontinuidade na força observada no momento do avanço da fissura.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um modelo de interface elástica com dano para a simulação do comportamento de uniões coladas. Esse modelo é baseado na mecânica do dano.

Ó dano inicial presente no nosso modelo permite uma avaliação do envelhecimento da camada de cola.

Os primeiros resultados são apresentados aqui. A validação do modelo necessita de mais resultados experimentais que serão obtidos com novas séries de ensaios mecânicos.

Outras formas de não-linearidade são visíveis nos resultados dos ensaios. Eles poderão ser posteriormente incluídos no modelo considerando-se os efeitos da plasticidade (Champaney e Valoroso (2003)).

## 6. REFERÊNCIAS

- Alfano, G., & Crisfield, M.A., 2003 "Solution strategies for the delamination analysis based on a combination of local-control arc-length and line searches". International Journal for Numerical Methods in Engineering, 58:999-1048, 2003.

Allix, O., Ladev  ze, P., & Corigliano, A., 1995 "Damage analysis of interlaminar fracture specimens". Composite Structures 31, pp 61-74.

Champaney, L., Valoroso, N., 2003 "Delamination analysis of adhesively bounded joints using damaging viscoplastic interfaces", VII International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS), Barcelone, Espagne.

De Barros, S., Gama, A.L., Rousseau, M., Collet, B., 2003 "Propagation of Lamb waves and SH waves in bonded plates", COBEM 2003, 17° International Congress of Mechanical Engineering S  o Paulo – Brasil, 10-14 November.

Kachanov, L.M., 1958 "Time of the rupture process under creep conditions. Interlaminar response of composite materials". Pagano N.J., Ed., pp.111-160.

Lema  tre, J., & Chaboche, J-L., 1985 M  canique des mat  riaux solides, Paris, Dunod

Mazars, J., & Pijaudier-Cabot, G., 1989 "Continuum damage theory : application to concrete". J. of Engineering Mechanics, ASCE, 115, pp. 345-365.

Rabotnov, Y.N., 1968 "Creep rupture". Proc. XII Int. Conf. Appl. Mech., Springer, Stanford.

Vlasie, V., Rousseau, M., 2002 "Rheological modelisation of a structural bond: influence of inertia" Forum Acusticum Sevilla 16-20 settembre

# INTERFACE MODEL TO SIMULATE THE BEHAVIOR OF ADHESIVE BONDED JOINTS

Silvio DE BARROS Bolsista da CAPES

SILVIO DE BARROS, Boisista  
sylvio.debarros@meca.uvsq.fr

Université de Versailles LEMIA/CNRS - 45 Av. Des Etats Unis 78035 Versailles Cedex - France

Laurent CHAMPANEY

laurent.champagne@meca.uvsq.fr

Université de Versailles LEMA/CNRS - 45, Av. Des Etats Unis 78035 Versailles Cedex - France

**Abstract.** This paper propose a damage interface model to simulate the behavior of adhesive bonded joints. This model was used before to represent the interlaminar degradation in composite materials and is based on damage mechanics. The ageing of the adhesive is taken into account by introducing an initial damage parameter. Considering the End Notched Flexure (ENF) tests of aluminium/epoxy specimens comparisons between experimental and numerical results are presented.

**Keywords.** bonded joints, damage, interface, ENF tests.