

ANÁLISE DE PLACAS DE VIDRO LAMINADO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Lara de Andrade Kunhen dos Santos

larakandrade@hotmail.com

Centro Universitário Christus (Unichristus)

Av. Dom Luís, 911, 60160-230, Ceará/Fortaleza, Brasil

Carlos David Rodrigues Melo

cdavid@crateus.ufc.br

Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus de Crateús

Rodovia BR-226, km 03, 63700-000, Ceará/Crateús, Brasil

Resumo. A utilização do vidro laminado na construção civil tem crescido muito nos últimos anos, principalmente devido ao avanço das pesquisas e ao aumento da compreensão sobre seu comportamento mecânico, apesar do seu uso em estruturas ainda ser considerado recente. O vidro laminado é composto de lâminas de vidro intercaladas com camadas intermediárias (*interlayers*) poliméricas. Esta estrutura faz com o que o compósito adquira maior resistência quando comparado ao vidro monolítico. A *interlayer* geralmente é composta por um material viscoelástico não-linear. Este trabalho tem como objetivo analisar a influência do tipo de *interlayer* na rigidez de placas de vidro laminado à flexão. Os modelos desenvolvidos são baseados na norma EN 1288-3:2000, que determina a resistência à flexão do vidro por meio de um ensaio de quatro pontos. São estudadas as três camadas intermediárias mais comuns comercialmente, PVB (Polivinil Butiral), EVA (Etileno Vinil Acetato) e DuPont's SentryGlas (SG). As placas são modeladas no programa comercial de elementos finitos ABAQUS e os modelos validados a partir de ensaios disponíveis na literatura científica. São utilizados modelos constitutivos lineares elásticos para os elementos de vidro e as *interlayers*. Uma análise paramétrica é realizada considerando a variação da espessura e o material das camadas intermediárias. Os resultados mostram que o modelo numérico desenvolvido apresenta uma boa aproximação ao resultado experimental. A partir dos modelos estudados, mostra-se que o PVB e o EVA diminuem a rigidez do conjunto conforme o aumento de suas espessuras. Entretanto, o SG segue o comportamento contrário, aumentando a rigidez do conjunto.

Palavras-chave: Vidro laminado, Elementos finitos, Placas, Estruturas.

1 Introdução

Por muitos anos, o vidro teve sua utilização principalmente ligada a questões estéticas, não sendo utilizado para fins estruturais devido ao seu comportamento frágil. A falta de ductilidade do vidro, imprescindível em aplicações estruturais, foi um dos principais motivos para que ocorresse restrição quanto à sua utilização em fins estruturais. Entretanto, com a chegada do vidro laminado, essa visão tem mudado e sua utilização tem sido abrangida para diversos fins, inclusive estrutural.

O vidro laminado é composto de duas ou mais placas de vidro, unidas por uma camada intermediária polimérica. Em caso de ruptura, a camada polimérica evita a dispersão dos estilhaços de vidro, diminuindo consideravelmente o risco de ferimentos graves e contribuindo para o ganho de ductilidade na estrutura. O compósito formado de vidro e polímero possui uma maior resistência quando comparado ao vidro comum, devido à utilização de materiais que possuem diferentes propriedades (Aşik e Tezcan [1]).

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do tipo de polímero da *interlayer* na rigidez de placas de vidro laminado à flexão. Os modelos desenvolvidos são baseados na norma EN 1288-3:2000 [2], que determina a resistência à flexão do vidro por meio de um ensaio de quatro pontos. O comportamento de três camadas intermediárias, PVB (Polivinil Butiral), EVA (Etileno Vinil Acetato) e DuPont's SentryGlas (SG), são estudados e comparados. As placas são modeladas no programa ABAQUS, onde os modelos são validados a partir de ensaios disponíveis na literatura científica. Para os elementos de vidro e as *interlayers*, são considerados modelos constitutivos lineares elásticos. É realizada uma análise paramétrica considerando a variação da espessura e o material das camadas intermediárias.

2 Vidro laminado

O vidro laminado possui duas ou mais lâminas de vidro, sendo intercaladas com materiais viscoelásticos, como PVB (Polivinil Butiral), EVA (Etileno Vinil Acetato) e SentryGlas (SG). Estes materiais possuem o mesmo índice de refração do vidro, possibilitando a transparência entre as camadas. A utilização em conjunto de vidro e polímero faz com que este material compósito adquira novas características mecânicas, quando comparado ao vidro comum, apresentando ótima capacidade de absorção de impactos no momento de ruptura. Dessa forma, o vidro laminado pode ser considerado um material mais seguro em relação ao vidro comum, pois em caso de ruptura, os fragmentos permanecem na camada polimérica, diminuindo as chances de acidentes (Akter e Khani [3]).

Conforme Liang, Lancaster e Izzuddin [4] o comportamento do vidro monolítico não deve ser igualado ao do vidro laminado, pois possuem comportamentos diferentes. Dessa maneira, necessita-se de um estudo mais aprofundado quanto ao comportamento dos diferentes materiais utilizados no compósito.

O polímero utilizado no vidro laminado é um material viscoelástico não-linear. Devido a tais características do polímero, o cálculo da tensão e deformação do vidro laminado torna-se mais complexo, necessitando de análise numérica (Behr, Minor e Norville [5]; Bennison *et al.* [6]; Louter *et al.* [7]; Galuppi e Royer-Carfagni [8]). A análise numérica possui uma alta precisão em seus resultados para diversas condições de apoio, carregamentos e geometrias, tornando-se uma ferramenta bastante útil no estudo do comportamento do vidro laminado (Foraboschi [9]).

3 Elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica para a resolução de equações diferenciais arbitrárias, em geral de maneira aproximada, sendo aplicável para vários fenômenos físicos. Neste método, o contínuo é subdividido em pequenos elementos discretos, onde uma aproximação das variáveis físicas e da geometria são realizadas sobre cada elemento. Dessa forma,

determinando-se o comportamento de todos os elementos, estes são reunidos por algumas regras específicas, para que então, seja obtida uma solução para toda a região (Akter e Khani [3]).

O programa de elementos finitos ABAQUS utiliza dois tipos de elementos de casca, *conventional* e *continuum*, como apresentado na Figura 1. Os elementos *conventional* são S4R, S3R, SAX1, entre outros e os elementos *continuum* são SC6R e SC8R. O elemento *continuum shell* assemelha-se a um sólido tridimensional contínuo, porém seu comportamento constitutivo e cinemático é similar a um elemento *conventional shell* (Hibbit, Karlsson e Sorensen [10]). Estes elementos facilitam a análise de problemas de contato.

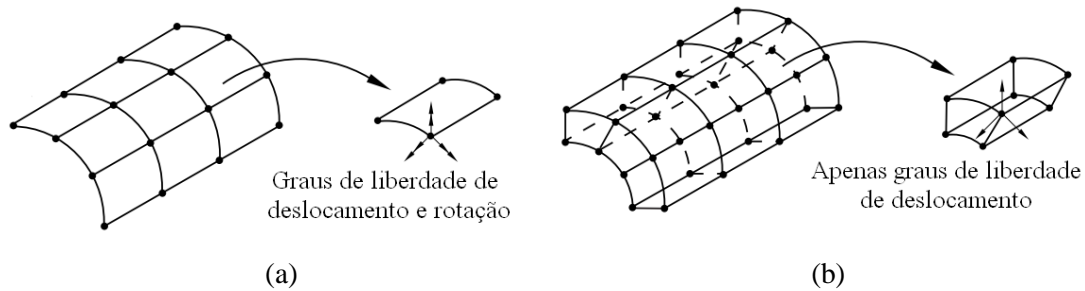


Figura 1. Elemento finito *shell*: (a) *conventional* e (b) *continuum*

4 Resultados e discussões

Neste trabalho, a validação do modelo numérico inicial foi realizada a partir de um ensaio experimental de flexão desenvolvido por Molnár *et al.* [11], baseado na norma EN 1288-3:2000 [2], referente ao ensaio de flexão a quatro pontos. O material utilizado para a *interlayer* do modelo foi o PVB. Para este modelo, foram realizados dois tipos de análise estática, uma considerando a não-linearidade geométrica e outra considerando a linearidade geométrica. Para as duas análises, foram utilizados modelos constitutivos lineares elásticos para o vidro e para a *interlayer*.

As dimensões consideradas foram de $L_b = 200$ mm, $a = 1000$ mm e $b = 360$ mm, baseadas na norma EN 1288-3:2000 [2]; $t_g = 10$ mm e $t_i = 1,52$ mm, baseados no ensaio experimental de Molnár *et al.* [11], como apresentado na Figura 2.

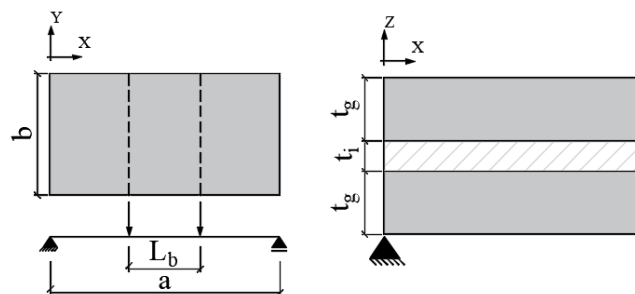


Figura 2. Modelo geométrico utilizado

Neste modelo, foi utilizado o elemento SC8R, do tipo *continuum shell*. O elemento SC8R é um hexaedro de oito nós, contendo quatro nós em sua face superior e quatro na inferior.

Os resultados da comparação do modelo com o ensaio estão apresentados na Figura 3. Os resultados mostram que modelo numérico tem uma boa aproximação do resultado experimental, tanto para o caso linear quanto para o caso não-linear. Observa-se que a influência da não linearidade geométrica na região pré-ruptura do vidro, é desprezível. Por isso, para o estudo paramétrico, optou-se por desprezar a não-linearidade. A ruptura é realizada primeiramente no vidro, mas não há perda de rigidez total devido à presença da *interlayer*. Para este modelo, o limite de ruptura não foi considerado.

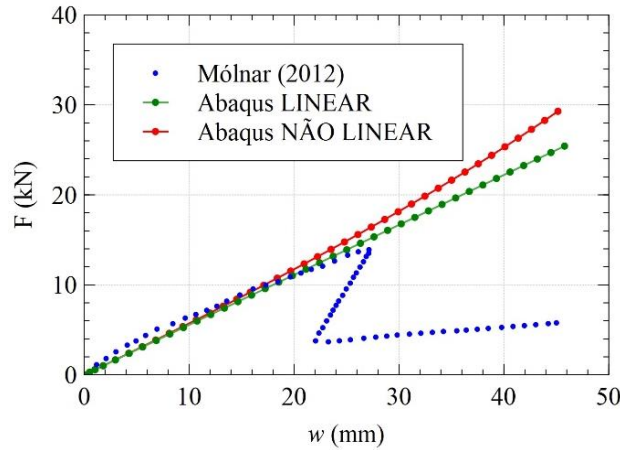


Figura 3. Validação do modelo numérico

Após a validação do modelo numérico inicial, foi realizado um estudo paramétrico. Considerou-se a variação de dois parâmetros, a espessura e o tipo de material da *interlayer*. A análise realizada foi do tipo linear estática. Assim como no exemplo de validação, foram utilizados modelos constitutivos lineares elásticos. Considerou-se o comportamento inicial do ensaio até o trecho de ruptura do vidro (ponto crítico).

No estudo paramétrico, foram utilizados três tipos de *interlayers* (PVB, EVA e SG) e três espessuras para cada tipo de material: 0,38 mm, 0,76 mm e 1,52 mm. As propriedades dos materiais nos modelos foram baseadas em Molnár *et al.* [11], para o PVB; Sable *et al.* [12] para o EVA; Akter e Khani [3] para o SentryGlas (SG). As propriedades utilizadas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades dos materiais utilizadas

Material	E (MPa)	ν
PVB	9,87	0,45
EVA	28	0,45
SG	135	0,49

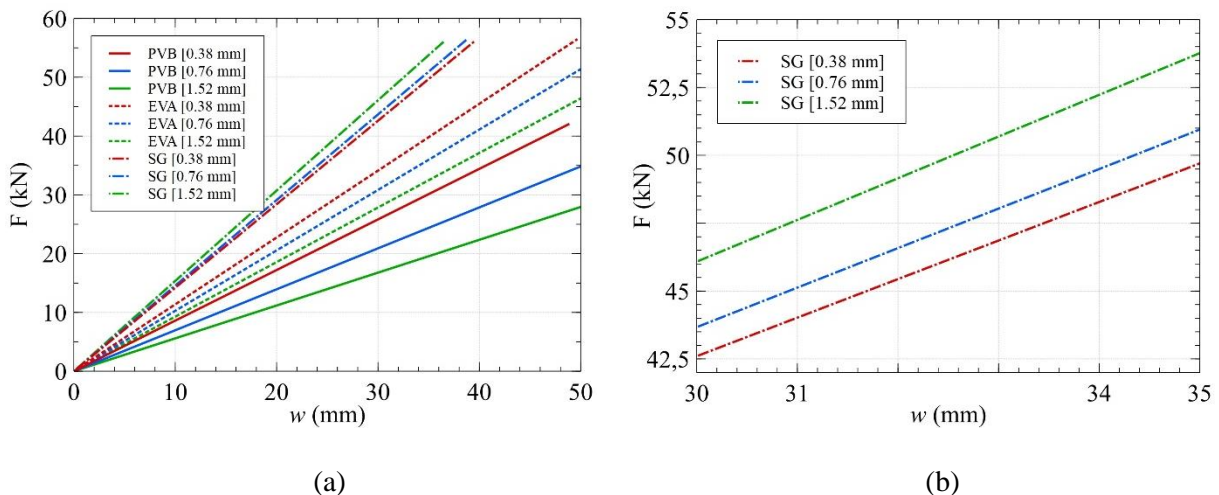


Figura 4. Estudo paramétrico: (a) PVB, EVA e SG e (b) SG

A partir dos resultados experimentais de Molnár *et al.* [11], utilizando placas de vidro com diferentes espessuras de PVB submetidas à flexão, mostrou-se que a rigidez do conjunto vidro-polímero diminui com o aumento da espessura de PVB. O módulo de elasticidade do PVB é consideravelmente

menor que do vidro, e com o aumento de sua espessura, há uma maior contribuição para a redução da rigidez do conjunto.

Os resultados obtidos através dos modelos numéricos, mostram que o PVB segue o mesmo comportamento demonstrado pelos ensaios experimentais de Molnár *et al.* [11], validando os modelos utilizados. A partir dos resultados numéricos, observa-se que o EVA segue o mesmo padrão de comportamento do PVB, contribuindo para a redução da rigidez do conjunto (Figura 4a). Entretanto, o SG apresenta o comportamento contrário, contribuindo para o aumento da rigidez do conjunto e demonstrando pouca variação em sua rigidez conforme o aumento da sua espessura (Figura 4b). Este comportamento ocorre devido à rigidez elevada do SG.

5 Conclusões

A partir dos modelos estudados, observa-se que o PVB e o EVA contribuem para a redução da rigidez do conjunto vidro-polímero. O SG apresenta o comportamento contrário, contribuindo para o aumento da rigidez do conjunto e demonstrando pouca variação em sua rigidez conforme sua espessura. A contribuição do SG para o aumento da rigidez do conjunto se dá devido à sua rigidez elevada. Para um melhor entendimento do comportamento do SG, trabalhos futuros sobre a influência de sua espessura na rigidez do conjunto vidro-polímero podem ser realizados.

Referências

- [1] M. Z. Aşik e S. Tezcan. A mathematical model for the behavior of laminated glass beams, *Computers and Structures*, 83(21–22), pp. 1742–1753, 2005.
- [2] EN 1288-3:2000, Glass in Building – Determination of the bending strength of glass – Part 3: Test with specimen supported at two points (four-point bending), CEN, Brussels, 2000.
- [3] S. T. Akter e M. S. Khani. Characterisation of laminated glass for structural applications, *Masters' Dissertation*, 2013.
- [4] Y. Liang, F. Lancaster, B. A. Izzuddin. Effective modelling of structural glass with laminated shell elements, *Composite Structures*, Elsevier Ltd, 156, pp. 47–62, 2016.
- [5] R. A. Behr, J. E. Minor, H. S. Norville. Structural behavior of architectural laminated glass, *Journal of Structural Engineering*, 119(1), pp. 202–222, 1993.
- [6] S. J. Bennison, J. G. Sloan, D. F. Kristunas, P. J. Buehler, T. Amos, C. A. Smith. Laminated glass for blast mitigation: Role of interlayer properties, *Glass processing days*, Glaston Finland/GPD, Tampere, 2005.
- [7] C. Louter, J. Belis, F. Bos, D. Callewaert, F. Veer. Experimental investigation of the temperature effect on the structural response of SG-laminated reinforced glass beams, *Engineering Structures*, (32:6), pp. 1590–1599, 2010.
- [8] L. Galuppi e G. Royer-Carfagni. The effective thickness of laminated glass plates, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 7, 2012.
- [9] P. Foraboschi. Analytical model for laminated-glass plate, *Composites Part B: Engineering*, Elsevier Ltd, 43(5), pp. 2094–2106, 2012.
- [10] D. Hibbit, B. Karlsson, P. Sorensen. ABAQUS Standard User's Manual, Inc., Vols. 1, 2 and 3, Version 6.13, 2013.
- [11] G. Molnár, L. G. Vigh, G. Stocker, L. Dunai. Finite Element Analysis of Laminated Structural Glass Plates with Polyvinyl Butyral (PVB) Interlayer, *Periodica Polytechnica*, 1: 35–42, 2012.
- [12] L. Sable, E. Skukis, G. Japins, K. Kalnins. Correlation between Numerical and Experimental Tests of Laminated Glass Panels with Visco-Elastic Interlayer, *Procedia Engineering*, 172: 945–52, 2017.