



INTERAÇÃO GLOBAL-LOCAL EM VIGA PULTRUDADA DE PRFV SUBMETIDA À FLEXÃO SIMPLES

Everton de Souza Vieira

Daniel C. Taissum Cardoso

everton_e12@hotmail.com

dctcardoso@puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ)

Av. Marquês de São Vicente, 225, 22451-900, Gávea, Rio de Janeiro - RJ, Brasil

Janine Domingos Vieira

Janine@vm.uff.br

Universidade Federal Fluminense (UFF-RJ)

Rua Alexandre Moura, 8, 24210-200, Niterói, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Resumo. A utilização de perfis pultrudados de polímero reforçado com fibras de vidro (pPRFV) tem crescido de maneira importante nos últimos anos, principalmente em ambientes agressivos. Sua elevada resistência à corrosão possibilita que a estrutura tenha um tempo de vida útil maior com custos reduzidos de manutenção. A elevada resistência mecânica do material na direção das fibras, equivalente ou superior à do aço, combinada com seu baixo peso específico permite a utilização de perfis leves com paredes finas. Entretanto, seu módulo de elasticidade na direção das fibras dos perfis pultrudados é cerca de 1/8 do módulo do aço. Diante disso, o comportamento e a resistência de elementos de pPRFV são governados pelo estado limite de instabilidade. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da fase inicial de uma pesquisa experimental em andamento sobre o desempenho de vigas de PRFV submetidas à flexão, explorando e discutindo detalhes sobre a interação entre modos global e local e sua influência no comportamento. As propriedades mecânicas relevantes para o problema são reportadas, assim como os resultados experimentais obtidos para uma viga específica. Os resultados são comparados com os obtidos através de análise não-linear utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Palavras-chave: flambagem local, flambagem global, polímero reforçado com fibra de vidro, flexão simples.

1 INTRODUÇÃO

Os perfis de matriz polimérica reforçada com fibras de vidro (pPRFV) possuem um grande potencial de uso na engenharia civil, com diversas vantagens sobre materiais de construção tradicionais. Além de maior resistência à corrosão, o material possui resistências à tração e à compressão equivalentes à do aço, mas com menor peso específico. Assim, elementos esbeltos e com paredes finas acabam sendo utilizados. Por outro lado, seu módulo de elasticidade é cerca de 1/8 do módulo do aço, resultando em problemas de instabilidade.

Tendo em vista, portanto, que o estado limite de instabilidade é fundamental na resistência de elementos estruturais de PRFV, o estudo dos modos de flambagem possíveis e do acoplamento não-linear é fundamental para a compreensão do comportamento. Por se tratar de um material com propriedades ortotrópicas, as formulações existentes em normas de projeto para material isotrópico já não são capazes de apresentar resultados confiáveis, tornando necessária a realização de estudos adicionais com o objetivo de entender como a interação modal pode reduzir a capacidade teórica para a condição perfeita.

Nesse trabalho, os resultados experimentais obtidos para uma viga de PRFV submetida à flexão simples são apresentados. A viga possui cargas críticas dos modos local e global próximas e, portanto, está suscetível a interação modal. Os resultados obtidos experimentalmente são comparados aos obtidos numericamente usando o Método dos Elementos Finitos. Para uma boa correlação, as propriedades mecânicas reais do material obtidas por ensaios de caracterização específicos foram adotadas no modelo numérico. Esse estudo faz parte da etapa inicial de uma pesquisa em andamento na PUC-Rio.

2 FLAMBAGEM LOCAL X GLOBAL

Os problemas de instabilidade em vigas de PRFV submetidas à flexão têm sido investigados por diversos autores ao longo das últimas três décadas. No entanto, as investigações normalmente se restringem aos modos local e global ‘puros’, sem levar em conta a interação modal. Por outro lado, os efeitos do acoplamento entre modos têm sido amplamente estudados em colunas, mostrando que a resistência final é significativamente reduzida com relação à condição perfeita (e.g. Barbero e Tomblin, 1994, Lane e Mottram, 2002, Cardoso et al., 2014).

Barbero et al. (1991) foram, talvez, os primeiros autores a investigarem o problema de flambagem local em vigas pultrudadas de PRFV. Os autores realizaram ensaios de flexão em 3 e 4 pontos em vigas de seção I e tubular quadrada, tendo observado modo de falha predominantemente por flambagem local. Para evitar interação modal, os autores adotaram travamentos laterais nos apoios e no meio do comprimento. Por fim, compararam a carga crítica obtida com previsão teórica, tendo obtido boa concordância. Mais adiante, Bank et al. (1995) apresentaram revisão sobre experimentos voltados para flambagem local em vigas e apresentaram discussão sobre alguns parâmetros que afetam a obtenção da carga crítica, tais como heterogeneidade, anisotropia e não-linearidade. O problema de flambagem local também foi abordado mais recentemente por Correia et al. (2011) e Silva et al. (2011), em artigos complementares voltados respectivamente para a observação experimental e para o

desenvolvimento de um método baseado na teoria de vigas generalizadas para obter a resposta pré e pós-flambagem.

Com relação à flambagem lateral torsional, Mottram (1992) foi um dos primeiros autores a explorar o assunto. Mottram realizou ensaios de flexão em 3 pontos em vigas com rotação restringida nos apoios e carregamento aplicado no topo da viga. O autor obteve boa correlação entre as cargas críticas experimentais e aquelas obtidas pelo método dos elementos finitos. Ensaios de flambagem lateral também foram realizados por Davalos e Qiao (1997), ainda levando em consideração aplicação de carga no topo da viga. As dificuldades experimentais associadas à consideração do acompanhamento da carga e do ponto de aplicação da mesma foram recentemente discutidas em séries de artigos de Nguyen et al. (2013, 2014, 2015).

Barbero e Raftoyiannis (1994) mostraram, através de análises numéricas, que a interação entre os modos de flambagem lateral torsional (global) e local pode acarretar em redução significativa de resistência. Ainda através de análises numéricas, Laudieiro et al. (2013) discutiram modos de falha para diferentes esbeltezes, reconhecendo a importância da interação modal em vigas de esbelteza intermediária. Por fim, Vieira et al. (2017) reportaram os resultados de um estudo experimental voltado para a investigação de vigas submetidas à flexão simples. Ensaios de flexão de 4 pontos foram realizados em vigas com diferentes seções transversais e comprimentos livres. Os autores mostraram que a interação modal é importante e que pode conduzir a reduções significativas de resistência com relação às previsões teóricas feitas para vigas perfeitas.

A relevância do presente trabalho, portanto, reside no impacto que o acoplamento entre modos pode ter na calibração de equações de resistência que vêm sendo propostas nas normas de projeto em desenvolvimento, tais como a ASCE (2010) e EUR 27666 (2016).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Caracterização Mecânica

A primeira etapa do programa experimental consistiu em obter as propriedades elásticas do material estudado. O perfil analisado é composto por fibras do tipo E-Glass imersas em matriz polimérica éster vinílica. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas ISO e ASTM, com corpos de prova extraídos da seção transversal estudada, apresentada na Figura 1. A Figura 2 ilustra os ensaios realizados, enquanto a Tabela 1 apresenta um resumo das propriedades médias obtidas.

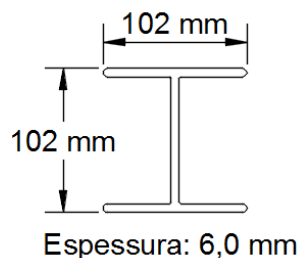


Figura 1. Seção transversal estudada.

Tabela 1. Propriedades elásticas do perfil analisado

Propriedade	Norma utilizada	Valor médio (MPa)
$E_{(flexão)}$	EN ISO 14125:1998	18640
$E_{(tração)}$	EN ISO ISO 527-4:1997	29500
G	D5379/D5379M - 12	3500

E = módulo de elasticidade; G = módulo de cisalhamento

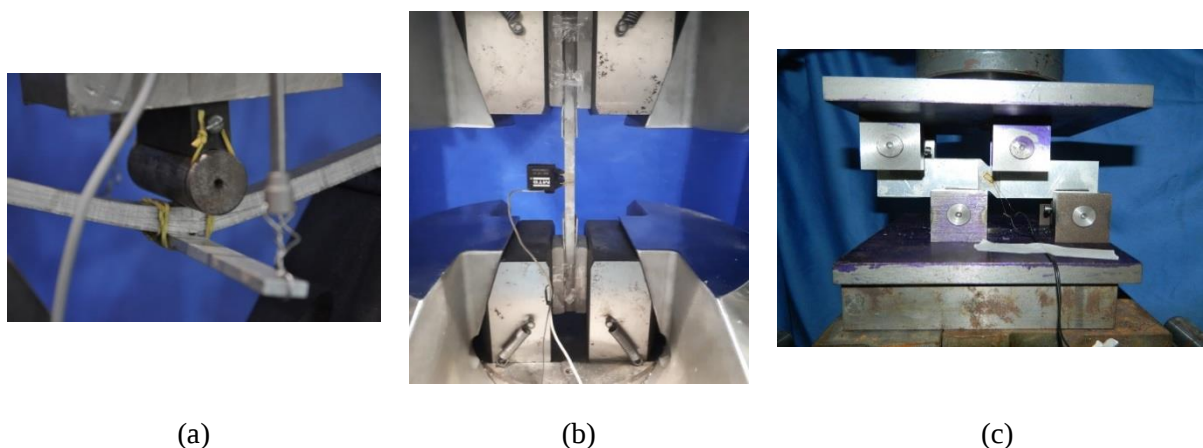


Figura 2. Ensaios de caracterização realizados: a) flexão; b) tração; c) cisalhamento.

3.2 Ensaio de Viga

Para o ensaio estrutural, foi adotada viga comprimento de 1200 mm e distância entre apoios de 1100 mm. Esquema de carregamento de flexão por 4 pontos foi considerado, com distância de 280 mm entre pontos de aplicação de carga. As únicas restrições laterais foram posicionadas a uma distância de 205 mm de cada apoio. Os elementos metálicos foram revestidos com teflon para evitar transferência de carga por atrito. Para a instrumentação dos ensaios, extensômetros elétricos de resistência foram posicionados no meio do vão, nas faces superior e inferior, junto a uma das pontas da mesa comprimida. Um transdutor de deslocamento também foi posicionado no meio do vão para monitoramento das deflexões da viga. O ensaio foi realizado até a ruptura, com uma taxa de carregamento de 0.5 mm/min. A Figura 3 mostra o setup utilizado.

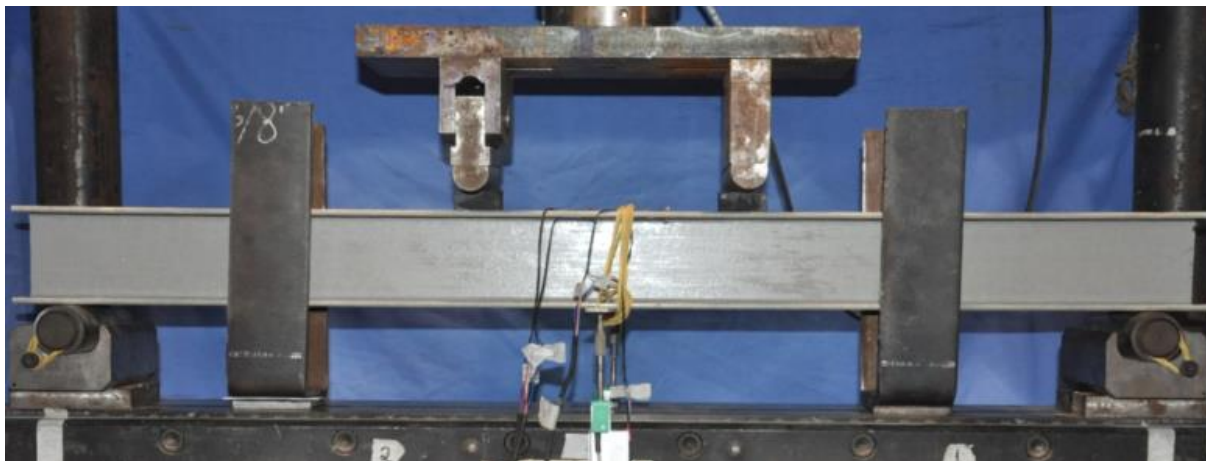


Figura 3. Setup adotado para o ensaio de flexão de 4 pontos.

A Figura 4a mostra a clara ocorrência de flambagem local na mesa superior, enquanto a Figura 4b ilustra a simultânea deflexão lateral da viga. O modo de falha, portanto, pode ser caracterizado pela interação entre os modos local e global. Na Figura 5 é apresentado um gráfico do momento fletor *versus* a curvatura adimensional, que é a diferença entre as deformações medidas no meio do vão de aplicação do carregamento, na face superior e a face inferior na ponta da mesa comprimida. Comparando o momento experimental correspondente à bifurcação do equilíbrio com o obtido por análise linear de flambagem pelo método dos elementos finitos (ver item 3.3), é possível concluir que há redução significativa na capacidade.



(a)



(b)

Figura 4. Resultados experimentais: a) meia-ondas de flambagem local; b) deflexão lateral.

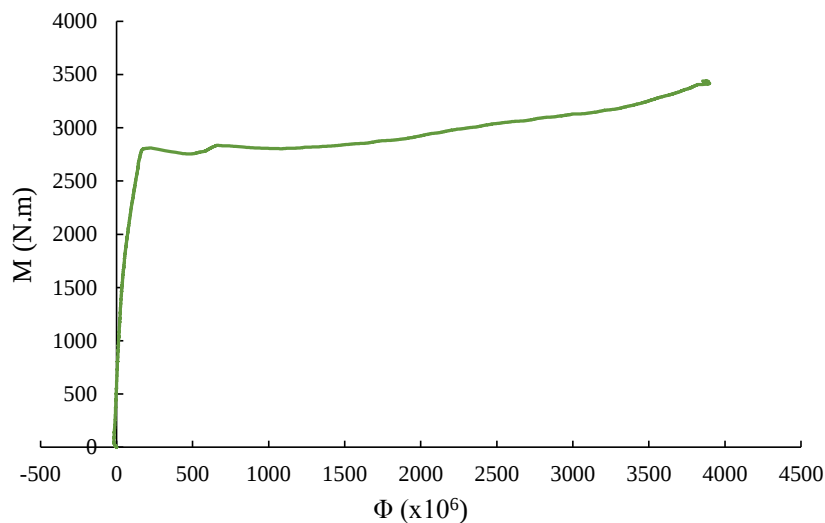


Figura 5. Gráfico momento fletor x curvatura adimensional na placa.

3.3 Modelo no MEF

Para efeito de comparação, a viga analisada foi modelada em elementos finitos, utilizando o software Abaqus 6.13-1. Após estudos preliminares de convergência, foram adotados 480 elementos do tipo shell S8R5, com integração reduzida, 5 graus de liberdade por nó e com razão de aspecto de 1:1. Para simular as condições de apoio, as translações nas 3 direções (X, Y e Z) foram restringidas no apoio da esquerda, enquanto translações apenas nas direções X e Y foram adotadas no apoio da direita. Nos pontos de travamento intermediário foram consideradas restrições apenas na direção X. A Figura 6 ilustra o modelo, as condições de contorno e o sistema de referência adotados.

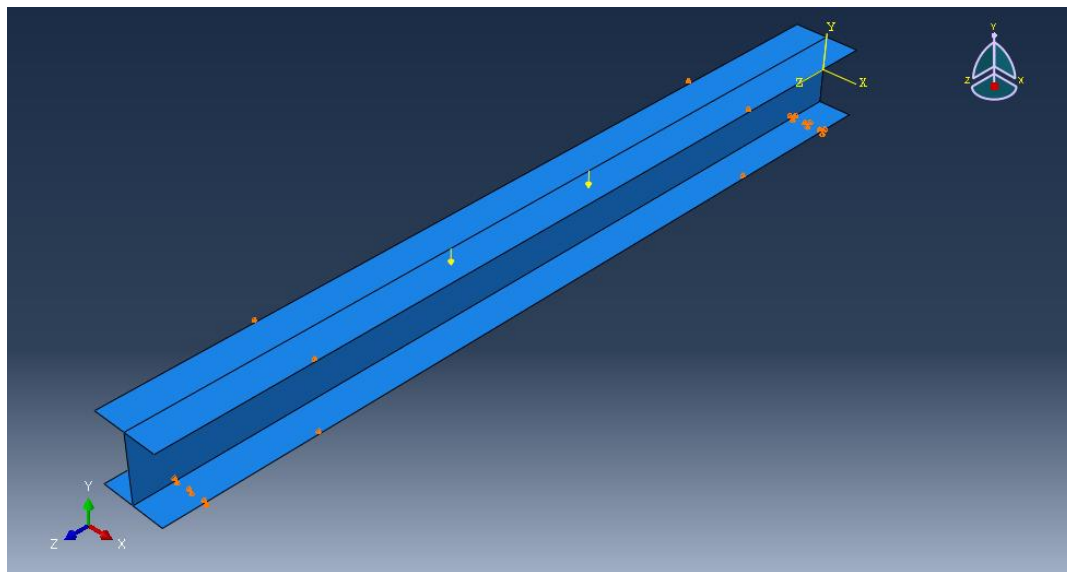
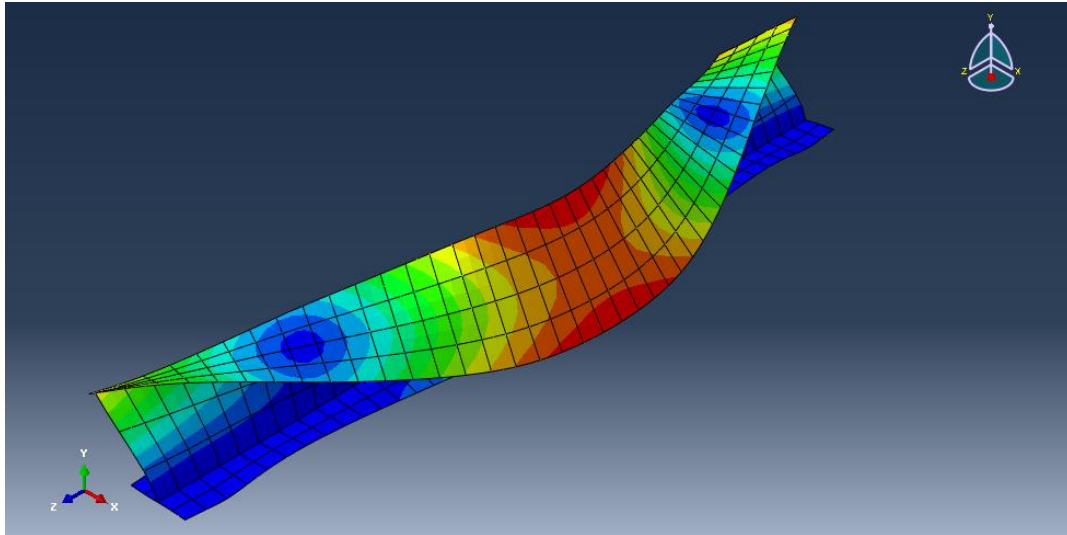
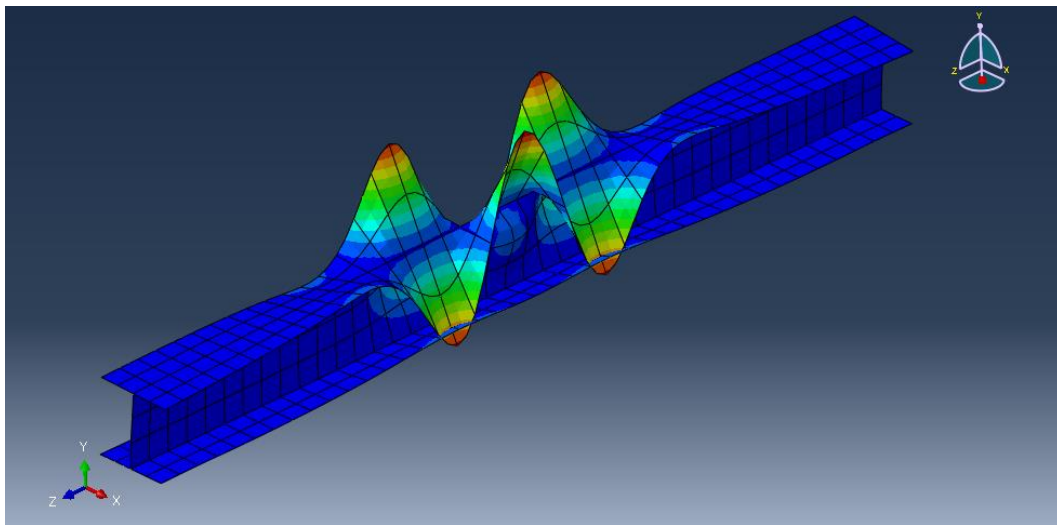


Figura 6. Modelo, condições de contorno e sistema de referência.

Em um primeiro momento, foi realizada análise linear de flambagem. As propriedades elásticas adotadas são as informadas na Tabela 1. Além disso, foi considerado coeficiente de Poisson igual a 0,32. As Figuras 7a e 7b mostram os primeiros modos global e local obtidos. Para esses modos, os momentos críticos obtidos foram, respectivamente, de 4756 e 6981 N.m.



(a)



(b)

Figura 7. Modos de flambagem: a) global; b) local.

Em uma segunda etapa, foram realizadas análises não-lineares combinando os dois modos supracitados. Foram consideradas as seguintes imperfeições para cada modo: 3, 6 e 9 mm. A Figura 8 mostra um gráfico do momento fletor *versus* a deflexão da ponta da mesa

para as imperfeições consideradas. É possível perceber que a interação modal reduz consideravelmente a capacidade e que a imperfeição geométrica tem papel fundamental no comportamento. O modo de falha típico obtido é ilustrado na Figura 9.

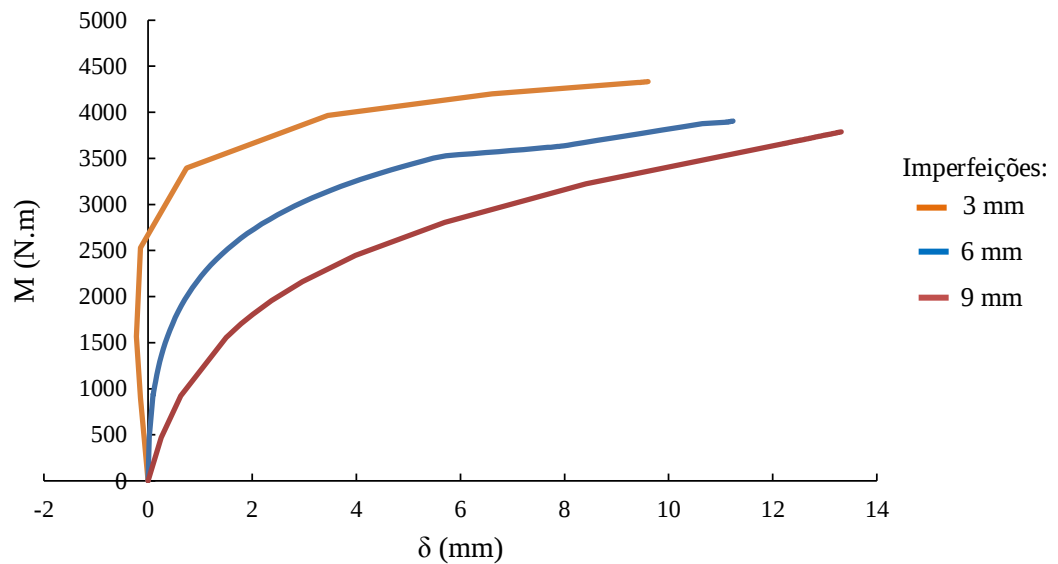


Figura 8. Gráfico momento x deflexão na ponta da mesa.

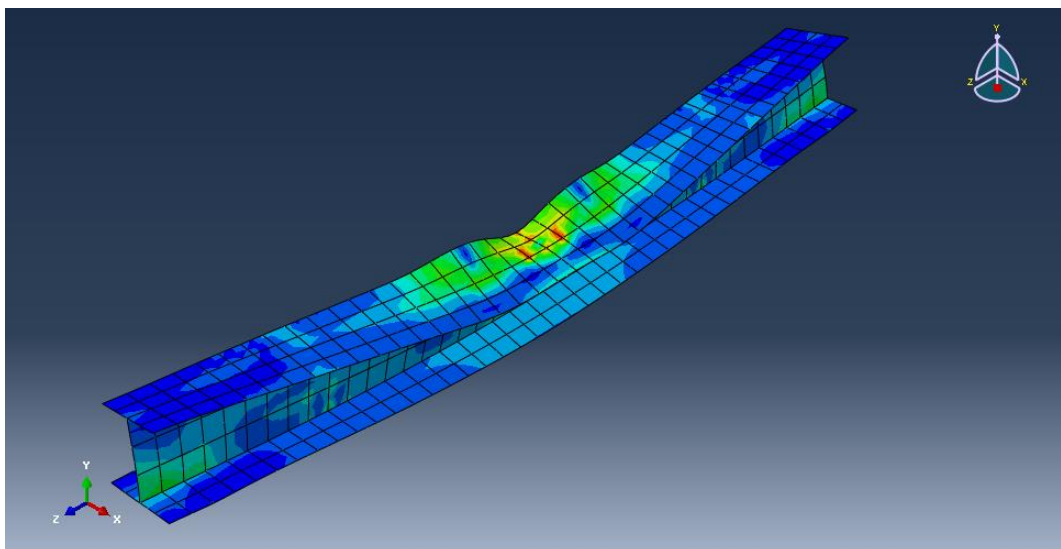


Figura 9. Modo de falha típico obtido através de análise não-linear.

4 CONCLUSÃO

A interação modal ocorre quando o deslocamento lateral não é restringido totalmente. Através de ensaios experimentais em uma viga de perfil H pultrudada e análise numérica através dos métodos dos elementos finitos foi investigada a interação de flambagem local-global submetido à flexão simples. O resultado experimental mostrou que a interação modal diminui o momento crítico comparado com o resultado analítico obtido através do MEF. Os dados numéricos também mostram que a interação modal combinada com o aumento da imperfeição, reduz significativamente o momento crítico e aumento na deflexão. De um modo geral, os resultados mostram que a interação local-global causa perda de desempenho na viga e precisa ser levada em consideração em aplicação estrutural.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à CAPES pelo suporte financeiro. Os autores agradecem à Stratus FRP pelo fornecimento do material.

REFERÊNCIAS

- Bank, Lawrence C. et.al.; Yin, Jiansheng; Nadipeli, Murali – Local bickling of pultruded beams – nonlinearity, anisotropy and inhomogeneity – Construction Building Materials, Vol. 9, No. 6, pp. 325-331, Elsevier, 1995;
- Barbero, Ever J; Raftoyiannis, Ioannis G. – Lateral distortional buckling of pultruded I-beams – Composite Structures 27, pp261-268, Elsevier, 1994;
- Barbero, Ever J; Tomblin, John – A phenomological design equation for FRP columns with interaction between local and global buckling – Thin-walled structures 18, pp. 117 – 131, Elsevier, 1994;
- Barbero, Ever J; Fu, Shin-Ham; Raftoyiannis, Ioannis G. et. al. – Ultimate bending strength of composite beams – Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 3, No. 4, pp. 292-306 ASCE, 1991;
- Cardoso, Daniel C.T.; Harries, Kent A.; Batista, Eduardo de M. – Compressive equation for GFRP square tube columns – Composites: Part B, Elsevier, 2014 ;
- Correia, J. R.; Branco, F. A.; Silva, N.M.F.; Camotim, D.; Silvestre, N. – First-order, buckling and post-buckling behavior of GFRP pultruded beams. Part 1: Experimental study, Computers and Structures 89, Elsevier, 2011;
- Davalos, Julio F.; Qiao, Pizhong – Analitical and experimental study of lateral and distortional buckling of FRP wide-flange beams, Journal of Composites for Construction, Vol. 1, No. 04, pp. 150 -159, ASCE, 1997;
- Lane, A.; Mottram, J. T. – Influence of modal coupling on the buckling of concentrically loaded pultruded fibre-reinforced plastic columns, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and aplications, 133-144, SAGE, 2002;

- Laudiero, Ferdinando; Minghini, Fabio; Nerio, Tullini – Postbuckling failure analysis of pultruded FRP beams under uniform bending, Composites: Part B, Elsevier, 2013;
- Mottran, J.T. - Lateral-torsional buckling of a pultruded I-beam, Composites, Vol. 23, No.2, Butterworth-Heinemann Ltd., 1992;
- Nguyen, T.T.; Chan, T.M.; Mottran, J.T. – Influence of boundary conditions and geometric imperfections on lateral-torsional buckling resistance of a pultruded FRP I-beam by finite element analysis, Composite Structures, Vol. 100, pp. 233-242, ISSN 0263-8223, Elsevier, 2013;
- Nguyen, T.T.; Chan, T.M.; Mottran, J. Toby – Lateral-torsional buckling design for pultruded FRP beams, Composite Structures, Vol. 133, pp. 782-793, Elsevier, 2015;
- Nguyen, T.T.; Chan, T.M.; Mottran, J. Toby – Lateral-torsional buckling resistance by testing for pultruded FRP beams under different loading and displacement boundary conditions, Composites: Part B Engineering, Elsevier – 2014;
- Silva, N.M.F.; Camotim, D.; Silvestre, N.; Correia, J.R.; Branco, F.A. – First-order, buckling and post-buckling behavior of GFRP pultruded beams. Part 2: Numerical simulation, Computers and Structures, Vol. 89, issues 21-22, pp. 2065-2078, Elsevier, 2011
- Vieira, Janine Domingues; Harries, Kent A.; Liu, Tianqiao – Flexural stability of pultruded glass fibre-reinforced polymer I-sections, Structures and Buildings, ICE Publishing, 2017.