

4 Modelo Numérico Computacional

4.1. Introdução

Neste capítulo serão descrito o modelo numérico utilizado, com descrição do elemento finito e as hipóteses nas quais se basearam.

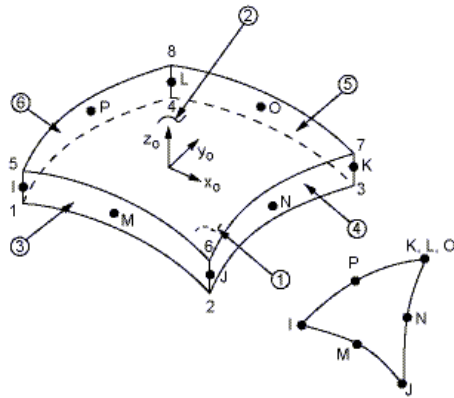
Os modelos numéricos aqui estudados foram elaborados utilizando-se modelos similares aos utilizados por Rodrigues [22], Chung *et al* [6] e Chung e Liu [14]. Foram calibrados através dos dois últimos trabalhos supracitados, utilizando os resultados dos ensaios em laboratório por eles realizados como parâmetro para a modelagem. Esta calibração será descrita no item 4.8 “Validação do Modelo”.

4.2. Elemento Finito

O modelo numérico em elementos finitos no artigo de Chung e Liu [14], foi composto de elementos de casca (*shell*) iso-paramétricos com 8 nós e esquema de integração de $3 \times 3 \times 5$. O esquema iterativo Newton-Raphson foi utilizado. O material é isotrópico não-linear, com curva tensão-deformação bi-linear seguindo critério de escoamento Von-Mises e fluxo plástico associado. Com a não-linearidade geométrica o mecanismo de Vierendeel e formação de rótulas plásticas puderam ser bem estudados.

O comportamento do material é elasto-plástico perfeito, com elementos de casca, utilizando uma a tensão de escoamento de 345 MPa e um módulo de elasticidade igual ao do aço, 200 GPa.

O elemento finito utilizado foi o mesmo dos autores, elemento *SHELL* 281, que é composto por oito nós com seis graus de liberdade por nó, ou seja, translações nas direções X, Y, Z e rotações em relação aos eixos X, Y e Z.



x_0 = Element x-axis if ESYS is not provided.

x = Element x-axis if ESYS is provided.

Figura 4.1 - Elemento SHELL 281, 8-Node Finite Strain Shell [10]

Este elemento é recomendado para análise de estruturas em casca, de espessura fina a moderada [10]. Assim como para aplicações lineares, grandes rotações e/ou grandes tensões não lineares. Mudanças na espessura da casca são levadas em conta para análises não lineares. Trabalha melhor utilizando um esquema de solução Newton-Raphson.

4.3. Malha

Malhas grosseiras e refinadas não demonstraram muitas diferenças na avaliação de resistência das vigas nos trabalhos de Chung *et al* [6] e Chung e Liu [14], chegando a mil elementos como quantidade satisfatória. Após estudo quantitativo, chegou-se a aproximadamente 1580 elementos de casca para as vigas de perfis menores e a 5134 elementos para vigas de perfis maiores e de geometria mais complexa, sendo em média metade locada em volta da abertura, pelo fato da concentração de esforços. Comparações com testes em laboratórios foram satisfatórias como podem ser visualizadas na Figura 4.10 na sequência deste capítulo.

Para modelagem da abertura utilizou-se uma malha mais refinada para demonstrar fielmente as concentrações de cargas. Os passos de modelagem estão ilustrados na Figura 4.2, reconstituição da Viga3A de Chung *et al* [6].

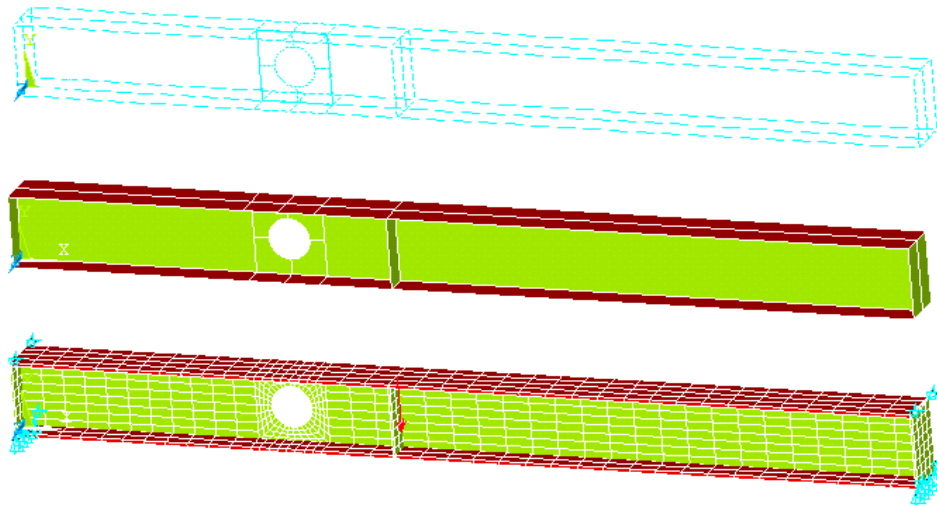


Figura 4.2 - Sequência de modelagem representando linhas, áreas, malha de elementos carregamento

A Figura 4.3 é outro modelo construído, reproduzido a partir das dimensões e características da Viga2A de Chung *et al* [6]. Representa uma malha em elementos finitos, demonstrando o refinamento no local da abertura, aplicação de carga no topo do reforço central e as restrições dos nós.

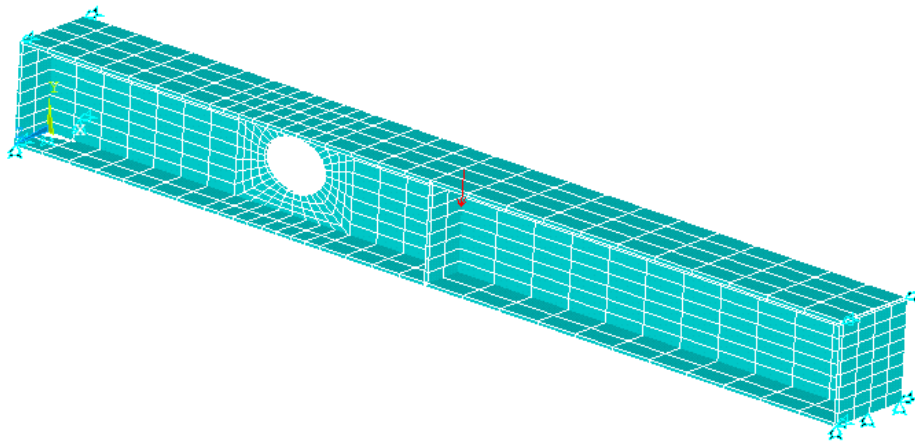


Figura 4.3 - Modelo elaborado para validação do estudo

Estes dois modelos que serviram de calibração são constituídos de aproximadamente 1000 elementos, de acordo com o número encontrado por Chung *et al* [6]. Os perfis aqui estudados possuem dimensões maiores e, portanto, malhas com maior quantidade de elementos.

4.4. Hipóteses Simplificadoras

O modelo elasto-plástico perfeito foi escolhido por representar melhor os resultados encontrados nos ensaios laboratoriais realizados por Chung *et al* [6].

Aplicou-se o deslocamento pontual no nó correspondente a aplicação de carga utilizada pelos autores, no topo da mesa superior. Restringiu-se os movimentos nas direções dos eixos X e Y nos nós dos apoios, assim como os movimentos no eixo Z nos dois nós em cada extremidade superior da viga.

Enrijecedores em forma de chapas foram modelados no local de aplicação do deslocamento a fim de evitar a flambagem prematura da peça.

As simulações foram rodadas somente até aplicação de deslocamento, não houve o descarregamento elástico.

4.5. Software Ansys

Ansys Multiphysics é um conjunto de sistemas computacionais cujo procedimento de análise e cálculo se baseia no Método dos Elementos Finitos. Cada sistema contido no programa Ansys se destina a um determinado tipo de análise. As principais análises que podem ser processadas pelo programa são:

- Mecânica estrutural;
- Transmissão de calor;
- Escoamento interno e externo de fluidos;
- Eletromagnetismo.

Dentre estas, o que mais se destaca é, sem dúvida, a mecânica estrutural. As análises relacionadas à mecânica estrutural que podem ser desenvolvidas com auxílio do Ansys são: estática, modal, fadiga, fluência, harmônica, transiente, espectral e flambagem. Descrição do software retirada de apostila, UERJ-LABBAS [13]. A análise estrutural é a ferramenta de estudo desta dissertação.

4.6. Análise Paramétrica

Através da análise paramétrica, que consiste em “parametrizar” as variáveis do modelo, podendo então realizar diversas simulações incrementando mudanças localizadas. No caso de aberturas na alma de vigas, podemos criar variáveis como distância da abertura ao apoio; excentricidade da abertura; dimensões da própria abertura; dimensões dos reforços, assim como quaisquer outras dimensões que venham a ser interessantes ao estudo.

Após uma calibração do modelo, no intuito de manter a fidelidade às reações reais de uma estrutura, a parametrização possibilita ampliar o leque de variáveis estudadas, poupando tempo e gastos com ensaios laboratoriais.

No trabalho de Chung e Liu [14] a redistribuições dos esforços após escoamento são incorporadas através dos elementos finitos, possibilitando o estudo do mecanismo de Vierendeel. Neste estudo foram examinadas as seguintes variáveis paramétricas:

- Comprimento da abertura, c , em oito formas de aberturas (constantes no anexo A);
- Profundidade da abertura, d_0 , com 0,50h, 0,65h e 0,75h, sendo h a altura da viga;
- Tamanho das vigas utilizando quatro tipos de perfis UB.

E estes autores realizaram 960 compilações não-lineares, com limite de escoamento de 275N/mm^2 . Com objetivo de se comparar a capacidade de cargas das vigas, demonstrando a praticidade da parametrização.

4.7. Geometria dos Modelos de Validação

Seguindo esses detalhamentos supracitados, inicialmente modelaram-se as VIGA2A e VIGA3A do trabalho de Chung *et al* [6], obedecendo também os detalhes geométricos apresentados pela Figura 4.4.

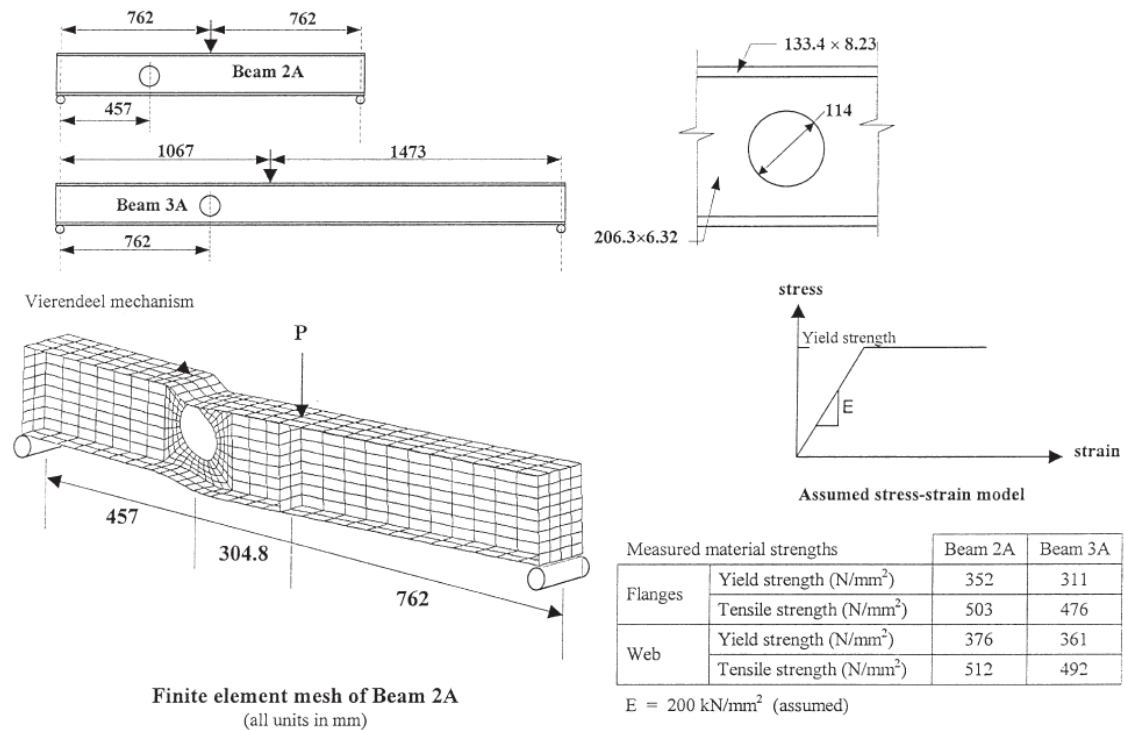


Figura 4.4 - Detalhes da modelagem utilizada por Chung *et al* [6]

As características da localização abertura e aplicação de carga para a VIGA3A estão apresentadas na Figura 4.5:

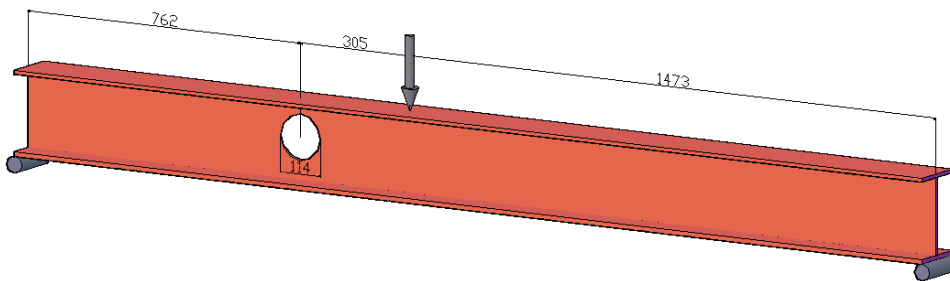


Figura 4.5 - Localização da abertura e da aplicação da carga, Viga3A

A Figura 4.6 ilustra o diagrama de momento fletor desta Viga3A se não houvesse a presença da abertura, em contra partida, ilustram-se as diferenças dos esforços nos pontos A e C, onde o ponto A é o centro da abertura e o ponto C seria o local de esforço equivalente. Nota-se que no ponto A formam-se os “tês” onde os esforços se concentram acima e abaixo da abertura, solicitando mais o aço neste ponto, facilmente comparável com o ponto C de comparação.

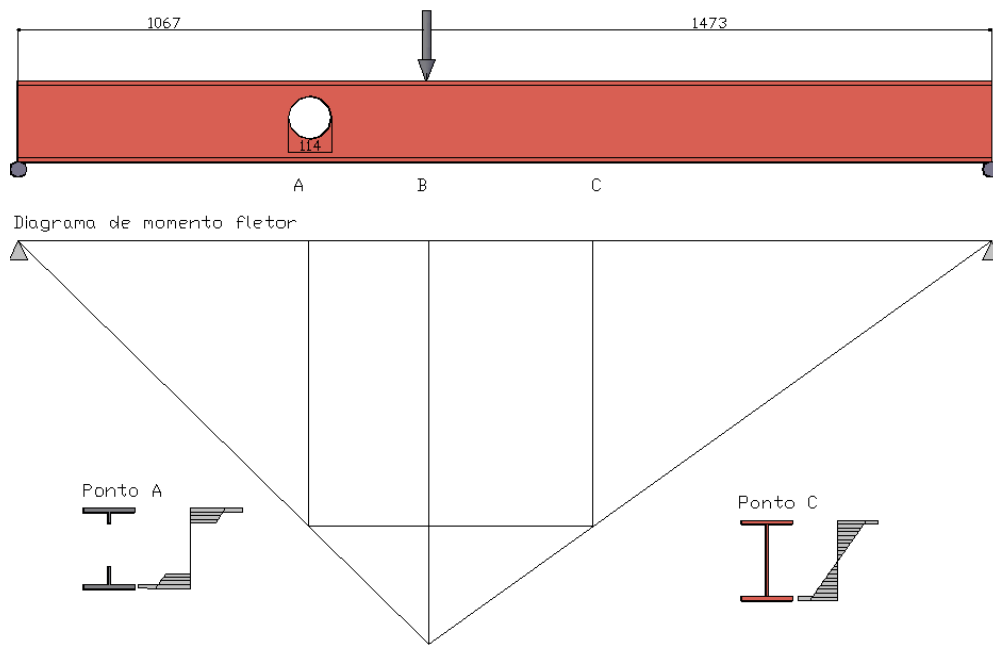


Figura 4.6 - Diagrama de momento fletor e representação de esforços em seções da Viga3A

Após o output do software, tem-se a possibilidade de uma demonstração da solução nodal de tensões pelo critério de Von Mises, como exemplo tem-se a Figura 4.7 abaixo.

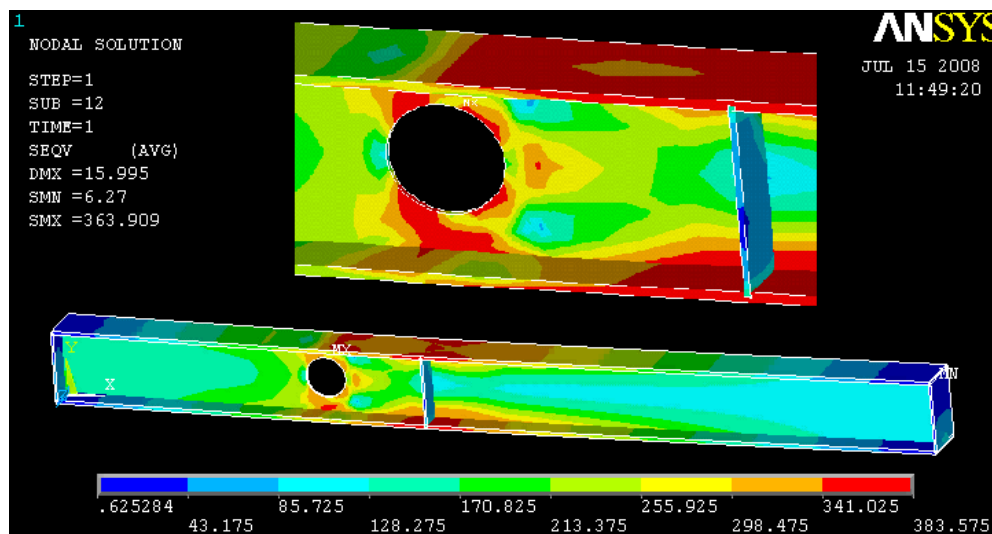


Figura 4.7 - Solução Nodal de Tensões pelo critério de Von Mises, Viga3A

Ilustrando assim a formação das quatro rótulas plásticas previstas na bibliografia, apresentadas na Figura 4.8.

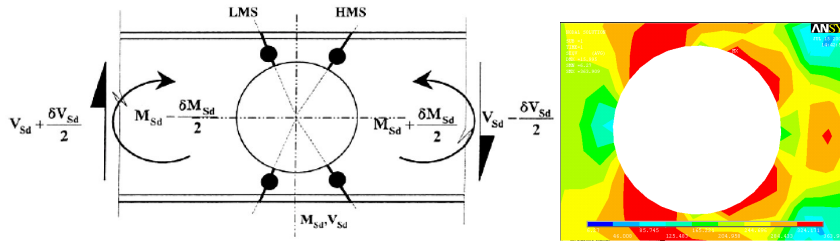


Figura 4.8 - Comparação da formação de rótulas plásticas conforme literatura

Percebe-se a simetria na direção diagonal quando se observam as tensões no entorno dessa abertura circular.

4.8. Validação do Modelo

No intuito de validar a modelagem aqui utilizada comparam-se os resultados obtidos por Chung *et al* [6] aos modelos obtidos pela análise por M.E.F.

O gráfico resultante do experimento de Chung, momento no centro da abertura em kNm *versus* deflexão no meio do vão em mm, esta apresentado na Figura 4.9.

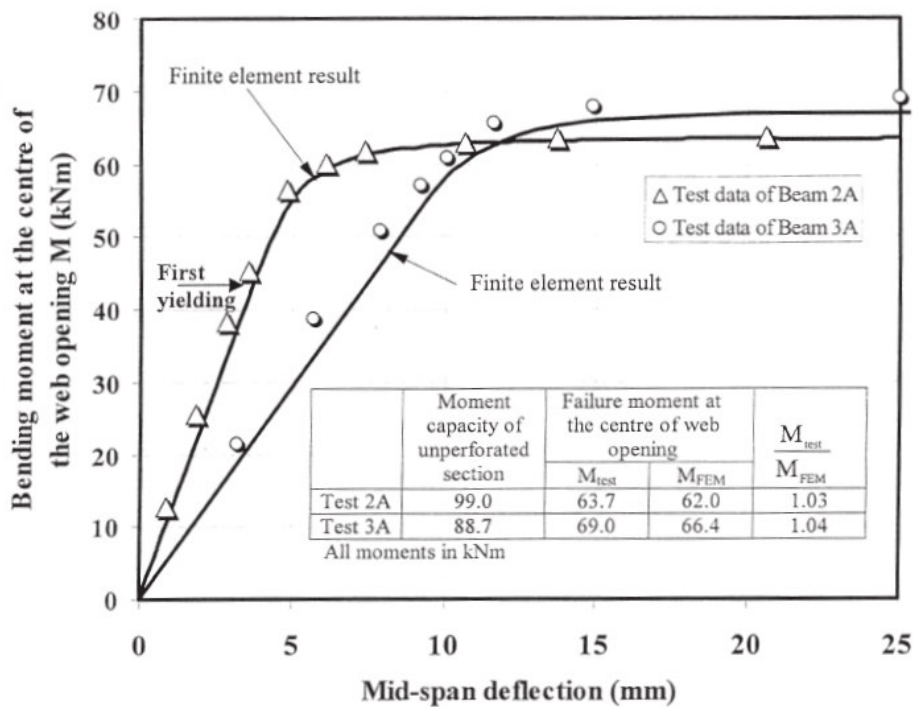


Figura 4.9 - Resultados obtidos por Chung [6] para vigas 2A e 3A

Os resultados dos modelos aqui construídos podem ser visualizados pelo gráfico da Figura 4.10 e da Tabela 4.1, que compara os momentos resistentes dos ensaios de Chung [6] com os dos modelos aqui gerados.

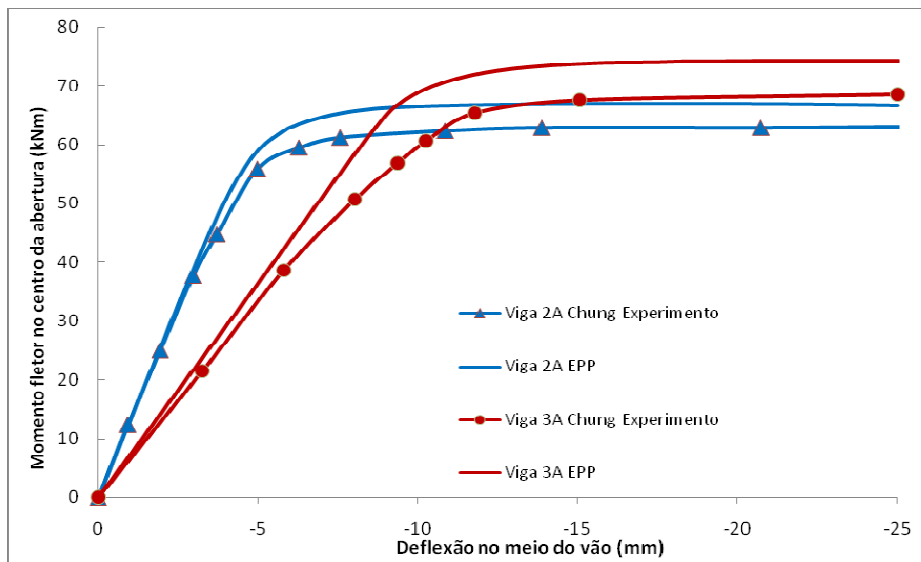


Figura 4.10 - Comparação com os ensaios Chung [6], obtidos através dos modelos criados para VIGA2A e 3A

Supõe-se que as ligeiras diferenças entre as respectivas curvas sejam pelas imperfeições do ensaio laboratorial dos autores e pelo modelo elasto-plástico perfeito aqui adotado. Tal curva de modelagem também foi encontrada por Rodrigues [21], apresentando uma coincidência de pontos quase perfeita, com diferença máxima de 1%.

Tabela 4.1 - Comparativo de resultados com Chung para Vigas 2A e 3A

	Momento resistente da seção não perfurada	Momento de falha no centro da abertura			Mtest[6] / Mfem	Mfem[21] / Mfem
		Mtest[6]	Mfem	Mfem[21]		
Teste 2A	99,0	63.7	66.62	67.3	0.96	1.01
Teste 3A	88,7	69	74.17	74.1	0.93	0.99

Os resultados do modelo possuem uma margem de erro de no máximo 4 a 7% nos testes 2A e 3A respectivamente, quando comparados com os ensaios realizados por Chung [6], e praticamente coincidem com os resultados gerados pelos modelos de Rodrigues [21]. Portanto considera-se que a modelagem aqui apresentada reproduz os ensaios laboratoriais de vigas providas de características semelhantes. Futuros ensaios poderão confirmar a acuidade destes modelos.