

ESTUDO DE MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS PARA O CÁLCULO DE FLECHA EM VIGAS I-JOIST

ANALYTICAL AND NUMERICAL STUDY OF DISPLACEMENT CALCULATION IN I-JOIST BEAMS

Haddan Willian Guimarães⁽¹⁾, Matheus de Godoy Tavares⁽¹⁾, Jorge Luís Nunes de Góes⁽²⁾

(1) Acadêmico em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil

(2) Dr. Prof., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

Endereço de contato: hwguimaraes@gmail.com

Código de identificação: T6-20

Resumo

Os produtos engenheirados de madeira (PEM) são derivados de madeira que aliam baixo peso específico, alta resistência mecânica e controle de qualidade, produzidos através da combinação de vários componentes em um elemento estrutural, utilizando a melhor propriedade de cada elemento. As vigas I-Joist são um exemplo de PEM utilizadas em larga escala na América do Norte, Europa e Japão. A viga I-joist geralmente é constituída por mesas superior e inferior de madeira serrada e alma em OSB. O presente trabalho apresenta uma metodologia para o desenvolvimento de um modelo numérico que avalie o comportamento estrutural com foco nos deslocamentos de vigas I-Joists padrão PRI 60. Foi empregado o software Autodesk *Simulation Mechanical*®, e análise estática em regime elástico linear, com o elemento sólido, materiais ortotrópicos e propriedades elásticas normatizadas de acordo com a ABNT NBR 7190:1997, Wood Handbook [8] e BS EN 12369-1:2001. Os resultados numéricos obtidos mostram que o modelo desenvolvido é adequado, quando comparado com os resultados analíticos.

Palavras chaves: I-Joist; OSB; MEF; simulações

Abstract

The engineered wood products (EWP) are wood-based products that combines low weight, high mechanical capacity and quality control of the product process. These products are made by several wood components that results in one structural element. The EWP employ the better property of each one to manufacture a product that has enhanced properties. The I-Joist beams are an example of these products. The I-Joist beams are composite structural members that are manufactured using sawn or structural composite lumber flanges and structural panel webs. The EWP are common used in North America, Europe and Japan. This paper present a methodology used for the numerical model development that evaluate the displacement of I-Joist beams. The PRI60 standard beam was evaluated through Simulation Mechanical® software. The analysis type was static linear with these characteristics: brick element, orthotropic materials and standard elastic properties provided by ABNT NBR 7190:1997, Wood Handbook [8], and BS EN 12369-1:2001. The numerical results show that the developed numerical model is appropriate when compared with analytical results.

Keywords: I-Joist; OSB; FEM; simulations

1. INTRODUÇÃO

A madeira tem apresentado ao longo do tempo um importante papel na construção civil por ser um material de grande abundância, alta capacidade estrutural, valor estético, propriedades termoacústicas, baixo peso estrutural, baixo consumo energético para sua produção, material de fácil obtenção e de fonte renovável em comparação a outros sistemas construtivos, como o concreto armado. Nos últimos anos, questões de ordem ambientais e sustentáveis implicaram o desenvolvimento dos produtos derivados de madeira com o emprego de madeiras provenientes de florestas plantadas, tornando esses Produtos Engenheirados de Madeira (PEM) ecologicamente corretos, com sólido mercado consumidor. Os PEM são produzidos através da combinação de vários componentes em um elemento estrutural de madeira, caracterizando-se pela utilização da melhor propriedade de cada elemento [1].

As vigas I-Joist são um exemplo de PEM altamente utilizadas na construção civil nos EUA, Canadá, Japão e Europa com diversas normas e diretrizes para dimensionamento como a ASTM D5055:2004 [2] e os modelos de cálculo de Rancourt [3], ligações com outras peças e considerações para com outros elementos estruturais. As vigas I-Joist são caracterizadas por serem elementos estruturais de baixo peso estrutural e são capazes de suportar os mesmos carregamentos que as vigas de seção retangular [4], [5]; todavia, a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 [6] não faz nenhuma referência quanto ao dimensionamento de vigas I-Joist.

Os materiais utilizados nas vigas I-Joist, geralmente madeira maciça e chapa de OSB, possuem comportamento ortotrópico o que dificulta a aplicação simples da teoria de vigas simplificada para materiais isotrópicos. A teoria de vigas de Euler-Bernoulli comumente utilizada em análises estruturais despreza os efeitos da deformação por cisalhamento, mas para o modelo de viga a ser analisado, as deformações por cisalhamento são consideráveis, estando entre 15% a 30% da flecha devido a flexão pura, dependendo da geometria do problema [7], [8].

A APA [8] indica que existem diferenças em projetar uma I-Joist e projetar uma viga em madeira serrada de seção maciça. Na maioria dos casos em uma viga em madeira serrada a flecha devido a deformação por cisalhamento é muito pequena, entretanto para vigas I-Joist de madeira, a parcela da flecha relativa ao cisalhamento é considerável em todos os casos [8].

As vigas I-Joist apresentam deformação por cisalhamento considerável e os modelos de cálculo devem ser capazes de prever tal comportamento como a teoria de vigas de Timoshenko [9]. As simulações numéricas em elementos finitos são mais práticas e menos onerosas que ensaios experimentais, mas para que sejam confiáveis devem ser calibradas e comparadas com modelos analíticos e resultados experimentais. Sendo assim, o trabalho tem por finalidade determinar o modelo numérico mais apropriado para análises elásticas em vigas I-Joist, avaliando também a influência das constantes elásticas nos deslocamentos.

2. METODOLOGIA

O *software* adotado para a análise numérica foi o *Autodesk Simulation Mechanical 2015® Educational Version*. Os itens a seguir apresentam o método utilizado para a obtenção do modelo numérico. Para a obtenção da flecha analítica foi utilizada a equação 1:

$$1. \delta = \int_{est} \frac{M_a M_b}{EI} ds + \int_{est} f_s \frac{V_a V_b}{GA} ds \quad (1)$$

Onde a é a parcela do esforço real, b é a parcela do esforço referente a força virtual, V é a força cortante, M é o momento fletor, E é o módulo de elasticidade longitudinal, A é a área da seção transversal, G é o módulo de elasticidade transversal, I é o momento de inércia da seção transversal, J é o momento polar de inércia e f_s é o fator de forma.

O fator de forma para uma viga I-Joist é dado por [10]:

$$f_s = \left[1 + \frac{3(D_2^2 - D_1^2)D_1}{2D_2^3} \left(\frac{t_2}{t_1} - 1 \right) \right] \frac{4D_2^2}{10r^2} \quad (2)$$

Onde D_1 é a distância do CG até a face interna da mesa, D_2 é a distância do CG até a face externa da mesa, t_1 é a espessura da alma, t_2 é a espessura da mesa e r^2 é o raio de giração da seção transversal.

O cálculo de flecha de vigas I-Joist via Rancourt [3] é feito pelas equações apresentadas na figura 1.

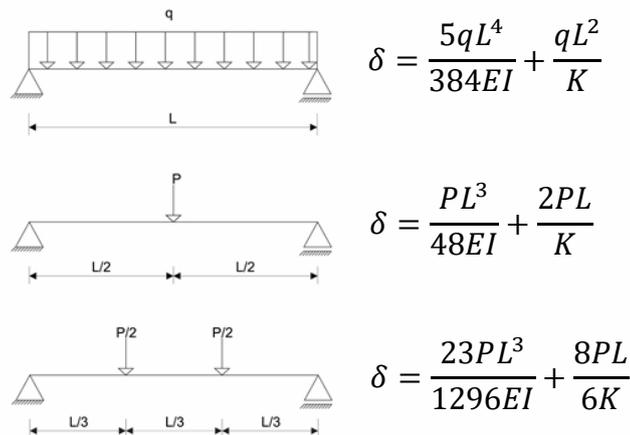


Figura 1: Cálculo de flecha para "I-Joists" considerando a deformação por cisalhamento

Onde os valores de K estão descritos na tabela 1.

Tabela 1: Valores de coeficiente K para as séries de viga I-Joist padronizadas.

Altura (mm)	Série da Viga	K (kN)
241	PRI – 20, 30, 40, 50 e 60	21974
302	PRI – 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90	27490
356	PRI – 40, 50, 60, 70, 80 e 90	32383
406	PRI – 40, 50, 60, 70, 80 e 90	37009

2.1 Calibração do modelo

Foi adotado uma viga de aço perfil w250x44,8 [11]. A presente viga foi simulada nos elementos *beam*, *plate* e *brick*. Para o elemento *brick* foi realizado três simulações: material isotrópico; material ortotrópico 1 com as mesmas propriedades em todos os eixos; e material ortotrópico 2 com as mesmas propriedades em todos os eixos, mas sem os valores dos coeficientes de Poisson. Os intuídos dessas simulações foram verificar a ausência de alguns parâmetros do material, como o Poisson, influencia nas simulações, e verificar a sensibilidade do modelo na ausência de constantes elásticas. Os resultados foram comparados com resultados analíticos via PTV. As propriedades elásticas inseridas no *software* são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Propriedades elásticas

Isotrópico		
E	199947	MPa
ν	0,29	
Ortotrópico 1		
E_x, E_y, E_z	199947	MPa
G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}	77499	MPa
$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$	0,29	
Ortotrópico 2		
E_x, E_y, E_z	199947	MPa
G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}	77499	MPa
$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$	0	

2.2 A escolha do elemento finito

Foi modelada uma viga I-Joist PRI60 241 [12], [13]. Essa simulação foi realizada em elementos *beam* (com seção transformada), *plate* e *brick*. Para as simulações em elemento *brick* realizou-se simulações com e sem os valores dos coeficientes de Poisson para as mesas. Os resultados de flecha foram comparados com cálculos analíticos de flecha via PTV e Rancourt [3]. As propriedades elásticas inseridas no *software* são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3: Propriedades elásticas da mesa e da alma

	Ponderosa Pine		OSB	
E_x	9790,00	MPa	4930	MPa
E_y	1194,38	MPa	1980	MPa
E_z	812,57	MPa	914*	MPa
G_{xy}	1351,02	MPa	1080	MPa
G_{xz}	1125,85	MPa	50	MPa
G_{yz}	166,43	MPa	50	MPa
ν_{xy}	0,337	-	0	-
ν_{xz}	0,400	-	0	-
ν_{yz}	0,426	-	0	-

* O valor E_z foi obtido por meio de laudo técnico [14]

2.3 Influência da densidade de malha

Para a viga I-Joist PRI60 241 [12], [13] simulada, realizou-se novas simulações com elementos de maior dimensão e elementos de menor dimensão das adotadas previamente com o intuito de avaliar a influência da densidade de malha na simulação. A definição da malha é parte fundamental da análise, pois nela é possível determinar o tamanho dos elementos e estendê-los por todo o sólido seguindo os parâmetros fornecidos pelo *software*. Foram simuladas vigas PRI60 241 com malha de 6, 10 e 20 mm de tamanho absoluto.

2.4 Simulação de vigas série PRI 60

Foram realizadas as modelagens e simulações para as outras vigas da série PRI 60 [12], [13] como ilustra a figura 2. O intuito dessas simulações foi verificar a veracidade do modelo para as diferentes dimensões de viga.

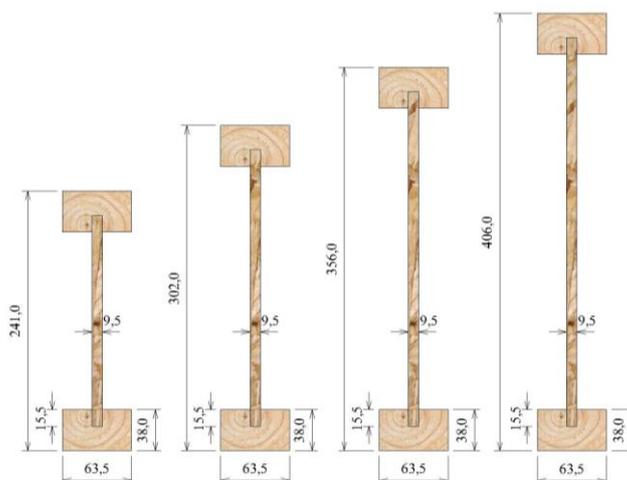


Figura 2: Dimensões PRI 60 (valores em mm)

2.5 Influência da relação L/H

Com o intuito de analisar a influência do cisalhamento nas vigas I-Joist, realizou-se os cálculos analíticos para diferentes relações L/H entre 10 e 40 comparando com dimensões usuais para avaliar a porcentagem que a flecha devido ao cisalhamento desempenha para esses vãos.

2.6 Influência do tipo de carregamento

Simulou-se a viga PRI60 241 para os seguintes carregamentos: flexão em 4 pontos, flexão em 3 pontos e para carregamento distribuído para avaliar o comportamento do modelo devido à forma de carregamento que a viga é submetida.

2.7 Comparação com resultados experimentais

Simulou-se a viga ensaiada experimentalmente por Lima (2014) com o intuito de comparar os resultados obtidos de ensaios condizem com os resultados provenientes do modelo numérico [15]. Com o intuito de simular esta viga para a verificação do modelo utilizou-se as correlações da ABNT NBR 7190:1997 para os módulos de elasticidade longitudinal e transversal apresentadas nas equações 3 e 4. As propriedades elásticas inseridas no *software* são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4: Propriedades elásticas da viga I ensaiada por Lima (2014)

Propriedade	Mesa inferior	Mesa superior	Alma	Unidade
E_x	12195	9541	4470	MPa
E_y	3048	2385	1980	MPa
E_z	609	477	914	MPa
G_{xy}	1170	1183	1080	MPa
G_{xz}	813	636	50	MPa
G_{yz}	78	79	50	MPa
ν_{xy}	0	0	0	-
ν_{xz}	0	0	0	-
ν_{yz}	0	0	0	-

$$G = \frac{E_{c0}}{20} \quad (3)$$

$$E_{c90} = 0,25 E_{c0} \alpha_n \quad (4)$$

3. RESULTADOS

3.1 Calibração do modelo

A viga simulada possui 5,4 m de comprimento com flexão em 4 pontos 2x1300N. As propriedades do aço utilizadas foram obtidas da database do software Simulation Mechanical,® ASTM A572 descritas na tabela 2. A malha adotada para a simulação foi de 10 mm, as condições de vinculação foram um apoio fixo e outro apoio móvel, L/H igual a 20. Com base nos cálculos e simulações, obteve-se os resultados descritos na tabela 5.

Tabela 5: Resultados da viga de aço Perfil w250x44,8

Modelo	Flecha (mm)	Diferença (%)
Analítico M	0,50765	-
Analítico V	0,01700	-
Analítico M + V	0,52465	-
<i>Beam</i>	0,50765	-3,24%
<i>Plate</i>	0,50266	-4,19%
<i>Brick</i> Isotrópico	0,52868	-0,77%
<i>Brick</i> Ortotrópico 1	0,52867	-0,77%
<i>Brick</i> Ortotrópico 2	0,52915	-0,86%

Observa-se no gráfico 1 os resultados são constantes entre as simulações e os modelos de cálculo. O modelo *plate* apresentou-se mais rígido do que os outros modelos numéricos, isso era esperado devido a forma como o modelo foi desenhado, em que há sobreposição de área como mostra a figura 3.

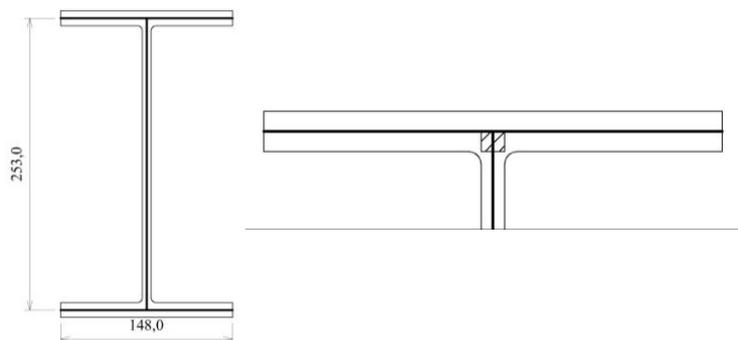


Figura 3: Área de sobreposição do modelo numérico em *Plate*

As simulações MEF *brick* utilizando material ortotrópico resultou em flecha com variação de apenas +0,002% comparando com a simulação de material isotrópico. Utilizando o modelo ortotrópico com Poisson “0” resultou em uma flecha de 0,089%, o modelo torna-se menos rígido proporcionando um aumento da flecha da ordem de 0,1%. Em relação ao PTV, as simulações em elemento *brick* apresentam menos de 1% de diferença. Os modelos *beam* e *plate* não consideram as deformações por cisalhamento. A diferença entre as simulações com material isotrópico e

ortotrópico são semelhantes porque a viga está sujeita à mesma tensão normal e a deformação é governada pelo eixo longitudinal da viga.

3.2 A escolha do elemento finito

Foram realizadas as simulações para as vigas PRI60 241. A viga simulada tem relação L/H igual a 20, vão de 4,8 m e a simulação foi realizada como sendo flexão em 4 pontos com 2x1300N. A malha adotada para a simulação foi de 10 mm, as condições de vinculação foram um apoio fixo e outro apoio móvel. O *Wood Handbook* (2012) apresenta correlações para se determinar o Poisson das espécies de madeiras, porém, para uma possível simulação com uma madeira nacional, não possuímos de tais correlações. Assim, realizou-se uma simulação com uma PRI60 241 com e sem o Poisson da *Ponderosa Pine* para avaliar a influência que este desempenha na simulação. Com base nos cálculos e simulações obteve-se os resultados descritos na tabela 6.

Tabela 6: Resultados das simulações da viga PRI60 241

Modelo	Flecha (mm)	Diferença (%)
Analítico M	10,2412	-
Analítico V	0,8516	-
Analítico M + V	11,0928	-
Rancourt	10,9984	-0,85%
<i>Beam</i>	10,3025	-7,12%
<i>Plate</i>	14,3322	+29,20%
<i>Brick</i> (OSB $\nu = 0$)	11,0459	-0,42%
<i>Brick</i> (OSB e <i>Ponderosa Pine</i> : $\nu = 0$)	11,0571	-0,32%

O resultado obtido com a viga no modelo *plate* não se era esperado, pois, assim como a viga com perfil de aço, há a sobreposição de áreas, assim se era esperado um modelo mais rígido e não menos rígido como o resultado apresentado. Para essa simulação, a região da ligação alma-mesa não é representada na modelagem, não sendo aconselhado para a modelagem de vigas I-Joist. A figura 4 apresenta a área de sobreposição no modelo.

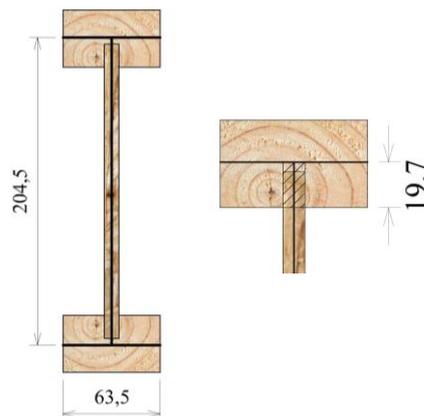


Figura 4: Sobreposição de área no modelo *plate* para viga I-Joist

Os resultados mostram que ambos os modelos *Brick* apresentaram resultados satisfatórios com diferença menor que 0,5%. Com base no resultado obtido, verificamos que o Poisson da madeira não tem influência significativa no modelo, sua ausência o aproxima mais do modelo analítico.

3.3 Influência da densidade de malha

Em seguida foram realizadas simulações para avaliar a influência de discretização da malha em relação ao resultado de flecha. Assim, foram realizadas mais duas simulações com o modelo *brick*, com a malha de 20 mm e outra de 6 mm. Os resultados obtidos estão descritos na tabela 7.

Tabela 7: Resultados da influência da densidade de malha

Modelo	Flecha (mm)	Diferença (%)
Analítico M + V	11,0928	-
<i>Brick</i> (malha de 6 mm)	11,0841	-0,08%
<i>Brick</i> (malha de 10 mm)	11,0571	-0,42%
<i>Brick</i> (malha de 20 mm)	11,0295	-0,57%

A diferença no resultado de flecha entre uma malha de 10 e 20 mm não é muito diferente, entretanto, o uso de uma malha de 20 mm apresenta figuras não uniformes em sua seção transversal após a discretização do elemento estrutural. Comparando a malha de 10 e 6 mm, verifica-se que a malha de 6 mm apresenta uma diferença ínfima da ordem de 0,1%, o que a torna adequada para o modelo, porém, é necessário um hardware capaz de realizar essa simulação, pois ela exige muito processamento.

3.4 Simulação de vigas série PRI 60

Verifica-se que o modelo *brick* é o que melhor representa o comportamento de uma viga I-Joist, portanto, foram realizadas simulações para as outras alturas de vigas PRI60, o resultado encontra-se na tabela 8. As propriedades utilizadas para os materiais estão presentes na tabela 3. Optou-se por utilizar uma densidade de malha de 10 mm porque o uso de uma malha de 6 mm faz a simulação exigir demasiado processamento uma vez que as vigas ensaiadas têm dimensões consideradas grandes.

Tabela 8: Resultados PRI 60

Modelo	241	302	356	406
Flexão 4 pontos	2 x 1300	2 x 1400	2 x 1400	2 x 1400
Comprimento (m) L/H = 20	4,8	6,0	7,1	8,1
Analítico M	10,2412	12,5821	14,1767	15,5087
Analítico V	0,8516	0,9596	0,9880	1,0046
Analítico M + V	11,0928	13,5417	15,1647	16,5133
Rancourt	10,9984	13,3969	14,9952	16,3258
Diferença (%)	+0,86%	+1,08%	+1,13%	+1,15%
<i>Brick</i>	11,0459	13,4606	15,0634	16,4590
Diferença (%)	-0,42%	-0,60%	-0,67%	-0,33%

Verifica-se que o modelo é adequado para a análise do padrão PRI, sendo a diferença menor que 1%. A diferença entre as vigas não seguiu um padrão linear uma vez que além de aumentar a altura da viga, alterou-se também o comprimento da mesma, para que a relação L/H igual a 20 fosse mantida.

3.5 Influência da relação L/H

Afim de avaliar a influência que a parcela referente a força cisalhante influencia na flecha da viga I-Joist, foram realizados cálculos analítico variando a relação L/H entre 10 e 40. Este intervalo foi adotado porque [10] citam que para relações L/H entre 12 e 24 o efeito de cisalhamento deve ser considerado, a partir de 24 o efeito pode ser negligenciado. Isso se deve pelo valor de G que é muito

pequeno quando comparado com o valor de E para vigas de madeira. Os cálculos realizados geraram um gráfico onde foram plotados a relação L/H pela respectiva porcentagem que o cisalhamento influencia para o respectivo comprimento de viga (gráfico 1), a equação 5 mostra como foi calculada a porcentagem da flecha devido ao cisalhamento.

$$\psi = \frac{\delta_V}{\delta_{M+V}} * 100(\%) \quad (5)$$

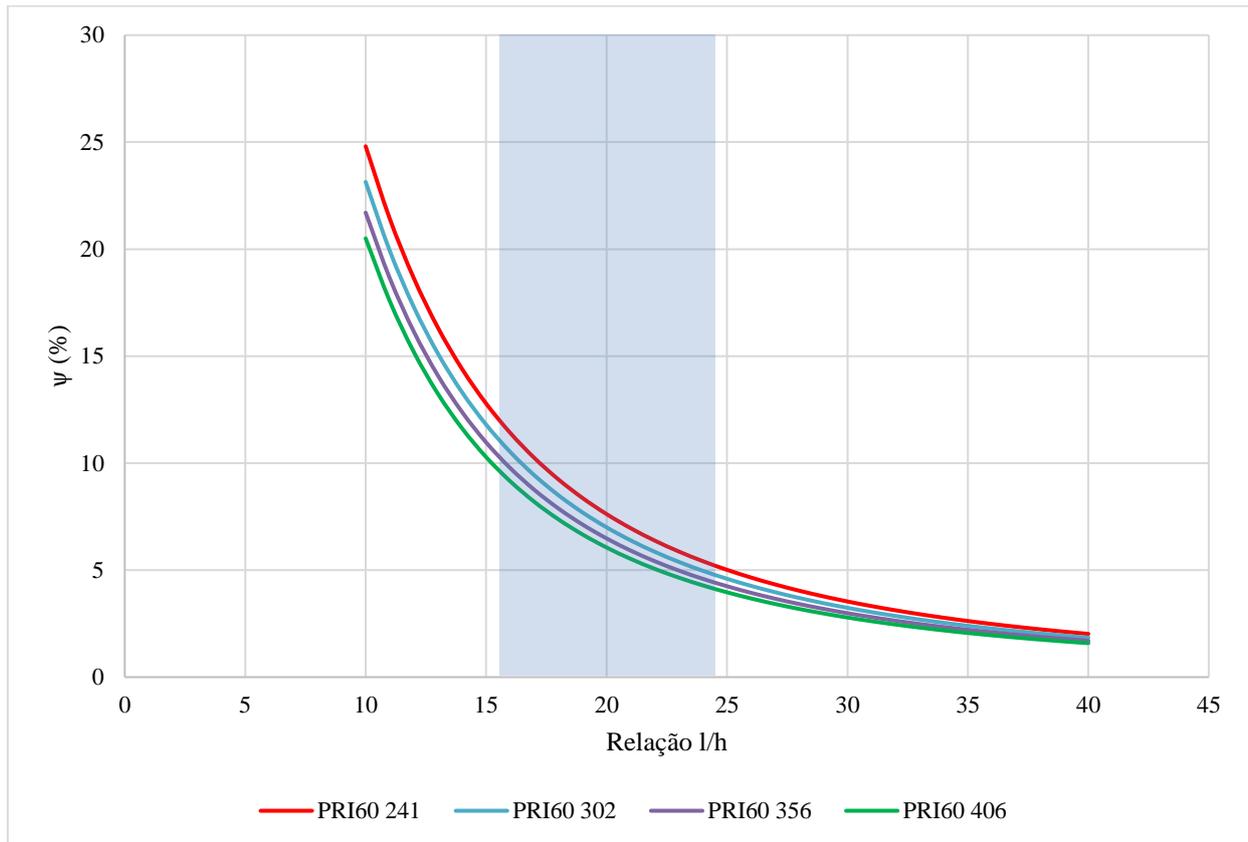


Gráfico 1: Influência do cisalhamento na relação L/H PRI60

O gráfico mostra que conforme a relação L/H aumenta, o cisalhamento passa a influenciar menos na flecha, com a relação L/H 25, o cisalhamento passa a ter influência de 5% e começa a convergir até os 2% para L/H igual a 40. Conforme aumenta a altura da viga, a porcentagem de flecha devido ao cisalhamento diminui. Para relações de L/H entre 10 e 25, a parcela de deformação devido ao cisalhamento varia de 25 a 5%. A área em azul no gráfico mostra as relações L/H mais comuns para o uso das vigas I-Joist sugeridas pela [12] e [13] que tem relação L/H variando de 16 a 24.

3.6 Influência do tipo de carregamento

Foram realizadas simulações com diferentes formas de carregamento: flexão em 4 pontos já descritas, flexão em 3 pontos e carregamento distribuído. Foi adotado a viga PRI60 241, com as propriedades descritas na tabela 3. Como resultado obteve-se os valores descritos na tabela 9. Com relação L/H igual a 20 a densidade de malha utilizada foi de 10 mm devido a solicitação do hardware ao ser simulado com malha de 6 mm. Verifica-se que o modelo é apropriado para os diferentes tipos de carregamentos abordados neste artigo.

Tabela 9: Resultados para diferentes carregamentos

Flexão	3 Pontos	4 Pontos	Distribuída
Carregamento	1 x 2600 N	2 x 1300 N	541,7 N/m
vão (m)	4,8	4,8	4,8
Modelo		Flecha	
Analítico M	12,0222	10,2412	7,5143
Analítico V	1,2773	0,8516	0,6387
Analítico M + V	13,2996	11,0928	8,1530
<i>Brick</i>	13,1959	11,0459	8,1050
Diferença (%)	+0,79%	+0,42%	+0,59%

3.7 Comparação com resultados experimentais

Com a simulação e cálculos analíticos, obteve-se os resultados descritos na tabela 10. A densidade de malha utilizada foi de 10 mm. A relação L/H foi de 24, vão de 5,8 m.

Tabela 10: Resultados para viga I ensaiada

Modelo	241
Flexão 4 pontos	2 x 1204,5 N
Analítico M	14,5694 mm
Analítico V	0,8209 mm
Analítico M + V	15,3903 mm
Rancourt	15,4172 mm
<i>Brick</i>	15,3654 mm
Diferença (M+V)	-0,16%
Diferença (Rancourt)	+0,17%
$\delta_{experimental}$	15,6600 mm
Diferença (M+V)	-1,72%
Diferença (Rancourt)	-1,55%
Diferença (<i>Brick</i>)	-1,88%

O resultado obtido demonstra que o modelo é adequado para análises de ensaios feitos em laboratórios. É necessário ressaltar que a investigação das constantes elásticas deve ser feita para se realizar uma análise próxima ao que acontece em um ensaio. Podemos atribuir a diferença (%) entre os modelos de cálculo devido às aproximações feitas para os outros módulos de elasticidade que foram adaptados para fornecer esses dados ao programa. A figura 5 mostra o estado de deslocamento da viga ensaiada por Lima (2014).

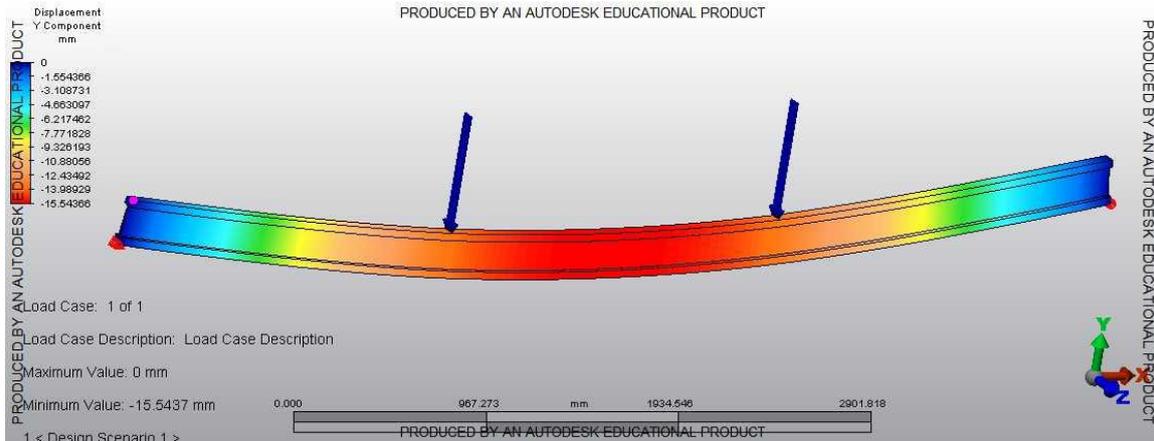


Figura 5: Estado de deslocamento da viga I ensaiada por Lima (2014)

Para as simulações realizadas ao longo desta pesquisa, é possível verificar que as mesmas apresentam um deslocamento menor do que os modelos de cálculo via PTV ou Rancourt, isso se era esperado, pois segundo [4] as mesas da viga I-Joist contribuem na resistência à força cortante, no modelo de cálculo via PTV adotado como comparador ao longo deste, consideramos somente o módulo de elasticidade transversal da alma para suportar a força cortante. A figura 6 demonstra a distribuição de tensão e deformação em uma viga I-Joist.

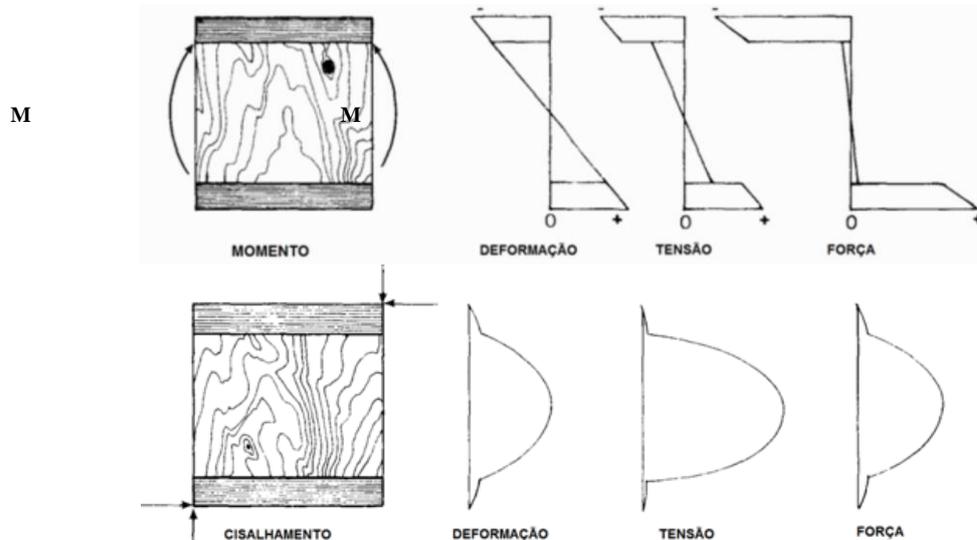


Figura 6: Tensão e deformação em vigas I-Joist

4. CONCLUSÃO

A análise numérica de vigas I-Joist permite caracterizar o comportamento estrutural da mesma quando se comparado com resultados analíticos. Em países onde o método construtivo em Wood Frame é utilizado em grande escala, os órgãos normativos oferecem diretrizes para a execução desse tipo de estruturas. Em âmbito nacional, é evidente a necessidade de uma diretriz para esse tipo de estrutura, pois a norma brasileira oferece poucas informações e simplificações para o dimensionamento do elemento estrutural. Através das simulações numéricas, constata-se que o cisalhamento deve ser considerado para vigas I-Joist.

Para definir o comportamento estrutural da viga I-Joist em regime elástico linear sugere-se o modelo numérico no *software Simulation Mechanical®* com o elemento *brick*, o nível de

discretização da malha de 6 mm de tamanho absoluto. É necessário possuir as seguintes constantes elásticas dos materiais da viga: E_x , E_y , E_z , ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} , G_{xy} , G_{xz} e G_{yz} . A ausência do Poisson não afeta consideravelmente a simulação.

A ausência de constantes elásticas, ou fornecidas de modo aproximado acarretam em diferenças da ordem de 2%. Por esta razão sugere-se a investigação das seguintes constantes elásticas para as mesas da viga e para a alma: E_x , E_y , E_z , G_{xy} , G_{xz} e G_{yz} . O modelo verificado apresenta diferenças menores de 1% com o modelo analítico para flexão e 3 pontos, flexão em 4 pontos e para carregamento distribuído. É possível observar que a influência do cisalhamento depende da relação L/H da viga e que para os casos mais comuns o cisalhamento tem influência de 4 a 13% (relação L/H entre 15 e 25).

O intuito da elaboração do modelo numérico é a investigação de todas as constantes elásticas dos materiais nacionais a serem utilizados na confecção de vigas I-Joist. De posse das constantes elásticas, sugere-se a execução vigas I-Joist e a modelagem numérica das mesmas para que os resultados experimentais e numéricos sejam comparados com as constantes elásticas ensaiadas. O presente estudo verificou o regime elástico linear do elemento estrutural, para futuras pesquisas, ainda indica-se investigar critérios para dimensionamento dos estados limites últimos e modos de falha das vigas I-Joist.

REFERENCIAS

- [1] AMERICAN WOOD COUNCIL. 'Guideline Wood I-Joists: manual for engineered wood construction'. (1999), American Forest & Paper Association.
- [2] ASTM, American Society for Testing and Materials. D5055: 'Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists', (West Conshohocken, 2004).
- [3] RANCOURT, Derek. G. 'Structural Behavior of Wood I-Joist / OSB Roof Panel Assemblies'. (2008, Master of Science (in Civil & Environmental Engineering)-University of Maine, Orono).
- [4] LEICHTI, Robert J.; FALK, Robert H.; LAUFENBERG, Theodore L. 'Prefabricated wood I-joist: an industry overview'. (Forest Products Journal. Vol. 40, Nº 3, 1990).
- [5] FISETTE, Paul. 'Choosing Between Oriented Strandboard and Plywood'. (2005). Disponível em: <<http://bct.eco.umass.edu/publications/by-title/choosing-between-oriented-strandboard-and-plywood/>>. Acesso em: 22 Maio. 2016.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190: 'Projeto de Estruturas de Madeira'. Rio de Janeiro (1997).
- [7] GARBIN, D. 'Análise do desempenho estrutural de vigas I com mesas constituídas de madeiras reaproveitadas de batentes'. (2013). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão.
- [8] USDA, United States Department of Agriculture. 'Wood handbook - Wood as an engineering material'. (Madison: Forest Products Laboratory, 2010).
- [9] TIMOSHENKO, S.P.; GERE, J. E. 'Mecânica dos Sólidos'. Vol. 2. Rio de Janeiro (1994).
- [10] YOUNG, Warren C; BUDYNAS, Richard G. 'Roark's Formulas for Stress and Strain'. New York (McGraw-Hill, 2002).
- [11] GERDAU, 'Perfis Estruturais Gerdau. Tabela de Bitolas'. (2014). Disponível em <www.comercialgerdau.com.br/produtos/download/16_Perfil_Estrutural_tabela_de_bitolas.pdf>. Acesso em 7 ago. 2014.
- [12] ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. 'Performance Rated I-Joists'. Form Nº EWS X720H (2012).
- [13] ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. 'Performance Rated I-Joists'. Form Nº EWS Z725D (2012).
- [14] GÓES, Jorge L. N. de. 'Investigação das propriedades físicas e mecânicas de calços de OSB'. Jerônimo Monteiro (2007). Laudo Técnico - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro (2007).
- [15] LIMA, F. M. 'Desempenho Estrutural de Vigas "I-Joists" - Padronização e Subsídios para o Pré Dimensionamento'. (2014). Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão (2014).