



ANÁLISE NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS EM ESTRUTURAS RETICULADAS DE OUTDOORS

Fabiana Yukiko Moritani

Germano Francisco Simon Romera

Leandro Vanalli

Camila Forigo

fabianamoritani@gmail.com

ge76@bol.com.br

lvanalli@uem.br

camila.forigo@hotmail.com

Departamento de Tecnologia (DTC), Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Avenida Angelo Moreira da Fonseca, 1800, 87506-460, Umuarama, Paraná, Brasil

Abstract. *Use of numerical formulations for solving engineering problems has always been essential in engineering. Thus, the use of structural analysis commercial or academic programs must be increasingly stimulated among future engineers, in the teaching of engineering schools, aiming to modeling common or more complex structural problems. In this context, this paper presents a numerical study (with the simulation of problems in computer) on reticulated structures that are used to support the billboards, seeking a better understanding of the behavior of the stresses internal load distribution, still aiming at identifying the most optimum arrangements for the beam of the structures. For this, we analyzed (by FTOOL® and Hyperworks® simulation software) some examples of reticulated structures support, like those used to support billboards panels, under the action of several loads, intending to reach contributions regarding the improvement of provision beam in favor of better distribution of internal loads acting on them. The development of this work presented many contributions to the scientific and professional training of the participants as well as for teaching of Engineering.*

Keywords: *Computational tools, Framed structures, Stress distributions*

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento de tensões e de deslocamentos das estruturas, fundamentado no entendimento da Teoria da Elasticidade aplicada aos materiais estruturais, para a resolução de problemas de Engenharia é atualmente imprescindível (Timonshenko e Gere, 1993). Cada vez mais a análise de tais problemas passa a ser feita através de técnicas cujo emprego necessita do computador e também do conhecimento matemático aplicado ao desenvolvimento de formulações que descrevam o comportamento estrutural para permitir a obtenção de soluções confiáveis.

Atualmente, a computação aparece como a grande responsável pelo desenvolvimento das técnicas numéricas, tornando possível uma análise cada vez mais próxima da realidade de problemas físicos relacionados com a Engenharia, permitindo assim uma modelagem estrutural mais precisa. Nesse contexto, o uso de softwares que permitam a solução de problemas estruturais de engenharia é muito bem vinda sob o aspecto de garantir mais segurança e previsão de comportamentos mecânicos que favoreçam um dimensionamento mais seguro. Assim, o emprego de softwares acadêmicos de análise estrutural, como HyperWorks Student Edition e o FTOOL® podem evoluir cada vez mais entre os acadêmicos de Engenharia visando-se modelagens de problemas estruturais comuns ou mais complexos.

As estruturas constituídas por barras estruturais, também chamadas de reticuladas, ligadas entre si pelas suas extremidades, estão entre as mais comuns na Engenharia Civil, sendo empregadas para a construção de coberturas, torres, pórticos, contraventamentos, etc. São constituídas de diferentes materiais, como aço, alumínio, madeiras e até mesmo materiais compósitos (Mendonça, 2005). Dessa forma, devido sua diversidade de arranjos e constituições materiais, as estruturas reticuladas se constituem como boas alternativas para a sustentação de painéis (outdoors) que geralmente são usados pela indústria da divulgação comercial e marketing (Fig. 1). No entanto, na ocorrência de ventos fortes, aliada a uma estruturação ineficiente do painel, é comum ocorrer ruína de uma ou mais barras da estrutura de sustentação, causando assim, conseqüentemente, a ruína de toda a estrutura.



Figura 1. Estrutura reticulada de sustentação de outdoors

Nesse contexto, o presente artigo apresenta um estudo numérico, com a simulação de problemas em computador de estruturas reticuladas, sobretudo as que são utilizadas para a sustentação de outdoors, buscando-se o entendimento da distribuição de esforços em suas barras, conhecimento fundamental no ensino de Engenharia, visando-se ainda a identificação

de arranjos mais eficientes para as mesmas. Para tanto, são analisados alguns exemplos de estruturas de sustentação reticuladas, sob ação de carregamentos horizontais, com o auxílio dos softwares FTOOL[®] e HyperWorks[®], disponibilizados em versões educacionais, pretendendo-se alcançar contribuições no que tange a melhoria da disposição das barras em prol de melhor distribuição de esforços internos atuantes sobre elas.

2 ESTRUTURAS RETICULADAS DE OUTDOORS – CONDIÇÕES DE CONTORNO E MATERIAIS EMPREGADOS NAS ANÁLISES

A madeira é, sem dúvida, o material estrutural mais empregado para a construção de estruturas portantes dos outdoors no Brasil. Isso se deve a sua facilidade de obtenção em todas as regiões do país, bem como, a própria tradição e conhecimento no trabalho com esse material entre os operários do setor. De acordo com Bauer (2001), a madeira é um material de construção tecnicamente adequado e economicamente competitivo para todas as obras de engenharia, inclusive estruturas de coberturas em grandes vãos. Já as estruturas de sustentação de outdoors são geralmente constituídas de barras com seções retangulares de madeira, de área inferior a 200 cm², sendo a ação do vento o principal agente solicitante e, mesmo com curta duração, principalmente responsável pelos acidentes estruturais.

Segundo a norma da ABNT NBR 7190/1997 (Projetos de Estruturas de Madeira), para se levar em conta a maior resistência da madeira sob ação de cargas de curta duração, na verificação da segurança em relação a estados limites últimos quando da combinação de ações de longa duração em que o vento representa a ação variável principal, as solicitações nas peças de madeira devem ser multiplicadas por pelo fator de correção de 0,75 (zero vírgula setenta e cinco). A mesma norma também define classes de resistência para possibilitar o emprego de madeiras com propriedades padronizadas, mesmo que de espécies florestais diferentes, orientando a escolha do material para a elaboração de projetos estruturais.

De acordo com Soriano (2010), para a análise estrutural simplificada de determinação de esforços solicitantes em treliças espaciais, costuma-se obter treliças planas por divisão de treliças espaciais em partes planas, para facilidade de análise em procedimento manual. Dessa forma, pode-se considerar em determinados casos, principalmente na identificação de simetrias das condições de contorno da análise, o cálculo de treliças planas na estrutura de madeira dos outdoors.

No contexto de se avaliar as potencialidades de aplicação de programas computacionais no ensino de Engenharia de Estruturas, para melhor entendimento dos fenômenos associados aos diferentes comportamentos mecânicos dos elementos de sustentação, as estruturas reticuladas são excelentes permitindo-se uma avaliação até mesmo intuitiva da distribuição dos esforços sobre elas, facilitando-se assim o ensino com associação às modelações numéricas. Para a modelação que se propõe neste artigo, um outro aspecto importante é a definição de como se considerar as vinculações do pórtico (estrutura reticulada do outdoor) e o solo de sustentação, bem como, a vinculação entre as barras de madeira.

Para a vinculação da estrutura com o solo, é possível observar que em ruínas de outdoors, as rupturas acontecem, geralmente, na parte central das barras de sustentação e não nas bases dessas estruturas, portanto, para as análises dos modelos nos softwares, serão consideradas estruturas com apoios engastados no solo, mas para uma melhor representação do solo pode-se considerar o valor do módulo de elasticidade do mesmo como de 20 MPa, valor médio para solos argilosos-arenosos.

Em relação aos carregamentos atuantes em um outdoor, tem-se a contribuição significativa da carga de vento sobre a placa de alumínio e, ainda, o carregamento da própria estrutura, ou seja, as barras de madeira e a placa metálica de divulgação. Mas observa-se que o carregamento do vento é a ação mais favorável para a ruína nesse tipo de estrutura, por isso é importante que se tenha o entendimento da ação do vento atuando, principalmente, nas placas metálicas de divulgação. Pitta (2001) relata que, a atuação do vento em construções consideradas baixas e pesadas não acarretará em solicitações consideráveis, mas em estruturas esbeltas, como é o caso de estruturas de outdoors, o vento passa a ser uma das ações mais importantes a se determinar na fase de projeto.

Segundo a norma da ABNT NBR 6123/1998, na determinação da força devida ao vento é necessário conhecer a velocidade básica do mesmo, V_0 , adequada ao local onde a estrutura será construída, definida pela norma como a velocidade de uma rajada de 3 (três) segundo, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano. Como regra geral, é admitido que o vento básico pode soprar de qualquer direção horizontal. Em caso de dúvida quanto à seleção da velocidade básica e em obras de excepcional importância, é recomendado um estudo específico para a determinação de V_0 .

Assim, a velocidade característica do vento, V_k , que leva em consideração a geometria e localização das edificações, é dada pela multiplicação da velocidade básica do vento pelos fatores S_1 (fator topográfico), S_2 (que leva em consideração a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura do terreno) e S_3 (fator estatístico), constantes em norma:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3. \quad (1)$$

Sabendo a velocidade característica do vento, é possível obter a pressão dinâmica que o mesmo exerce sobre a edificação:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (2)$$

Sendo (unidades SI): q em N/m^2 e V_k em m/s . Para placas retangulares a força de vento depende do coeficiente de força C_f , que está relacionado com a angulação da estrutura em questão:

$$F = C_f q A \quad (3)$$

Onde: C_f = coeficiente de força; q = pressão dinâmica do vento no topo do muro ou placa; A = área da face: $A = I h$; I = comprimento do muro ou placa; h = altura do muro ou placa.

3 DEFINIÇÃO DA MODELAGEM DO OUTDOOR

O FTOOL® (Two-dimensional Frame Analysis Tool) é um software utilizado em análises estruturais e conhecido por ser uma ferramenta simples e prática na inserção de dados e obtenção de resultados de tensões e deformadas são bastante eficientes em estruturas simples, apesar de ser limitado às estruturas planas, desenvolvido pelos departamentos de Engenharia Civil e de Informática da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio em 1998.

O HyperWorks também é um software voltado para análise estrutural por meio do método dos elementos finitos, sendo possível construir elementos em 2D e 3D. Ao longo dos anos a empresa Altair®, na qual desenvolveu o software HyperWorks, desenvolveu solvers com Radioss (com análise de elementos finitos linear e não linear implícito e explícito), OptiStruct e solidThinking Inspired (otimização estrutural), MotionSolve (simulação multicorpos) e AcuSolve (Acoplado Dinâmica dos Fluidos; CFD). Cada vez mais as universidades vêm adotando HyperWorks nos programas de educação, treinando os alunos para utilizar simulações como direcional de projetos, incluindo modelagem, análises e pós-processamento. Dessa forma, foi elaborado o HyperWorks Student Edition que visa o aprendizado do aluno no uso do HyperWorks em diversos ramos da Engenharia.

É importante salientar que a escolha por esses dois softwares se deu pelas suas potencialidades e disponibilidades de emprego no ensino de engenharia de estruturas na universidade dos autores. Dessa maneira, foi possível iniciar as análises em modelos nos softwares, por meio de modelagem da estrutura reticulada com barras de seção retangular, material considerado como elástico e isotrópico e dados de carregamento e vinculação como a seguir se descreve. Primeiramente, utilizou-se o FTOOL® na modelagem da estrutura, considerando que esse software só calcula estruturas planas. Por isso, foi necessária a divisão da estrutura espacial em planas, utilizando a seção central, no qual é a parte com maior contribuição do carregamento da força do vento, assim como pode ser observado na Fig. 2.

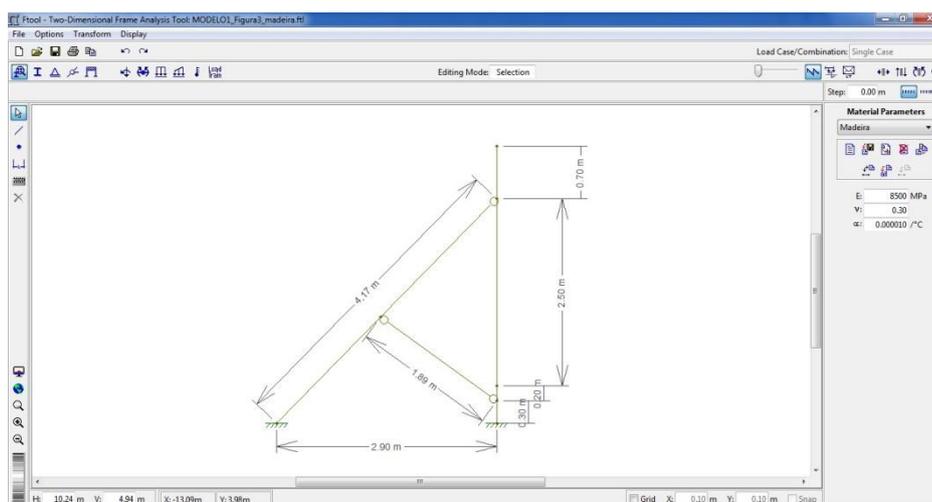


Figura 2. Modelo no FTOOL®

Na modelagem das estruturas foram feitas algumas considerações importantes na inserção dos dados de cada exemplo, segundo as dimensões e arranjos das barras dos modelos adotados. Dentre essas considerações estão a vinculação na união entre os elementos de barras (rotuladas ou rígidas), a vinculação dos apoios (engastado, rotulado ou considerando uma certa rigidez do solo), a natureza dos carregamentos (força de vento e peso próprio – carregamentos distribuídos), o material (madeira, porém com comportamento isotrópico) e a seção das barras sendo retangular.

Foram feitas no FTOOL® a modelagem de três modelos diferentes de estruturas de outdoors. Em seguida, buscando uma otimização estrutural na distribuição dos esforços na estrutura reticulada, foram feitas algumas alterações na disposição e no número das barras.

No programa FTOOL[®], a vinculação das estruturas ao solo pode ser por meio de diferentes tipos de apoios definidos pelo usuário. A vinculação entre as vigas pode ser por meio de união rígida ou rotulada. Na prática, os outdoors são vinculados ao solo por meio de uma porção da sua estrutura enterrada no mesmo. Esse tipo de união não se comporta como um apoio ideal e nem como um engastamento ideal. Já as vigas de madeira, na maior parte dos outdoors executados, são presas entre si por juntas pregadas, não se comportando nem como juntas perfeitamente rígidas e nem perfeitamente rotuladas. Deve-se então identificar qual a melhor maneira de se modelar a estrutura de um outdoor, a fim de se otimizar a mesma para se obter o melhor desempenho em termos de melhor distribuição dos esforços.

Para um melhor entendimento sobre a vinculação da estrutura com o solo, construiu-se um modelo no Hypermesh[®] em que a união da estrutura com o solo é feita por apoios fixos (2º gênero) e outro modelo de estrutura em que o vínculo com o solo é realizado por meio de engastamentos. Considerou-se também que as barras de madeira são unidas entre si por juntas rotuladas. Em seguida, foi realizado a modelação tridimensional da estrutura no software Hypermesh[®] dando-se maior realismo ao comportamento da mesma sob ação do carregamento do vento. Neste software é exigido maior atenção do operador, tanto na inserção de dados como também na visualização dos resultados. Analisou-se o mesmo modelo de *outdoor*, utilizado no FTOOL[®], para a modelagem respeitando as dimensões, material utilizado e carregamento de vento no plano da chapa metálica.

Ambos modelos utilizaram na sua construção elementos de viga com seção transversal quadrada de 80x80mm, com o trecho do outdoor sujeito a um carregamento distribuído horizontal de 3,85 kN/m representando o carregamento de vento, conforme Fig. 4. A madeira foi considerada como isotrópica, possuindo módulo de elasticidade $E = 8,5$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. A modelagem da rótula no FTOOL[®] é feita apenas para a extremidade da viga no nó, e não no nó como um todo que une as três porções do elemento. Já no Hypermesh[®], a modelagem da junta rotulada é feita liberando-se grau de liberdade 6 (DOF 6 é a rotação ao redor do eixo Z) do nó do *pin flag* do elemento que une as duas vigas. Já a modelagem do apoio fixo no Hypermesh é realizada restringindo-se os graus de liberdade de 1 a 5, deixando o DOF 6 liberado, Fig. 4.

A Fig. 3 mostra a comparação entre os esforços internos no FTOOL[®] e no Hypermesh[®] para essa modelagem. A Fig. 3 mostra o outdoor com apoio fixo, sendo que a coluna à esquerda mostra os resultados para o FTOOL[®] e a da direita os resultados para o Hypermesh[®]. A primeira linha apresenta os esforços normais, a segunda linha os esforços cortantes e a terceira linha os momentos fletores. A Fig. 5b, da mesma maneira, apresenta os resultados para o modelo engastado.

Observa-se que os valores dos esforços são praticamente os mesmos para os modelos construídos no FTOOL[®] e no Hypermesh[®]. A pequena diferença em alguns nós se dá devido ao refinamento da malha do modelo de elementos finitos realizado no Hypermesh[®]. Entretanto a vinculação ideal do outdoor com o solo não se dá nem por meio de apoio e nem por engastamento, mas sim por meio de uma fixação intermediária entre simplesmente apoiada e completamente engastada. Essa vinculação pode ser feita no FTOOL[®] por meio de apoios elásticos de rigidez linear e de rigidez à flexão.

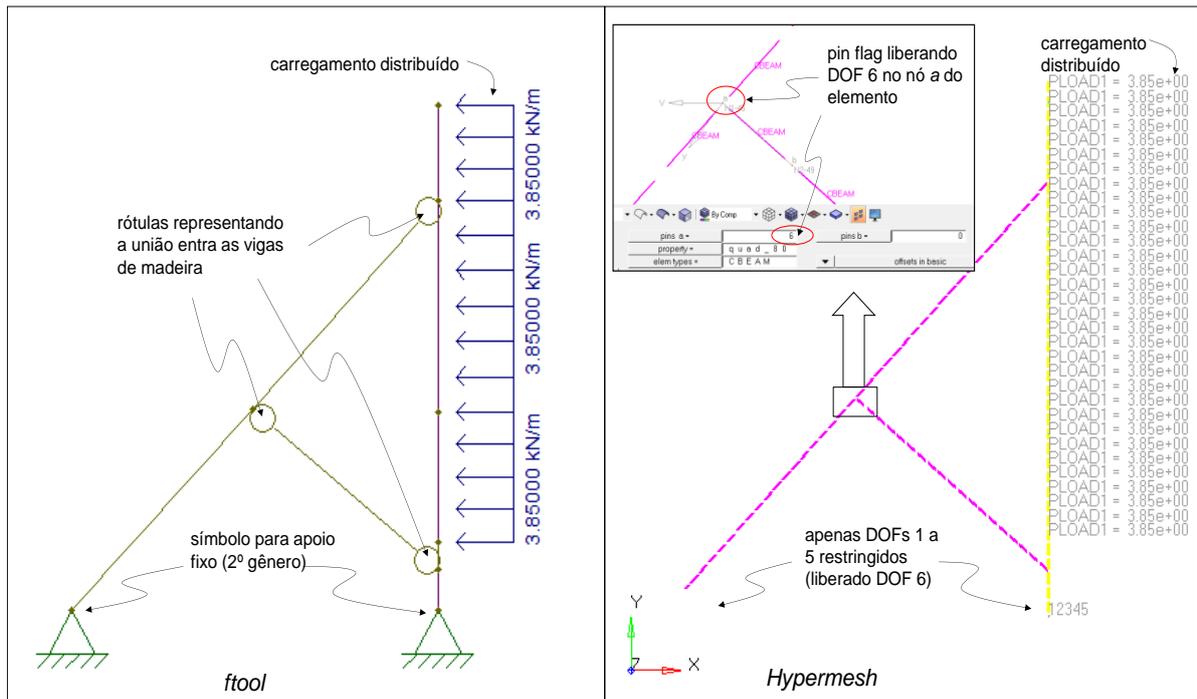


Figura 3. Modelagem do outdoor no FTOOL® e no Hypermesh

Uma vez que o modelo está bem definido entre os dois softwares pode-se modelar o solo no Hypermesh® de modo que seja obtida a rigidez deste para ser utilizada em apoios elásticos no FTOOL®. Para tanto, modelou-se uma porção de solo ao redor da fixação da base do outdoor, considerando-se que 1,0 m do pilar do outdoor está enterrado. Foi utilizado elemento sólido para o solo e uniu-se os nós da viga de madeira aos elementos sólidos que representam o solo. Os nós das superfícies da borda deste talude de solo, que se encontram consideravelmente longe da viga (para não influenciar na rigidez do solo) recebem a condição de contorno de engastamento, conforme mostrado na Fig. 4.

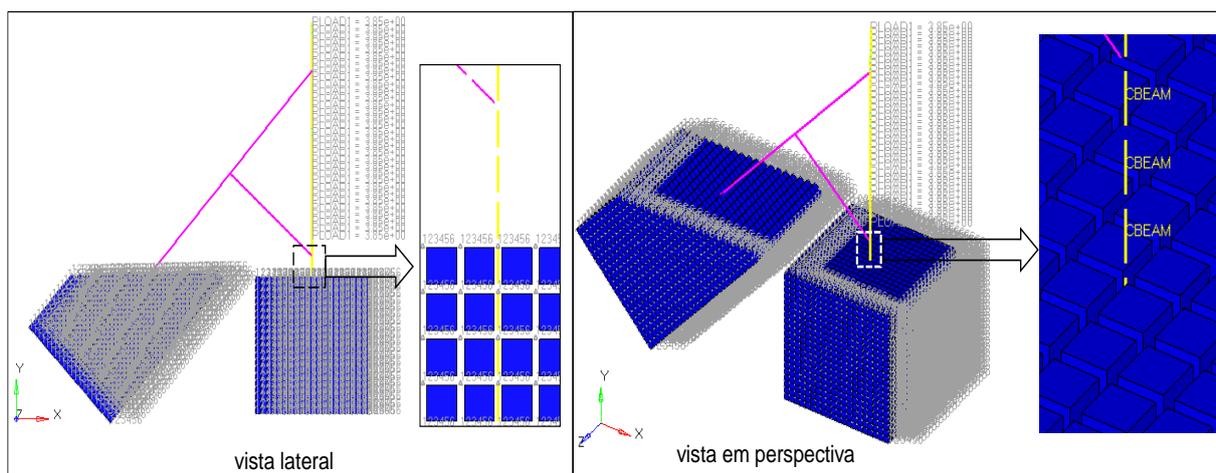


Figura 4. Modelagem do outdoor fixado ao solo (simplificação de modelagem no plano) e detalhe da união da viga com o solo no Hypermesh

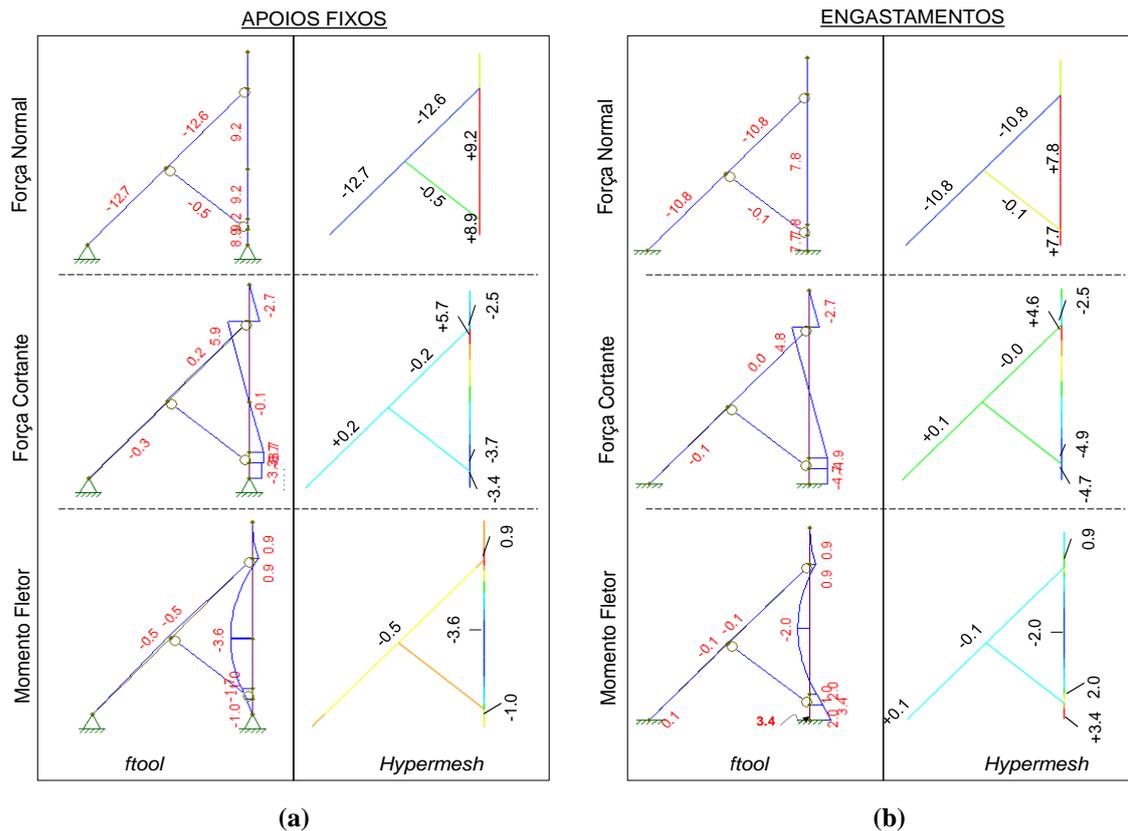


Figura 5. (a) Comparação dos Esforços Internos para Outdoor Apoiado e (b) Engastado, ambos modelados no FTOOL® e no Hypermesh®

A representação da estrutura continua sendo a de uma estrutura plana, porém o solo ao redor das barras de madeira é deformável e essa deformação provê informações para representação dos apoios elásticos. Realizou-se o cálculo utilizando três valores diferentes de Módulo de Elasticidade ($E=5\text{MPa}$, $E=20\text{MPa}$ e $E=80\text{MPa}$). Os resultados obtidos dos modelos do Hypermesh® são mostrados na Tabela 1 a seguir, sendo os valores das deformações lineares (δ_x) e deformações angulares (θ_z) nos nós da união da barra de madeira com o solo, bem como os esforços internos nos elementos (cortantes e momento fletores) nessa união da viga com o solo também são mostrados.

Tabela 1. Valores das Deformações, Esforços Internos e Rigidez do Solo

Rigidez linear horizontal				Rigidez à rotação			
E_{solo} (MPa)	δ_x (mm)	V_x (kN)	K_x (kN/m)	E_{solo} (MPa)	θ_z (rad)	M_z (kNm)	K_z (kNm/rad)
5	9,512	4,051	426	5	$3,844 \cdot 10^{-2}$	1,819	47
20	4,312	4,267 kN	990	20	$2,733 \cdot 10^{-2}$	2,147	79
80	1,908	4,425 kN	2319	80	$1,905 \cdot 10^{-2}$	2,400	126

O valor da rigidez da mola no apoio elástico é a razão simples entre o esforço (V_x ou M_z) e a deformação (δ_x ou θ_z). Assim, também é mostrado na Tabela 1 os valores da rigidez linear (K_x) e da rigidez à flexão (K_z) para os diferentes valores de Módulo de Elasticidade

considerados para o solo. Três modelos da estrutura foram construídos no *FTOOL*[®] utilizando os valores de rigidez tanto linear na direção horizontal quanto de flexão mostrados na Tabela 1. Algumas barras da estrutura reticulada são denominadas de A a E para auxiliar na apresentação dos resultados, conforme mostrado na Fig. 6.

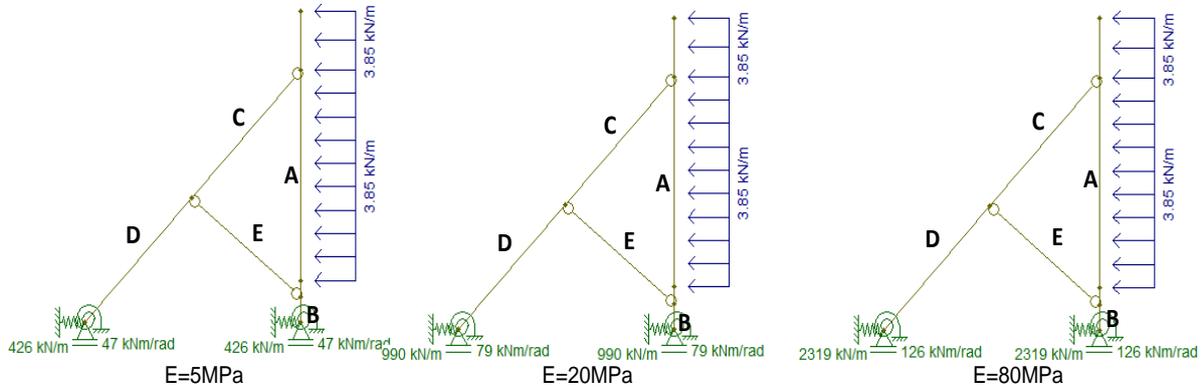


Figura 6. Modelagem dos apoios elásticos do outdoor para diferentes solos

Fez-se a comparação dos esforços internos obtidos no *FTOOL*[®] com os esforços internos obtidos no modelo do *Hypermesh*[®], que são mostrados na Fig. 7. Cada uma das três colunas da Fig. 7 mostra, lado a lado, os resultados oriundos de ambos programas. A primeira coluna à esquerda mostra os resultados para $E=5\text{MPa}$, a coluna do meio apresenta os resultados para $E=20\text{MPa}$ e na coluna à direita considerou-se $E=80\text{MPa}$.

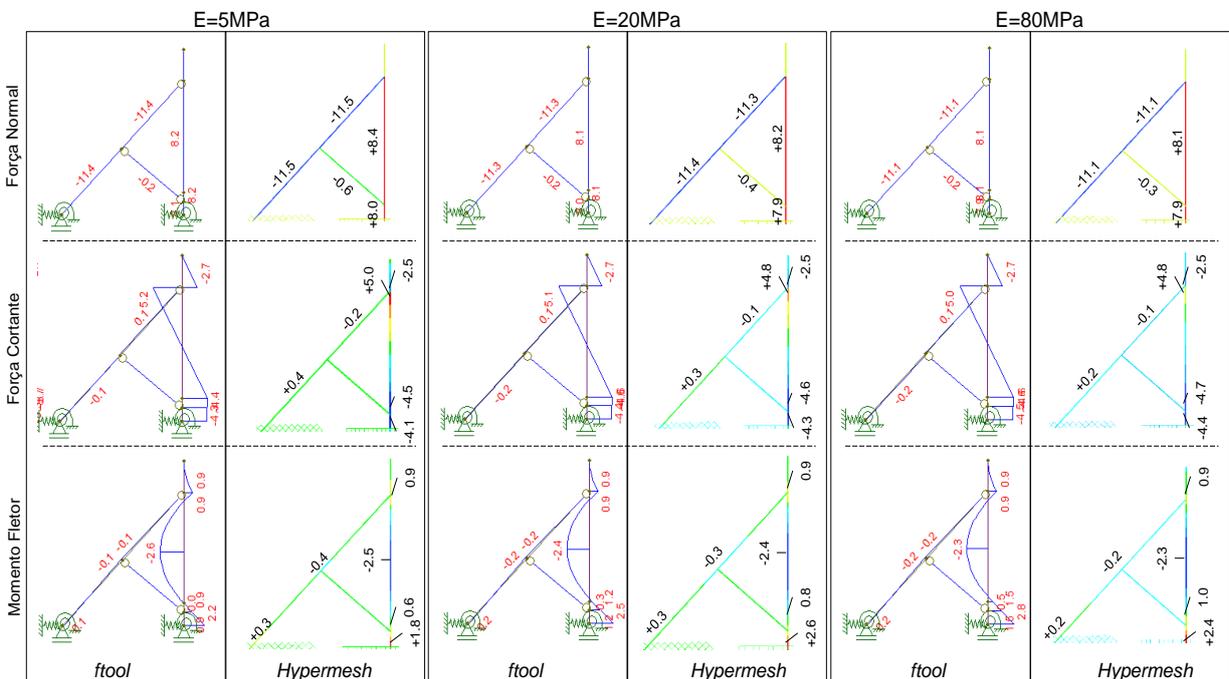


Figura 7. Comparação dos esforços internos no outdoor para diferentes solos

Tabela 2. Força normal para diferentes vínculos do outdoor com o solo

Região	Força normal (kN)									
	Apoio fixo		E=5MPa		E=20MPa		E=80MPa		Engastado	
	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
A	9,2	9,2	8,2	8,4	8,1	8,2	8,1	8,1	7,8	7,8
B	8,9	8,9	8,1	8,0	8,0	7,9	7,9	7,9	7,7	7,7
C	-12,6	-12,6	-11,4	-11,5	-11,3	-11,3	-11,1	-11,1	-10,8	-10,8
D	-12,7	-12,7	-11,5	-11,3	-11,3	-11,4	-11,1	-11,1	-10,8	-10,8
E	-0,5	-0,5	-0,6	-0,2	-0,2	-0,4	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1

Tabela 3. Força cortante para diferentes vínculos do outdoor com o solo

Região	Força cortante (kN)									
	Apoio fixo		E=5MPa		E=20MPa		E=80MPa		Engastado	
	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
A _{SUP}	5,9	5,7	5,2	5,0	5,1	4,8	5,0	4,8	4,8	4,6
A _{INF}	-3,7	-3,7	-4,4	-4,5	-4,6	-4,6	-4,6	-4,7	-4,9	-4,9
B	-3,3	-3,4	-4,3	-4,1	-4,4	-4,3	-4,5	-4,4	-4,7	-4,7
C	0,2	-0,2	0,1	-0,2	0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,0	0,0
D	-0,3	0,2	-0,1	0,4	-0,2	0,3	-0,2	0,2	-0,1	0,1
E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 4. Momento fletor para diferentes vínculos do outdoor com o solo

Região	Momento Fletor (kN.m)									
	Apoio fixo		E=5MPa		E=20MPa		E=80MPa		Engastado	
	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
A _{SUP}	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
A _{MÁX}	-3,6	-3,6	-2,6	-2,5	-2,4	-2,4	-2,3	-2,3	-2,0	-2,0
A _{INF}	-1,0	-1,0	0,9	0,6	1,2	0,8	1,5	1,0	2,0	2,0
B	-1,0	-1,0	2,2	1,8	2,5	2,6	2,8	2,4	3,4	3,4
C	-0,5	-0,5	-0,1	-0,4	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1
D	-0,5	-0,5	0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Observa-se nas três tabelas a grande semelhança entre os resultados obtidos utilizando-se os dois programas. A modelagem utilizando o software FTOOL® é muito simples e rápida de ser feita, dispensando-se pouco trabalho em relação à modelagem utilizando o Hypermesh®. Pode-se perceber que a metodologia de modelar apoios elásticos no FTOOL® utilizando a rigidez do solo obtida do modelo do Hypermesh® pode ser empregada na modelagem da estrutura do outdoor a fim de se testar as diferentes configurações estruturais.

4 RESULTADOS

Com a definição das condições vinculação entre as barras das estruturas constituintes dos outdoors e com o solo de sustentação, realizou-se análise numérica de 3 (três) modelos diferentes de estruturas de *outdoors* no programa FTOOL®, conforme Fig. 8.

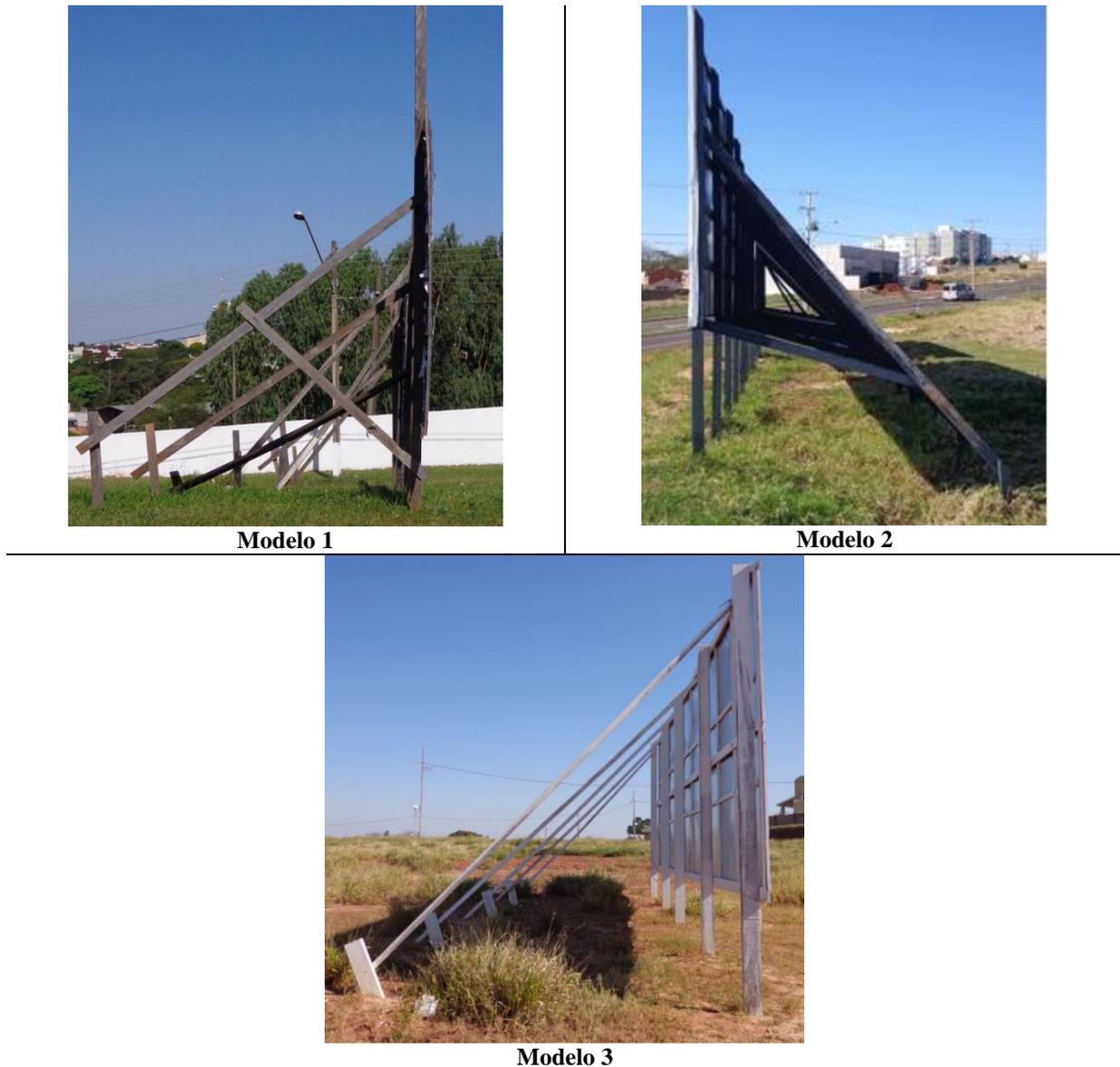


Figura 8. Três tipos diferentes de outdoors, cada um constituindo um modelo de análise

A partir da estimativa para a velocidade básica do vento $V_0 = 43,0$ (m/s), para a cidade de Umarama – PR realizou-se os cálculos do carregamento da força do vento, de acordo com a NBR 6123/1998. Visto que a localização dos outdoors é considerada um terreno “plano ou fracamente acidentado”: $S_1=1,0$. Para o modelo 1 considerou-se localizado na Categoria II (terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados) e Classe A de superfície frontal de 3,70m. Assim, conforme a Tabela 1 da NBR 6123/1998, tem-se que $b = 1,0$; $Fr = 1,0$ e $p = 0,085$. Logo S_2 , é dado pela Eq. (4):

$$S_2 = b \cdot Fr \left(\frac{z}{10} \right)^p = 1,0 \cdot 1,0 \cdot \left(\frac{3,70}{10} \right)^{0,085} = 0,919 \quad (4)$$

Já para o fator S_3 considerou-se o grupo 3 com $S_3=0,95$. Portanto, o valor da velocidade característica, V_k , é obtida pela Eq. (5):

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_o = 1,0 \cdot 0,919 \cdot 0,95 \cdot 43 = 37,54 \text{ m/s} \quad (5)$$

E a pressão dinâmica do vento é dada pela Eq. (6):

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 = 0,613 \cdot 37,54^2 = 863,85 \text{ N/m}^2 \quad (6)$$

Considerando-se que a força de vento é aplicada sobre a placa retangular de área A , então, o coeficiente de força é igual a 2, porém, para se obter uma carga distribuída linearmente ao longo das barras verticais junto a placa de alumínio, dividiu-se a placa em larguras de $L = 2,23\text{m}$, a força de vento é dada pela Eq. (7):

$$F = C_f \cdot q \cdot L = 2 \cdot 863,85 \cdot 2,2 = 3852,77 \text{ N/m} = 3,85 \text{ N/m} \quad (7)$$

Seguindo o mesmo procedimento de cálculo, obteve-se a força de vento, segundo uma carga distribuída, para outros modelos, assim como observado na Tabela 5:

Tabela 5. Carregamentos de vento

Modelo	Z (m)	S_1	S_2	S_3	V_k (m/s)	Q (N/m ²)	L (m)	F (kN/ m)
1	3,70	1,0	0,919	0,95	37,54	863,85	2,23	3,85
2	4,40	1,0	0,933	0,95	38,10	889,68	1,80	3,20
3	4,10	1,0	0,927	0,95	37,87	879,06	2,00	3,52

Para o carregamento permanente devido a estrutura de madeira em unidade de carga distribuída linearmente (kN/m), considerou-se a densidade aparente para a classe C25 igual a $\rho_{\text{aparente}} = 550 \text{ kg/m}^3$. Assim, a carga permanente da estrutura de madeira é dada multiplicando a densidade pela área da seção da barra de madeira, assim como na seguinte Eq. (8):

$$F_{\text{barras}} = \rho_{\text{aparente}} \cdot A \cdot g = 550 \cdot (0,08 \cdot 0,08) \cdot 9,81 = 0,0282528 \text{ kN/m} \quad (8)$$

Já para o carregamento permanente devido às chapas de alumínio, tem-se que para uma chapa plana de alumínio de 0,50mm de espessura com peso específico de 1,35kg/m²:

$$F_{\text{chapas}} = \frac{3,0105 \text{ kg}}{\text{m}} \cdot g = G_{\text{chapas}} = 0,02953 \text{ kN/m} \quad (9)$$

Com a soma das cargas permanentes dadas na Eq. (10):

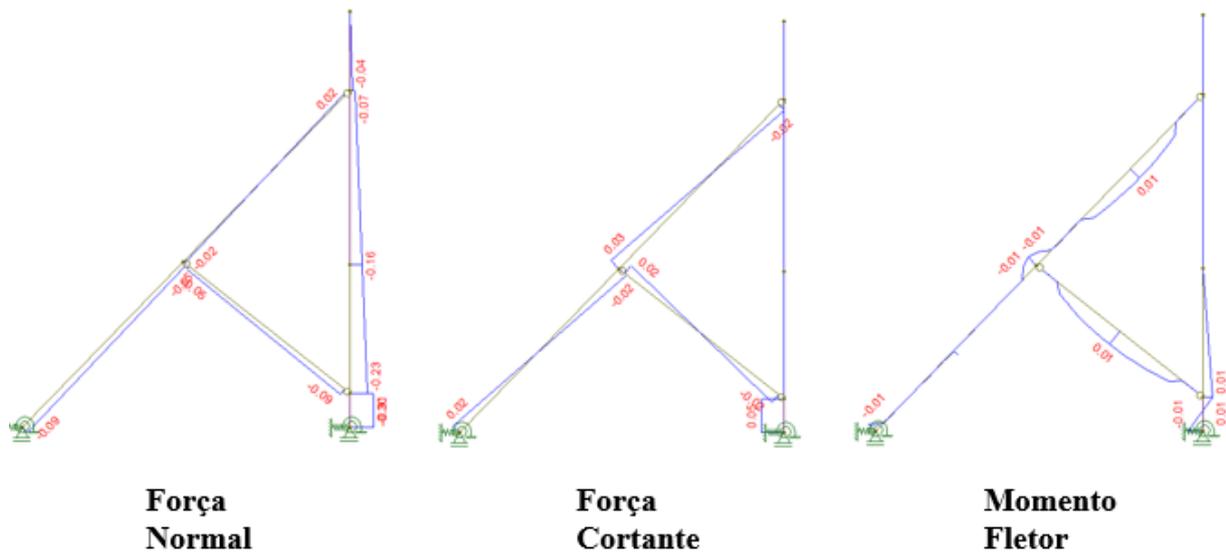
$$P = 0,02825 + 0,02953 = 0,05779 \text{ kN/m} \quad (10)$$

Os resultados para os demais modelos estão inseridos na Tabela 6:

Tabela 6. Carregamentos permanentes

Modelo	Comprimento (m)	Carga permanente da barra de madeira (kN/m)	Carga permanente da chapa metálica (kN/m)	Total carregamento permanente (kN/m)
1	2,23	0,02825	0,02953	0,05779
2	1,80	0,02825	0,02384	0,04912
3	2,00	0,02825	0,02649	0,05474

Para o modelo 1, conforme os dados constantes nas tabelas 5 e 6, obteve-se os resultados de esforços que estão sendo apresentados nas Fig. 9 a 14 e, também nas tabelas 7, 8 e 9 a seguir, para melhor compreensão dos resultados:

**Figura 9. Esforços internos do modelo 1 devido às cargas permanentes**

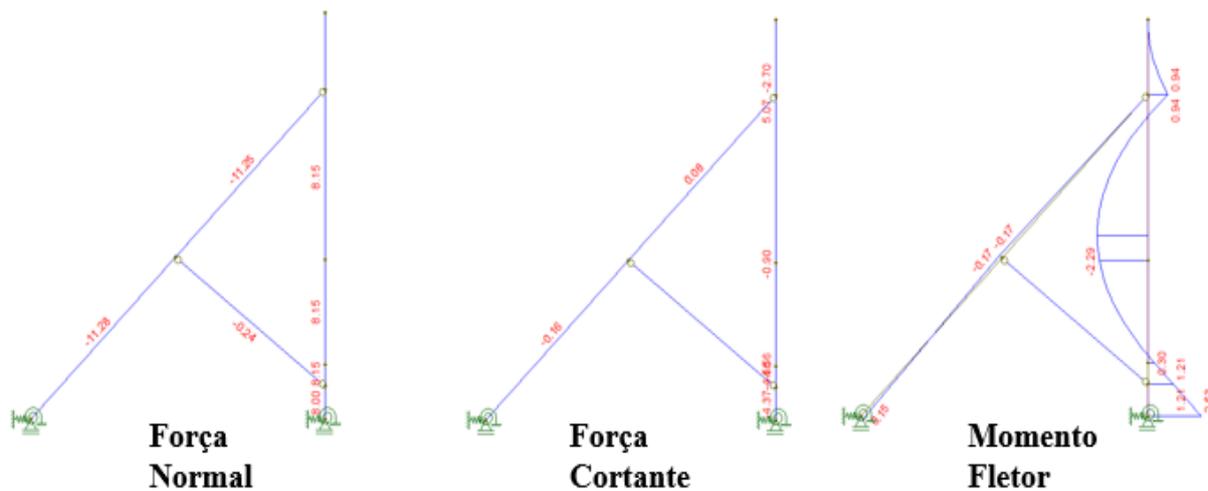


Figura 10. Esforços internos do modelo 1 devido à carga de vento

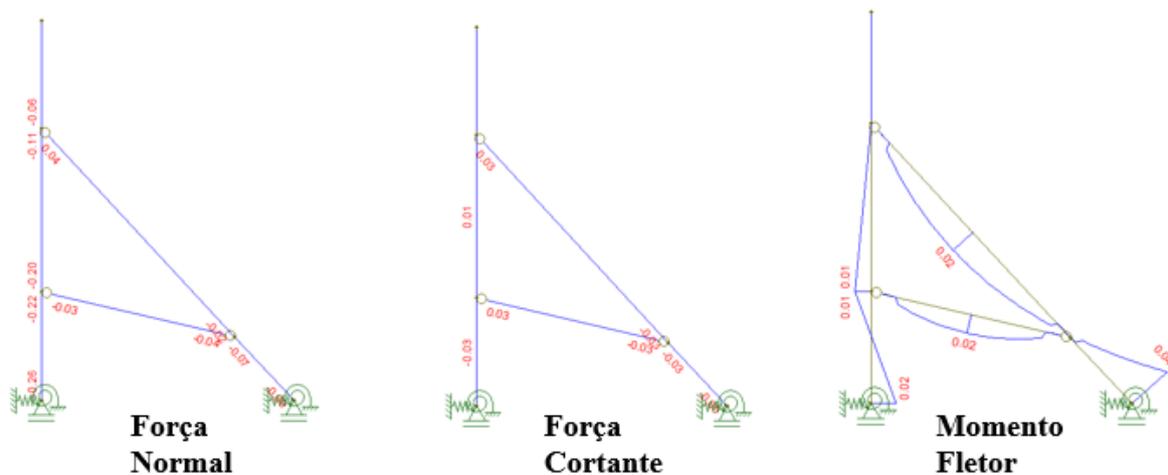


Figura 11. Esforços internos do modelo 2 devido às cargas permanentes

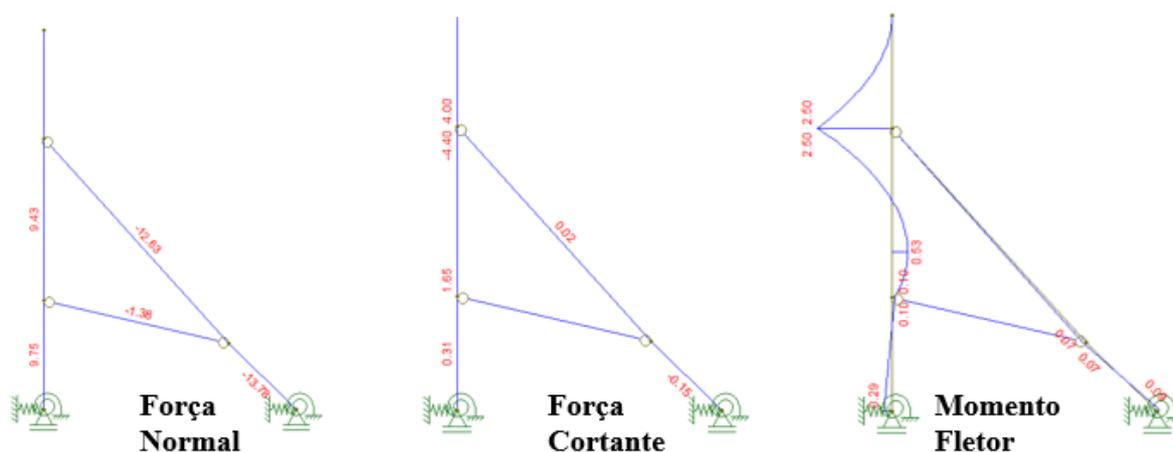


Figura 12. Esforços internos do modelo 2 devido à carga de vento

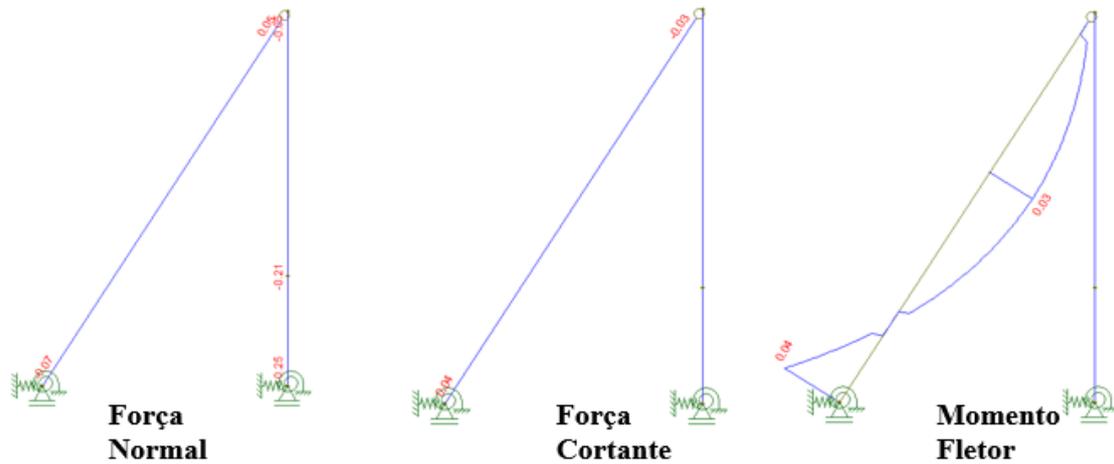


Figura 13. Esforços internos do modelo 4 devido às cargas permanentes

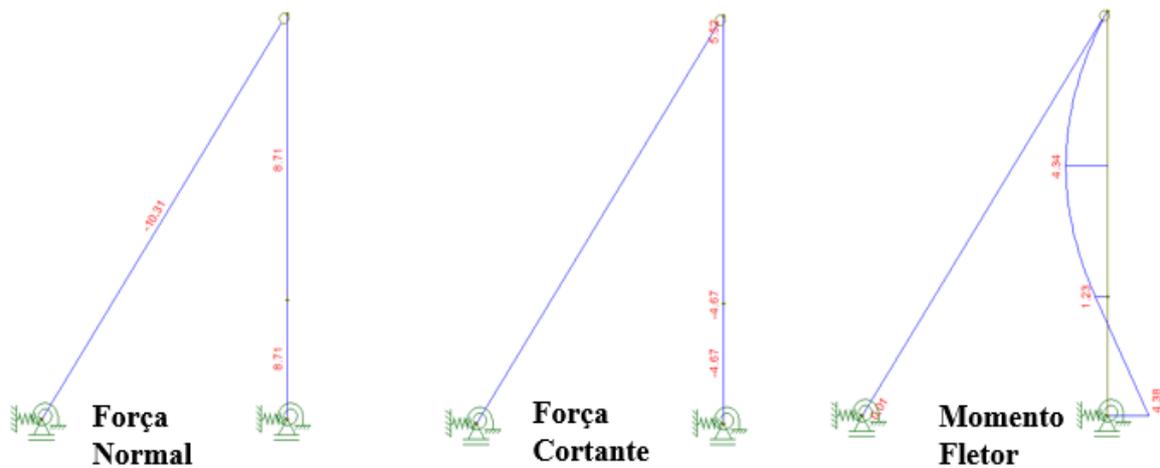


Figura 14. Esforços internos do modelo 3 devido à carga de vento

Tabela 7. Esforços internos do modelo 1

Barra	Vento			Carga permanente		
	Normal (kN)	Cortante (kN)	Mom. Fletor (kN.m)	Normal (kN)	Cortante (kN)	Mom. Fletor (kN.m)
a	0	0/-2,70	0/0,94	0/-0,04	0	0
b	8,15	5,07/-4,56	0,94/-2,29/1,21	-0,07/-0,23	0	0/0,01
c	8,00	-4,37	1,21/2,53	-0,30/-0,31	0,05	0,01/-0,01
d	-11,28	0,08	0/-0,17	0,02/-0,02	-0,02/0,03	0/0,01/-0,01
e	-11,25	-0,16	-0,17/0,15	-0,05/-0,09	-0,02/0,02	-0,01/-0,01
f	-0,24	0	0	-0,05/-0,09	0,02/-0,02	0/0,01/0

Tabela 8. Esforços internos do modelo 2

Barra	Vento			Carga permanente		
	Normal (kN)	Cortante (kN)	Mom. Fletor (kN.m)	Normal (kN)	Cortante (kN)	Mom. Fletor (kN.m)
A	0	0/4,00	0/-2,50	0/-0,06	0	0
B	9,43	-4,40/1,65	-2,50/0,53/0,10	-0,11/-0,20	0,01	0/0,01
C	9,75	0,31	0,10/0,29	-0,22/-0,26	-0,03	-0,01/0,02
D	-12,63	0,02	0/0,07	0,04/-0,02	0,03/-0,03	0/0,02/0
E	-13,78	-0,15	0,07/-0,09	-0,07/-0,09	-0,03/-0,05	0/-0,04
F	-1,38	0	0	-0,03/-0,04	0,03/-0,03	0/0,02/0

Tabela 9. Esforços internos do modelo 3

Barra	Vento			Carga permanente		
	Normal (kN)	Cortante (kN)	Mom. Fletor (kN.m)	Normal (kN)	Cortante (kN)	Mom. Fletor (kN.m)
A	8,71	5,52/-4,67	0/-4,34/-1,23	-0,05/-0,21	0	0
B	8,71	-4,67	-1,23/4,38	-0,21/-0,25	0	0
C	-10,31	0	0	-0,07/0,05	0,04/-0,03	0/0,03/-0,04

Nas Tabelas 7, 8 e 9, com resultados respectivamente dos modelos 1, 2 e 3, quando tem-se somente um valor na célula correspondente ao esforço, Ex.: X,XX, representa o valor único no vão de cada barra, para dois valores, Ex.: X,XX/X,XX, representa os valores da extremidade esquerda e direita, respectivamente, no vão de cada barra, e já para três valores, Ex.: X,XX/X,XX/X,XX, representa os valores da extremidade esquerda, valor máximo e extremidade direita, respectivamente, no vão de cada barra.

4.1 Redistribuição dos esforços na estrutura

No intuito de se analisar a redistribuição de esforços nas barras dos outdoors, bem como, verificar a potencialidade de aplicação de softwares nesse aspecto da compreensão do comportamento mecânico das estruturas, efetuou-se pequenas alterações de posicionamento das barras nos modelos 1 e 2, resultando nos padrões de distribuição apresentadas nas Fig. 15 e 16 a seguir.

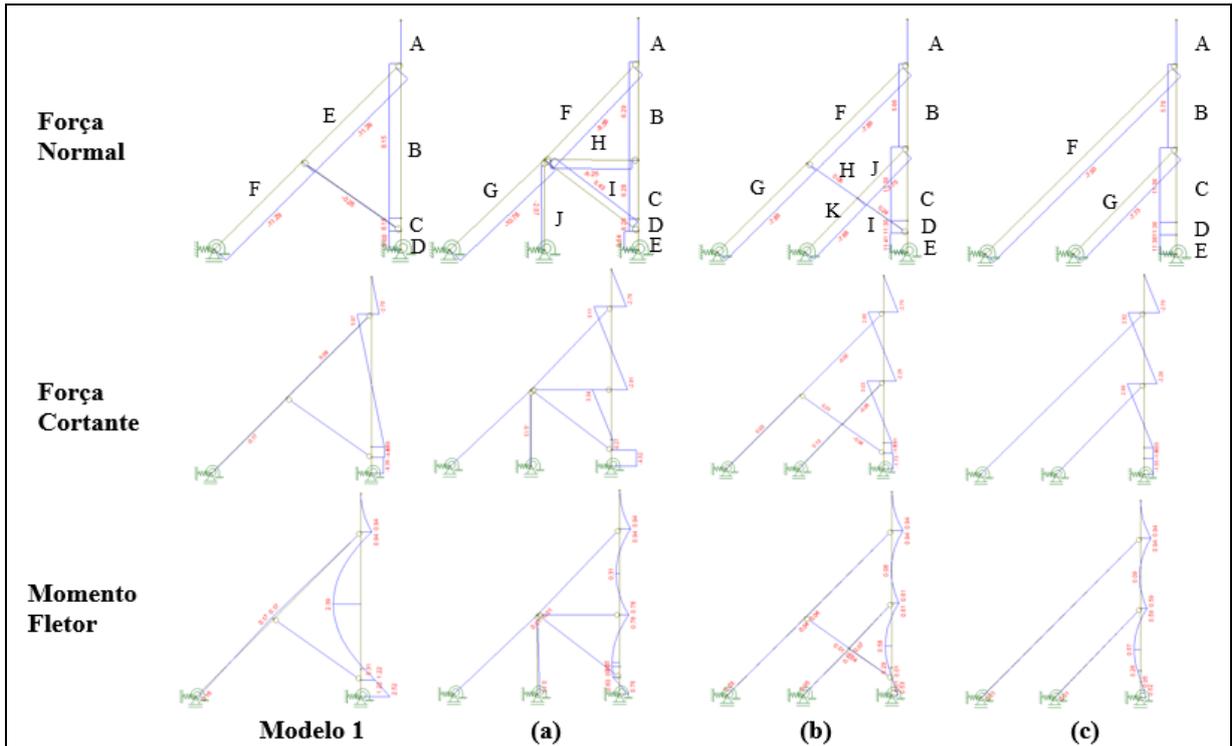


Figura 15. Esforços internos para as remodelagens do modelo 1.

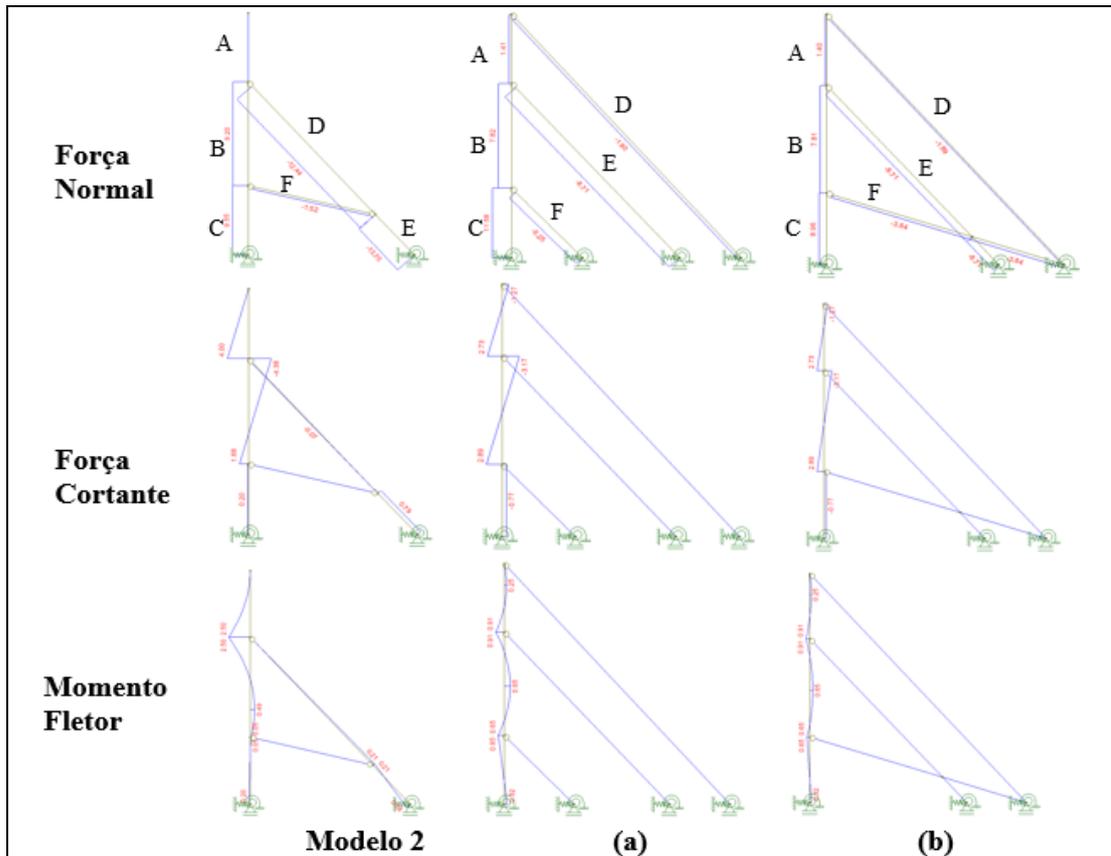


Figura 16. Esforços internos para as remodelagens do modelo 2.

Para melhor visualização dos resultados após alteração de posicionamento das barras nos modelos 1 e 2, apresenta-se as Tabelas 10 e 11:

Tabela 10 – Esforços internos da remodelagem do modelo 1

Modelo (a)			
Barra	Força normal (kN)	Força cortante (kN)	Momento fletor (kN.m)
A	0	-2,70/0	0,94/0
B	6,29	-2,91/3,11	0,78/-0,31/0,94
C	6,28	-0,27/3,34	-0,65/0,78
D	6,28	-0,27	-0,60/-0,65
E	9,64	-4,52	0,76/-0,60
F	-8,56	0	0/0,01
G	-10,78	0	0,01/0
H	-6,25	0	0
I	5,43	0	0
J	-2,07	-0,13	-0,19/0
Modelo (b)			
A	0	-2,70/0	0,94/0
B	5,66	-2,29/2,80	0,61/-0,08/0,94
C	11,30	-1,51/3,03	-0,29/-0,58/0,61
D	11,30	-1,51	0,01/-0,29
E	11,41	-1,73	0,53/0,01
F	-7,89	-0,02	0/0,04
G	-7,89	0,03	0,04/0
H	0,05	0,01	0,01
I	0,24	-0,04	0,04/0
J	-7,75	-0,06	-0,05/0,10
K	-7,68	0,13	0,07/0
Modelo (c)			
A	0	-2,70/0	0,94/0
B	5,70	-2,28/2,82	0,59/-0,09/0,94
C	11,36	-1,55/2,99	-0,26/-0,57/0,59
D	11,36	-1,55	0,05/-0,26
E	11,36	-1,55	0,52/0,05
F	-7,93	0	0,01/0
G	-7,73	0	0,01/0

Tabela 11. Esforços internos da remodelagem do modelo 2.

Modelo (a)			
Barra	Força normal (kN)	Força cortante (kN)	Momento fletor (kN.m)
A	1,41	2,73/-1,27	-0,91/0
B	7,82	2,89/-3,17	-0,65/0,65/-0,91
C	11,58	-0,77	0,32/-0,65
D	-1,90	0	0
E	-8,71	0	0
F	-5,25	0	0
Modelo (b)			
A	1,40	2,73/-1,27	-0,91/0
B	7,81	2,89/-3,17	-0,65/0,65/-0,91
C	8,96	-0,77	0,32/-0,65
D	-1,89	0	0
E	-8,71	0	0
F	-3,84	0	0

5 CONCLUSÃO

Este artigo tratou da análise das distribuições de esforços em barras de estruturas portantes de outdoors por meio da aplicação de programas computacionais visando-se sobretudo, a aplicação dos mesmos na melhor visualização e compreensão dessas distribuições ao longo das estruturas.

O estudo mostrou que os programas FTOOL[®] e Hypermesh[®] podem ser usados com muita versatilidade no ensino de Engenharia, permitindo vários tipos de análise, alterações de condições físicas e de contorno dos elementos constituintes das estruturas, quando da montagem de modelos que visam a simulação de situações reais da Engenharia Civil.

O problema da modelagem de esforços em estruturas de outdoors, devido a ação do vento, foi analisado de forma inovadora, abordando-se desde aspectos associados à vinculação das mesmas no solo e com o tipo de rigidez que ocorre nos nós de ligação entre as barras. Muitos acidentes têm ocorrido no país com esses painéis de divulgação devido a ação de ventos fortes, estimulando-se assim pesquisas que visem apresentar melhores disposições para as barras dessas estruturas.

Para continuidade dos estudos, pretende-se avaliar mais refinadamente o cálculo da rigidez da ligação entre as barras, bem como, a distribuição de esforços nas mesmas com a posterior verificação de segurança de acordo com a norma da ABNT NBR 7190/1997 de estruturas de madeira.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Araucária pela concessão de bolsa de Iniciação Científica à acadêmica Fabiana Yukiko Moritani para a realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1988. *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1997. *NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira*. São Paulo.

Bauer, F. L. A., 2001. *Materiais de construção*. Vol. 2. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos.

FTOOL[®] - Two-dimensional Frame Analysis Tool. Disponível em: <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/FTOOL®/>> Acessado em: Ago. 2013.

HyperWorks. Disponível em: <<http://www.altairuniversity.com/hyperworks/>> Acessado em: Mar. 2013.

Mendonça, P. T. R. *Materiais compostos & estruturas-sanduíche: projeto e análise*. 1a Edição. Editora Manole, Barueri, SP, 2005.

Pitta, J. A. A., 2001. *Ações devidas ao vento em edificações*. São Carlos: EdUFSCar, 47p. (Série Apontamentos).

Soriano, H. L. *Análise de Estruturas: Métodos das Forças e Métodos dos Deslocamentos*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.

Timoshenko, S. P. [et] Gere, J. E., 1993. *Mecânica dos Sólidos*. Volume 1. 1 ed. Tradução e coordenação técnica de José Rodrigues de Carvalho. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos.