

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

TIAGO AGUIAR GALES

MODELAGEM NUMÉRICA DA PONTE DE MADEIRA E CONCRETO
“FLORESTINHA”

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2015

TIAGO AGUIAR GALES

MODELAGEM NUMÉRICA DA PONTE DE MADEIRA E CONCRETO
“FLORESTINHA”

Monografia apresentada ao
Departamento de Ciências
Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito parcial para a
obtenção do título de Engenheiro
Industrial Madeireiro.

Orientador: Prof. Dr. Dsc. Pedro
Gutemberg de Alcântara
Segundinho.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2015

TIAGO AGUIAR GALES

MODELAGEM NÚMERICA DA PONTE DE MADEIRA E CONCRETO
"FLORESTINHA"

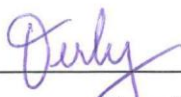
Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 01 de julho de 2015.

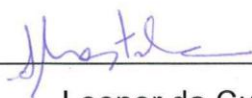
COMISSÃO EXAMINADORA



Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Dercilio Junior Verly Lopes
Doutorando em Ciências Florestais
Examinador



Leonor da Cunha Mastela
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais e irmãos, pela capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi o que me deu, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada, nossas conversas e conselhos me trouxeram ao final dessa jornada para assim iniciar mais uma dentre tantas que estão por vir.

Aos meus familiares e amigos pelo incentivo e pelo apoio constante.

Aos meus Tios maçons e irmãos Demolay além de meu Capítulo mãe "Alegre" nº 463, pela formação, convívio e aprendizado em uma ordem tão importante para os jovens de nossa sociedade.

Ao Prof. Dr. Pedro Segundinho, pela confiança e paciência ao caminhar nessa empreitada do qual não teria concluído este trabalho.

"Quem dera fossemos apenas homens, mas somos DeMolays".

Walt Disney

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Pai Celestial, pelas dádivas concedida em minha jornada assim como as falhas impostas por ele.

Aos meus pais e familiares não tenho palavras para expressar o agradecimento por essa conquista.

Aos meus companheiros da república "Babilônia" Joabe, Kauann, Keiffer e a agregada Barbará Ellen. Agradeço principalmente ao meu amigo Joabe que não mediu esforços em me ajudar e conceder meios para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos do DF e companheiros de dota 2, pelas madrugadas perdidas de diversão e descontração, assim como meus amigos do grupo Pixote e especialmente para as meninas.

Meus amigos(as) presentes assim como aqueles distantes que de alguma forma contribuíram para meu crescimento.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Industrial Madeireira assim como meus amigos da UFES, pela ajuda, amizade e alegrias. Especialmente aos meus grandes amigos Cláudio Cesar Nascimento de Souza Jr., Franco Simões Poletti, Allan Ewerton Rezende, Doahn Simões Flores, Renan Pereira, Lairó David Feuchard, José Antonio Neto, André Prata Villas-Boas e as meninas da madeira do qual não posso esquecer Thais Barbosa, Érica Ceschim e Dâmaris Billo Nogueira, sem vocês essa conquista não seria alcançada, meus sinceros agradecimentos.

A todos os professores, que foram importantes em minha vida acadêmica, e em especial aos professores Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela orientação deste trabalho e ao professor Djeison Cesar Batista pela orientação no programa de iniciação científica da universidade e por me mostrar o caminho para me tornar um engenheiro.

A todos que diretamente ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A madeira devido as suas características de resistência mecânica, durabilidade fácil trabalhabilidade se torna um material que apresenta uma superioridade para construções de pontes. Uma das partes mais importantes na estrutura de pontes é o tabuleiro, pois este distribui as cargas para as vigas principais. Atualmente há uma tendência de se usar peças com seções mistas em concreto e madeira, trazendo alguns benefícios tais como maior durabilidade e economia. Através do método dos elementos finitos (MEF) podemos fazer análise do comportamento mecânico dessas estruturas mistas através do programa SAP2000® versão estudante. O objetivo do trabalho foi comparar os resultados de deslocamento vertical obtidos da modelagem numérica pelo método dos elementos finitos (MEF), com os resultados teóricos obtidos pelo *Orthotropic Timber Bridges* e experimental da ponte de madeira e concreto denominada Ponte “Florestinha”. Idealizaram-se três modelos dos quais o modelo 1 e 2 utilizaram-se vigas de madeira roliças enquanto o modelo 3 utilizou vigas de seção quadrada representando vigas de madeira laminada colada, os modelos 1 e 2 diferem-se pelos conectores sendo que para o modelo 1 o conector é perpendicular a viga enquanto o modelo 2 o conector é paralelo a viga. Após a idealização dos modelos comparou-se os resultados com os valores experimentais e com os resultados obtidos pelo programa *Orthotropic Timber Bridges* (OTB). Na conclusão deste trabalho verificou-se que o modelo 1 obteve resultados próximos aos valores experimentais, tendo como Desvio Padrão do Erro para o carregamento central de $\pm 0,63$ cm enquanto para o carregamento lateral foi de $\pm 0,58$ cm assim conclui-se que o modelo numérico ajustado, pode representar o modelo e os deslocamentos da estrutura mista. O modelo 3 foi o que obteve pior relação entre os modelos e foi o que apresentou maior deslocamento no vão central das vigas.

Palavras chave: estruturas mistas de madeira e concreto. método dos elementos finitos. pontes de madeira e concreto. deslocamento vertical.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1.1 O problema e sua importância	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo geral	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Pontes de Madeira	3
2.2 Estruturas mistas de madeira e concreto	3
2.3 Método dos elementos finitos (MEF)	4
3 METODOLOGIA	6
3.1 Classificação da pesquisa	6
3.2 Metodologia do trabalho	6
3.3 Modelo numérico	9
3.4 Simulação em elementos finitos para análise da ponte florestinha	9
3.5 Caracterização dos modelos através do método dos elementos finitos	15
3.5.1 Modelo 1 - SAP 2000®	15
3.5.2 Modelo 2 - SAP 2000®	17
3.5.2 Modelo 3 - SAP 2000®	19
3.6 Análise dos dados	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Dados gerados do projeto, construção e ensaio, do protótipo "ponte florestinha"	23
4.2 Dados gerados pelo método dos elementos finitos	26
4.3 Análise estatística	29
5 CONCLUSÃO	31
6 REFERÊNCIAS	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores experimentais dos deslocamentos verticais do carregamento central e do carregamento lateral.....	23
Tabela 2 – Valores obtidos pelo software OTB dos deslocamentos verticais do carregamento central e do carregamento lateral.....	24
Tabela 3 – Valores dos deslocamentos verticais do modelo 1 obtidos pelo MEF para o carregamento central e carregamento lateral.....	26
Tabela 4 – Valores dos deslocamentos verticais do modelo 2 obtidos pelo MEF para o carregamento central e carregamento lateral.....	27
Tabela 5 – Valores dos deslocamentos verticais do modelo 3 obtidos pelo MEF para o carregamento central e carregamento lateral.....	28
Tabela 6 – Valores para o carregamento central.....	29
Tabela 7 – Valores para o carregamento lateral.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ponte florestinha.....	6
Figura 3.2 – Seção transversal adotada para a Ponte Florestinha.....	7
Figura 3.3 – Posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro, carregamento 1 centrado e carregamento 2, na lateral.....	8
Figura 3.4 – Disposição dos conectores "X" nas vigas de madeira.....	8
Figura 3.5 – Vista em três dimensões da parte superior do tabuleiro de madeira-concreto para os modelos 1 e 2.....	10
Figura 3.6 – Vista em três dimensões da parte inferior do tabuleiro de madeira-concreto para os modelos 1 e 2.....	11
Figura 3.7 – Vista em três dimensões da parte inferior do tabuleiro de madeira-concreto para o modelo 3.....	11
Figura 3.8 – Vista em três dimensões da parte inferior do tabuleiro de madeira-concreto para o modelo 3.....	11
Figura 3.9 – Vista frontal do tabuleiro de madeira-concreto e as translações dos nós dos apoios nas extremidades das vigas de madeira para os modelos 1 e modelo 2	12
Figura 3.10 – Vista frontal do tabuleiro de madeira-concreto e as translações dos nós dos apoios nas extremidades das vigas de madeira do modelo 3.....	12
Figura 3.11 – Posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro para todos os modelos, carregamento 1 centrado.....	13
Figura 3.12 – Posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro para todos os modelos, carregamento 2 lateral.....	14
Figura 3.13 – Disposição dos conectores do modelo 1.....	15
Figura 3.14 – Disposição dos conectores do modelo 2.....	15

Figura 3.15 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de stress, carregamento central do modelo 1.....	16
Figura 3.16 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de stress, carregamento lateral do modelo 1.....	17
Figura 3.17 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de stress, carregamento central do modelo 2.....	18
Figura 3.18 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de stress, carregamento lateral do modelo 2.....	19
Figura 3.19 – – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de stress, carregamento central do modelo 3.....	20
Figura 3.20 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de stress, carregamento lateral do modelo 3.....	21
Figura 4.1 – Comparação de deslocamentos verticais na seção transversal central com o carregamento central.....	25
Figura 4.2 – Comparação de deslocamentos verticais na seção transversal central com o carregamento lateral.....	25
Figura 4.3 – Comparação entre os modelos dos deslocamentos verticais na seção transversal central com o carregamento central.....	28
Figura 4.4 – Comparação entre os modelos dos deslocamentos verticais na seção transversal central com o carregamento lateral.....	29

1 INTRODUÇÃO

A madeira tem algumas propriedades que a torna mais viável que determinados materiais para o setor da construção civil, em que essas características variam de acordo com cada espécie. Devido a essa variação, a madeira tem que ser bem avaliada para determinado uso, principalmente no mercado de construção civil, na qual uma de suas aplicações é na parte estrutural.

Para ser possível fazer boas construções é fundamental um bom conhecimento do material para o uso racional da madeira. Como material de construção, a madeira oferece muitas peculiaridades (REMADE, 2001) que influênciam diretamente desde a qualidade da madeira escolhida e, por fim, da construção no geral. Faz-se, então, necessário o completo conhecimento da madeira e suas potencialidades estruturais para seu uso racional na construção civil.

Segundo Souza (2004), desde a construção da primeira ponte improvisada pelo homem tem-se conseguido desenvolver estruturas mais eficientes, para vencer vãos cada vez maiores. Em termos de custos as pontes de madeira construídas com técnicas atuais são de baixo custo, fácil trabalhabilidade e a durabilidade é satisfatória. A maioria das pontes no Brasil não se tem um planejamento e em sua construção não há técnicos especializados em madeira, resultando em estruturas caras, inseguras e de baixa durabilidade.

A madeira apresenta um elevado valor como matéria prima, Soriano (2001) afirma que as estruturas mistas (constituídas por materiais de diferentes propriedades mecânicas) são uma solução para manter a segurança estrutural e reduzir o custo da construção com desempenho arquitetônico e ambiental vantajoso.

De acordo com Segundinho (2005), a utilização de madeira com concreto na construção de pontes poderá solucionar problemas de durabilidade em comparação a pontes que utilizam somente madeira, resultando em maior economia nas construções compostas de madeira e concreto.

Soriano (2001) afirma que peças com seções mistas em concreto e madeira podem desempenhar função estrutural, desde que as propriedades de elasticidade e de resistência sejam aproveitadas de forma consciente, além de observar as condições de serviço, para se obter estruturas com grau de durabilidade satisfatório.

A tendência atual é estudar estruturas que, além de eficientes, sejam de execução rápida e baixo custo para que também possam ser construídas em locais de difícil acesso e pouca infraestrutura (MORAES, 2007).

Devido aos avanços tecnológicos a engenharia se tornou a profissão que estuda e aplica os conceitos matemáticos, técnicos e científicos. Na área de análise de estruturas das construções um dos meios que facilita o entendimento é o Método dos Elementos Finitos (MEF).

O MEF teve seu desenvolvimento no final do século XVIII, quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos. O MEF é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original.

1.1 O problema e sua importância

As pontes de madeira são construídas com pouco ou nenhum conhecimento tecnológico, isso acaba gerando diversos problemas como reduzindo a vida útil e a segurança da construção, outro problema é o alto custo para se fazer um experimento para avaliar estruturas de madeira, fazendo com que a análise estrutural pelo método dos elementos finitos seja uma alternativa economicamente viável para essa situação.

Assim os valores obtidos pelo método dos elementos finitos se equiparam com os valores obtidos experimentalmente?

Espera-se que os valores obtidos através da modelagem numérica se assemelhem aos valores obtidos experimentalmente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O Objetivo geral será comparar os resultados do deslocamento vertical obtidos da modelagem numérica pelo método dos elementos finitos (MEF), com os resultados teóricos obtidos pelo programa *Orthotropic Timber Bridges* (OTB) e experimental da ponte de madeira e concreto denominada ponte “Florestinha”.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pontes de Madeira

Franklin D. Roosevelt ex-presidente dos Estados Unidos da América na inauguração da ponte George Washington, em 1931, relacionou a história da construção das pontes à própria história da civilização e do progresso dos povos. A construções de pontes, aceleram a evolução econômica na região onde é implementada, isso facilita o acesso entre regiões ocasionando uma maior difusão de aproveitamento de recursos, educacionais, culturais artísticos, políticos e religiosos, assim caracterizando as pontes de madeira com valor inestimável (SOUZA, 2004).

A madeira é um material complexo, heterogêneo, anisotrópico, higroscópico e de origem biológica. Proporciona uma ótima resistência mecânica e se comparada ao seu peso se torna o melhor dentre os materiais utilizados nas construções. Quando usada estruturalmente, a madeira ajuda a reduzir a dimensão da fundação (por ser leve) e o efeito da ação sísmica. Quando preservada em boas condições de manutenção, isto é, mantendo-a seca, arejada e preferencialmente sem contato com o solo, ela proporciona uma boa durabilidade, isolamento térmico, elétrico e acústico excelentes. Existem madeiras com cores e textura atrativas e agradáveis, o que possibilita uma ampla escolha de formas, que agrada desde os arquitetos, até os clientes que ficam satisfeitos com o resultado da construção (MARQUES, 2008).

Devido as suas características a madeira torna-se um material superior na construção de pontes de pequenos e médios vãos, não só pela sua abundância, mas também pelas suas características de resistência e durabilidade, o que a torna economicamente viável (CALIL; DIAS, 1997).

No desenvolvimento das pontes, uma das partes fundamentais é o tabuleiro, parte da superestrutura que forma a pista de rolamento e distribui as cargas das rodas dos veículos para as vigas principais (PIGOZZO, 2004).

2.2 Estruturas mistas de madeira e concreto

As estruturas mistas de madeira e concreto são designados para constituição de forro, pisos e paredes. Além disso, podem constituir a superestrutura de pontes, passarelas para pedestres e outras estruturas em geral (SORIANO; MASCIA, 1999).

No caso de pontes com estrutura de madeira e tabuleiro de concreto, destaca-se o ganho de vida útil proporcionado pela proteção das peças de madeira contra a abrasão e as intempéries. A utilização de uma laje de concreto sobre as peças de madeira da superestrutura pode prolongar em até três vezes a vida útil das pontes (SORIANO; MASCIA, 1999).

Ceccotti (1995 citado por MORAES, 2007) afirma que ainda em comparação às estruturas de madeira, as seções mistas apresentam capacidade de carga aproximadamente duas vezes maior e rigidez melhorada de três a quatro vezes.

Quando se comparam estruturas mistas com lajes de piso ou cobertura em concreto armado, além da redução do custo direto por metro quadrado, a execução da estrutura também é mais rápida, empregando-se menor quantidade de escoras e fôrmas como aspectos favoráveis à sua aplicação. (CECCOTTI 1995 citado por SORIANO, 2001).

O sistema de pontes em placa mista composta de madeira e concreto consistem de uma laje de concreto, rigidamente conectada aos elementos estruturais de madeira de tal modo que a construção funcione monoliticamente. Em vigas simplesmente apoiadas, o concreto resiste à compressão ao passo que a madeira resiste à tração (SOUZA 2004).

Os tabuleiros em lajes são construídos pela concretagem de uma camada de concreto em uma base contínua de peças de madeira pregadas longitudinalmente. Os tabuleiros compostos em laje foram inicialmente construídos em 1932 e foram usados durante as décadas de 30 e 40 (SOUZA 2004).

2.3 Método dos elementos finitos (MEF)

No âmbito da engenharia de estruturas, o método dos elementos finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores (AZEVEDO, 2003).

Atualmente, o método dos elementos finitos é uma parte importante e indispensável em projetos de engenharia. Devido a sua confiabilidade, flexibilidade e relativa facilidade de implementação computacional, o método é empregado extensivamente na análise de sólidos e estruturas (GOMES, 2005).

Esse método baseia-se na transformação em sistemas de equações lineares as equações diferenciais parciais que governam problemas em domínios contínuos.

No caso dos problemas de análise estrutural, as equações de equilíbrio, as relações deformações-deslocamentos e as equações constitutivas dos materiais. No MEF, o domínio correspondente à estrutura supõe-se com efeito decomposto em subdomínios, ditos elementos finitos, dentro de cada um dos quais o campo elástico se exprime como combinação linear de um número finito de campos elementares ou modos elementares de deformação (SEGUNDINHO, 2005).

Mediante a discretização de cada material que compõe a seção mista, é possível modelar a estrutura pelo método dos elementos finitos. Emprega-se essa técnica para a análise do comportamento de vigas mistas em madeira e concreto, comparando resultados experimentais e valores obtidos por um programa computacional, de forma a verificar o grau de interação entre a mesa e a alma da estrutura GUTKOWSKI & CHEN (1996 citado por SORIANO, 2001).

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da pesquisa

Esta pesquisa se classifica, quanto aos fins, como descritiva, pois estuda características e propriedades intrínsecas da madeira com o fim de obter comparação entre as variáveis obtidas por modelagem numérica em relação aos valores obtidos experimentalmente. Já quanto aos meios, a pesquisa é classificada como experimental, pois através de um objeto de estudo faz-se experimentos e determina-se uma comparação entre as variáveis.

O problema investigado pode ser classificado de duas formas distintas: qualitativo e quantitativo. A pesquisa será considerada quantitativa, porque utiliza a linguagem matemática para explicar os resultados ou relações de casualidade entre fenômenos.

3.2 Metodologia do trabalho

O trabalho se baseia nos resultados do projeto, construção e ensaios do protótipo da ponte “Florestinha”, construída por Pigozzo (2004) que estudou a aplicação de barras de aço coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes. Na Figura 3.1 tem-se a imagem da ponte “Florestinha”.



Figura 3.1 – Ponte “Florestinha”. Fonte: Pigozzo (2004).

Na figura 3.2 tem-se a seção transversal adotada para a ponte “Florestinha”.

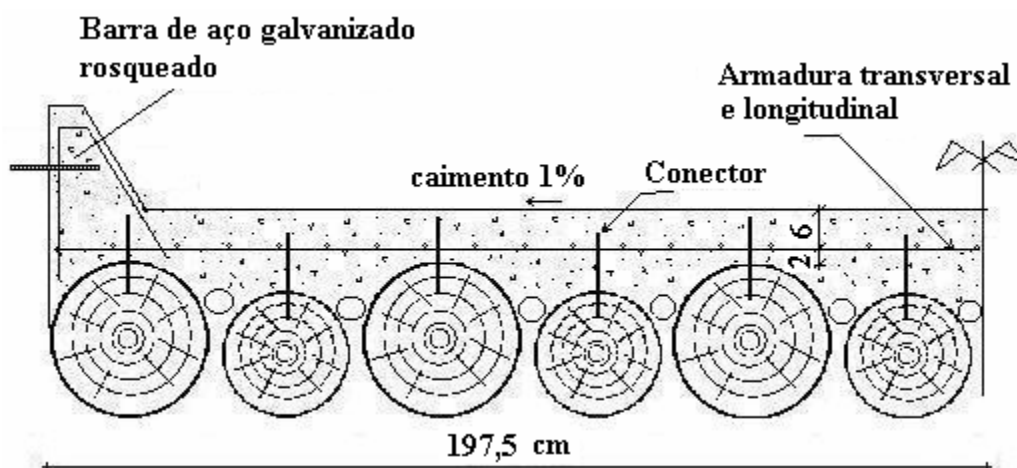


Figura 3.2 – Seção transversal adotada para a Ponte “Florestinha”. Fonte: Pigozzo (2004).

A ponte “Florestinha” situa-se na estrada municipal que liga o município de Piracicaba a Anhambi no estado de São Paulo, nas coordenadas: 22° 45' 40"S e 47° 45' 12,5"W com altitude em relação ao nível do mar de 450m.

No projeto da ponte “Florestinha” foram utilizadas 12 vigas naturais da espécie *Eucalyptus Citriodora*, apresentando umidade média de 20%, com comprimento de 700,0 cm e diâmetro médio no centro do vão, de 30,0 cm, as vigas foram numeradas de forma crescente no mesmo sentido do fluxo d'água para o dimensionamento das medidas de deslocamentos verticais.

O tabuleiro de concreto foi projetado para uma espessura média de 12,0 cm com comprimento de 700,0 cm e largura de 395,0 cm.

O veículo-tipo utilizado para as provas de cargas foi um caminhão com dois eixos traseiros e carregamentos de 120 kN por eixo traseiro, o posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro foi disposto ao centro e lateralmente da laje de concreto conforme a Figura 3.3.

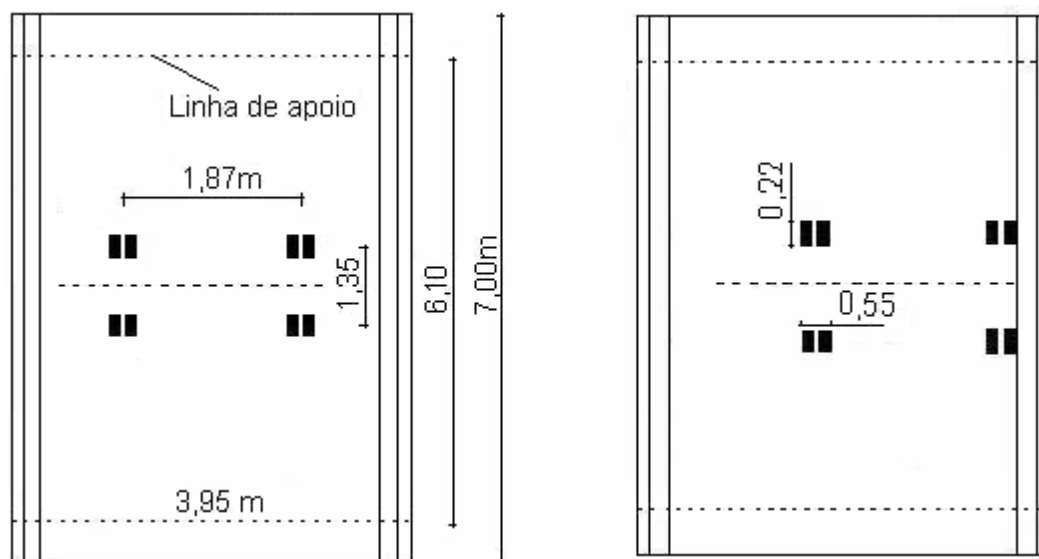


Figura 3.3 – Posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro, carregamento 1 centrado e carregamento 2, na lateral. Fonte: Pigozzo (2004).

Para fazer a ligação entre a viga e a laje de concreto utilizou-se conectores em “X” de barras de aço CA-50 com diâmetro de 8,0 mm, inclinadas de 45° em relação ao eixo das vigas. Os espaçamentos estão representados na Figura 3.4.

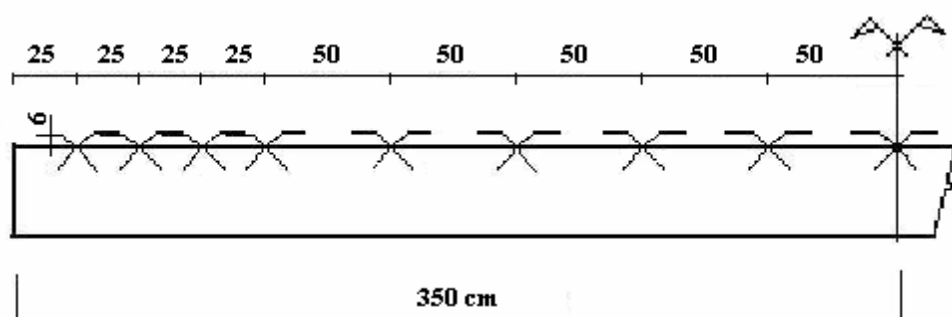


Figura 3.4 – Disposição dos conectores “X” nas vigas de madeira. Fonte: Pigozzo (2004).

Após a análise dos dados obtidos por Pigozzo (2004) através dos dados experimentais e pelo programa de cálculo estrutural *Orthotropic Timber Bridges* (OTB[®]) procedeu-se a modelagem e a análise estrutural por meio do MEF, utilizando-se o programa *Structural Analysis Program* (SAP2000[®]) estudante obtido pelo site do desenvolvedor, para se fazer o levantamento dos deslocamentos verticais.

3.3 Modelo numérico

No programa SAP2000® encontram-se vários elementos estruturais, com isso será feita a idealização do modelo do tabuleiro utilizando esses elementos, tais como *Frames*, *Shells*, *Asolid* e *Solid*. Para a confecção do modelo numérico computacional do tabuleiro misto de madeira e concreto utilizará o elemento de barra (*Frame*) para representar os pinos de aço, o elemento sólido (*Solid*) para representar os materiais madeira e concreto.

O elemento de barra (*Frame*) usa em geral uma formulação tridimensional a qual inclui seis graus de liberdade, três rotações e três translações. Esse elemento é determinado segundo uma linha conectada a dois nós em suas extremidades. Cada elemento tem seu próprio sistema local de coordenadas para ser usado quando temos que definir as propriedades das seções, os carregamentos e as respostas. Nesses elementos podemos selecionar de forma parcial ou total os efeitos da rigidez que podem ocorrer nas junções (nós).

O elemento sólido (*Solid*) é usado para modelar estruturas sólidas tridimensionais, uma vez que, é baseado em uma formulação isoparamétrica que inclui nove modos de flexão incompatíveis opcionais. O modo de flexão incompatível mostra significativamente o comportamento à flexão do elemento se a geometria deste for de forma retangular. Será mostrado um comportamento improvisado mesmo se a geometria do elemento não for retangular. O sistema local de coordenadas é idêntico ao sistema global, sendo o sistema local usado para definir as propriedades do material, as cargas, e as reações. Também são permitidas a inclusão de propriedades anisotrópicas do material.

3.4 Simulação em elementos finitos para análise da ponte “Florestinha”

Para se fazer a modelagem do tabuleiro de madeira-concreto idealizou-se três modelos, dos quais cada um apresenta dois tipos de carregamento, o carregamento central e o carregamento lateral, o modelo 1 difere-se do modelo 2 apenas quanto aos conectores entre a viga e o tabuleiro enquanto o modelo 3 adotou-se hipoteticamente as vigas de madeiras laminada colada (MLC) em vez de vigas roliças. O modelo 1 e 3 apresenta conectores no sentido perpendicular a viga de acordo com o padrão

utilizado na construção da ponte enquanto o modelo 2 apresenta conectores achatados seguindo o princípio da equivalência da inércia.

Fizeram-se algumas considerações nos modelos de modo que os resultados numéricos das discretizações da laje de concreto, do pino de aço e das vigas de madeira, reflitam da melhor maneira possível o comportamento estrutural obtido experimentalmente. Nas Figuras 3.5 e 3.6 tem-se a vista da ponte modelada no programa SAP2000® para o modelo 1 e modelo 2.



Figura 3.5 – Vista em três dimensões da parte superior do tabuleiro de madeira-concreto para os modelos 1 e 2. Fonte: O autor.

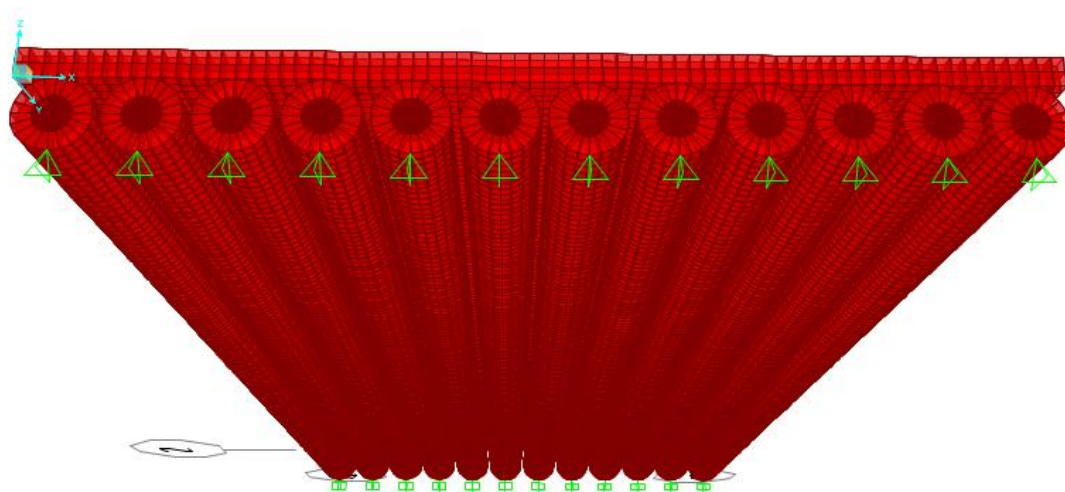


Figura 3.6 – Vista em três dimensões da parte inferior do tabuleiro de madeira-concreto para os modelos 1 e 2. Fonte: O autor.

Nas Figuras 3.7 e 3.8 tem-se a vista da ponte modelada no programa SAP2000® para o modelo 3.

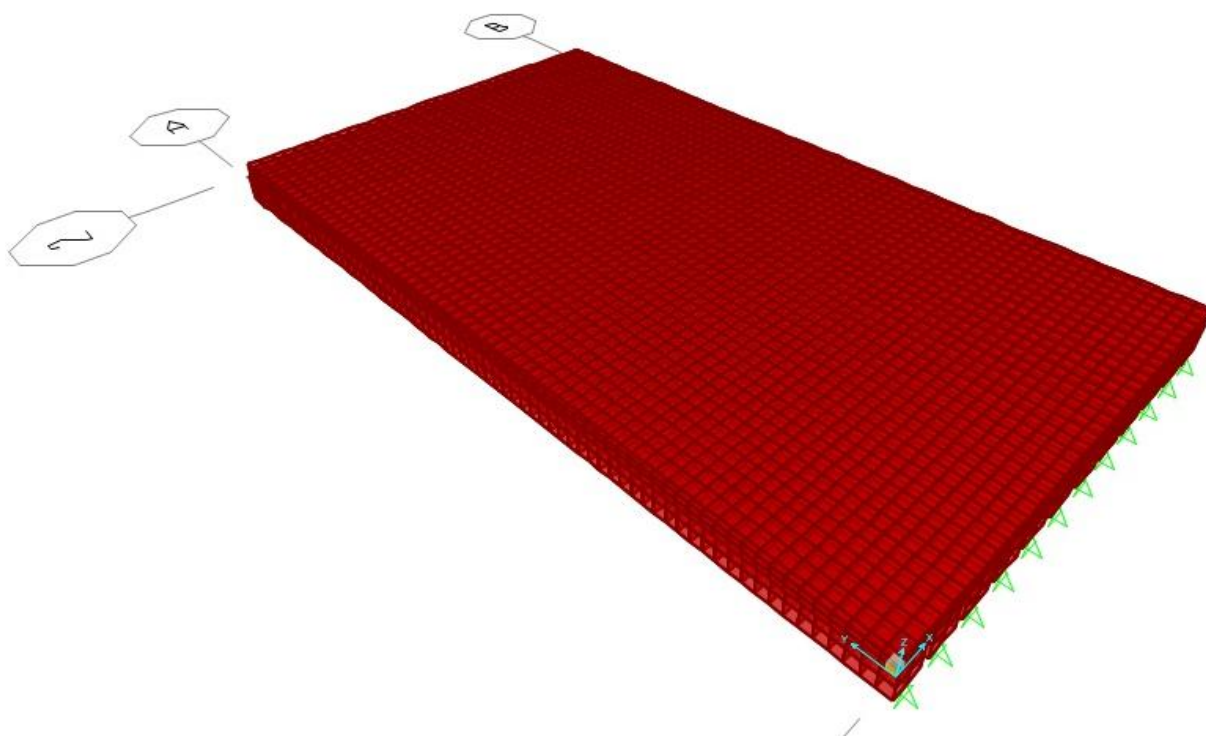


Figura 3.7 – Vista em três dimensões da parte superior do tabuleiro de madeira-concreto para o modelo 3. Fonte: O autor.

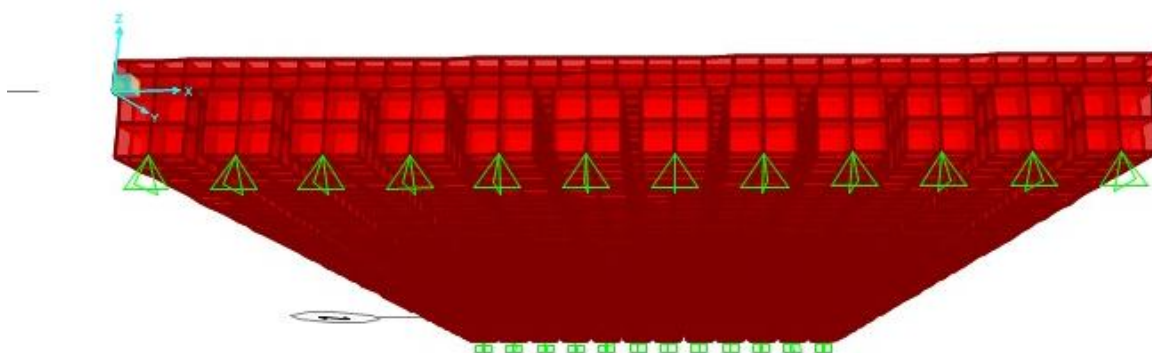


Figura 3.8 – Vista em três dimensões da parte inferior do tabuleiro de madeira-concreto para o modelo 3. Fonte: O autor.

As translações dos nós dos apoios nas extremidades das vigas de madeira foram restringidas nas três direções e as rotações em torno dos eixos principais foram

liberadas, as vigas foram dispostas a uma distancia de 33 cm entre si, na Figura 3.9, tem-se a vista frontal do tabuleiro de madeira-concreto e as translações dos nós dos das vigas de madeira para os modelos 1 e 2 enquanto a Figura 3.10 mostra a vista frontal do tabuleiro de madeira-concreto para o modelo 3 .

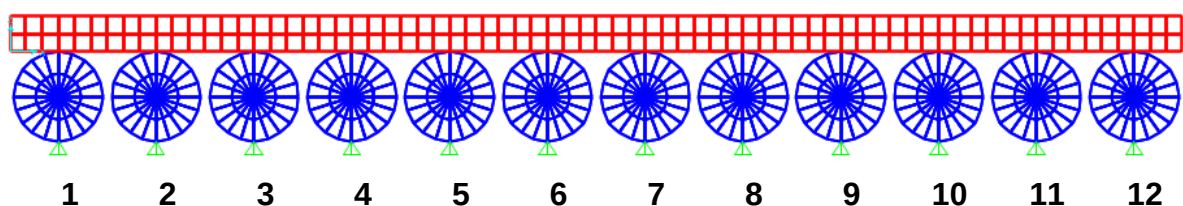


Figura 3.9 – Vista frontal do tabuleiro de madeira-concreto e as translações dos nós dos apoios nas extremidades das vigas de madeira para os modelos 1 e modelo 2. Fonte: O autor.

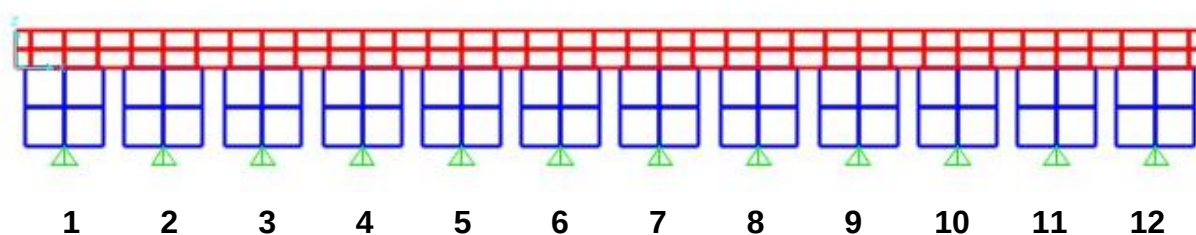


Figura 3.10 – Vista frontal do tabuleiro de madeira-concreto e as translações dos nós dos apoios nas extremidades das vigas de madeira do modelo 3. Fonte: O autor.

O coeficiente de Poisson para o concreto foi considerado igual a 0,20, enquanto o coeficiente de Poisson para a madeira foi considerado igual 0,30, mesmo sendo esse um material ortótropo, na modelagem a madeira foi considerada como um material isotrópico.

A laje de concreto tem dimensões igual a (395x700x12 cm) e foi discretizada em 5.460 elementos de sólidos com dimensões (11x10x6 cm) para todos os modelos propostos.

A simulação das cargas foi aplicada no nó onde se encontra os sólidos da laje, no mesmo lugar onde foram colocadas as cargas no ensaio experimental, para o carregamento central utilizou-se os pontos cartesianos do tabuleiro A (104; 280; 0), B (291; 280; 0), C (291; 410; 0) e D (104; 410; 0), enquanto para o carregamento lateral utilizou-se os pontos A (148; 280; 0), B (335; 280; 0), C (335; 410; 0) e D (148; 410; 0)

e em ambos carregamentos os pontos apresentam carga de 60kN provenientes do veículo-tipo para os três modelos apresentados, conforme as Figuras 3.11 e 3.12.

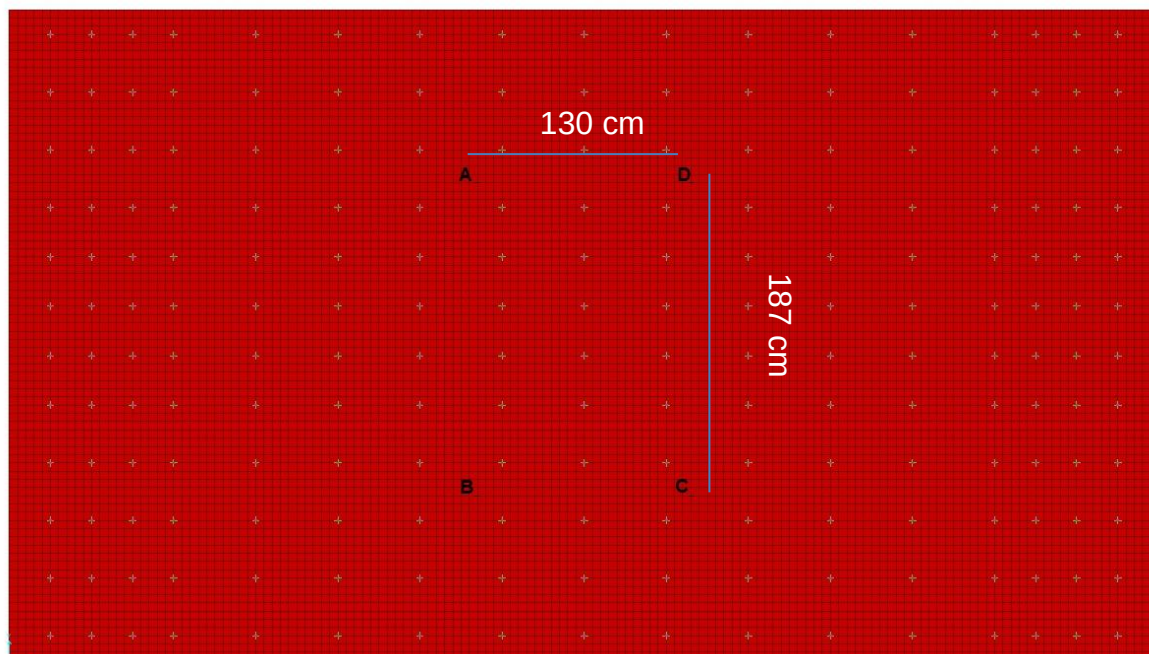


Figura 3.11 – Posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro para todos os modelos, carregamento 1 centrado. Fonte: O autor.

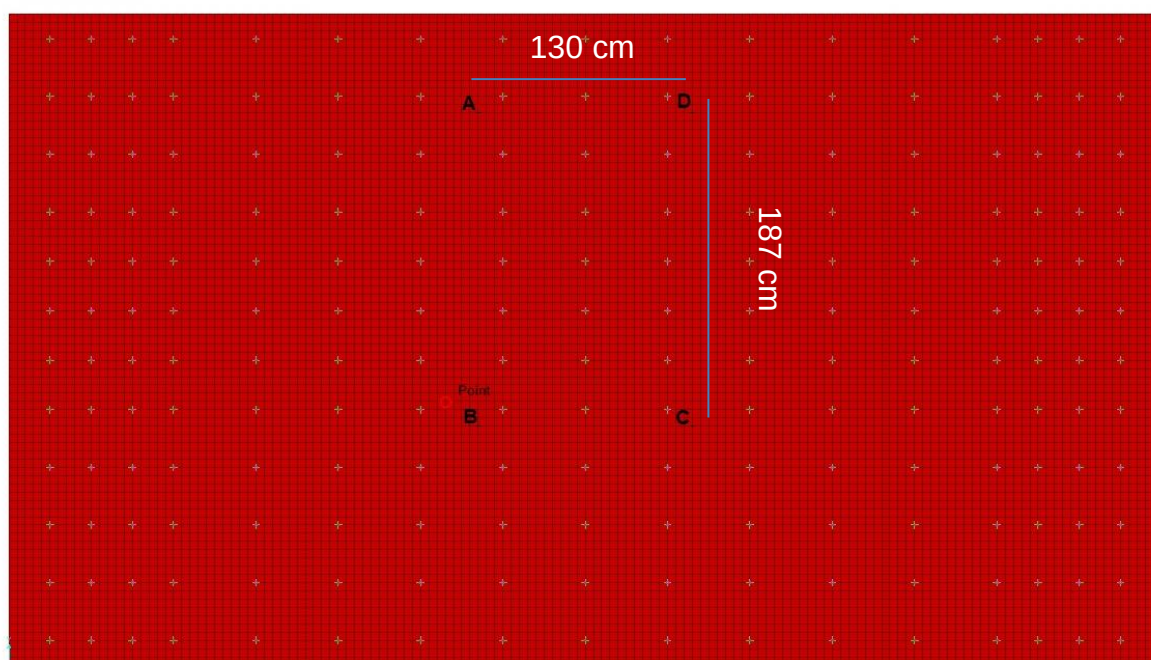


Figura 3.12 – Posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro para todos os modelos, carregamento 2 lateral. Fonte: O autor.

As dimensões das doze vigas de madeira para os modelos 1 e modelo 2 são de 700 cm de comprimento, para o diâmetro adotou-se o valor médio de 30cm e foi discretizada em 2800 elementos de sólido cada um com comprimento de 10 cm e feito em um de um ângulo de 18° de rotação. Para o modelo 3 as vigas roliças foram interpretadas como vigas de seções quadradas equivalentes, considerando o princípio da equivalência da inércia. As vigas do modelo 3 possuem dimensões igual a (26x700x26 cm) e foram discretizadas em 280 elementos de sólido, com dimensões de (13x10x13 cm). Após a discretização das vigas procedeu-se a coleta dos valores dos nós (joint) no centro de cada viga para futura obtenção dos valores de deslocamento verticais.

Para a ligação entre a laje de concreto e as vigas de madeira, foi simulada uma barra do elemento Frame seguindo o princípio da equivalência da inércia já que o programa não dispunha do modelo de conectores apresentado na construção da ponte assim seguindo a disposição apresentada na Figura 3.4. Para esses nós ligados por essas barras permitiu-se apenas a translação no sentido perpendicular ao tabuleiro misto de madeira concreto e rotação em torno do eixo perpendicular ao sentido longitudinal. No modelo 1 e 3 foram utilizados conectores perpendiculares a viga como mostra a Figura 3.13 com comprimento de 12 cm e diâmetro de 8mm. No

modelo 2 foram utilizados conectores paralelos a viga com comprimento de 12cm e diâmetro de 8mm conforme a Figura 3.14.

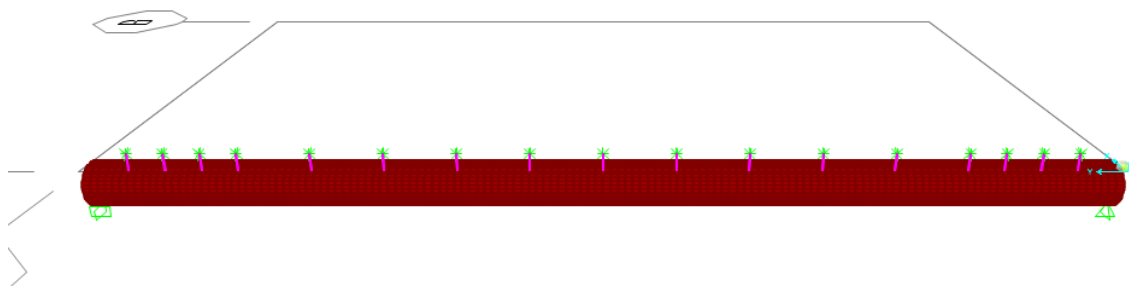


Figura 3.13 – Disposição dos conectores do modelo 1. Fonte: O autor.

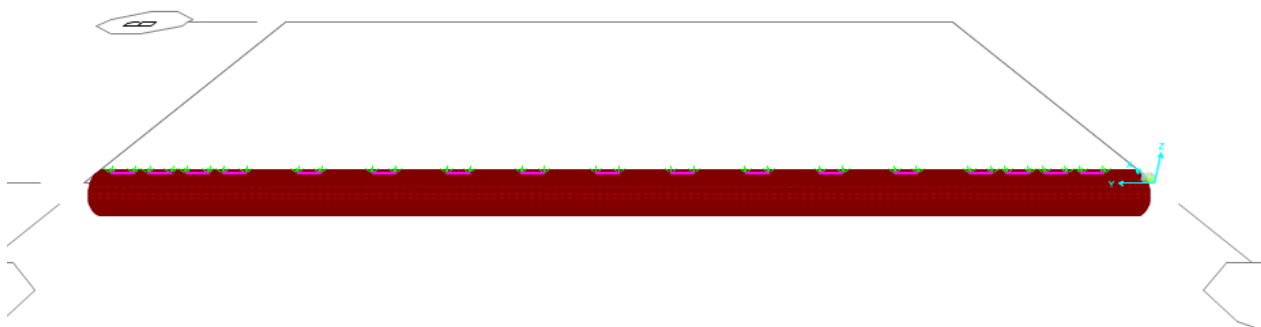


Figura 3.14 – Disposição dos conectores do modelo 2. Fonte: O autor.

3.5 Caracterização dos modelos através do método dos elementos finitos

3.5.1 Modelo 1 - SAP 2000®

No modelo 1 foi adotado um módulo de elasticidade do concreto secante da madeira e dos pinos de acordo com os dados apresentados no projeto, construção, do protótipo ponte "Florestinha" (Pigozzo. 2004). Os resultados desse modelo estão representados nas Figuras 3.15 e 3.16 com representação em cores das tensões em kN/cm^2 na estrutura.

- Carregamento Central

Tipo de carga aplicada: Trem-tipo de 120 kN por eixo (60 kN por roda);

Módulo de Elasticidade Médio do Concreto: 20200 MPa;

Módulo de Elasticidade Médio da Madeira: 20000 MPa.

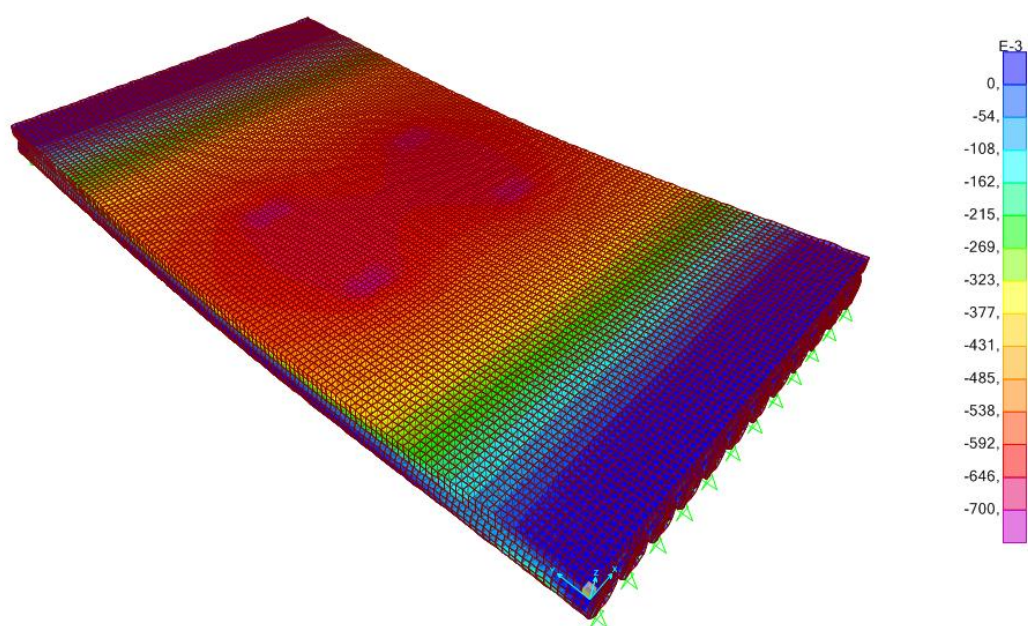


Figura 3.15 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de tensão, carregamento central do modelo 1 . Fonte: O autor.

- Carregamento Lateral

Tipo de carga aplicada: Trem-tipo de 120 kN por eixo (60 kN por roda);

Módulo de Elasticidade do Concreto: 20200 MPa;

Módulo de Elasticidade da Madeira: 20000 MPa.

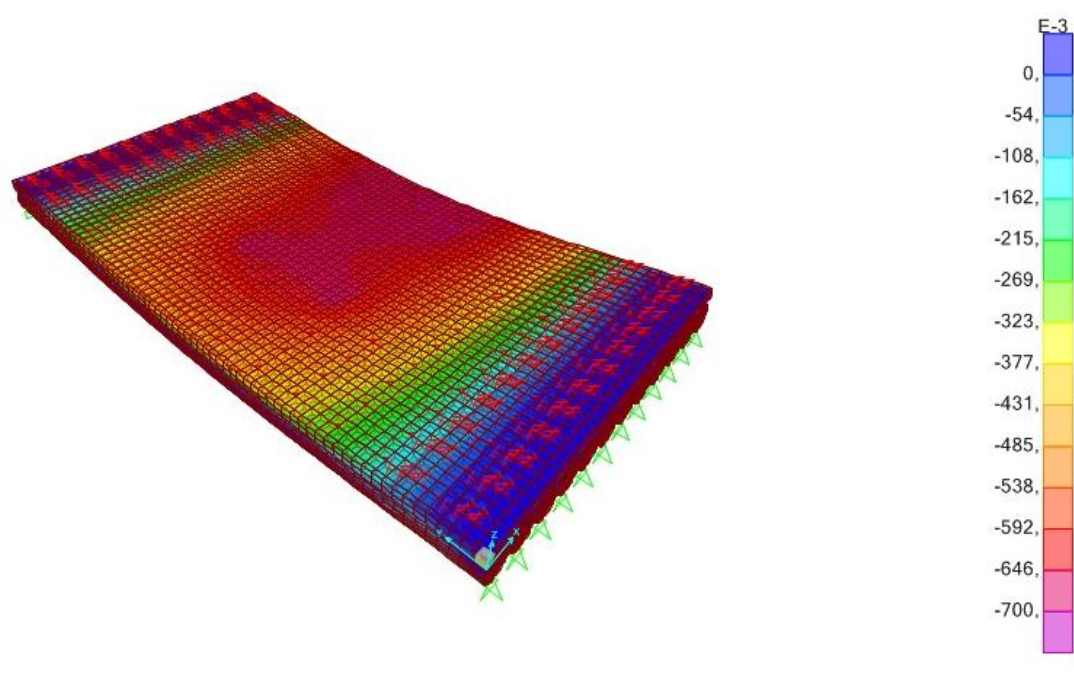


Figura 3.16 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de tensão, carregamento lateral do modelo 1. Fonte: O autor.

3.5.2 Modelo 2 - SAP 2000®

No modelo 2 mantiveram-se as mesmas características dos materiais utilizados no primeiro modelo numérico diferenciando apenas os conectores. Os resultados desse modelo estão representados nas Figuras 3.17 e 3.18 com representação em cores das tensões em kN/cm^2 na estrutura.

- Carregamento Central

Tipo de carga aplicada: Trem-tipo de 120 kN por eixo (60 kN por roda);

Módulo de Elasticidade do Concreto: 20200 MPa;

Módulo de Elasticidade da Madeira: 20000 MPa.

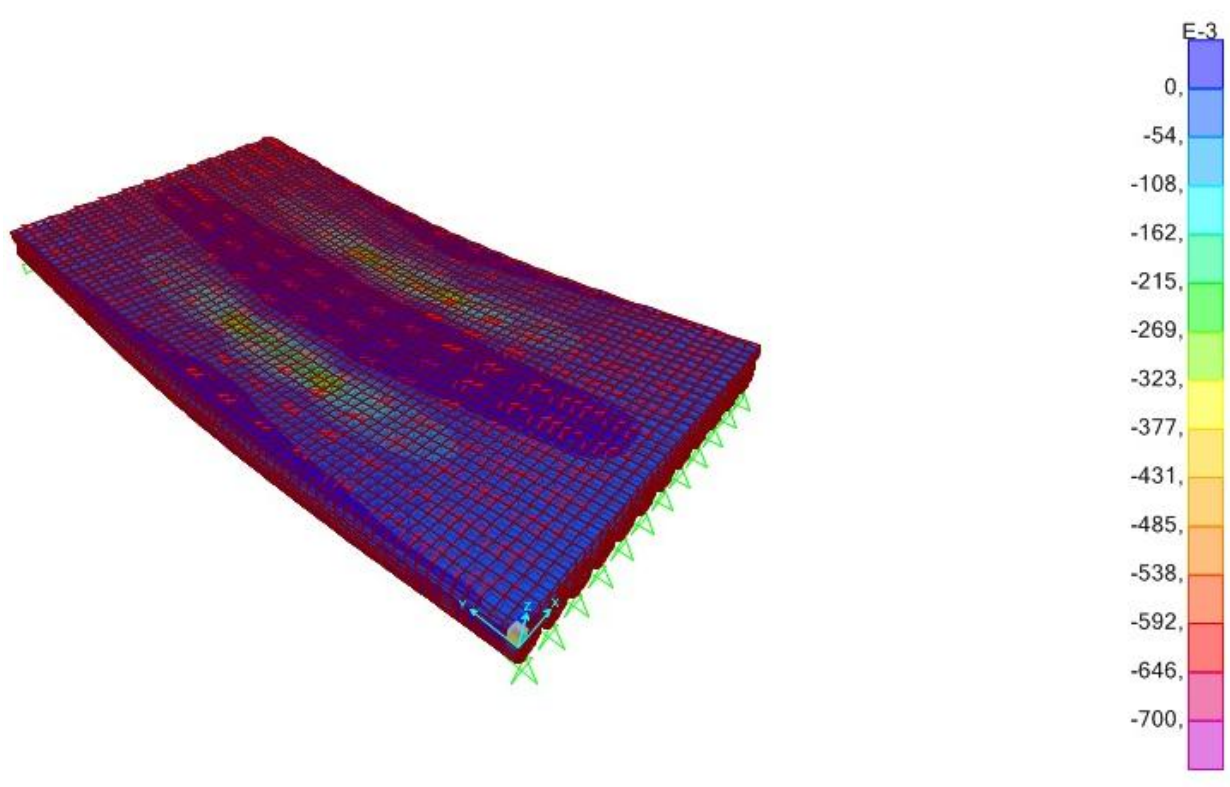


Figura 3.17 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de tensão, carregamento central do modelo 2. Fonte: O autor.

- Carregamento Lateral

Tipo de carga aplicada: Trem-tipo de 120 kN por eixo (60 kN por roda);

Módulo de Elasticidade do Concreto: 20200 MPa;

Módulo de Elasticidade da Madeira: 20000 MPa.

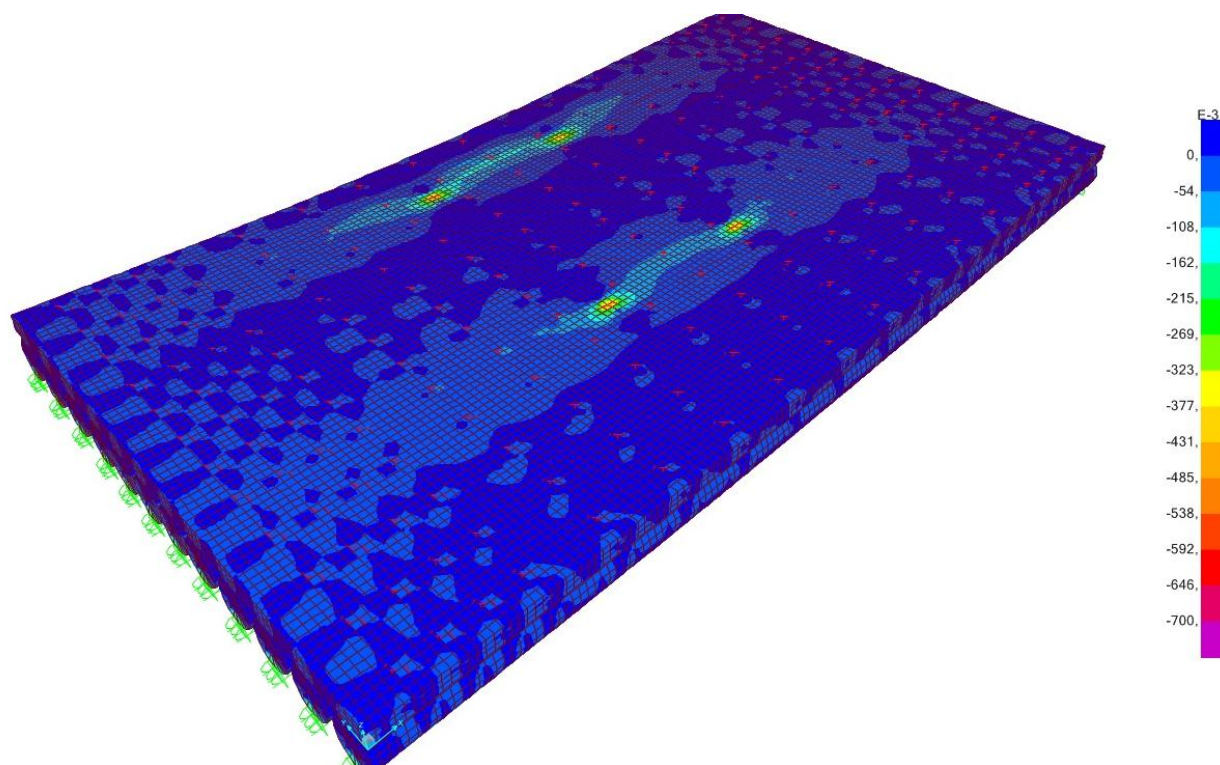


Figura 3.18 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de tensão, carregamento lateral do modelo 2. Fonte: O autor.

3.5.2 Modelo 3 - SAP 2000®

No modelo 3 mantiveram-se as mesmas características dos materiais utilizados no primeiro modelo numérico. Os resultados desse modelo estão representados nas Figuras 3.19 e 3.20 com representação em cores das tensões em kN/cm² na estrutura.

- Carregamento Central

Tipo de carga aplicada: Trem-tipo de 120 kN por eixo (60 kN por roda);

Módulo de Elasticidade do Concreto: 20200 MPa;

Módulo de Elasticidade da Madeira: 20000 MPa.

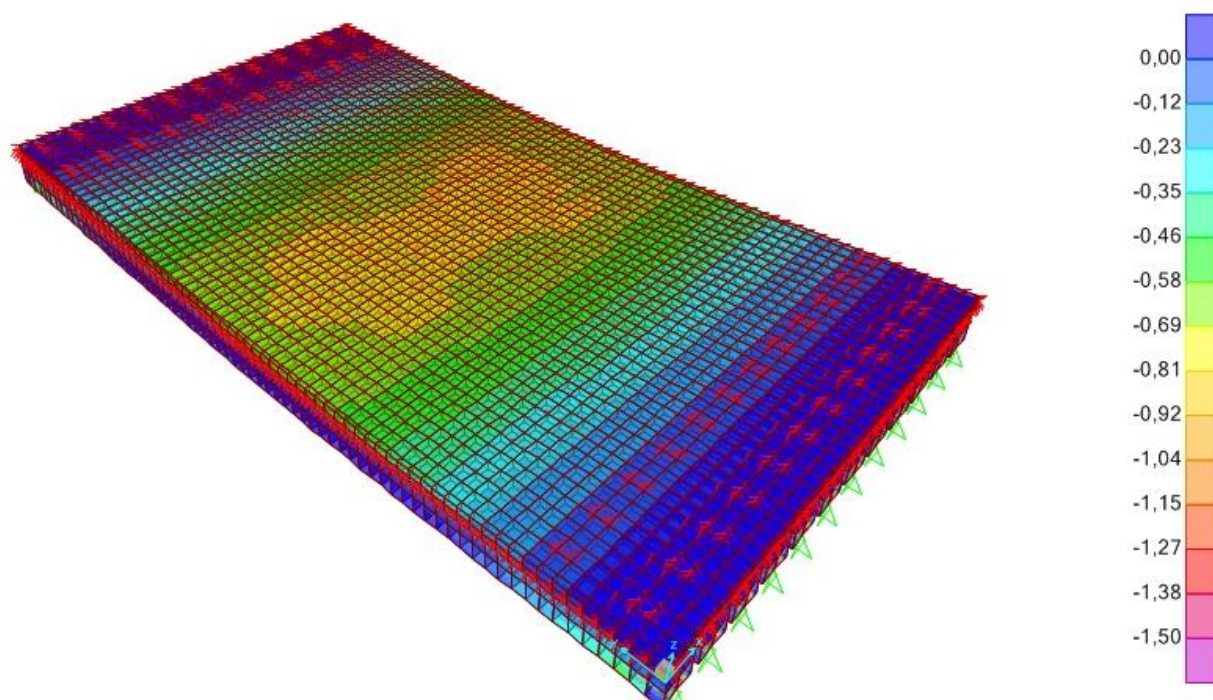


Figura 3.19 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de tensão, carregamento central do modelo 3. Fonte: O autor.

- Carregamento Lateral

Tipo de carga aplicada: Trem-tipo de 120 kN por eixo (60 kN por roda);

Módulo de Elasticidade do Concreto: 20200 MPa;

Módulo de Elasticidade da Madeira: 20000 MPa.

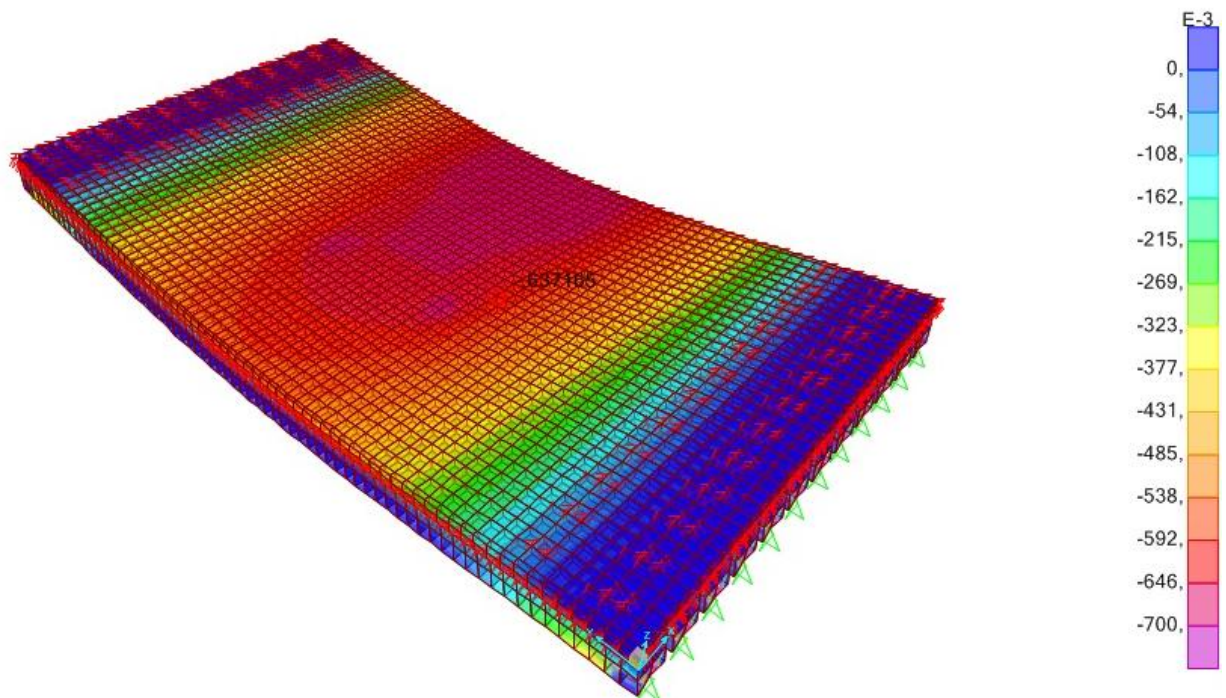


Figura 3.20 – Vista deformada do tabuleiro misto de madeira-concreto com diagrama de stress, carregamento lateral do modelo 3. Fonte: O autor.

3.6 Análise dos dados

Os dados foram analisados estatisticamente, foram determinados o valor do Erro Médio (EM) e do Desvio Padrão do Erro (DPE), para os deslocamentos verticais obtidos por meio dos modelos para os carregamentos centrais e laterais.

Erro Médio (EM) (Equação 1):

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{simulado(i)} - X_{medido(i)}| \quad (1)$$

em que: $X_{simulado(i)}$ é o valor simulado na posição i , $X_{medido(i)}$ é o valor medido na posição i

Erro Percentual Médio (EPM) (Equação 1):

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |EP_i| \quad (2)$$

em que: $EP_i = 100 \times \left(\frac{E_{exp} - E_{prog}}{E_{exp}} \right)$ são os ganhos em porcentagem para a i -ésima observação ($i = 1, 2, \dots, n$). Este valor leva em conta um sinal, designando se a função subestima (+) ou superestima (-) o valor observado.

A Equação 3 pode ser escrita da mesma forma que a Equação 2:

$$EPM = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_{exp} - E_{prog}}{E_{exp}} \right| \quad (3)$$

Desvio Padrão de Erro (DPE) (Equação 2):

$$DPE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{erro(i)} - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4)$$

em que X_{erro} é o valor do erro na posição i , $\bar{X}$ é a média dos valores do erro i , n é o número de valores da amostra e i representa o índice que determina a posição simulada.

Utilizou-se também estatística descritiva ao serem avaliadas médias e coeficiente de variação (CV).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados gerados do projeto, construção e ensaio, do protótipo ponte “florestinha”

Para se obter os dados da Tabela 1 e Tabela 2, utilizou-se regressão linear com os valores apresentados por Pigozzo (2004). Na Tabela 1 apresenta-se a numeração das vigas juntamente com sua posição em relação ao tabuleiro de concreto e os deslocamentos verticais dos carregamentos central e laterais.

Tabela 1 – Valores experimentais dos deslocamentos verticais do carregamento central e do carregamento lateral.

Viga	Posição (cm)	Carregamento central (mm)	Carregamento lateral (mm)
1	16,00	-3,0	-5,0
2	49,00	-4,0	-6,0
3	82,00	-6,0	-6,0
4	115,00	-6,0	-6,0
5	148,00	-6,0	-5,0
6	181,00	-6,0	-5,0
7	214,00	-5,0	-5,0
8	247,00	-5,0	-5,0
9	280,00	-5,0	-5,0
10	313,00	-5,0	-4,0
11	346,00	-4,0	-3,0
12	379,00	-2,0	-1,0

Fonte: Pigozzo (2004).

Na Tabela 2 estão apresentado os valores obtidos pelo programa OTB® com a numeração das vigas juntamente com sua posição em relação ao tabuleiro de concreto e os deslocamentos verticais dos carregamentos centrais e laterais.

Tabela 2 – Valores obtidos pelo programa OTB[®] dos deslocamentos verticais do carregamento central e do carregamento lateral.

Viga	Posição (cm)	Carregamento central (mm)	Carregamento lateral (mm)
1	16,00	-2,51	-3,48
2	49,00	-3,40	-4,38
3	82,00	-4,12	-4,77
4	115,00	-4,66	-5,01
5	148,00	-5,01	-5,09
6	181,00	-5,19	-5,02
7	214,00	-5,19	-4,80
8	247,00	-5,01	-4,42
9	280,00	-4,66	-3,89
10	313,00	-4,12	-3,21
11	346,00	-3,40	-2,38
12	379,00	-2,51	-1,39

Fonte: Pigozzo (2004).

A Figura 4.1 apresenta uma comparação entre os valores experimentais com os valores obtidos pelo programa OTB[®] para o carregamento central.

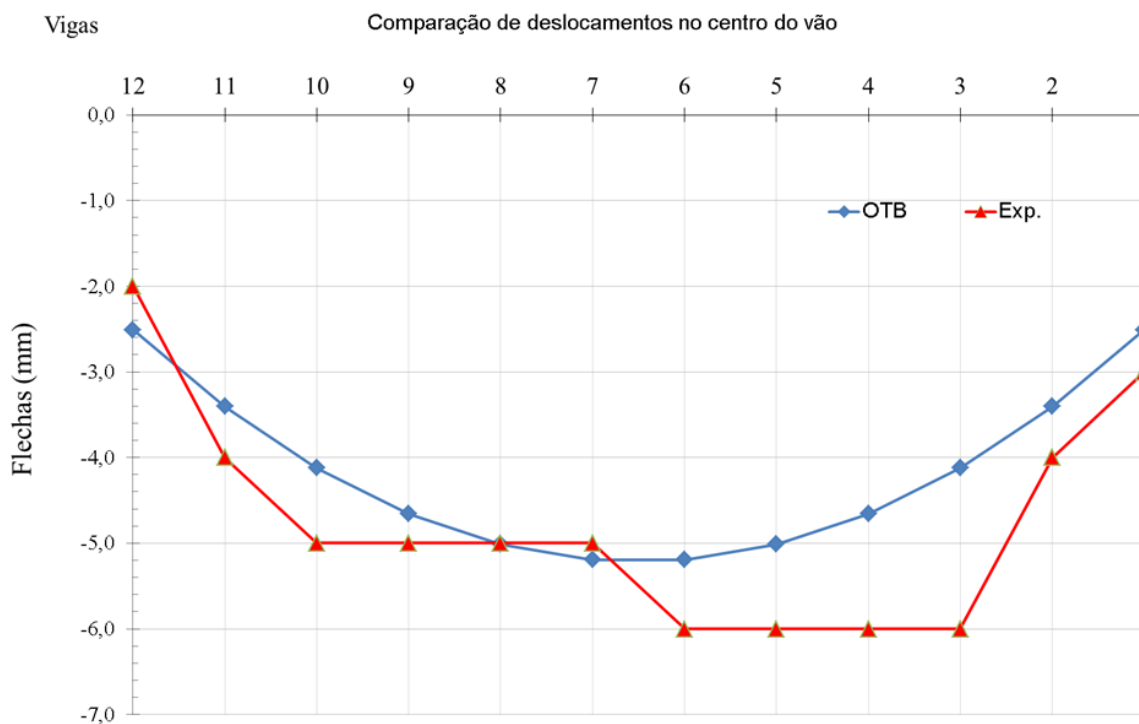


Figura 4.1 – Comparação de deslocamentos verticais na seção transversal central com o carregamento central. Fonte: Pigozzo (2004).

A Figura 4.2 apresenta uma comparação entre os valores experimentais com os valores obtidos pelo programa OTB[®] para o carregamento lateral.

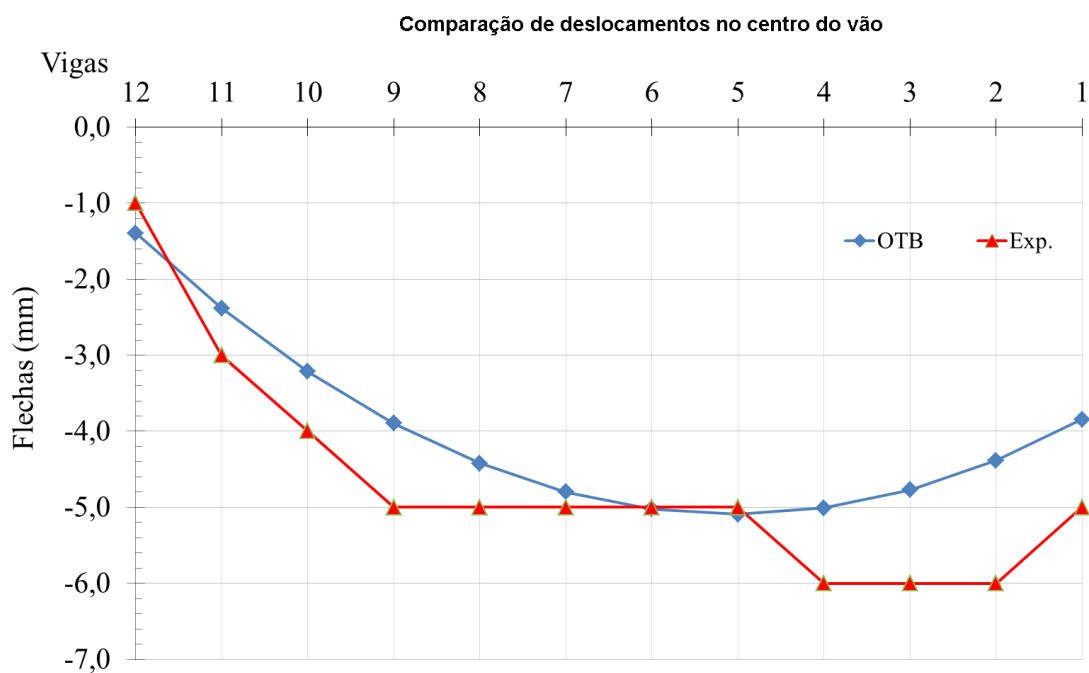


Figura 4.2 – Comparação de deslocamentos verticais na seção transversal central com o carregamento lateral. Fonte: Pigozzo (2004).

4.2 Dados gerados pelo método dos elementos finitos

A Tabela 3, a seguir, apresenta os valores de deslocamentos verticais para o carregamento central e lateral obtido pelo MEF para o modelo 1.

Tabela 3 – Valores dos deslocamentos verticais do modelo 1 obtidos pelo MEF para o carregamento central e carregamento lateral.

Viga	Posição (cm)	Car. central (mm)	Car. lateral (mm)
1	16,00	-2,94	-3,67
2	49,00	-3,80	-4,61
3	82,00	-4,65	-4,90
4	115,00	-5,07	-5,23
5	148,00	-4,80	-5,21
6	181,00	-4,50	-5,23
7	214,00	-4,50	-4,26
8	247,00	-4,80	-4,32
9	280,00	-5,07	-4,10
10	313,00	-4,65	-3,69
11	346,00	-3,80	-2,40
12	379,00	-2,94	-1,32

Fonte: O autor.

A Tabela 4, a seguir, apresenta os valores de deslocamentos verticais para o carregamento central e lateral obtido pelo MEF para o modelo 2.

Tabela 4 – Valores dos deslocamentos verticais do modelo 2 obtidos pelo MEF para o carregamento central e carregamento lateral.

Viga	Posição (cm)	Car. central (mm)	Car. lateral (mm)
1	16,00	-3,83	-3,67
2	49,00	-4,41	-4,61
3	82,00	-5,00	-4,90
4	115,00	-5,02	-5,23
5	148,00	-4,70	-5,21
6	181,00	-4,69	-5,23
7	214,00	-4,70	-4,26
8	247,00	-4,76	-4,32
9	280,00	-4,83	-4,10
10	313,00	-4,66	-3,69
11	346,00	-4,09	-2,40
12	379,00	-3,55	-1,32

Fonte: O autor.

A Tabela 5, a seguir, apresenta os valores de deslocamentos verticais para o carregamento central e lateral obtido pelo MEF para o modelo 3.

Tabela 5 – Valores dos deslocamentos verticais do modelo 3 obtidos pelo MEF para o carregamento central e carregamento lateral.

Viga	Posição (cm)	Car. central (mm)	Car. lateral (mm)
1	16,00	-6,26	-5,49
2	49,00	-6,30	-5,65
3	82,00	-6,33	-5,81
4	115,00	-6,35	-5,97
5	148,00	-6,35	-6,14
6	181,00	-6,34	-6,27
7	214,00	-6,34	-6,38
8	247,00	-6,34	-6,51

Tabela 5 continuação – Valores dos deslocamentos verticais do modelo 3 obtidos pelo MEF para o carregamento central e carregamento lateral.

Viga	Posição (cm)	Car. central (mm)	Car. lateral (mm)
9	280,00	-6,33	-6,65
10	313,00	-6,30	-6,80
11	346,00	-6,26	-6,94
12	379,00	-6,21	-7,08

A Figura 4.3 apresenta uma comparação entre os valores experimentais, OTB e o MEF para o carregamento central.

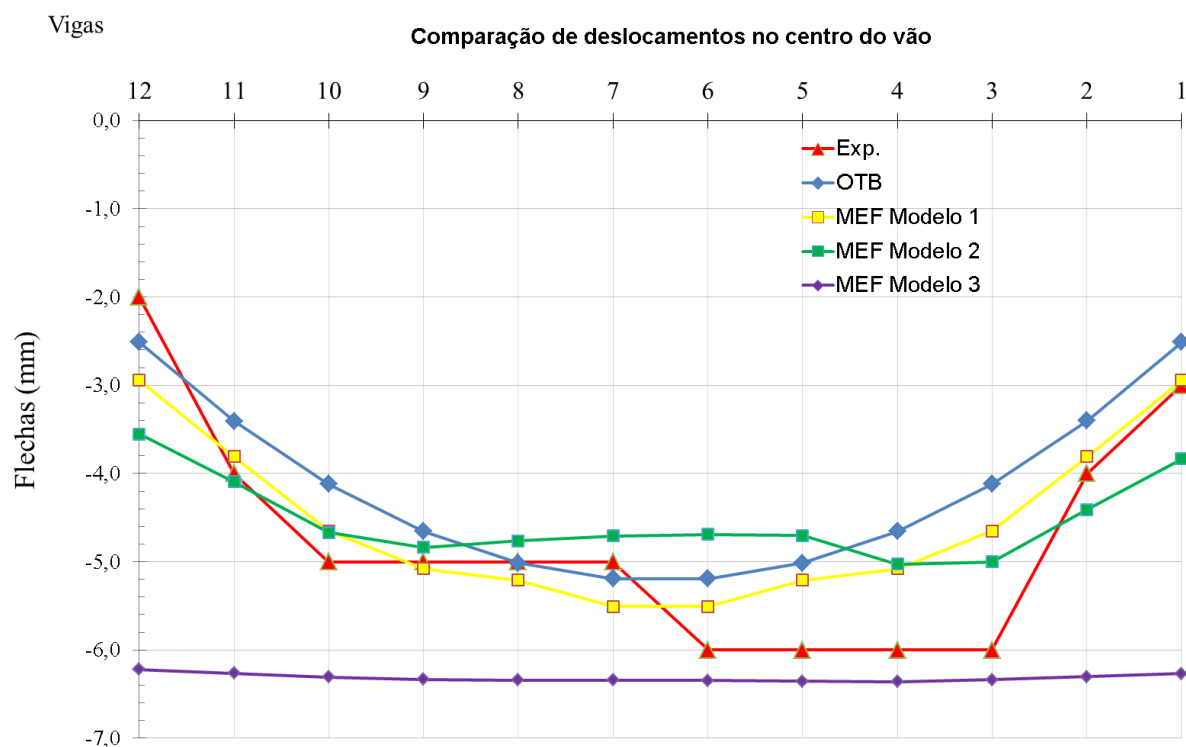


Figura 4.3 – Comparação entre os modelos dos deslocamentos verticais na seção transversal central com o carregamento central. Fonte: O autor.

A Figura 4.4 apresenta uma comparação entre os valores experimentais, OTB® e o MEF para o carregamento lateral.

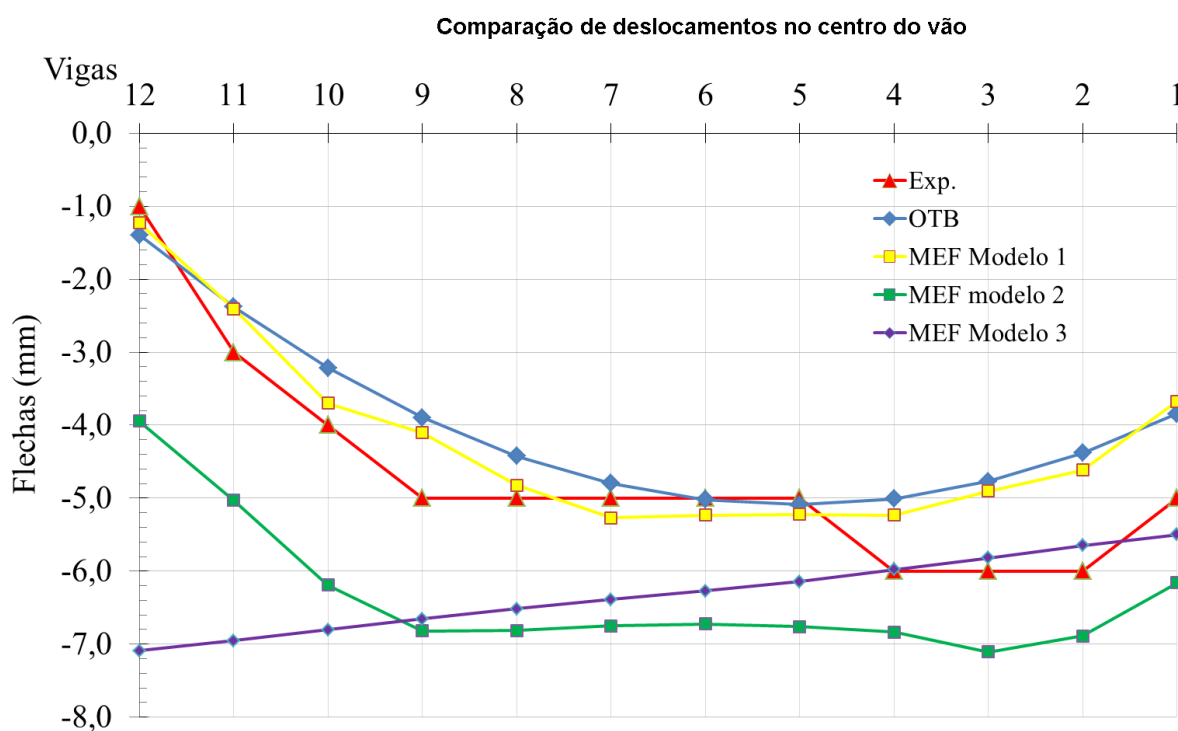


Figura 4.4 – Comparação entre os modelos dos deslocamentos verticais na seção transversal central com o carregamento lateral. Fonte: O autor.

4.3 Análise estatística

Na Tabela 6 mostra a análise estatística para o carregamento central comparando os quatros modelos com o modelo experimental.

Tabela 6 – Valores para o carregamento central.

	OTB®	MEF Modelo 1	MEF Modelo 2	MEF Modelo 3
Erro Médio	2,42	0,22	0,23	1,56
Erro Percentual Médio (%)	1,04	1,53	1,05	1,04
Desvio Padrão do erro	1,32	0,63	0,87	1,25
C.V (%)	0,54	2,90	3,85	0,79

Fonte: O autor.

Na Tabela 7 mostra a análise estatística para o carregamento lateral comparando os quatros modelos com o modelo experimental.

Tabela 7 – Valores para o carregamento lateral.

	OTB[®]	MEF Modelo 1	MEF Modelo 2	MEF Modelo 3
Erro Médio	0,94	0,59	1,67	1,65
Erro Percentual Médio (%)	0,25	1,23	1,09	0,74
Desvio Padrão	1,49	0,58	0,60	1,87
C.V (%)	1,58	0,97	0,36	1,13

Fonte: O autor.

Os resultados numéricos relacionados ao modelo 1 tanto para o carregamento central e para o carregamento lateral onde utilizam o módulo de elasticidade do concreto igual 20.200 MPa; e o módulo de elasticidade da madeira efetivo igual a 20.000 MPa aplicado pelo método de elementos finitos, ficaram próximos dos resultados experimentais.

O modelo 2 considerando os conectores no sentido longitudinal obteve melhores resultados do que o modelo OTB[®], porém obteve resultados piores comparado ao modelo 1 do qual utilizou conectores perpendiculares a viga, simulando os conectores reais, apesar do modelo 2 ter apresentado um erro percentual médio baixo em comparação ao modelo experimental, podemos observar pelas figuras 4.3 e 4.4 que seu comportamento difere do resultado experimental.

O modelo 3 do qual considerou as vigas com seções quadradas representando vigas de madeira laminada colada em comparação ao modelo experimental foi o que obteve pior relação entre os modelos e foi o que apresentou maior deslocamento no vão central das vigas, logo o modelo acaba majorando os resultados do deslocamento.

5 CONCLUSÃO

Os modelos numéricos são adequados para representar os modelos experimentais recomendando-se a utilização com base em ensaios experimentais, logo a proposta da utilização do método de elementos finitos em estruturas mista é adequada.

A partir das observações feitas pelos resultados obtidos dos modelos pelo método dos elementos finitos temos que o modelo 1 obteve valores próximos aos resultados experimentais, desta forma concluindo-se que o modelo pode representar os esforços da estrutura mista.

Um refinamento no modelo 3 seria uma forma de os resultados estarem condizentes com os resultados experimentais, já que em comparação aos modelos 1 e modelo 2 ele apresenta uma viga com poucas discretizações de elementos sólidos, o que pode estar ocasionando uma majoração nos resultados.

6 REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. F. M.. **Método dos elementos finitos**. 2003. Disponível em:
<http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/Livro_MEF_AA.pdf> Acesso em: 02 jul. 2014.
- CALIL, C. Jr.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, MG, v.I, p.71-77, 1997.
- GOMES, I. T. **Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface**. 2001. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79570/188949.pdf?sequence=1>> Acesso em: 02 jul. 2014.
- LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; LANDRE, J. Jr. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **R Dental Press Ortodon Ortop Facial**, n.2, p.35-43, 2006.
- MACHADO, F. M.; MOUCO, J. C.; SOARES, C. A. P. **Gestão sustentável: o gerenciamento dos resíduos sólidos da indústria da construção civil**. XIII SIMPEP – Bauru, SP, Brasil, novembro de 2006. Disponível em:
<http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/1030.pdf> Acesso em: 01 jul. 2014.
- Madeira de Eucalipto na construção civil. **Revista da Madeira**. Ed. N° 59. Set. 2001. Disponível em:
<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=7&subject=Constru%E7%E3o%20Civil&title=Madeira%20de%20Eucalipto%20na%20Constru%E7%E3o%20Civil#>>. Acesso em: 01 jul. 2014.

MARQUES, L. E. M. M. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção.** 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil)–Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

MORAES, V. M. **Ponte mista de madeira-concreto em vigas treliçadas de madeira.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

PIGOZZO, J. C. **Estudos e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade Estadual Paulista, São Carlos, 2004.

SEGUNDINHO, P. G. A. **Análise teórico-experimental de um tabuleiro misto madeira-concreto composto por vigas circulares.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

SORIANO, J. **Estruturas mistas em concreto e em madeira: Análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SORIANO, J.; MASCIA, N.T. **Estruturas mistas em concreto e madeira em pontes.** 1999. Disponível em: <http://www.ecivilnet.com/artigos/estruturas_mistas.htm>. Acesso em: 5 jul. 2014.

SOUZA, C. R. **Utilização de estruturas mistas na recuperação da capacidade de carga das pontes de madeira do Estado de Mato Grosso do Sul.** 2004. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.