

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

MANOEL ALVES JESUS SILVA NETO

**ANÁLISE DE UMA PONTE VICINAL COM SUPERESTRUTURA
CONSTITUÍDA DE CONCRETO E MADEIRA UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Cajazeiras-PB
2025

MANOEL ALVES JESUS SILVA NETO

**ANÁLISE DE UMA PONTE VICINAL COM SUPERESTRUTURA
CONSTITUÍDA DE CONCRETO E MADEIRA UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Civil do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba-Campus Cajazeiras,
sob Orientação do Prof. Dr. Sebastião Simão
da Silva.

Cajazeiras-PB
2025

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

- S586a Silva Neto, Manoel Alves Jesus.
Análise de uma ponte vicinal com superestrutura constituída de concreto e madeira utilizando o método dos elementos finitos / Manoel Alves Jesus Silva Neto.– 2025.
- 20f. : il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2025.
- Orientador(a): Prof. Dr. Sebastião Simão da Silva.
1. Construção civil. 2. Construção de ponte. 3. Concreto. 4. Madeira. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

CDU: 624.21(043.2)

MANOEL ALVES JESUS SILVA NETO

**ANÁLISE DE UMA PONTE VICINAL COM SUPERESTRUTURA
CONSTITUÍDA DE CONCRETO E MADEIRA UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, submetido à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, *Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 18 de dezembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

SEBASTIAO SIMAO DA SILVA

Data: 19/01/2026 19:35:31-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Sebastião Simão da Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador



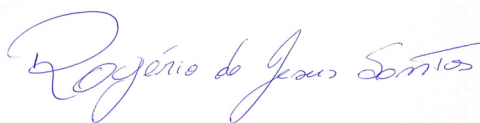
Documento assinado digitalmente

BRUNO DE MEDEIROS SOUZA

Data: 20/01/2026 19:06:28-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Bruno de Medeiros Souza – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1



Rogério de Jesus Santos – UFAL
Examinador 2

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

TÍTULO DO TRABALHO

Manoel Alves Jesus Silva Neto
manoel.jesus@academico.ifpb.edu.br
Sebastião Simão da Silva
sebastiao.silva@ifpb.edu.br

RESUMO

A infraestrutura rural brasileira depende, em grande parte, de pontes de estradas vicinais, cuja durabilidade e capacidade de carga são frequentemente limitadas quando construídas exclusivamente em madeira. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estrutural de tabuleiros mistos de madeira e concreto aplicados a uma ponte vicinal, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). A aplicabilidade desse sistema estrutural justifica-se por se tratar de uma solução viável, durável e sustentável. Realizou-se uma revisão bibliográfica sobre estruturas mistas, seguida de modelagem numérica no software LISA, com base em dados de estudos anteriores e da simulação de diferentes configurações de carregamento e conectores. A utilização do MEF permitiu a concepção uma diversa gama de modelos, resultando em maior segurança e confiabilidade na análise do sistema misto estudado. Os resultados obtidos são avaliados e comparados com referências teóricas e experimentais disponíveis na literatura, incluindo a análise dos deslocamentos verticais e da distribuição das tensões principais no tabuleiro misto.

Palavras-Chave: pontes vicinais; estruturas mistas; concreto; madeira; método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Brazilian rural infrastructure largely depends on bridges on secondary roads, whose durability and load-bearing capacity are often limited when constructed exclusively of timber. In this context, this study aims to analyze the structural behavior of a composite timber–concrete deck applied to a rural bridge using the Finite Element Method (FEM). The applicability of this structural system is justified by its viability, durability, and sustainability. A literature review on composite structures was conducted, followed by numerical modeling using the LISA software, based on data from previous studies and the simulation of different loading configurations and connectors. The results obtained were analyzed and compared with theoretical and experimental references available in the literature, including the evaluation of vertical displacements and the distribution of principal stresses in the composite deck.

Keywords: rural bridges; composite structures; timber; concrete; finite element method.

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transportes em áreas rurais do Brasil depende fortemente das pontes vicinais, que desempenham papel essencial na integração entre comunidades e no escoamento da produção agrícola. Tradicionalmente, essas estruturas são construídas com madeira, material amplamente disponível e de fácil manuseio. Conforme destacam Calil Júnior e Dias (1997), a madeira é uma fonte renovável, abundante e versátil, porém enfrenta limitações quanto à durabilidade e ao desempenho estrutural, especialmente devido à ação do intemperismo e à sobrecarga, como observado por Soriano e Mascia (2009).

Nesse contexto, as estruturas mistas de concreto e madeira surgem como uma alternativa promissora, associando as propriedades complementares desses dois materiais. A madeira contribui com leveza e resistência à tração, enquanto o concreto confere rigidez e proteção superficial contra intempéries, abrasão e fogo. Segundo Forti (2004), a combinação pode aumentar significativamente a rigidez estrutural (em até quatro vezes) e a capacidade de carga (em até duas vezes), além de estender a vida útil da estrutura.

Além do bom desempenho mecânico, a madeira destaca-se como uma escolha sustentável, sendo um dos poucos materiais estruturais renováveis com baixa energia incorporada. Calil Júnior e Dias (1997) ressaltam sua excelente relação resistência/peso, superior à do aço e do concreto, o que, aliado ao uso de madeira de reflorestamento com manejo sustentável, torna-a um dos materiais mais ecológicos disponíveis. Forti (2004) acrescenta que, em sistemas mistos, a madeira reduz o peso próprio e o impacto ambiental das estruturas, contribuindo para construções mais sustentáveis.

No entanto, o desempenho global dos tabuleiros mistos depende criticamente da eficiência das conexões entre madeira e concreto. A transferência adequada de esforços de cisalhamento ao longo da interface é fundamental para o comportamento solidário do sistema. Essas conexões, sejam rígidas (com adesivos epóxi) ou semirrígidas (com conectores metálicos), exercem influência direta na rigidez global e no desempenho à flexão, exigindo análise criteriosa quanto à sua configuração e propriedades mecânicas (Forti, 2004).

Para analisar tais interações com precisão, recorre-se a métodos numéricos avançados, entre os quais o Método dos Elementos Finitos (MEF) se destaca. De acordo com Azevedo (2003); Reddy (1993), o MEF permite simular com alta fidelidade os estados de tensões e deformações em estruturas com geometria e materiais complexos. Estudos como o de Mastela *et al.* (2021) demonstram que a modelagem de tabuleiros mistos pelo MEF apresenta elevada precisão, com desvios inferiores a 2% em relação a ensaios experimentais em pontes reais.

A versatilidade do MEF permite ainda a análise de diferentes geometrias, configurações de conectores e condições de carregamento. Como aponta Forti (2015), modelos baseados no princípio dos trabalhos virtuais oferecem compatibilidade com formulações via elementos finitos, representando adequadamente as interações entre os materiais e conectores.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estrutural de um tabuleiro misto de madeira e concreto aplicado a uma ponte vicinal, por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o software LISA. A análise baseia-se na modelagem numérica da ponte Florestinha, considerando diferentes condições de carregamento, com ênfase na avaliação dos deslocamentos verticais e do comportamento global da superestrutura.

Para atingir esse objetivo, o trabalho foi estruturado da seguinte forma: inicialmente, apresenta-se o referencial teórico, abordando os principais conceitos relacionados às pontes de madeira, às estruturas mistas de madeira e concreto e à aplicação do Método dos Elementos Finitos nesse contexto. Em seguida, descreve-se a metodologia adotada, contemplando o objeto de estudo, a modelagem numérica da ponte no software LISA e a definição dos carregamentos considerados. Posteriormente, são apresentados e analisados os resultados obtidos, realizando-se uma comparação entre dados experimentais, resultados de modelos numéricos desenvolvidos em trabalhos anteriores e os resultados do presente estudo. Por fim, são discutidas as considerações finais, destacando-se as conclusões alcançadas e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção apresenta-se os principais conceitos e estudos relacionados às pontes de madeira e de tabuleiro misto de concreto e madeira, abordando sua evolução, comportamento estrutural e métodos de análise. Também é introduzido o Método dos Elementos Finitos como ferramenta fundamental para a avaliação do desempenho dessas estruturas.

2.1 Pontes de madeira

As pontes de madeira tiveram ampla utilização no Brasil, especialmente em estradas vicinais, em razão da disponibilidade do material, baixo custo inicial e facilidade construtiva. Entretanto, a execução dessas estruturas ocorreu, em muitos casos, sem critérios técnicos adequados, resultando em degradação precoce e desempenho estrutural insatisfatório ao longo do tempo, o que contribuiu para a desvalorização da madeira como material estrutural (Gonçalves, 2017).

Apesar disso, a madeira apresenta propriedades mecânicas favoráveis, como boa relação resistência/peso, comportamento elástico adequado e caráter renovável. Quando corretamente especificada, tratada e dimensionada conforme normas técnicas, como a ABNT NBR 7190, a madeira pode ser empregada de forma segura em pontes de pequeno e médio porte (Miotto, 2009).

2.2 Estruturas mistas de madeira e concreto em tabuleiros

As estruturas mistas de madeira e concreto resultam da associação entre vigas de madeira e lajes de concreto armado, conectadas de modo a permitir o trabalho conjunto dos materiais. Esse sistema proporciona aumento significativo de rigidez e resistência, além de maior durabilidade quando comparado às estruturas exclusivamente de madeira (Fernandes, 2018).

Estudos experimentais e aplicações práticas demonstram que tabuleiros mistos apresentam deslocamentos verticais substancialmente menores quando comparados aos tabuleiros de madeira isolados, evidenciando a eficiência do comportamento composto. Ensaios realizados em protótipos reais indicaram reduções expressivas de flechas após a execução da laje de concreto, confirmando o ganho estrutural do sistema (Pigozzo, 2004).

No Brasil, a aplicação desse tipo de estrutura foi impulsionada por programas de pesquisa conduzidos por universidades, destacando-se a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, responsável pelo desenvolvimento e monitoramento de diversas pontes mistas implantadas em vias vicinais (Gonçalves, 2017).

2.3 Desempenho das superestruturas constituídas de concreto e madeira

O desempenho das estruturas mistas depende diretamente da eficiência do sistema de ligação entre a madeira e o concreto. Esses conectores são responsáveis pela transferência dos esforços de cisalhamento longitudinal, permitindo que os materiais atuem de forma solidária. Entre os sistemas mais utilizados destacam-se barras de aço coladas com resinas epóxi, parafusos inclinados, chapas metálicas e conectores em formato de “X” (Pigozzo, 2004).

Ensaio de prova de carga realizados em pontes mistas demonstraram que a ligação apresenta comportamento eficiente e, em geral, conservador, resultando em boa redistribuição de esforços entre as vigas e aumento da rigidez global do tabuleiro. A análise experimental também evidenciou que a eficiência da ligação pode atingir valores consideravelmente superiores à rigidez mínima teórica, reforçando a viabilidade do sistema para aplicação em pontes rodoviárias (Segundinho; Matthiesen, 2004).

2.4 Método dos Elementos Finitos no contexto de estruturas mistas

Na análise de pontes de tabuleiro misto de madeira e concreto, o MEF permite representar de forma mais realista o comportamento estrutural, considerando a interação entre os materiais, a contribuição dos conectores e a distribuição espacial das tensões. A utilização desse método supera as limitações das análises simplificadas, fornecendo resultados mais próximos do comportamento real da estrutura (Fernandes, 2018).

Modelagens numéricas realizadas com base no MEF demonstraram boa correlação com resultados experimentais obtidos em ensaios de laboratório e provas de carga em campo, tanto em termos de deslocamentos quanto de tensões. Nessas modelagens, a laje de concreto e as vigas de madeira são geralmente discretizadas por elementos sólidos, enquanto os conectores são representados por elementos lineares ou elementos de ligação específicos (Segundinho, 2005).

3 MÉTODO DA PESQUISA

A presente pesquisa foi conduzida por meio de uma abordagem qualitativa e quantitativa, com ênfase no desenvolvimento de um modelo numérico, de um tabuleiro misto de concreto e madeira, utilizando dados bibliográficos disponíveis na literatura e um estudo de caso pré-existente. A metodologia adotada contou com duas grandes etapas: levantamento e análise bibliográfica e modelagem estrutural e análise numérica com o software LISA.

3.1 Objeto e meio de estudo

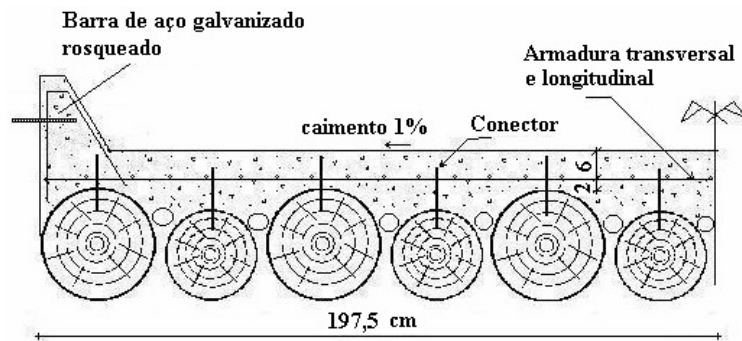
O objeto de estudo deste trabalho é um tabuleiro misto de madeira e concreto aplicado a uma ponte vicinal, adotando como referência geométrica, estrutural e de carregamento da ponte Florestinha, situada na estrada municipal que liga o município de Piracicaba a Anhambi no estado de São Paulo, nas coordenadas: 22° 45' 40"S e 47° 45' 12,5"W com altitude em relação ao nível do mar de 450m, formada por vigas longitudinais de madeira e uma laje superior de concreto, conectadas por dispositivos mecânicos, permitindo o trabalho conjunto dos materiais,. O sistema estrutural analisado é representativo de pontes vicinais brasileiras, normalmente utilizadas em zonas rurais e com vãos da ordem de 7,0 m. Essa estrutura foi originalmente estudada por Pigozzo (2004) e posteriormente modelada por Gales (2015) utilizando o SAP2000.

Figura 2 – Ponte Florestinha



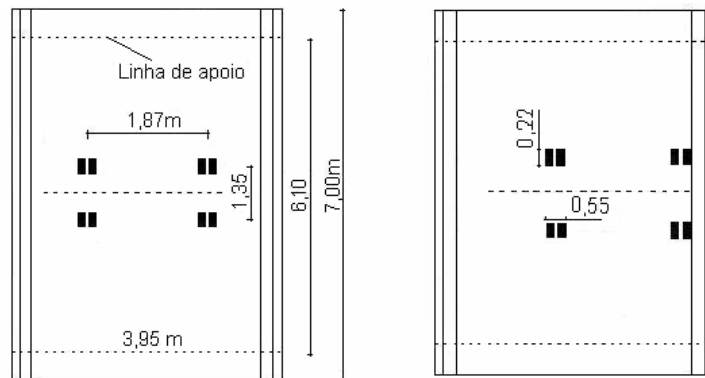
Fonte: Pigozzo (2004)

Figura 3 – Seção transversal da ponte Florestinha



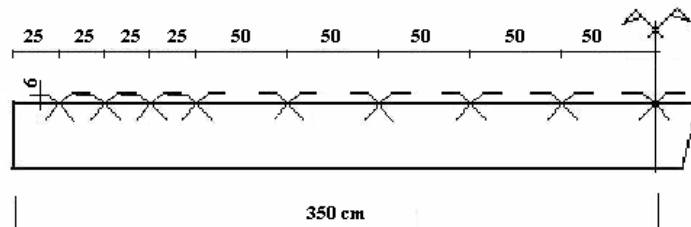
Fonte: Pigozzo (2004)

Figura 4 – Posicionamento do trem-tipo sobre o tabuleiro da ponte Florestinha, carregamento central e lateral



Fonte: Pigozzo (2004)

Figura 5 – Disposição dos conectores "X" nas vigas de madeira da ponte Florestinha



Fonte: Pigozzo (2004)

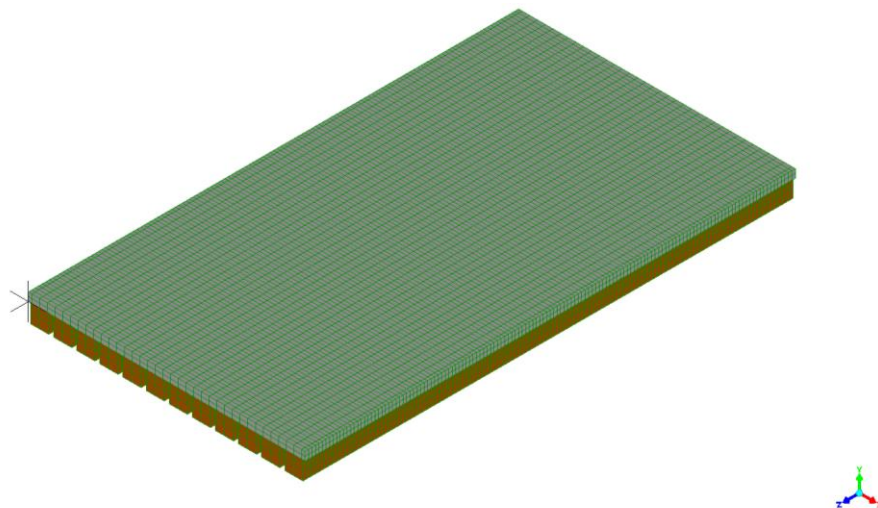
3.2 Modelagem por meio do software Lisa

Na modelagem do tabuleiro foi utilizado o software LISA, para reavaliar o comportamento da ponte sob carregamento estático, com ênfase na representação de vigas de madeira laminada colada (MLC) em substituição às vigas roliças originais, pois a madeira laminada colada apresenta desempenho mecânico, versatilidade construtiva e eficiência estrutural superiores à madeira maciça, configurando-se como uma das soluções mais adequadas para estruturas na construção civil, assim como destacado por Nogueira (2017).

Para a modelagem do tabuleiro de madeira e concreto idealizou-se um modelo, com dois tipos de carregamento, o carregamento central e o carregamento lateral, tendo ele as mesmas medidas adotadas por Gales (2015), além das hipóteses consideradas pelo mesmo: vigas retangulares de madeira laminada colada (MLC), tendo elas as dimensões (26×26×700 cm), em substituição as vigas roliças; conectores perpendiculares ao tabuleiro, de 12 cm de comprimento e 8 mm de diâmetro.

A laje do tabuleiro com dimensões de (395×12×700 cm) foi discretizada utilizando 10360 elementos sólidos de 8 nós (*Solid*): 9800 elementos com dimensões (11×6×5) mais 560 elementos (5×6×5), sendo esses alocados nas extremidades da laje. Ademais, cada uma das 12 vigas longarinas, foi discretizada, também utilizando do elemento solido de 8 nós (*Solid*), com 280 elementos (13×6×5) na parte superior, 280 elementos (13×7×5) no centro e 280 elementos (13×13×5) na parte inferior, sendo 840 elementos por viga, totalizando 10080 elementos nas 12 vigas.

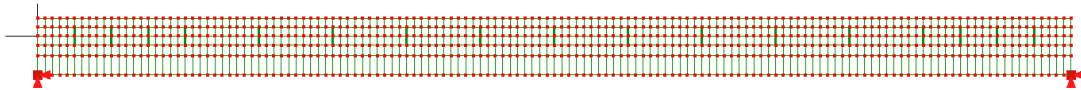
Figura 6 – Vista isométrica do tabuleiro



Fonte: Autoria Própria (2025)

Os conectores adotados foram discretizados utilizando elemento de barra (*Frame*), sendo cada conector composto por 2 elementos de 6 cm de comprimento. Em razão disso cada conector, apresenta 3 nós estando o superior e o central conectados a laje (por meio de nós comuns), e o inferior conectado as vigas pelo mesmo princípio aplicado na laje.

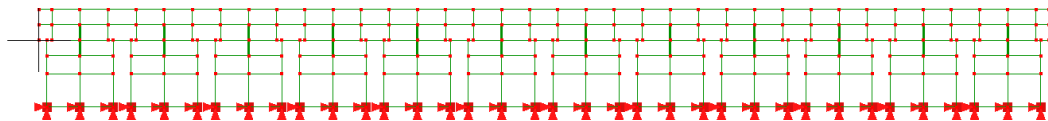
Figura 7 – Vista lateral do tabuleiro



Fonte: Autoria Própria (2025)

As vigas foram dispostas a 33 cm de distância, entre o centro de cada uma, e nos apoios das vigas foram impedidas todas as translações, nós 3 nós inferiores das extremidades de cada viga, permitindo apenas as rotações.

Figura 8 – Vista lateral do tabuleiro

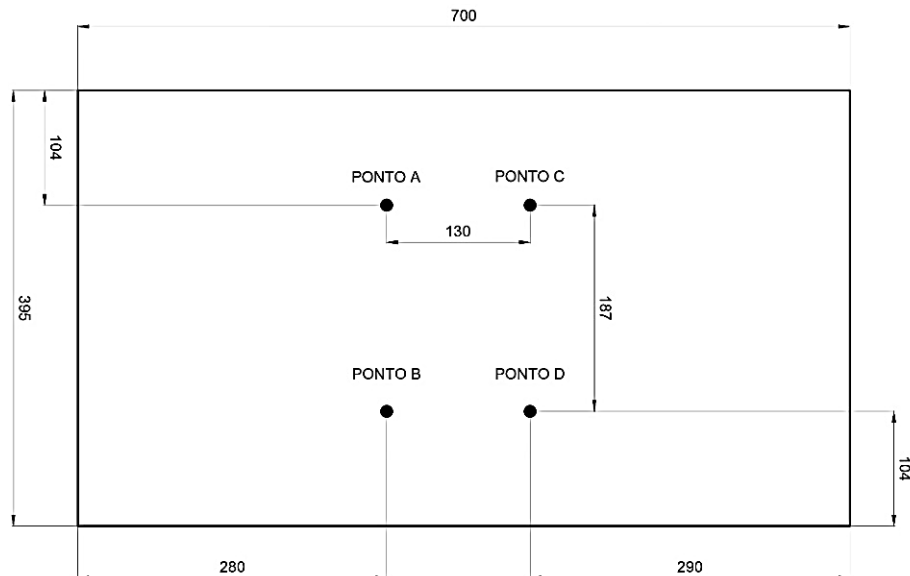


Fonte: Autoria Própria (2025)

3.3 Aplicação dos carregamentos

Considera-se sobre a ponte um caminhão com carga de 240 kN, sendo 120 kN por eixo ou 60 kN por roda. Assim, foram aplicadas 4 forças nodais A, B, C e D de 60 kN. Para o caso do caso do carregamento central, as coordenadas são A (104, 12, -280), B (291, 12, -280), C (104, 12, -410) e D (291, 12, -410), esses dados são melhor interpretados na Figura 9.

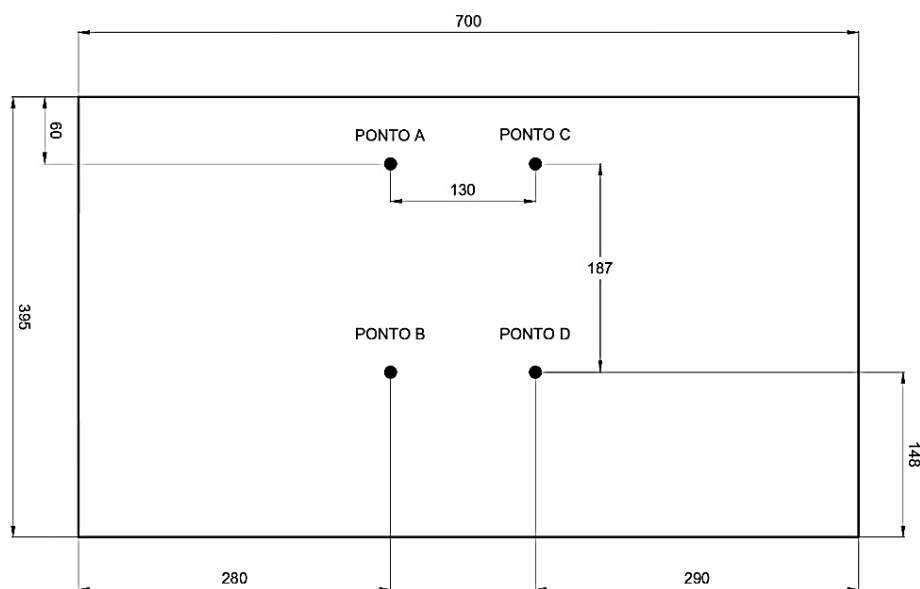
Figura 9 – Posição das forças no centro do tabuleiro



Fonte: Autoria Própria (2025)

No caso do caso do carregamento lateral, as coordenadas são A (60, 12, -280), B (247, 12, -280), C (60, 12, -410) e D (247, 12, -410), conforme Figura 10.

Figura 10 – Posição das forças na lateral do tabuleiro



Fonte: Autoria Própria (2025)

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Os dados seguir foram obtidos a partir de informações extraídas da literatura e da modelagem numérica realizada no software LISA, por meio do Método dos Elementos Finitos. Esses resultados são analisados, permitindo-se confrontar os valores obtidos no modelo numérico com dados de referência, a fim de avaliar o comportamento estrutural do tabuleiro misto de madeira e concreto estudado.

4.1 Deslocamentos experimentais com viga roliça

Na Tabela 1 apresenta-se os valores de deslocamento obtidos por Pigozzo (2004), para cada umas das 12 vigas modeladas, devido ao carregamento central e ao carregamento lateral.

Tabela 1 – Deslocamentos do tabuleiro da ponte - dados experimentais.

Vigas	Posição (cm)	Deslocamento Central (mm)	Deslocamento Lateral (mm)
1	16,00	-3,00	-5,00
2	49,00	-4,00	-6,00
3	82,00	-6,00	-6,00
4	115,00	-6,00	-6,00
5	148,00	-6,00	-5,00
6	181,00	-6,00	-5,00
7	214,00	-5,00	-5,00
8	247,00	-5,00	-5,00
9	280,00	-5,00	-5,00
10	313,00	-5,00	-4,00
11	346,00	-4,00	-3,00
12	379,00	-2,00	-1,00

Fonte: Pigozzo (2004)

4.2 Deslocamentos do modelo de elementos finitos em SAP2000 para vigas (MLC)

Na Tabela 2 apresenta-se os valores de deslocamento obtidos com o SAP2000 por Gales (2015), para cada uma das 12 vigas modeladas, devido ao carregamento central e ao carregamento lateral.

Tabela 2 – Deslocamentos do tabuleiro da ponte obtidos com o SAP2000.

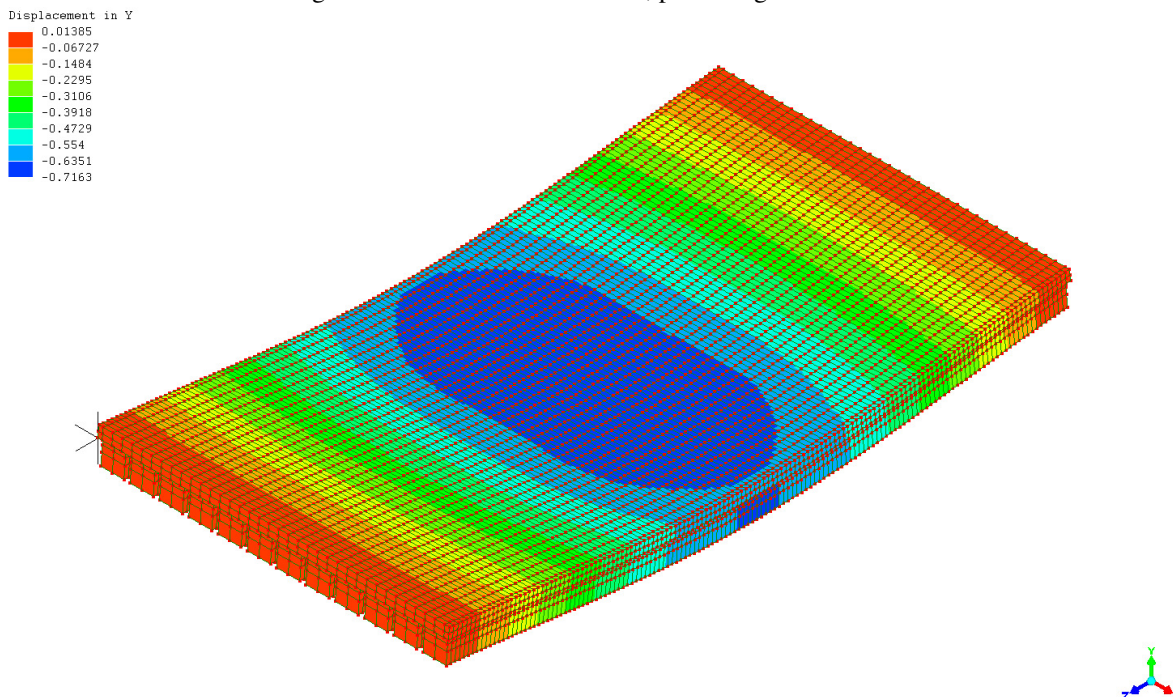
Vigas	Posição (cm)	Deslocamento Central (mm)	Deslocamento Lateral (mm)
1	16,00	-6,26	-5,49
2	49,00	-6,30	-5,65
3	82,00	-6,33	-5,81
4	115,00	-6,35	-5,97
5	148,00	-6,35	-6,14
6	181,00	-6,34	-6,27
7	214,00	-6,34	-6,38
8	247,00	-6,34	-6,51
9	280,00	-6,33	-6,65
10	313,00	-6,30	-6,80
11	346,00	-6,26	-6,94
12	379,00	-6,21	-7,08

Fonte: Gales (2015)

4.3 Deslocamentos obtidos pelo modelo de elementos finitos em LISA

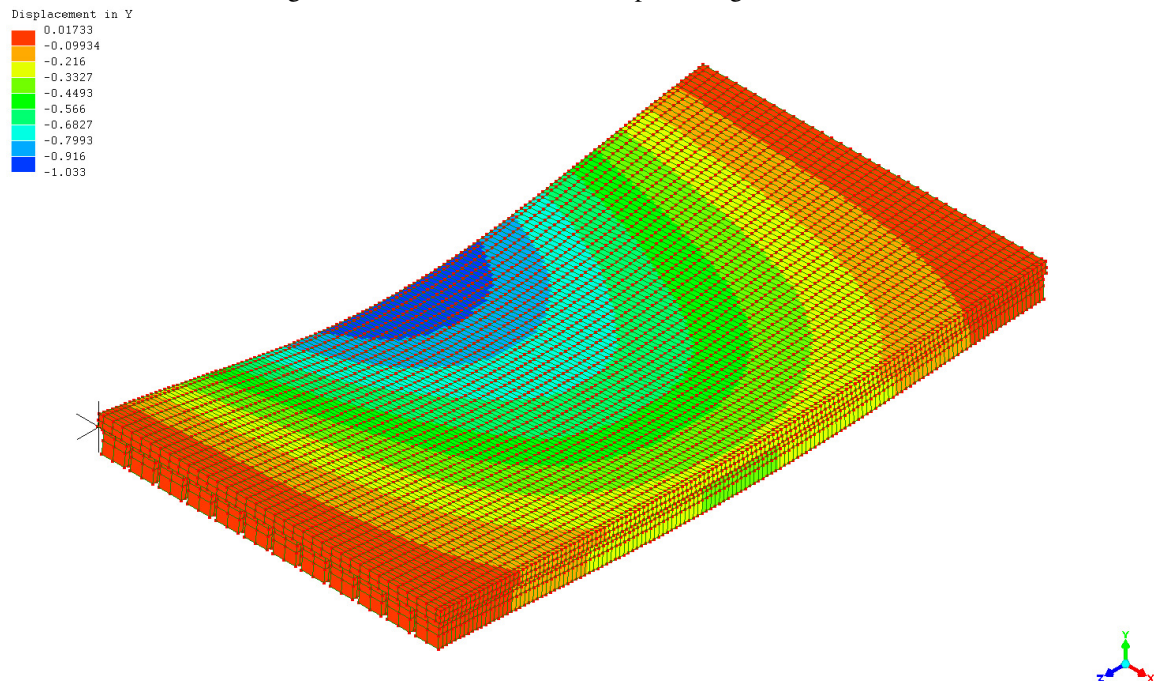
Nessa seção são apresentados os resultados da análise da superestrutura da ponte de Florestinha, considerando a atuação sobre a mesma do carregamento central e carregamento lateral.

Figura 11 – Tabuleiro deformado, por carregamento central



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 12 – Tabuleiro deformado, por carregamento lateral



Fonte: Autoria Própria (2025)

Pela configuração deformada do tabuleiro apresentada nas Figuras 11 e Figura 12, é possível verificar a interação das vigas com o tabuleiro. Os elementos das vigas e da laje não se encontram diretamente ligados e, dessa forma, apenas o conector realiza a transferência de esforços (sobretudo de cisalhamento), sendo esse o comportamento esperado, pela lógica de ligação utilizada na concepção dos conectores, e pelas condições de contorno utilizadas nos apoios.

Na Tabela 3, apresenta-se os valores de deslocamento obtidos pelo modelo produzido com o pacote comercial LISA, considerando vigas de madeira laminada colada (MLC), para os casos de carregamento central e lateral.

Tabela 3 – Deslocamentos do tabuleiro da ponte obtidos com o LISA.

Vigas	Posição (cm)	Deslocamento Central (mm)	Deslocamento Lateral (mm)
1	16,00	-6,40	-3,40
2	49,00	-6,70	-4,15
3	82,00	-6,98	-4,92
4	115,00	-7,14	-5,68
5	148,00	-7,15	-6,35
6	181,00	-7,12	-6,84
7	214,00	-7,12	-7,27
8	247,00	-7,15	-7,75
9	280,00	-7,14	-8,31
10	313,00	-6,98	-8,94
11	346,00	-6,70	-9,53
12	379,00	-6,40	-10,04

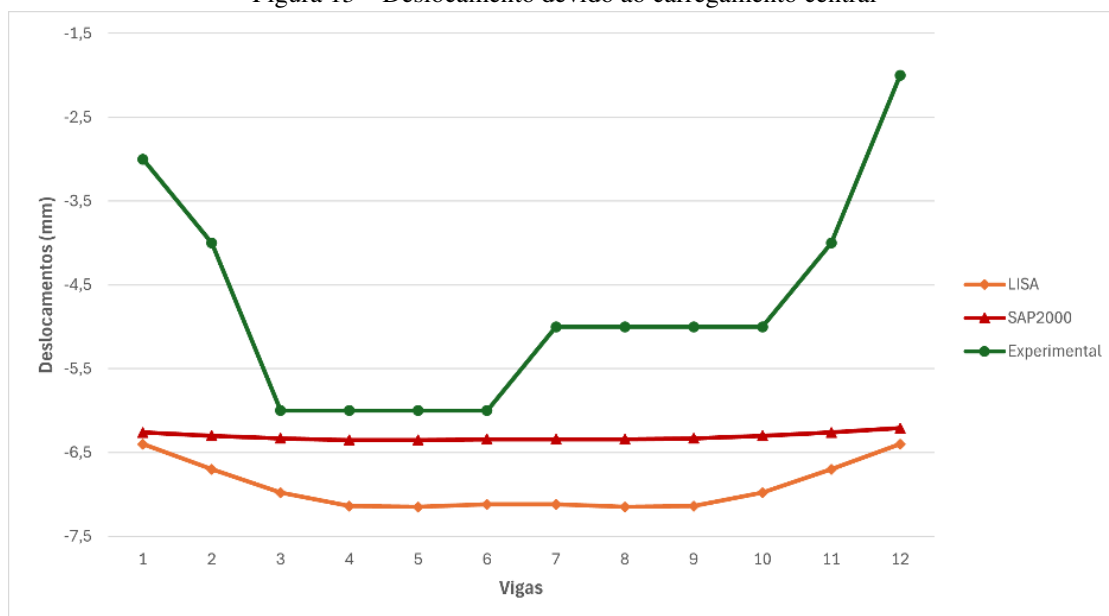
Fonte: Autoria Própria (2025)

4.4 Comparativo de Deslocamentos

Nessa seção é realizada uma análise comparativa entre os resultados de flecha medidos experimentalmente por Pigozzo (2004); obtidos com o SAP2000 por Gales (2015) e aqueles calculados neste trabalho com o software LISA.

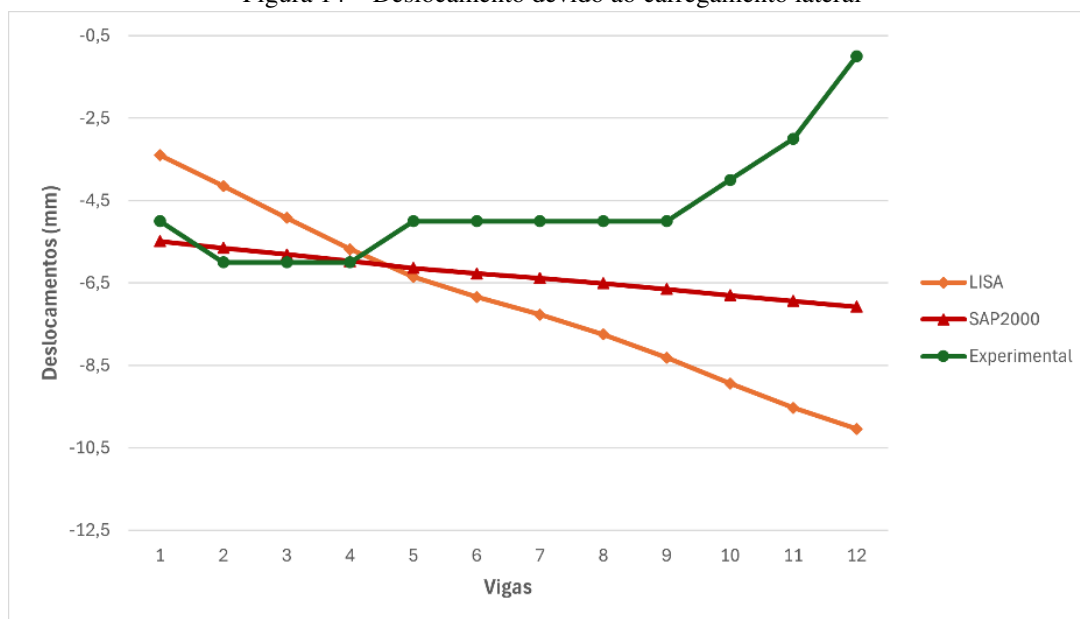
Nas Figuras 13 e 14 apresenta-se gráficos comparativos dos resultados dos deslocamentos, para cada viga modelada, devido ao carregamento central e ao carregamento lateral, e em cada trabalho antes mencionado.

Figura 13 – Deslocamento devido ao carregamento central



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 14 – Deslocamento devido ao carregamento lateral



Fonte: Autoria Própria (2025)

4.5 Análise das Tensões Principais no Tabuleiro Misto

Além da avaliação dos deslocamentos verticais, procedeu-se à análise das tensões principais no tabuleiro misto de madeira e concreto, obtidas a partir do modelo numérico desenvolvido no software LISA. A análise das tensões principais permite compreender de forma mais detalhada o estado de tensões atuante na estrutura, identificando regiões sujeitas predominantemente à tração e à compressão, bem como a influência da posição do carregamento na distribuição dessas solicitações.

Foram avaliadas as três tensões principais:

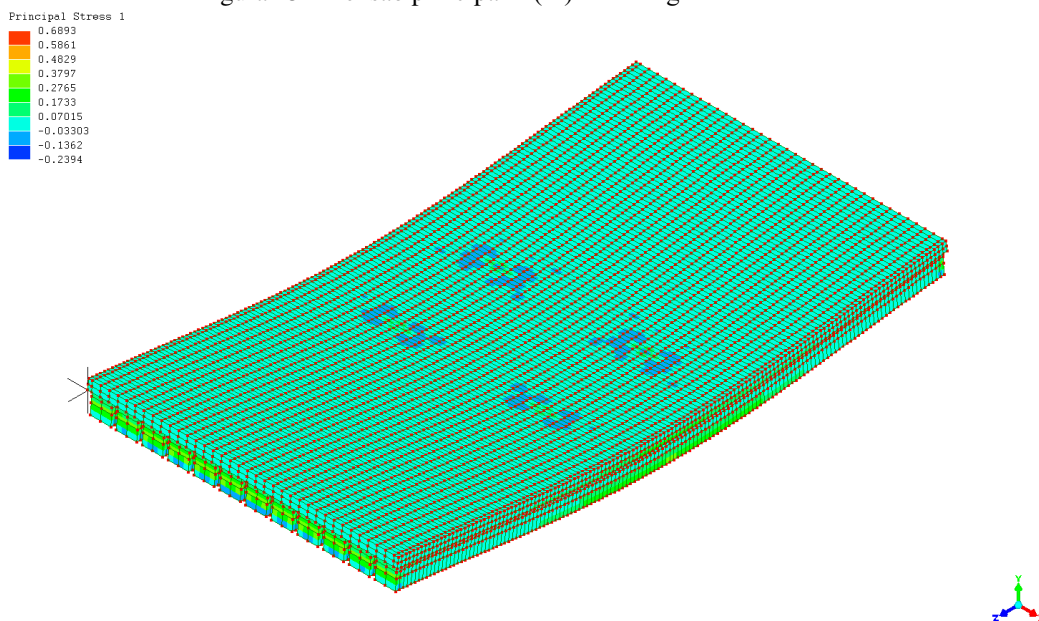
- Tensão principal 1 (σ_1) – associada à maior tensão de tração;
- Tensão principal 2 (σ_2) – associada à tensão intermediária;
- Tensão principal 3 (σ_3) – associada à maior tensão de compressão.

4.5.1 Tensões principais do carregamento central

As Figuras 15, Figura 16 e Figura 17 apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 no tabuleiro misto, considerando a aplicação do carregamento central. Observa-se que a tensão principal 1 (σ_1) apresenta valores positivos concentrados predominantemente na região inferior do tabuleiro, indicando a atuação de esforços de tração associados ao comportamento flexional da estrutura. As maiores intensidades ocorrem na região central do vão, coerente com a posição do carregamento e com a teoria clássica da flexão em vigas e lajes.

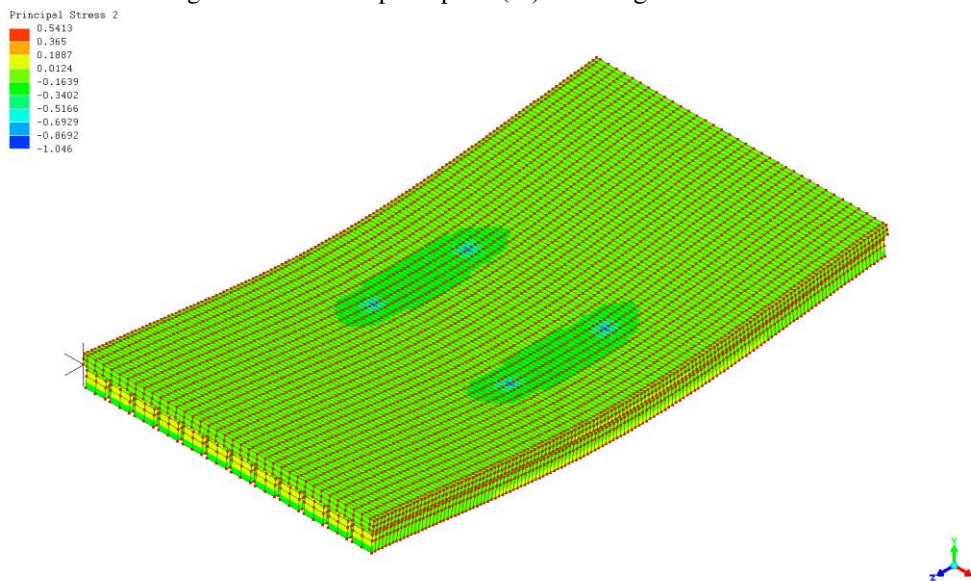
A tensão principal 2 (σ_2) apresenta valores intermediários, com distribuição mais homogênea ao longo do tabuleiro, refletindo um estado de tensões secundárias decorrente da interação entre a laje de concreto, as vigas de madeira e os conectores. Essa distribuição indica que o sistema misto promove uma adequada redistribuição dos esforços, evitando concentrações excessivas de tensões.

Figura 15 – Tensão principal 1 (σ_1) do carregamento central



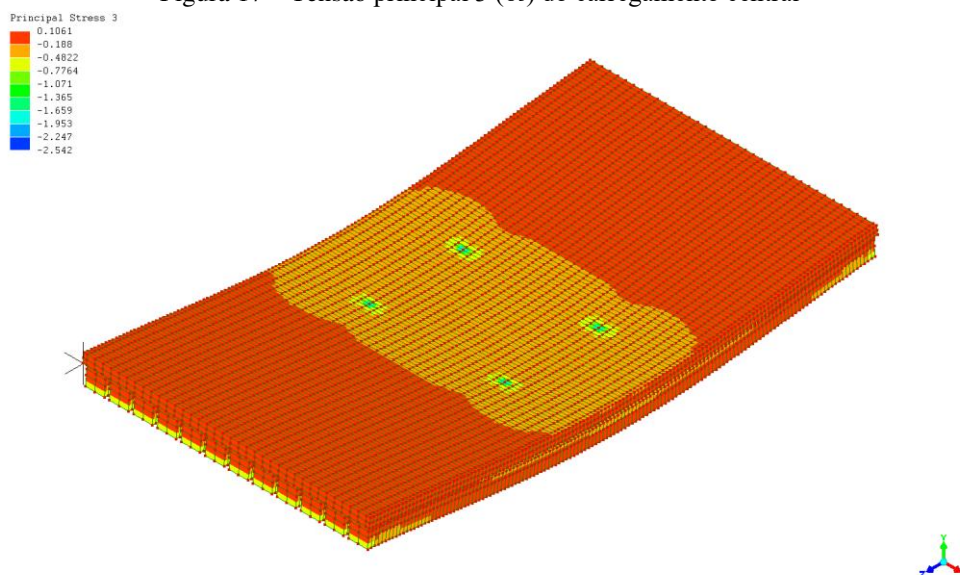
Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 16 – Tensão principal 2 (σ_2) do carregamento central



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 17 – Tensão principal 3 (σ_3) do carregamento central



Fonte: Autoria Própria (2025)

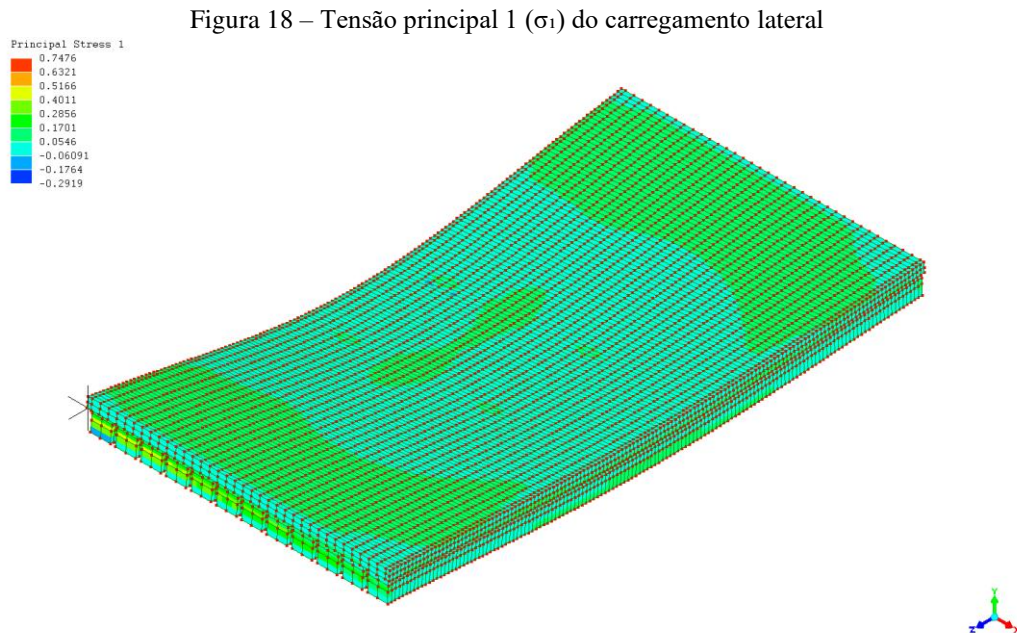
Já a tensão principal 3 (σ_3), associada à compressão, apresenta valores negativos predominantes na região superior do tabuleiro, especialmente na laje de concreto, confirmando o comportamento esperado para um sistema submetido à flexão positiva. A continuidade das regiões comprimidas evidencia a contribuição efetiva da laje de concreto na absorção das tensões de compressão.

4.5.2 Tensões principais do carregamento lateral

Para o caso do carregamento lateral, apresentado nas Figuras 18, Figura 19 e Figura 20, observa-se uma alteração significativa na distribuição das tensões principais quando comparada ao carregamento central. A tensão principal 1 (σ_1) apresenta concentrações mais elevadas nas vigas mais próximas à região de aplicação da carga, indicando uma assimetria no comportamento estrutural do tabuleiro. Esse efeito é característico de carregamentos excêntricos e reforça a importância da interação entre as vigas longitudinais por meio da laje de concreto.

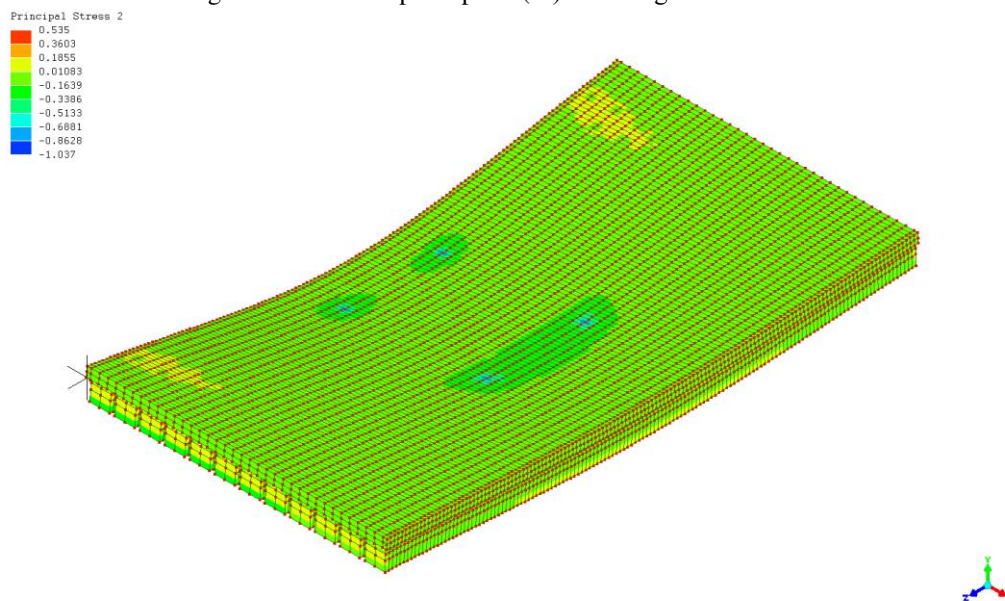
A tensão principal 2 (σ_2) mantém uma distribuição relativamente uniforme, porém com gradientes mais acentuados próximos à região carregada, evidenciando a transferência de esforços entre as vigas por meio dos conectores. Esse comportamento confirma a eficiência do sistema de ligação madeira–concreto na redistribuição das tensões.

A tensão principal 3 (σ_3) continua apresentando valores compressivos predominantes na laje de concreto, entretanto com maior intensidade nas regiões próximas ao carregamento lateral. Esse resultado demonstra que, mesmo sob carregamento excêntrico, o sistema misto mantém um comportamento estrutural coerente, com a laje absorvendo os esforços de compressão e as vigas de madeira resistindo predominantemente aos esforços de tração.



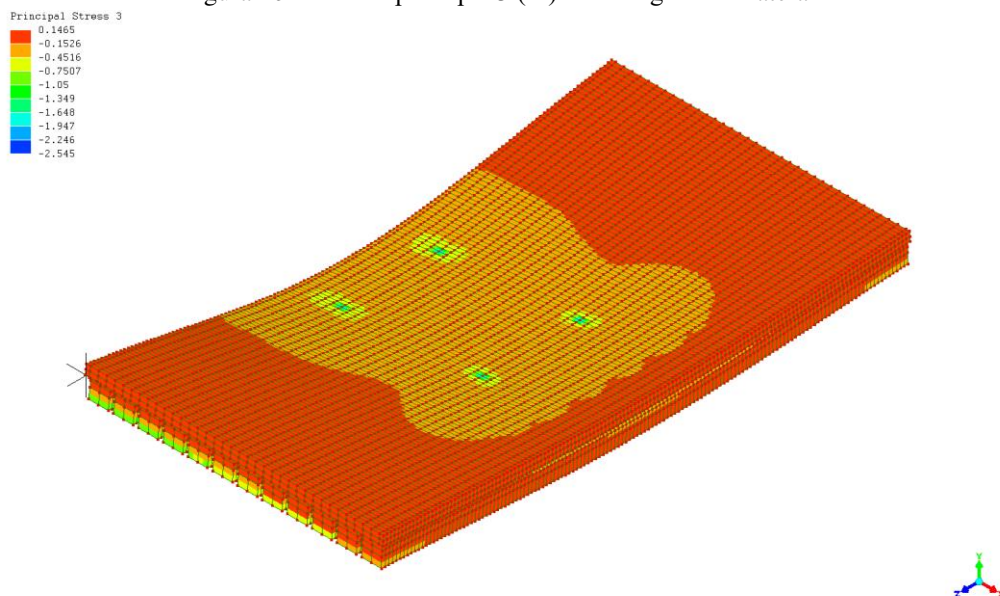
Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 19 – Tensão principal 2 (σ_2) do carregamento lateral



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 20 – Tensão principal 3 (σ_3) do carregamento lateral



Fonte: Autoria Própria (2025)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento estrutural de um tabuleiro misto de madeira e concreto aplicado a uma ponte vicinal, por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o software LISA. A partir da modelagem numérica desenvolvida, foi possível avaliar os deslocamentos verticais e o comportamento global da superestrutura sob diferentes condições de carregamento, tomando como referência a ponte Florestinha.

Os resultados obtidos evidenciaram que a adoção do sistema misto proporciona uma resposta estrutural mais eficiente quando comparada às soluções tradicionais em madeira, principalmente no que se refere à rigidez global do tabuleiro e à redistribuição dos esforços

entre as vigas longitudinais. Observou-se que a interação entre a laje de concreto e as vigas de madeira, mediada pelos conectores, desempenha papel fundamental no controle das flechas, reforçando a importância da correta modelagem da interface madeira–concreto.

A análise comparativa entre os resultados numéricos obtidos neste trabalho e aqueles disponíveis na literatura permitiu verificar que, apesar das diferenças quantitativas nos valores de deslocamento, o comportamento global da estrutura apresentou tendências coerentes. Essas diferenças estão associadas, principalmente, às escolhas de modelagem, como o tipo de elemento utilizado, o refinamento da malha e as condições de contorno adotadas, evidenciando a sensibilidade dos modelos numéricos a tais parâmetros. Nesse sentido, o presente estudo demonstra que o software LISA, mesmo sendo uma ferramenta de acesso mais simples, mostrou-se capaz de representar adequadamente o comportamento estrutural de tabuleiros mistos, desde que utilizado com critérios técnicos consistentes.

Como contribuição específica deste trabalho, destaca-se a avaliação do desempenho estrutural de um tabuleiro misto considerando a substituição das vigas roliças por vigas de madeira laminada colada (MLC), solução que apresenta vantagens em termos de regularidade geométrica, propriedades mecânicas mais homogêneas e maior controle de qualidade. Os resultados indicaram que essa substituição é tecnicamente viável e compatível com aplicações em pontes vicinais, podendo representar uma alternativa eficiente para projetos que busquem maior durabilidade e desempenho estrutural.

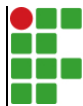
Ressalta-se que os resultados apresentados são decorrentes de uma análise numérica e, portanto, estão condicionados às hipóteses adotadas no modelo. Assim, embora o Método dos Elementos Finitos se mostre uma ferramenta poderosa para a compreensão do comportamento estrutural, ele não substitui ensaios experimentais ou monitoramentos em campo, devendo ser utilizado como instrumento de apoio ao projeto e à tomada de decisão.

Dessa forma, conclui-se que o estudo contribui para o avanço das análises numéricas aplicadas a pontes vicinais com superestrutura mista de madeira e concreto, oferecendo subsídios técnicos para o emprego de soluções estruturais mais eficientes, duráveis e sustentáveis na infraestrutura rural brasileira. Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de análises considerando diferentes tipos de conectores, variações no espaçamento entre vigas, estratégias alternativas de discretização e a validação dos modelos numéricos por meio de ensaios experimentais ou monitoramento estrutural em serviço.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. F. G. **O método dos elementos finitos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2003.
- CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p. 71–77, 1997.
- FERNANDES, F. P. D. **Análise numérica de vigas mistas de madeira e concreto em situação de incêndio**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- FORTI, N. C. S. **Análise numérica de vigas mistas em concreto e madeira**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- FORTI, N. C. S.; FORTI, T. L. D.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L. Análise de vigas mistas de concreto e madeira pelo método dos elementos finitos. **Ibracon Structures and Materials Journal**, São Paulo, v. 8, n. 4, p. 507–528, ago. 2015.
- GALES, T. A. **Modelagem numérica da ponte de madeira e concreto “Florestinha”**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Jerônimo Monteiro, 2015.
- GONÇALVES, R. M. **Estruturas mistas de madeira e concreto aplicadas a pontes**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- MASTELA, L. C.; SEGUNDINHO, P. G. A.; TAQUETTI, V. B.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; GALES, T. A. Modelagem numérica comparativa da ponte Florestinha construída em madeira e concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 295–304, jul./set. 2021.
- MIOTTO, J. L. **Estudo do comportamento estrutural de sistemas mistos de madeira e concreto**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- 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) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- SEGUNDINHO, P. G.; MATTHIESEN, J. A. **Análise experimental e numérica de tabuleiros mistos de madeira e concreto**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004.

SORIANO, J.; MASCIA, N. T. Estruturas mistas em madeira-concreto: uma técnica racional para pontes de estradas vicinais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1260–1269, jul. 2009.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Restrito

Entrega de TCC

Assunto:	Entrega de TCC
Assinado por:	Manoel Neto
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Manoel Alves Jesus Silva Neto, DISCENTE (202112200017) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 21/01/2026 09:11:39.

Este documento foi armazenado no SUAP em 21/01/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1737071

Código de Autenticação: f390b3f3dd

