



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

VINICIUS BORGES TAQUETTI

MODELAGEM NUMÉRICA EM VIGAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2020

VINICIUS BORGES TAQUETTI

MODELAGEM NUMÉRICA EM VIGAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Coorientador: Fabricio Gomes Gonçalves

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

T111m Taquetti, Vinicius Borges, 1986-
Modelagem numérica em vigas mistas de madeira e concreto / Vinicius Borges Taquetti. - 2020.
62 f. : il.

Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.
Coorientador: Fabricio Gomes Gonçalves.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Simulação. 2. Software de sistemas. 3. Método dos elementos finitos. 4. Deslocamento. 5. Tensões. I. Segundinho, Pedro Gutemberg de Alcântara. II. Gonçalves, Fabricio Gomes. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

MODELAGEM NUMÉRICA EM VIGAS MISTA DE MADEIRA E CONCRETO

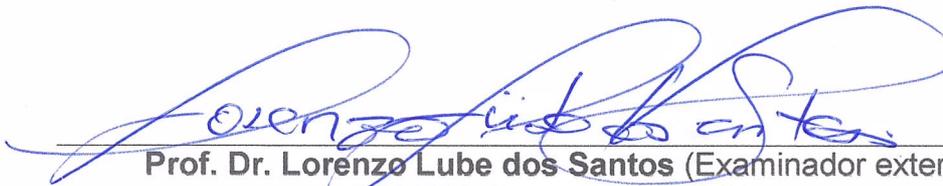
Vinicius Borges Taquetti

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 14 de fevereiro de 2020.



Prof. Dr. João Gabriel Missia da Silva (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Lorenzo Lube dos Santos (Examinador externo)
FAESA Centro Universitário



Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo amor, carinho e dedicação. Em especial a minha mãe, Alba, pela criação e ensinamento.

Ao meu orientador Prof. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho e coorientador Prof. Fabricio Gomes Gonçalves pelos conselhos, paciência e confiança para a execução deste trabalho. Aos professores, Dr. Lorenzo Lube dos Santos e Dr. João Gabriel Missia da Silva por terem aceitado, de prontidão, compor a banca examinadora.

Ao programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGCF - UFES) pela disponibilização dos recursos necessários para a concretização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) , pelo financiamento do programa SAP 2000.

Aos servidores do PPGCF, que direta ou indiretamente contribuíram com a minha formação profissional. Aos amigos que contribuíram diretamente na construção deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para a realização desta conquista, mesmo os que não estão aqui citados.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

TAQUETTI, Vinicius Borges. **Modelagem numérica em vigas mistas de madeira e concreto**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho. Coorientador: Fabricio Gomes Gonçalves.

A simulação em *softwares* vem ganhando cada vez mais destaque na construção civil e contribui para a viabilização e o emprego de novos materiais, como é o caso da madeira. A modelagem numérica por *softwares* se baseia no desenvolvimento de modelos matemáticos que explicam as características e antecipa o comportamento de determinados elementos, o que facilita a análise e aumenta a integridade da obra, principalmente nos projetos mistos, que possuem um grande potencial na construção civil. A utilização de pontes mistas de madeira e concreto, por exemplo, melhora a capacidade de carga e de resistência mecânica da estrutura e diminui os custos da obra, sendo uma das soluções mais adequadas em localidades rurais. Contudo, no Brasil, esse tipo de estrutura ainda não atingiu um alto nível de utilização, principalmente devido à falta de normas específicas e a complexidade anatômica da madeira. Nesse sentido, objetivou-se promover o cálculo estrutural de projetos mistos de madeira e concreto, por meio do método de elementos finitos, modelado no programa de análise estrutural SAP 2000, a fim de avaliar o comportamento de vigas previamente ensaiadas. Para isso, foram extraídas da literatura as informações necessárias para suprir o programa computacional, que realizou simulações de deslocamento e tensões em três modelos com diferentes espaçamentos entre a alma e a mesa das vigas, ligadas ou não por conectores (pinos em aço). Após o ajuste e análise dos modelos simulados, fez-se a validação dos resultados computacionais por meio da comparação com os dados experimentais e normas especializadas. Concluindo-se que a simulação numérica possibilitou a análise do comportamento das vigas mistas, sendo os resultados mais satisfatórios observados nos modelos que possuíam conectores, que possivelmente foi o elemento responsável pelo melhor desempenho da madeira e do concreto.

Palavras-chave: simulação numérica, *softwares*, método dos elementos finitos, deslocamento, tensões.

ABSTRACT

TAQUETTI, Vinicius Borges. **Numerical modeling in mixed wood and concrete beams**. 2020. Dissertation (Masters in Forest Sciences) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, Co-Advisor: Fabrício Gomes Gonçalves.

Software simulation is prominent in civil construction and contributes to the feasibility and use of new materials, such as wood. The numerical software model is based on the development of mathematical models that explain the characteristics and behavior of the materials, this facilitates the analysis and increases the safety of the construction, mainly in the mixed projects, which present a great potential of civil construction. The use of mixed bridges of wood and concrete, for example, improves the load capacity and mechanical strength of the structure and reduces construction costs, being one of the best solutions in rural areas. But, in Brazil, this type of structure is not yet widely used, due to the lack of specific standards and anatomical complexity of the wood. The objective was to promote the structural calculation of wood and concrete projects, using the finite element method, modeled in the structural analysis program SAP 2000, to evaluate the behavior of beams. For this, information was extracted from the literature to use the computer program, which made the simulations of displacement and stresses in three models with different spaces between a core and a table of the beams, which had or not connectors (steel pins). After adjusting and analyzing the simulated models, he validated the computational results by comparing them with experimental data and specific standards. In conclusion, the numerical simulation enabled the analysis of the behavior of the views, satisfactory results were observed in the models with connectors, which possibly was the element responsible for the best performance of wood and concrete.

Keywords: numerical simulation, software, finite element method, displacement, stresses.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. Objetivo Geral.....	10
2.2. Objetivos Específicos	10
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	11
3.1. Materiais de composição das vigas mistas	11
3.1.1. Concreto	11
3.1.2. Madeira.....	13
3.1.3. Aço	16
3.2. Pontes mistas de madeira e concreto	17
3.3. Modelagem numérica de elementos finitos em madeira	21
3.4. Modelagem numérica em vigas mistas de madeira-concreto.....	22
4. METODOLOGIA	25
4.1. Dimensões das vigas simuladas e discretização.....	25
4.2. Obtenção dos dados para modelagem das vigas no SAP 2000.....	26
4.3. Modelos simulados.....	28
4.4. Modelagem numérica das vigas mistas no SAP 2000.....	28
4.5. Análise estatística dos dados	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1. Deslocamentos.....	32
5.2. Tensões.....	36
6. CONCLUSÕES.....	46
7. REFERÊNCIAS	47
APÊNDICE A – Passos para a inserção dos dados e modelagem das vigas mistas de madeira e concreto no programa SAP2000	51
APÊNDICE B – Extração dos dados	58
APÊNDICE C – Resumo dos dados.....	60

1. INTRODUÇÃO

A informatização se tornou uma ferramenta fundamental na sociedade atual, sendo necessária para o desenvolvimento de diversas tarefas cotidianas. Na construção civil, por exemplo, a simulação em *softwares* vem ganhando cada vez mais destaque e contribui para a viabilização e o emprego de novos materiais, como a madeira.

Estruturalmente a madeira apresenta diversas vantagens, como elevada resistência específica, boas propriedades físicas e mecânicas e versatilidade de uso (SOUTO; BUENO; SILVA, 2016); além de possibilitar diversos acabamentos, que facilita sua associação com outros materiais.

Mascia et al. (2013) e Segundinho et al. (2018) citam que as combinações realizadas com madeira e concreto melhoram as propriedades mecânicas dos materiais, diminuem o peso da estrutura e reduzem consideravelmente o custo da obra, sendo uma excelente alternativa para a construção de pontes em localidades rurais.

Como todos os elementos envolvidos na ligação das peças, a madeira não difere em *software* para análises de elementos estruturais nas construções, podendo ser utilizada de forma isolada ou associada ao concreto.

A modelagem numérica por *softwares* se baseia na atividade de construir modelos que expliquem as características ou o comportamento de determinados materiais diante de simulações computacionais, utilizando-se de uma notação gráfica apoiada pelo uso de ferramentas que auxiliam as interpretações dos resultados (SOMMERVILLE, 2011; ALÉSSIO; SABADIN; ZANCHETT, 2017).

Essa modelagem implica na escolha adequada dos princípios físicos e das variáveis dependentes e independentes que descrevem o problema estudado, resultando em um modelo matemático constituído por um conjunto de equações diferenciais (RUGGIERO; LOPES, 1996).

No âmbito da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos – MEF tem como objetivo determinar o estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores (AZEVEDO, 2003). Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas e pode ser aplicada, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes e barragens.

Trabalhos como os de El Shayeb et al. (2006), Akgul et al. (2014) e Faria e Lima (2018) testaram a aplicação do MEF em diferentes materiais e constataram que a modelagem de elementos estruturais pode ser uma solução rápida para a simulação de pequenas e grandes estruturas, sendo uma forma mais eficiente de utilizar a madeira e outros materiais sem comprometer o desenvolvimento dos projetos.

Contudo, no Brasil, as estruturas de madeira ainda não atingiram um alto nível de utilização como é observado na Europa e nos Estados Unidos, devido principalmente a falta de normas específicas para fomentar sua aplicação em larga escala. Somado a esse problema, são poucos os profissionais que conhecem as propriedades e sabem trabalhar com este tipo de material, que é tão variável e complexo em sua composição.

Dessa forma, se justifica o desenvolvimento e a divulgação de pesquisas relacionadas à modelagem numérica em projetos mistos de madeira e concreto, uma vez que seus conceitos estão atrelados não apenas na utilização de novas tecnologias e materiais, mas também na concepção do produto e na viabilização do seu emprego por meio de estudos que comprovem previamente a sua eficácia nas situações almejadas. Sendo, assim, proposto um modelo de MEF no SAP 2000, com o objetivo de promover esse tipo de estrutura no país.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Promover o cálculo estrutural de projetos mistos de madeira e concreto, por meio do MEF modelado no programa de análise estrutural SAP 2000, a fim de avaliar o comportamento das vigas previamente ensaiadas por Segundinho (2005).

2.2. Objetivos Específicos

- Exportar os dados associados à propriedade física (tensões) e mecânica (deslocamento), previamente ensaiada por Segundinho (2005), para a alimentação do programa computacional;
- Realizar simulações de deslocamento e tensões em modelos de vigas mistas de madeira e concreto;
- Validar os resultados computacionais com dados experimentais e normas especializadas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Materiais de composição das vigas mistas

3.1.1. Concreto

A história da construção mista está diretamente ligada ao desenvolvimento do concreto armado e das estruturas em aço. Inicialmente, o concreto foi utilizado como material de revestimento, protegendo os perfis de aço contra o fogo e a corrosão, não sendo considerado nos cálculos da construção (ALVA; MALITE, 2005).

Atualmente, o concreto é o principal material da construção civil, devendo ser avaliado de acordo com a sua aplicação final, principalmente quando associado a uma estrutura, onde sua importância torna-se maior diante da resistência que ele passou a adquirir (LIMA et al., 2014).

Com atualização de maio de 2014, a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 6118 para Projeto de Estruturas de Concreto é considerada a “norma-mãe” em estruturas simples de concreto, concreto armado e protendido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2014), sendo esses materiais amplamente utilizados em casas de alvenaria, rodovias, pontes, edifícios e outras estruturas do Brasil (LIMA et al., 2014).

O concreto é composto por pelo menos um aglomerante (prioritariamente o cimento), água e agregados (areia e brita); podendo também possuir outros materiais, como aditivos químicos e compostos minerais. Ao ser hidratado com água, o cimento se adere aos demais elementos, formando uma mistura resistente e de fácil modelagem, que ao endurecer forma um bloco monolítico propício para as bases estruturais das construções (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

As proporções desses elementos variam de acordo com o objetivo e localidade da obra, podendo ainda ocorrer adição de outros materiais para melhorar as propriedades do concreto, tais como plastificante, retardador de pega e impermeabilizante (NEVILLE, 2016).

As propriedades do concreto fazem dele um material com elevada resistência à água ao ser comparado com aço e madeira, que apresentam maior deterioração

quando expostos. Outros fatores notórios ao concreto são seu baixo custo, facilidade de manuseio, durabilidade, versatilidade e adaptabilidade as mais variadas formas geométricas; o que faz dele o principal material empregado nas estruturas de construção civil mundial (CARMONA FILHO; CARMONA, 2013).

Devido a sua ampla empregabilidade, as estruturas de concreto são frequentemente expostas em ambientes e condições adversas, com grandes oscilações de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, mas mesmo assim possuem boa durabilidade (VLAHOVIC et al., 2011; CARMONA FILHO; CARMONA, 2013).

Couto et al. (2013) destacam que todos os sinais de deterioração do concreto são facilmente detectados a olho nu, como fissuras e desagregações, que são causadas por ações físicas, químicas ou mecânicas externas ou internas as estruturas da construção.

No estado endurecido, o concreto é considerado um material resistente às intempéries e ameaças físicas, sendo as consequências mais severas observadas pela variação da temperatura durante a fase de lançamento e nos primeiros dias de idade do concreto, quando ele ainda se encontra no estado fresco (PAGE; PAGE, 2007; RICHARDSON, 2007). Portanto, durante a concepção da composição dessa matriz cimentícia, deve-se prever as eventuais variações que este material possa vir a sofrer.

Locais de frio intenso, por exemplo, devem seguir procedimentos específicos para a dosagem e aplicação de uma matriz cimentícia. München et al. (2019), ao analisaram a influência da temperatura de cura no comportamento mecânico e físico de concretos com diferentes idades e temperaturas de cura, observaram que, apesar do desenvolvimento lento das propriedades mecânicas nos primeiros 7 dias, a diminuição na temperatura de cura proporcionou aumento de resistência em até 26% aos 28 dias; concluindo que a cura em baixas temperaturas é capaz de proporcionar misturas mais íntegras em idades avançadas, uma vez que o concreto atingiu maior velocidade de propagação de onda ultrassônica e resistência, pelo fato de ocorrer a hidratação residual do cimento.

Em estruturas mistas, especificamente aquelas compostas por concreto e madeira, como é observado na Figura 1, pode-se melhorar as propriedades mecânicas do concreto e diminuir consideravelmente o peso da estrutura construída com a associação da madeira (SORIANO; MASCIA, 2009).

Figura 1– Seção transversal de painel misto em madeira e concreto com sistema de ligação discreta (A) e detalhe de conectores metálicos instalados verticalmente na viga de madeira (B)



Fonte: adaptado de Soriano e Mascia (2009).

De acordo com Mascia et al. (2013), as estruturas constituídas pela associação de materiais com diferentes propriedades mecânicas, como no caso de concreto e madeira, é uma alternativa às estruturas convencionais da construção civil, pois além de reduzir os custos da obra, mantém a segurança estrutural com um vantajoso desempenho arquitetônico e ambiental.

3.1.2. Madeira

A madeira é um material biológico variável e de complexa composição, que apresenta características distintas entre as espécies (BURGER; RICHTER, 1991). Por isso, informações a respeito de suas propriedades são fundamentais para a escolha mais adequada e para o desenvolvimento tecnológico de projetos de estruturas que utilizam este material.

A escolha de espécies madeireiras na construção civil ocorre após análises das propriedades e dos respectivos níveis de esforços requeridos para um desempenho satisfatório. Para cada propriedade são fixados valores mínimos e máximos, tendo por base os valores de madeiras tradicionais, suas dimensões, formas e defeitos (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT, 2013).

Comparada a outros materiais normalmente utilizados na construção civil, a madeira apresenta diversas vantagens, como: ser uma matéria-prima renovável; capturar o CO₂ atmosférico durante a realização da fotossíntese da árvore; ter baixo consumo de energia durante o seu processamento; possuir alta resistência específica; e apresentar propriedades físicas, mecânicas, térmicas, elétricas e acústicas adequadas ao uso final (SOUTO; BUENO; SILVA, 2016). Além disso, a

madeira possui grande versatilidade de uso, que varia principalmente de acordo com a espécie, beneficiamento e corte da peça, como descrito no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação e utilização geral da madeira na construção civil

Classe	Descrição de uso	Algumas espécies
Construção civil pesada externa	Peças serradas usadas para estacas marítimas, pontes, postes, cruzetas, estacas, escoras e dormentes ferroviários, estruturas pesadas e torres de observação	Angelim pedra Cumaru Cupiúba Jatobá
Construção civil pesada interna	Peças serradas na forma de vigas, caibros, pranchas e tábuas utilizadas em estruturas de cobertura	Angelim amargoso Oiticica amarela Tauari
Construção civil leve externa e uso temporário	Peças serradas na forma de tábuas e pontaletes empregados em usos temporários (andaimes, escoramento e fôrmas para concreto) e as ripas e caibros utilizadas em partes secundárias de estruturas de cobertura	Cedrorana Curupixá Mandioqueira
Construção civil leve interna, decorativa	Peças serradas e beneficiadas como forros, painéis, lambris e guarnições, onde a madeira apresenta cor e desenhos decorativos	Garapa Tatajuba Roxinho
Construção civil leve interna, de utilidade geral	Peças serradas e beneficiadas como forros, painéis, lambris e guarnições, onde o aspecto decorativo não é fator limitante	Tachi Cedrorana
Construção civil leve esquadrias	Peças serradas e beneficiadas como portas, venezianas e caixilhos	Muiracatiara Curupixá
Construção civil - assoalhos domésticos	Peças serradas e beneficiadas utilizadas em pisos (tábuas corridas, tacos, tacões e parquetes)	Cumaru Garapa Jatobá

Fonte: adaptado de IPT (2013).

A cupiúba (*Goupia glabra* Aubl. – Goupiaceae), por exemplo, é um espécie nativa da região Amazônica (STEEGE et al., 2013), possui tronco cilíndrico de alto porte e madeira pesada, como observa-se na Figura 2, sendo indicada para construção naval e civil, fabricação de vigas, caibros, ripas, batentes de porta e janelas, móveis, dormentes, postes, moirões, cruzetas e pontes (GURGEL et al., 2015).

Figura 2 – Tronco da árvore cupiúba (*Goupia glabra*)



Fonte: Gurgel et al., 2015.

Resultados obtidos em ensaios experimentais permitem concluir que as vigas mistas com madeira apresentam maior rigidez à flexão, sendo uma alternativa de estrutura mais leve em comparação a estruturas apenas em aço e/ou concreto (CARRASCO; OLIVEIRA, 2003). Além disso, devido ao menor número de escoras e fôrmas necessárias para a montagem dos elementos, as estruturas mistas de madeira e concreto são executadas de forma mais rápida, uma vez que as vigas de madeira contribuem para o cimbramento da estrutura.

Baixos custos operacionais, alta durabilidade, fácil trabalhabilidade e versatilidade de uso são outras vantagens observadas na combinação de madeira e concreto (MATTHIESEN et al., 2010; SEGUNDINHO et al., 2018).

Estruturas de madeira e concreto foram avaliadas como técnica racional para construção de pontes em estradas vicinais por Soriano e Mascia (2009), que analisaram as características das pontes construídas somente com madeira e as compararam com pontes de estruturas mistas, como se observa na Figura 3. Os autores concluíram que a técnica de estrutura mista com madeira e concreto resultaram em benefícios para o desempenho e a durabilidade das pontes.

Figura 3 – Pontes mistas em madeira e concreto com largura de 4,0 m e comprimento total de 7,00 m. Longarinas roliças e fundações em estacas de madeira (A). Detalhes de execução: Fixação dos conectores com adesivo epóxi (B) e Concretagem do tabuleiro (C)



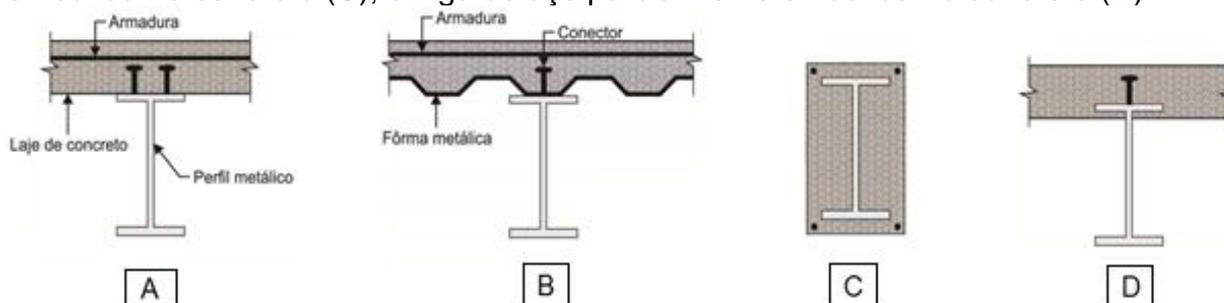
Fonte: Calil Júnior et al. (2006).

No Brasil, estudos demonstram a viabilidade econômica, o potencial estrutural e a durabilidade de estruturas mistas de madeira e concreto quando comparada a outros materiais (FONTE; CALIL JÚNIOR, 2007; SEGUNDINHO; MATTHIESEN, 2008; SEGUNDINHO et al., 2018). Apesar disso, este tipo de estrutura ainda não é amplamente utilizada no Brasil, sendo necessários estudos para aumentar a divulgação da madeira na construção civil do país.

3.1.3. Aço

Elementos mistos de aço e concreto são fabricados por meio da associação de um componente em aço, geralmente de perfil I ou tubular, com um componente em concreto, simples ou armado, como é observado na Figura 4 (ALVA; MALITE, 2005).

Figura 4 – Tipos mais usuais de vigas de mistas de aço e concreto: laje com face inferior plana (A); laje com forma de aço incorporada (B); viga de aço totalmente embutida no concreto (C); e viga de aço parcialmente embutida no concreto (D)



Fonte: adaptado de Malite (1990).

A interação entre o concreto e o aço pode ocorrer de maneira mecânica (conectores, mossas e ressaltos), por atrito ou por aderência e repartição de cargas. Denomina-se, então, elemento misto aço e concreto o material que possua um perfil de aço (laminado, dobrado ou soldado) que atua em conjunto com o concreto, formando pilares, vigas, lajes ou ligações mistas (ALVA; MALITE, 2005).

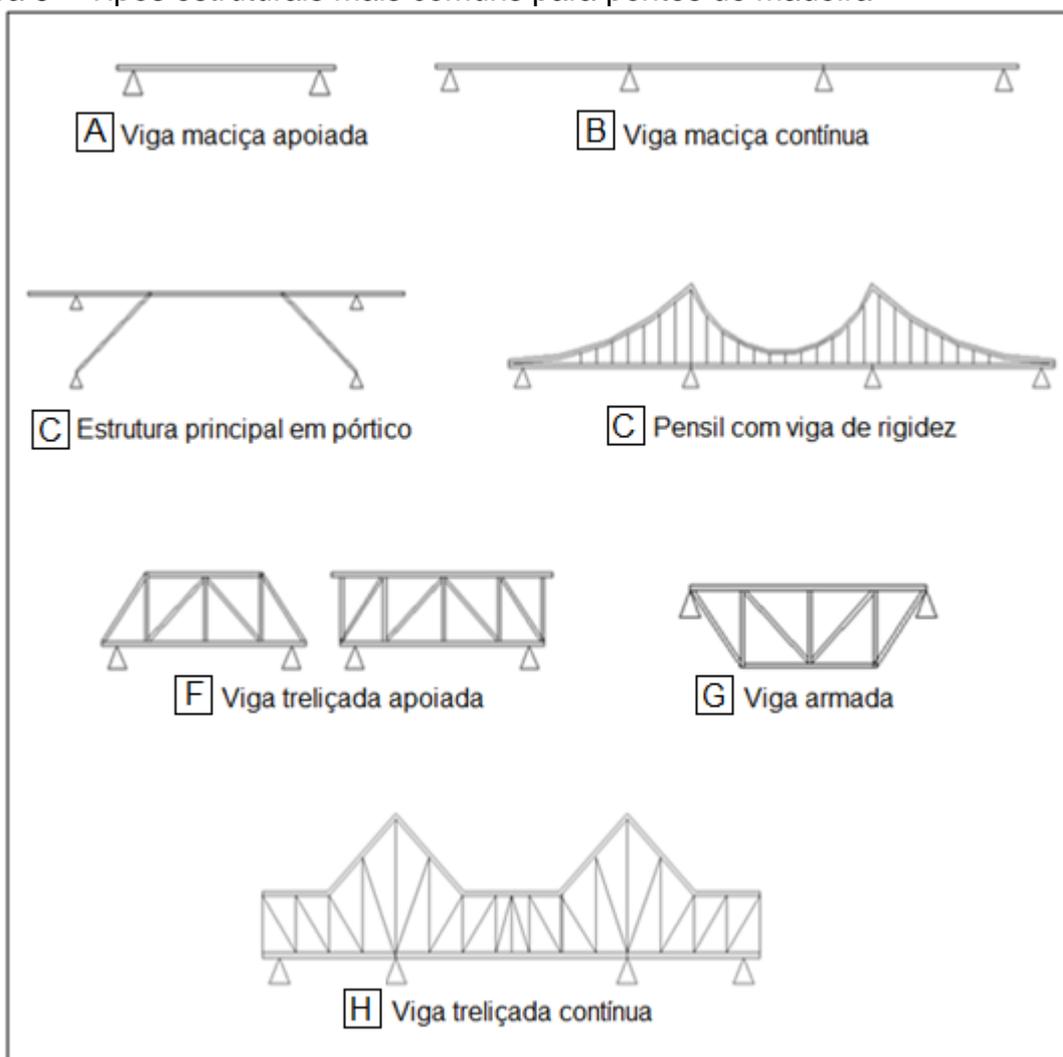
A escolha por estruturas mistas está ligada, principalmente, ao fato de que a estrutura de aço pode ser construída antes, suportando as cargas permanentes e de construção. Com o processo de concretagem dos pilares e vigas mistas com dimensões menores aos elementos do concreto armado, por exemplo, tem-se um aumento significativo da resistência da estrutura (ALVA; MALITE, 2005).

Outra possibilidade vantajosa são as estruturas mistas com madeira, cuja ligação entre a madeira e o concreto pode ser feita com diversos conectores provenientes do aço, como pregos, parafusos, pinos e barras metálicas (SEGUNDINHO; MATTHIESEN, 2008).

3.2. Pontes mistas de madeira e concreto

Desde o início da humanidade, o homem procurou vencer obstáculos para a sua livre locomoção. Para isso, muitas vezes, foram utilizadas passarelas e troncos de madeira a fim de fazer a travessia entre estradas, rios e lagos. Ao longo dos anos, com o aprimoramento desta técnica, as pontes de madeira foram evoluindo e, atualmente, existem vários tipos e soluções estruturais, como observado na Figura 5 (PAIVA, 1995; CALIL JÚNIOR; DIAS, 1997).

Figura 5 – Tipos estruturais mais comuns para pontes de madeira



Fonte: adaptada de Logsdon (1982).

Por ser de fácil manuseio e de grande disponibilidade no mercado, a madeira é um dos materiais de construção mais antigos utilizados na construção de pontes. Entre as principais vantagens de sua utilização, estão: a elevada capacidade de resistência a esforços de compressão e tração; o peso leve considerável; a fácil trabalhabilidade; e as boas condições de isolamento térmico e acústico (PFEIL; PFEIL, 2003).

Adicionalmente, na construção civil, as pontes de madeira são de fácil aplicação e não necessitam de equipamentos especiais, sendo uma excelente alternativa para rodovias rurais ou secundárias (RITTER, 1992). Fonte e Calil Júnior (2007), ao estudarem pontes protendidas de madeira para vias rurais, destacaram que os resultados apontaram baixo custo de material e de implemento, facilidade e rapidez de execução e elevado desempenho em campo.

De acordo com Segundinho e Matthiesen (2008), a utilização da composição madeira e concreto na construção de pontes certamente solucionará problemas relacionados à durabilidade daquelas que utilizam apenas madeira, sendo também uma alternativa mais econômica.

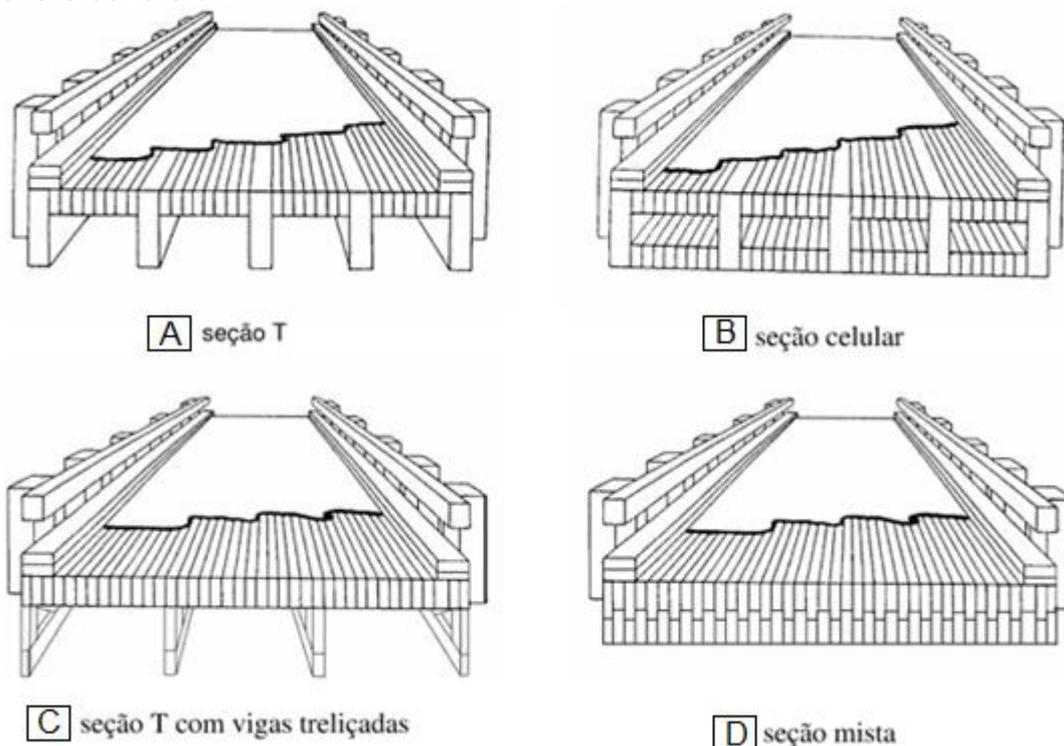
As estruturas mistas de madeira e concreto consistem na solidarização de vigas de madeira serrada ou laminada coladas a uma laje de concreto, por meio de elementos de ligação mecânica capazes de resistir a esforços de deslizamento na interface dos dois materiais, como as peças em aço (CARRASCO; OLIVEIRA, 2003).

Além de pontes, as estruturas mistas de madeira e concreto podem ser aplicadas em outras áreas da construção civil, como em residências, comércios, indústrias e na infraestrutura pública (escolas, parques, passarelas e indústrias). No setor agrícola e florestal, as estruturas mistas podem facilitar e diminuir os custos na elaboração de estradas e rotas para escoamento da produção, na montagem de habitações e prédios industriais, entre outras aplicações (SORIANO; MASCIA, 2009).

Em tabuleiros mistos, Calil Neto et al.(2017) citam que o concreto, além de proteger a madeira contra as intempéries e o desgaste superficial por abrasão, também diminui as vibrações provocadas pelas cargas dinâmicas de maior peso próprio, aumenta o isolamento acústico e a proteção contra fogo e proporciona maior rigidez e resistência à estrutura.

Contudo, a madeira pode apresentar algumas limitações, principalmente em relação a sua durabilidade natural e higroscopicidade. De acordo com Molina e Calil Júnior (2009), a utilização de concreto nos transversinas de madeira surgiu como uma alternativa para resolver tais problemas. Neste tipo de estrutura, a peça de concreto, que é constituída por uma laje armada, se conecta com as vigas de madeira de modo que ambos os materiais trabalhem em conjunto, como é visto na Figura 6.

Figura 6 – Seções transversais mais usuais em transversinas construídas com madeira e concreto



Fonte: Adaptado de Fonte e Calil Júnior (2007).

De acordo com Alvim e Almeida (2003), a associação da madeira com o concreto resulta em elementos com excelentes propriedades estruturais, que une o melhor de cada material, isto é, a leveza da madeira com a elevada resistência às intempéries do concreto.

Além disso, quando tratadas com material preservativo, tais como soluções de cobre, cromo e arsênio (CCA) ou cobre, cromo e boro (CCB), as peças de madeira ficam mais resistentes ao ataque de agentes xilófagos. Dessa forma, é possível a construção de grandes estruturas com um longo período de integridade, como exemplo de pontes fabricadas com madeiras tratadas (FONTE; CALIL JÚNIOR, 2007)

No Brasil, o primeiro registro da utilização de concreto em transversinas de madeira foi no interior do estado de São Paulo, na rodovia que liga Cambaratiba a Borborema. Neste sistema, Hellmeister (1978) empregou sobre longarinas peças roliças de madeira tratadas com CCA, utilizando o concreto como elemento de regularização da superfície e observou que as imperfeições naturais das superfícies das peças roliças de madeira serviram de apoio para a peça de concreto, o que favoreceu a transmissão das forças de cisalhamento entre os materiais, criando uma certa resistência ao deslizamento.

3.3. Modelagem numérica de elementos finitos em madeira

Na era tecnológica, o emprego da informatização se tornou uma ferramenta fundamental para as situações cotidianas, sendo parcial ou totalmente necessária para o desenvolvimento completo de qualquer tarefa. É com base nesses preceitos que se utilizam métodos numéricos associados à programação e ao desenvolvimento de *softwares* na Engenharia, o que possibilitou ao profissional ter maior capacidade criativa e de inovação em seus produtos (CASTRO, 2017).

Ao considerar a dificuldade de analisar uma estrutura como um todo, é possível avaliar os elementos estruturais de forma individual. Nesse sentido, os *softwares* podem auxiliar no desenvolvimento de modelos que sirvam para a avaliação dos elementos estruturais constituídos a partir da madeira e seus derivados. Tendo em vista a maior segurança oferecida por este método, a modelagem dos elementos estruturais se destaca na engenharia civil (CHRISTOFORO; LAHR, 2011).

Atualmente, os programas de modelagem são comuns ao cotidiano da população, mas nem sempre são de livre acesso, necessitando por vezes de um alto investimento para a sua aquisição. Por isso, na construção civil, deve-se considerar o material e os fins de utilização estrutural antes de se fazer a escolha do programa, para que a aplicação da modelagem numérica seja adequada ao estudo realizado, evitando gastos desnecessários.

Os *softwares* de dimensionamento de estruturas que existem hoje no mercado são desenvolvidos com o intuito de determinar os deslocamentos nodais e, conseqüentemente, os esforços, tensões e deformações correspondentes da estrutura (CHRISTOFORO; LAHR, 2011).

Dentre as ferramentas existentes para a análise numérica, destacam-se os programas comerciais ou *softwares* específicos como *Structural Analysis Program 2000* – SAP 2000, ANSYS e COMSOL, que são desenvolvidos com base no MEF. Esses *softwares* reproduzem numericamente o comportamento das estruturas e oferecem maior segurança na avaliação dos dados estudados (CALIL NETO et al., 2017).

Programas como SAP 2000 possuem ambiente de modelagem gráfica baseada em objetos 3D, com grande variedade de análises e opções de *design*. Este *software* é um dos programas estruturais mais integrados, produtivos e práticos

no mercado, devido ao seu fácil manuseio e rápida criação de estruturas, análise e *design* (MELO, 2016).

O SAP 2000 permite a realização de análise linear, cargas móveis e domínio da frequência, sendo também conhecido pela precisão dos resultados, velocidade de processamento, algoritmos numéricos eficientes e precisos elementos finitos, o que fez dele o programa de análise estrutural mais utilizado no mundo (MELO, 2016).

No MEF, uma peça de grande porte é dividida em partes menores a fim de se obter pequenos elementos que serão submetidos a diferentes cargas. Trabalhos como os de Argyris e Kelsey (1960) e Zienkiewicz e Taylor (2000) apresentaram uma descrição detalhada da evolução deste método desde a década de 60.

De maneira geral, o MEF é um método matemático que faz a discretização de um sólido para determinar o seu estado de tensão e deformação, por meio da demonstração de possíveis ações externas que afetam as estruturas (AZEVEDO, 2003).

Os procedimentos atuais de projetos para estruturas de madeira são embasados, principalmente, em dados de experimentos e conhecimentos do comportamento da madeira, fixadores e conectores (BARALDI; CALIL JÚNIOR, 2002).

Mollina et al. (2012), ao compararem resultados experimentais com um estudo numérico de elementos estruturais de madeira em altas temperaturas por meio do ANSYS, concluíram que os resultados apresentaram uma boa concordância com os dados reais.

Portanto, a modelagem de elementos estruturais, como vigas de madeira serrada ou laminada é de fundamental importância não só para a comprovação de ensaios já realizados, mas também para a posterior segurança da construção.

3.4. Modelagem numérica em vigas mistas de madeira-concreto

A utilização de estruturas mistas com madeira na construção civil tem crescido nos países mais desenvolvidos, principalmente para melhorar as propriedades estruturais e para reduzir os custos de execução da obra (CARRASCO; OLIVEIRA, 2003). Juntamente a isso, a madeira se destaca na

produção de edificações sustentáveis, principalmente pela possibilidade de utilização de madeiras provenientes de florestas plantadas (SOUTO; BUENO; SILVA, 2016).

A simulação das estruturas mistas apresenta complexidade inerente ao uso de materiais com propriedades distintas, que deve ser relacionada aos efeitos das variações térmicas e de carregamento prolongado (SORIANO; MASCIA, 2009).

Os principais modelos matemáticos para a representação do comportamento de estruturas mistas propostos na literatura se baseiam nos princípios de equações de equilíbrio e da energia (FORTI et al., 2015).

Normalmente, a abordagem escolhida para a formulação de uma estrutura mista é a do princípio dos trabalhos virtuais. Neste caso, a viga mista é considerada como duas vigas independentes conectadas. A energia de deformação da estrutura é dada pela soma das energias de deformação das duas vigas independentes mais a energia de deformação dos conectores e, por isso, o trabalho virtual das forças internas do conjunto será a soma dos três trabalhos virtuais internos individuais (FORTI et al., 2015).

Entretanto, diferente das estruturas mistas de aço e concreto, das quais existem várias publicações e normas, as estruturas de concreto e madeira não possuem normativa própria no Brasil, sendo utilizada na maioria das vezes as normas internacionais Eurocode 5 (COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO – EN 1995-1-1, 2004) e *Deutsches Institut für Normung* – DIN 1052 (1988).

Essas normas consideram a influência do deslizamento na interface do sistema pela adoção de um produto de rigidez efetivo, onde as variáveis são a forma da seção transversal, o módulo de elasticidade dos materiais constituintes, o espaçamento entre os conectores e o módulo de deslocamento da ligação (FORTI et al., 2015).

Para analisar o comportamento mecânico de vigas mistas em concreto e madeira, Mascia et al. (2007) determinou os deslocamentos verticais de três maneiras: (1) pela resolução analítica das equações de equilíbrio; (2) pelo programa de elementos finitos bidimensionais; e (3) pela equação do princípio dos trabalhos virtuais, sendo essa última abordagem obtida por meio de conceitos e pesquisas teóricas sobre vigas mistas. Os autores concluíram que a formulação proposta se mostrou consistente e seus resultados corroboraram com os dados experimentais.

Com o objetivo de apresentar uma análise do comportamento de viga mista, de seção transversal T, constituída por uma viga de madeira laminada colada e uma laje de concreto armado solidarizadas por meio de ligações flexíveis, Carrasco e Oliveira (2003) desenvolveram e analisaram uma simulação numérica (utilizando um programa de MEF) com um dimensionamento teórico; e concluíram que os resultados foram condizentes e satisfatórios com os ensaios experimentais já publicados sobre flexão simples de viga mista.

O desenvolvimento tecnológico do processo de construção de estruturas em madeira possibilitou avanços no conhecimento do comportamento e emprego da madeira em estruturas mistas, o que também permitiu a utilização mais racional de cada material (FORTI et al., 2015). Apesar disso, o Brasil ainda carece de normas próprias para fomentar a aplicação em larga escala de madeira nas estruturas mistas da construção civil, o que faz da publicação de pesquisas o principal meio para a divulgação desse tipo de estrutura no país.

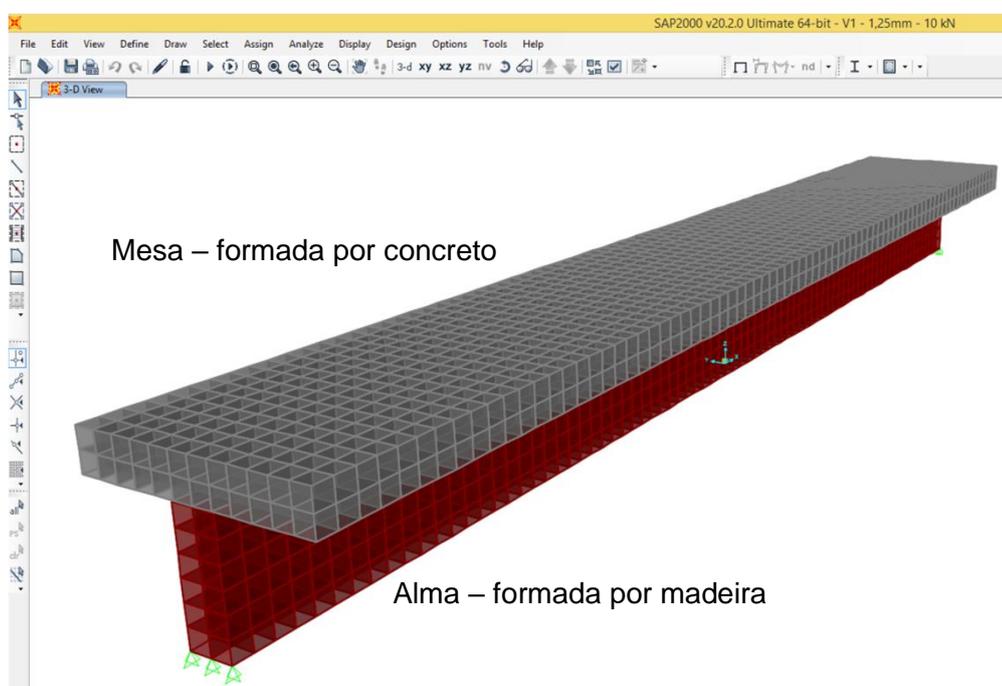
4. METODOLOGIA

A partir dos dados experimentais publicados por Segundinho (2005), extraíram-se as informações necessárias para o carregamento do programa SAP 2000 e a realização da modelagem, sendo todos os dados padronizados seguindo os critérios estabelecidos pela norma Eurocode 5 (EN 1995-1-1, 2004).

4.1. Dimensões das vigas simuladas e discretização

Pelo Método de Elementos Finitos (MEF) foi definida a quantidade de elementos em que a viga foi dividida. Com essa discretização foram gerados dois sólidos (alma e mesa) com vários elementos menores, sendo produzidos 960 cubos para a alma e 1920 cubos para a mesa, o que totalizou 2880 cubos, como é observado na Figura 7. De acordo com o modelo produzido, a alma e a mesa podem ou não estar conectadas por pinos de aço.

Figura 7 – Forma tridimensional da viga gerado pelo SAP2000



Fonte: o autor.

A altura e a largura dos elementos sólidos, descritas na Tabela 1, variou de acordo com as dimensões da alma e mesa citadas por Segundinho (2005), que

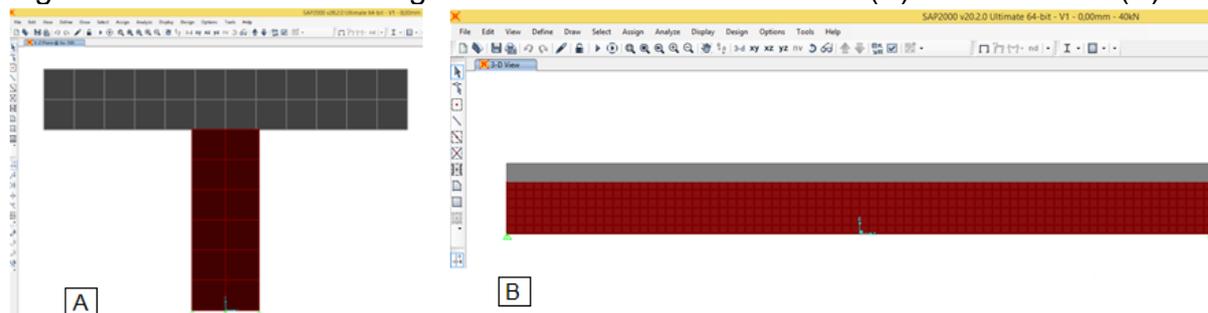
produziu cubos com aproximadamente 2,5 x 2,5 x 2,5 cm (largura x comprimento x altura) em oito vigas simuladas, como exemplificadas na Figura 8. A altura também variou de acordo com as dimensões da alma.

Tabela 1 – Dados das vigas simuladas no programa de modelagem numérica

VIGA	Dimensões da alma (cm)		Dimensões da mesa (cm)		Comprimento Alma e Mesa (cm)	Número de pinos	Espaçamento entre pinos (cm)
	Largura	Altura	Largura	Altura			
1	5,5	15,0				20	10
2	5,5	15,5				20	10
3	5,5	15,5				14	15
4	5,5	15,0	30,0	5,0	200,0	12	20
5	5,0	14,5				20	10
6	5,0	14,5				14	15
7	5,0	14,5				14	15
8	5,0	14,5				20	10

Fonte: adaptado de Segundinho (2005).

Figura 8 – Vista frontal da viga mista de concreto e madeira (A) e vista lateral (B)



Fonte: o autor.

4.2. Obtenção dos dados para modelagem das vigas no SAP 2000

As Tabelas 2 e 3 trazem as propriedades dos principais materiais utilizados por Segundinho (2005) nas oito vigas mistas estudadas.

Tabela 2 – Propriedades físicas e geométricas do concreto presente nas vigas mistas

VIGAS	Resistência média do Concreto	Módulo de Elasticidade	Largura	Altura	Área	Momento de inércia
	$F_{c,m}$ (kN cm ⁻²)	$E_{c,m}$ (kN cm ⁻²)	b_c (cm)	h_c (cm)	A_c (cm ²)	I_c (cm ⁴)
1	4,46	4441,0	5,0	30,0	150,0	312,5
2	3,58	4090,0	5,0	30,0	150,0	312,5
3	4,04	4329,0	5,0	30,0	150,0	312,5
4	3,41	4159,0	5,0	30,0	150,0	312,5
5	5,30	4200,5	5,0	30,0	150,0	312,5
6	5,30	4200,5	5,0	30,0	150,0	312,5
7	4,82	3793,5	5,0	30,0	150,0	312,5
8	4,82	3793,5	5,0	30,0	150,0	312,5

Fonte: adaptado de Segundinho (2005).

Tabela 3 – Propriedades físicas e geométricas da madeira (*Goupia glabra*) presente nas vigas mistas

VIGAS	Resistência à compressão paralela às fibras	Módulo de Elasticidade	Largura	Altura	Área	Momento de inércia
	$F_{c0,m}$ (kN cm ⁻²)	$E_{c0,m}$ (kN cm ⁻²)	b_w (cm)	h_w (cm)	A_w (cm ²)	I_w (cm ⁴)
1	5,13	861,36	15,0	5,5	82,50	1546,90
2	5,13	903,48	15,5	5,5	85,30	1706,80
3	5,13	894,55	15,5	5,5	85,30	1706,80
4	5,13	1044,48	15,0	5,5	82,50	1546,90
5	5,44	1084,82	14,5	5,0	72,50	1270,26
6	5,44	1129,17	14,5	5,0	72,50	1270,26
7	5,44	1862,61	14,5	5,0	72,50	1270,26
8	5,44	1770,50	14,5	5,0	72,50	1270,26

Fonte: adaptado Segundinho (2005).

Os conectores (pinos de ligação) utilizados por Segundinho (2005) foram provenientes de barras de aço CA50, com ½ polegada de diâmetro e 12,5 mm de comprimento, como visto na Figura 9, sendo essas características usadas na modelagem desta pesquisa.

Figura 9 – Pinos inseridos nas almas de madeira das vigas



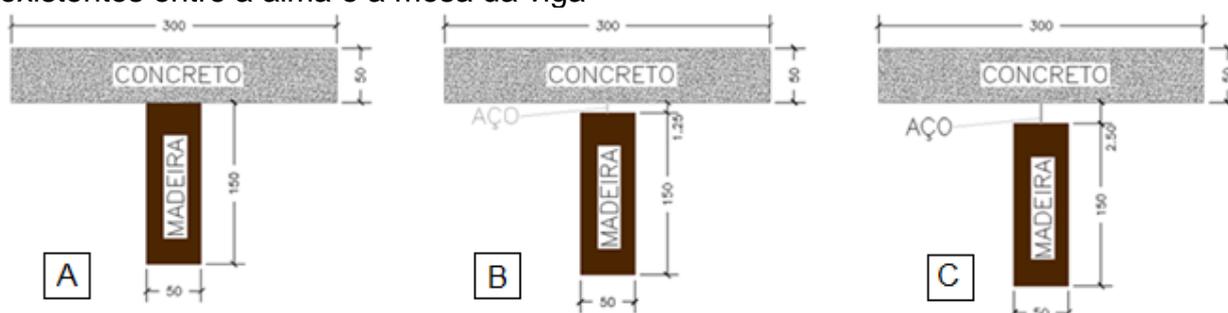
Fonte: Segundinho (não publicado)

4.3. Modelos simulados

Foram realizadas três simulações (modelos) com diferentes espaçamentos entre a alma e a mesa, para cada uma das oito vigas analisadas, sendo eles:

- Modelo 1: a alma e a mesa estão “coladas” uma na outra, não havendo conectores ou espaçamento entre elas, como observado na Figura 10 (A);
- Modelo 2: a alma e a mesa estão afastadas por pinos de aço (conectores) a uma distância de 1,25 mm, como observado na Figura 10 (B);
- Modelo 3: a alma e a mesa estão afastadas por pinos de aço a uma distância de 2,5 mm, como observado na Figura 10 (C).

Figura 10 – Esquema dos modelos simulados, com os diferentes espaçamentos existentes entre a alma e a mesa da viga

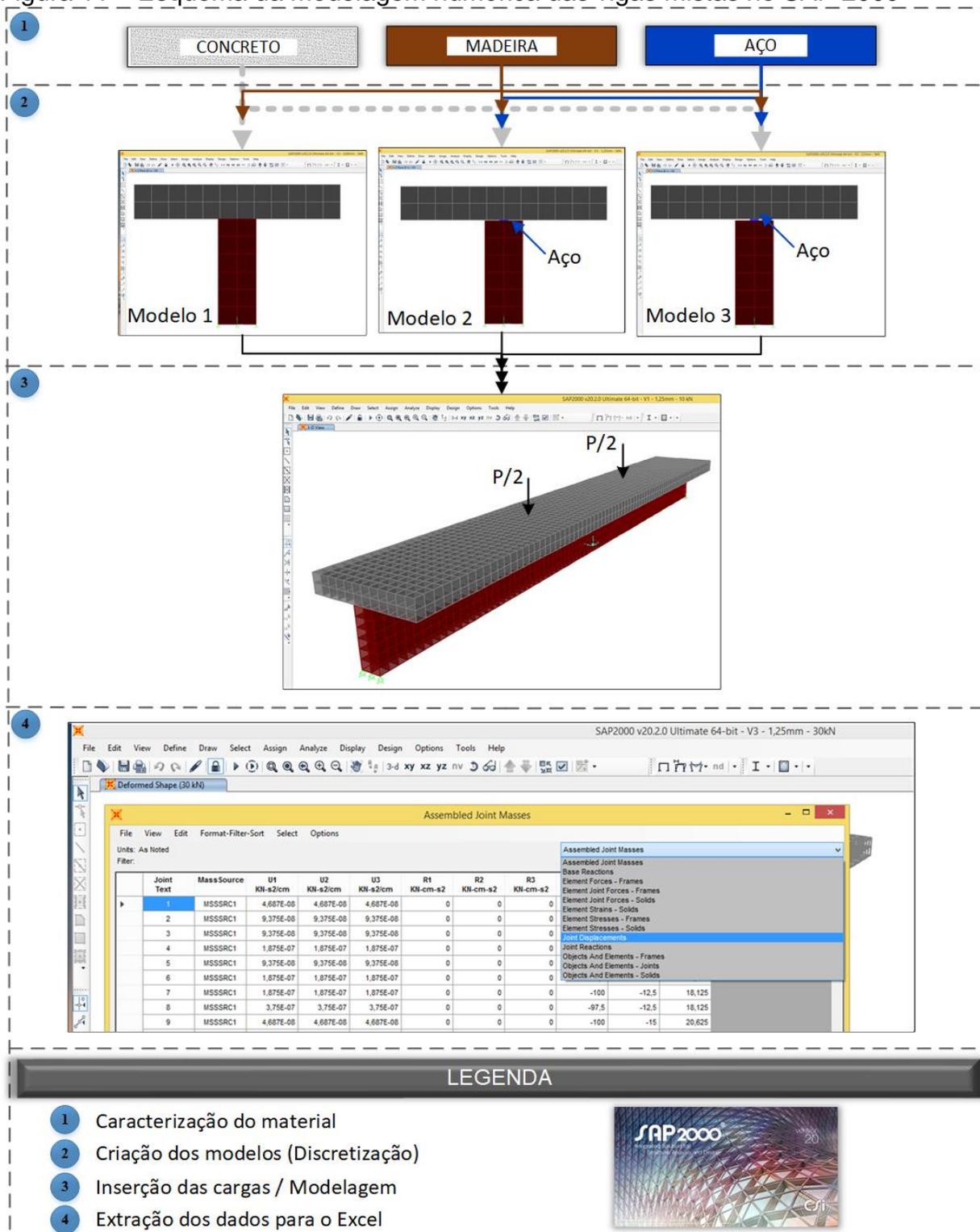


Fonte: o autor.

4.4. Modelagem numérica das vigas mistas no SAP 2000

Os passos para a modelagem numérica das vigas e para a utilização e inserção dos dados no SAP 2000 foram detalhados no Apêndice A e esquematizados na Figura 11.

Figura 11 – Esquema da modelagem numérica das vigas mistas no SAP 2000

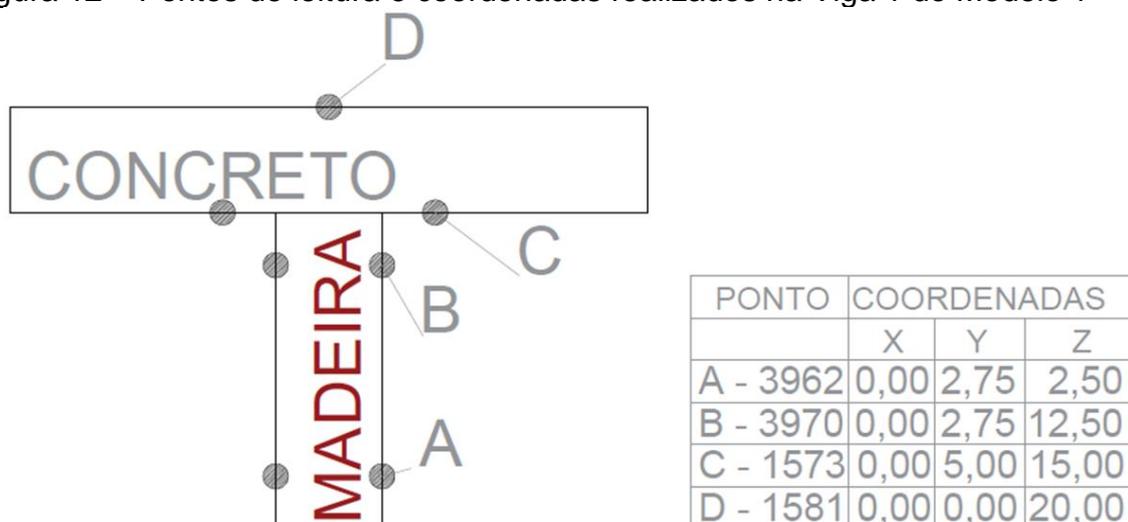


Fonte: o autor.

Para análise dos dados gerados do programa SAP 2000 foram definidos pontos de leitura seguindo a orientação dos pontos reais, nos quais foram inseridos os extensômetros de leitura dos dados, localizados sobre os nós mais próximos do

ponto medido pelo programa, nas coordenadas X, Y e Z e pelo ponto de nó da locação (A, B, C e D), como exemplificado na Figura 12.

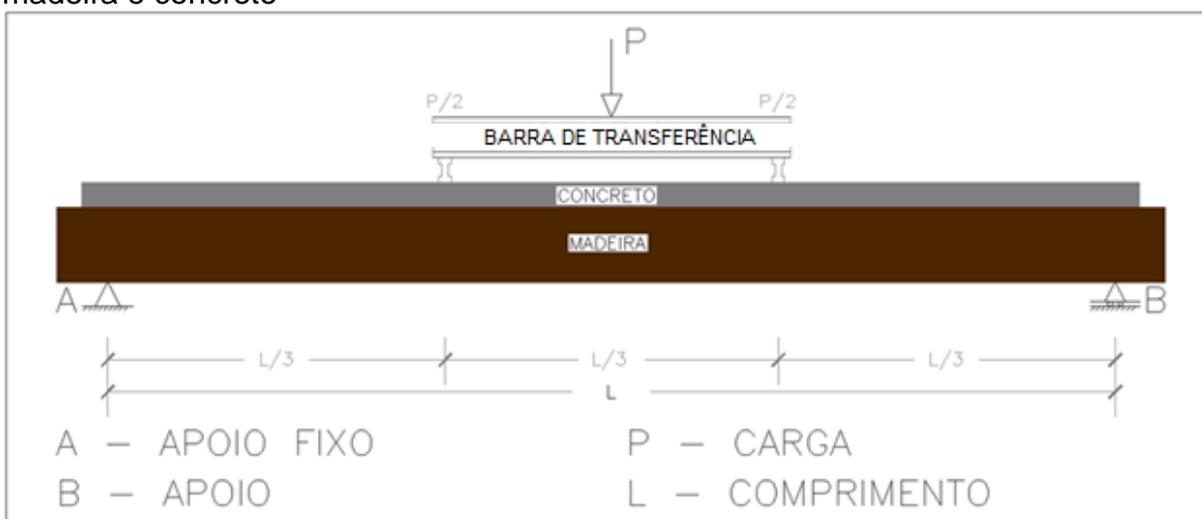
Figura 12 – Pontos de leitura e coordenadas realizados na Viga 1 do Modelo 1



Fonte: o autor.

Assim como realizado nos ensaios experimentais de Segundinho (2005), nos três modelos foram simulados dois pontos de carga sobre a viga, como se observa na Figura 13.

Figura 13 – Simulação de cargas em dois pontos de apoio sob a viga mista de madeira e concreto



Fonte: o autor.

Nas vigas de 1 a 4 simulou-se uma carga crescente de 0 a 40 kN, sendo as leituras das tensões e dos deslocamentos realizadas a cada 5 kN, totalizando oito leituras por viga em cada ponto de leitura.

Nas vigas de 5 a 8 simulou-se cargas crescentes e aleatórias até a ocorrência de 0,1 cm de descolamento. Nesse ponto, verificou-se a tensão em todos os pontos de leitura da viga, repetindo-se o mesmo procedimento até que cada viga apresentasse 1 cm de deslocamento.

A leitura dos pontos ocorreu após a geração de 216 modelos simulados numericamente no SAP 2000, 448 planilhas no Excel e 40 gráficos, respectivamente, exemplificados nos Apêndices B e C, onde se fez a seleção dos modelos que mais se assemelhavam com os dados experimentais.

Para cada viga foram selecionados os Modelos 1, 2 e 3 que correspondem a 0,0 mm, 1,25 mm e 2,5 mm de distância entre a alma e a mesa, respectivamente, dos quais foram comparados com os dados experimentais obtidos por Segundinho (2005) e com as normas Eurocode 5 (EN 1995-1-1, 2004) e NBR 7190 (ABNT, 1997) a fim de fazer sua validação.

4.5. Análise estatística dos dados

Todos os dados foram compilados em gráficos gerados no SigmaPlot 13.0 com seus respectivos Erros Médios (EM). Para os deslocamentos verticais e tensões encontrados nos carregamentos centrais de cada modelo simulado foi calculado no Excel, por meio da Equação 1, o valor do Erro Médio.

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

Em que: EM é o erro médio; $X_{\text{simulado}(i)}$ é o valor simulado na posição i ; e $X_{\text{medido}(i)}$ é o valor obtido na posição i .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os deslocamentos e tensões das vigas devem ser estimados e compreendidos com clareza, pois afetam diretamente a estética da construção, a confiabilidade dos usuários e, principalmente, a integridade da estrutura. Os tópicos 5.1. e 5.2. detalham os resultados e discussão de cada variável analisada.

5.1. Deslocamentos

Os deslocamentos das vigas 1 a 4 pelos Modelos 1, 2 e 3 ajustados, comparados aos dados reais publicados por Segundinho (2005) e as normas técnicas a Eurocode 5 (EN 1995-1-1, 2004) e a NBR 7190 (ABNT, 1997), bem como seus respectivos Erros Médios são apresentados na Figuras 14 e 15.

De modo geral, observou-se que os valores para o deslocamento das vigas nos Modelos 2 e 3 foram semelhantes e superiores aos valores reais, das normas específicas e do Modelo 1. Observou-se, ainda, que o aumento no deslocamento foi proporcional ao aumento de carga aplicada, o que representou ganhos significativos a estrutura, uma vez que os Modelos 2 e 3 possibilitam maior Estado Limite de Serviço que os valores obtidos nos ensaios experimentais.

O deslocamento de uma viga pode ser ocasionado por diversos fatores. Nawy (2008) cita que os principais são: as dimensões da seção transversal; os tipos dos materiais empregados; a extensão do vão; a propagação da zona de fissuração do concreto; a grandeza e a configuração do carregamento; a retração; e a fluência e os processos de dimensionamento e de moldagem da estrutura.

Além disso, o deslocamento também ocorre em função da rigidez da conexão, que depende do espaçamento e da rigidez individual dos conectores. A rigidez da ligação determina a distribuição da tensão no elemento estrutural composto (NEWMARK; SIESS; VIEST, 1951). Nos procedimentos de cálculo com ligações por pinos, por exemplo, assume-se um sistema de ligação distribuído uniformemente ao longo da superfície de contato entre os materiais, ou seja, a resistência ao deslocamento proporcionada pelos pinos é constante e expressa pela unidade de espaçamento dos conectores (SEGUNDINHO, 2005).

Figura 14 – Deslocamentos observados nos Modelos 1, 2 e 3, nos dados reais e nas normas específicas para as Vigas 1, 2, 3 e 4 e seus respectivos Erros Médios

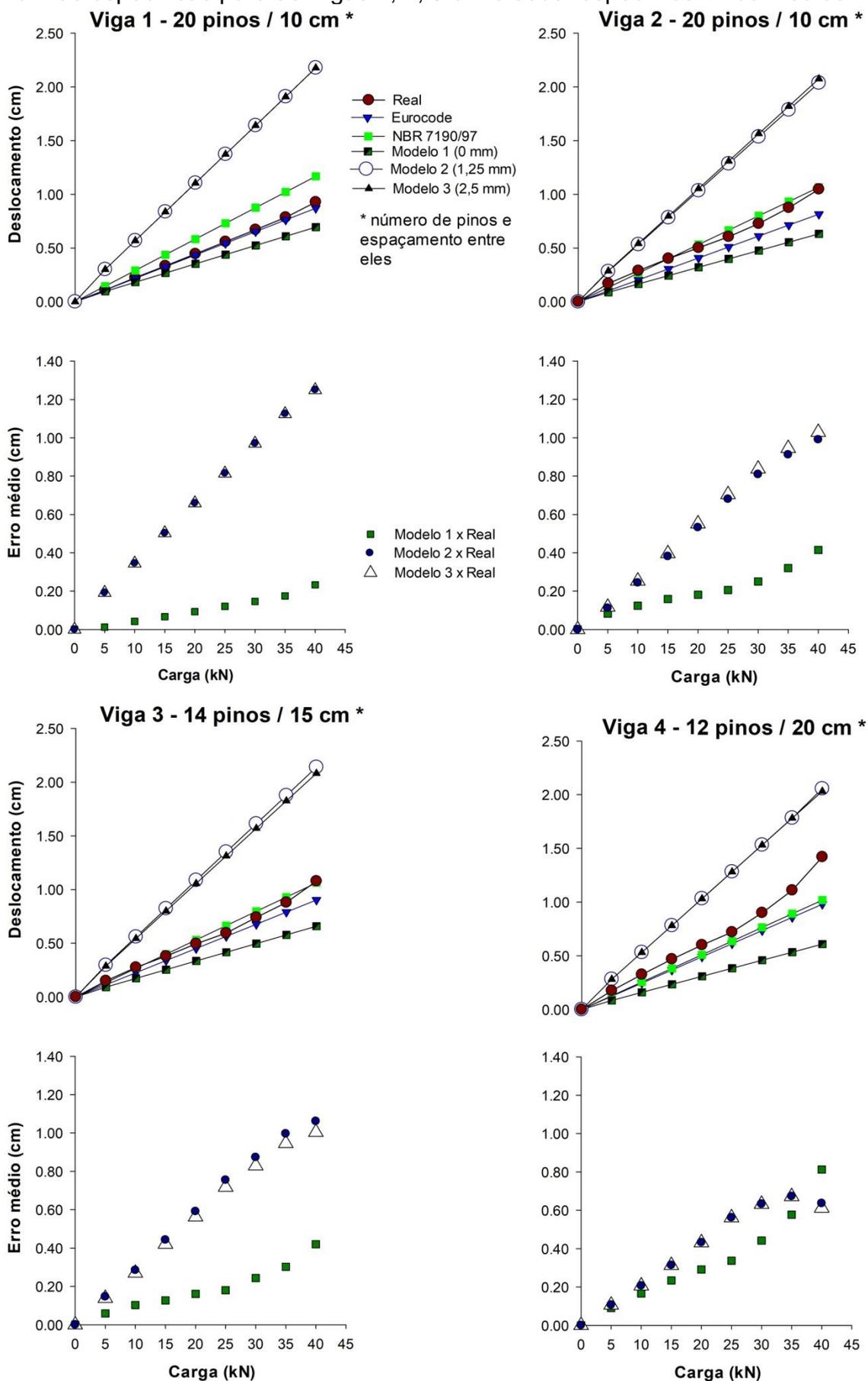
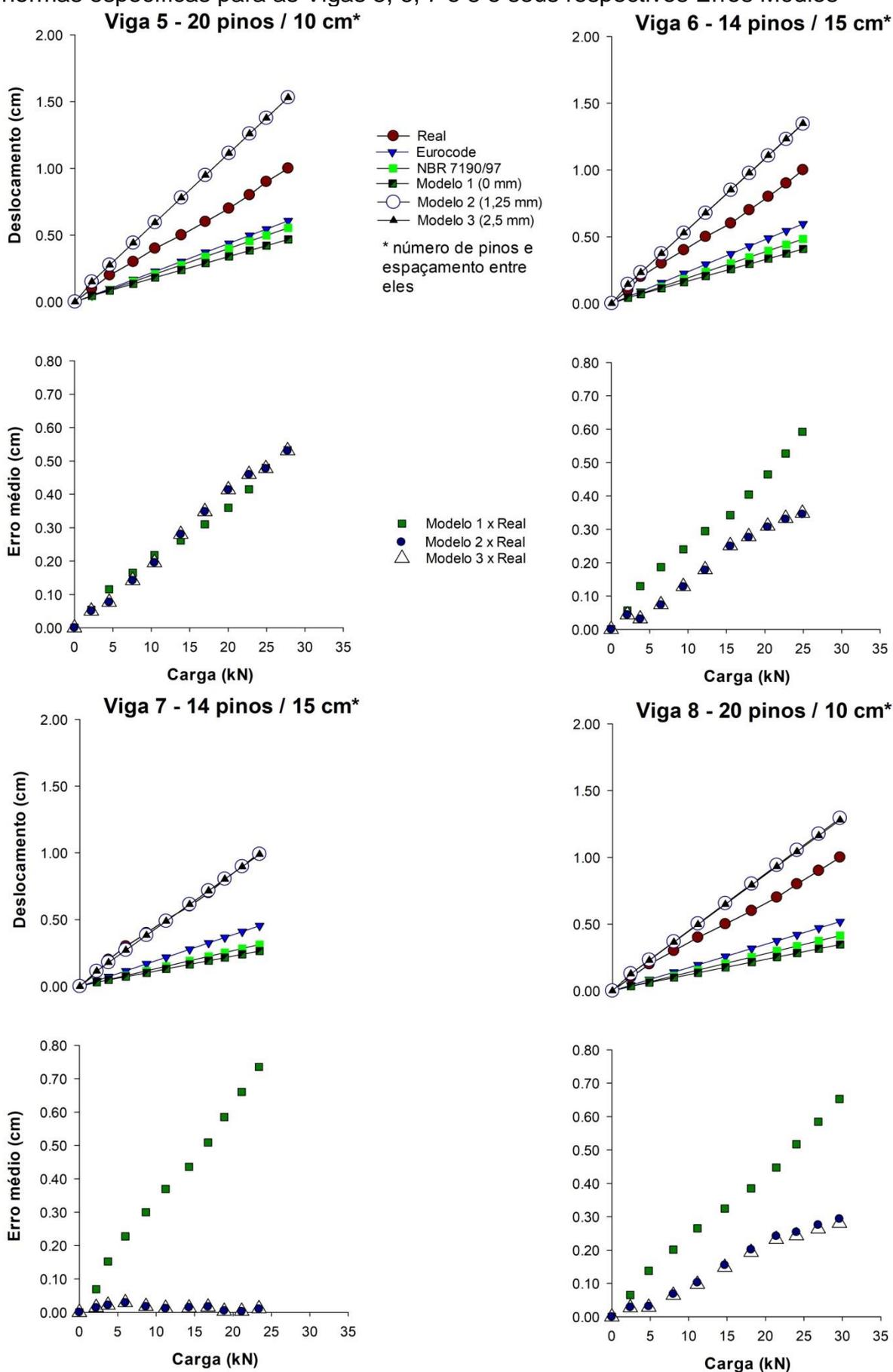


Figura 15 – Deslocamento observados nos Modelos 1, 2 e 3, nos dados reais e nas normas específicas para as Vigas 5, 6, 7 e 8 e seus respectivos Erros Médios



A influência do espaçamento entre os conectores foi verificada nos modelos que possuíam distância entre a alma e a mesa da viga, que apresentam maiores valores de Estado Limite de Serviço. Logo, ao se empregar o sistema de ligação na interface de contato madeira e concreto, pode-se elevar em até duas vezes a capacidade de carregamento da estrutura, se comparado a uma seção com os materiais que trabalham separadamente (AHMADI; SAKA, 1993), sendo sua rigidez de três a quatro vezes mais elevada, o que provoca menores deslocamentos, pois as flechas são inversamente proporcionais à rigidez da estrutura (CECCOTTI, 1995).

A redução do momento de inércia por meio dos deslocamentos verticais em estruturas fletidas com diferentes conectores (i: pregos, barras de aço e parafusos; ii: anéis, tubos de aço e placas dentadas; iii: entalhes com barras de aço; e iv: treliça ou chapa de aço colada na madeira) foi pesquisada por Ceccotti (1995). O autor concluiu que a utilização dos pinos de aço tem fundamental importância para impedir a separação vertical entre o concreto e a madeira, além de contribuir para resistência horizontal do sistema, o que corroborou com os resultados desta pesquisa.

Foi verificada uma eficiência significativa no uso dos conectores, assim como observado por Segundinho e Matthiesen (2004) em análise experimental de um modelo de estrutura para pontes com placas de concreto e toras de eucalipto, cujo sistema de ligação era formado por barras de aço (CA50) com 12,5 mm, fixadas verticalmente na madeira,

Acredita-se, que o sistema de ligação favoreceu a transferência dos esforços de cisalhamento horizontal nas vigas estudadas, o que afetou de forma significativa a distribuição de forças internas na estrutura, suas deformações e o afastamento vertical entre o concreto e a madeira, como também observado por Girhammar e Gopu (1993) e Fragiacomio e Ceccotti (2006).

Outro fator pertinente é a semelhança nos valores encontrados para o estado limite de utilização dos Modelos 2 e 3 quanto ao deslocamento, incluindo uma tendência no erro médio. Verificou-se que o Modelo 2 pode otimizar os custos da construção, uma vez que, com menos material de ligação (1,25 mm), se mantém o mesmo estado limite.

Analisando essas vertentes, acredita-se que a ligação deve ser idealizada de modo que os materiais sejam utilizados de acordo com suas melhores propriedades, isto é, o concreto solicitado à compressão e a madeira solicitada à tração (AHMADI;

SAKA, 1993; KAVALIAUSKAS et al., 2005; BRUNNER et al., 2007). Fundamentando, assim, o princípio básico da otimização: uma construção mais leve, com baixo custo e elevado desempenho estrutural.

5.2. Tensões

As tensões das vigas 1 a 4 pelos Modelos 1, 2 e 3 ajustados comparadas aos dados reais publicados por Segundinho (2005), a Eurocode 5 (EN 1995-1-1, 2004), a NBR 7190 (ABNT, 1997) e seus respectivos Erros Médios são demonstradas nas Figuras 16 a 19. Já para as vigas 5 a 8, as tensões dos modelos ajustados comparadas a Eurocode 5 e seus respectivos erros são observadas nas Figuras 20 a 23.

Os pontos de leitura A (formada por madeira) e D (formada por concreto) são os mais expressivos para a análise da alma e da mesa, respectivamente, por estarem mais afastados das interseções da viga. No ponto de leitura A das vigas 1, 3 e 4, observou-se que os valores das tensões normais nos Modelos 2 e 3 foram superiores aos valores reais, das normas específicas citadas e do Modelo 1.

Verificou-se, ainda, que o aumento nas tensões foi proporcional ao aumento de carga aplicada, o que representou ganhos significativos a estrutura, uma vez que os Modelos 2 e 3 possibilitou maior Estado Limite de Serviço que os valores obtidos nos ensaios experimentais, ou seja, os Modelos simulados 2 e 3 indicam uma maior resistência da estrutura como um todo, sendo os melhores valores observados nas vigas 3 e 4, cujos pontos de leitura A apresentaram resistência máxima de aproximadamente $2,5 \text{ kN cm}^{-2}$ e erro médio inferior a $0,6 \text{ kN cm}^{-2}$.

Nos pontos de leitura D dessas vigas, observou-se valores negativos, sendo os resultados encontrados nos Modelos 2 e 3 inferiores a todos os parâmetros estabelecidos e os valores encontrados no Modelo 1 semelhantes a NBR 7190 e aos dados reais, sendo os valores mais satisfatórios observados nas vigas 3 e 4, que apresentaram resistência máxima de aproximadamente $(-) 5 \text{ kN cm}^{-2}$ e erro médio inferior a 2 kN cm^{-2} .

Figura 16 – Tensões aplicadas nos pontos A, B, C e D da viga 1 e comparação entre os Modelos 1, 2 e 3 com os dados reais, normas específicas e seus respectivos Erros Médios

Viga 1 - 20 pinos / 10 cm *

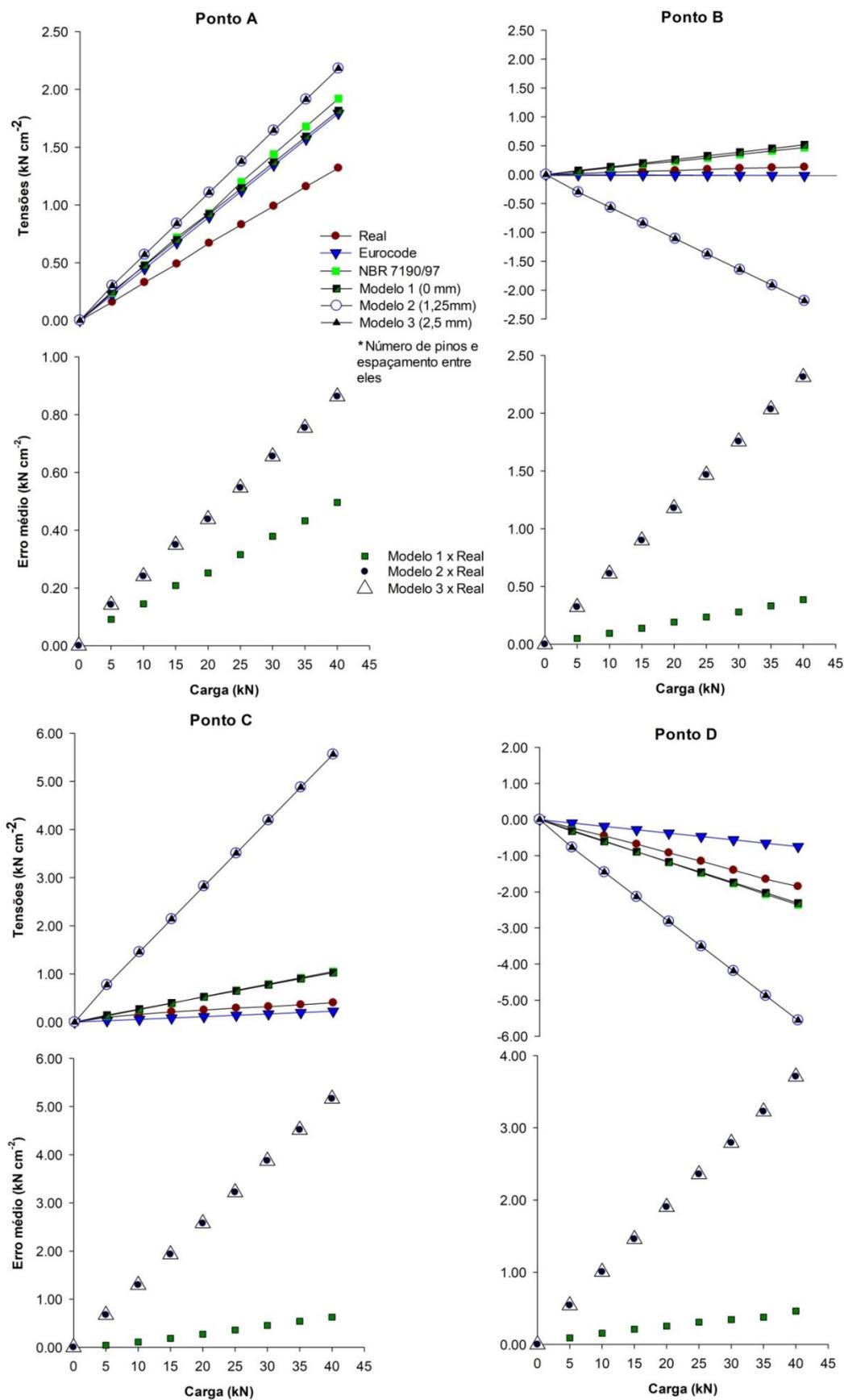


Figura 17 – Tensões aplicadas nos pontos A, B, C e D da viga 2 e comparação entre os Modelos 1, 2 e 3 com os dados reais, normas específicas e seus respectivos Erros Médios

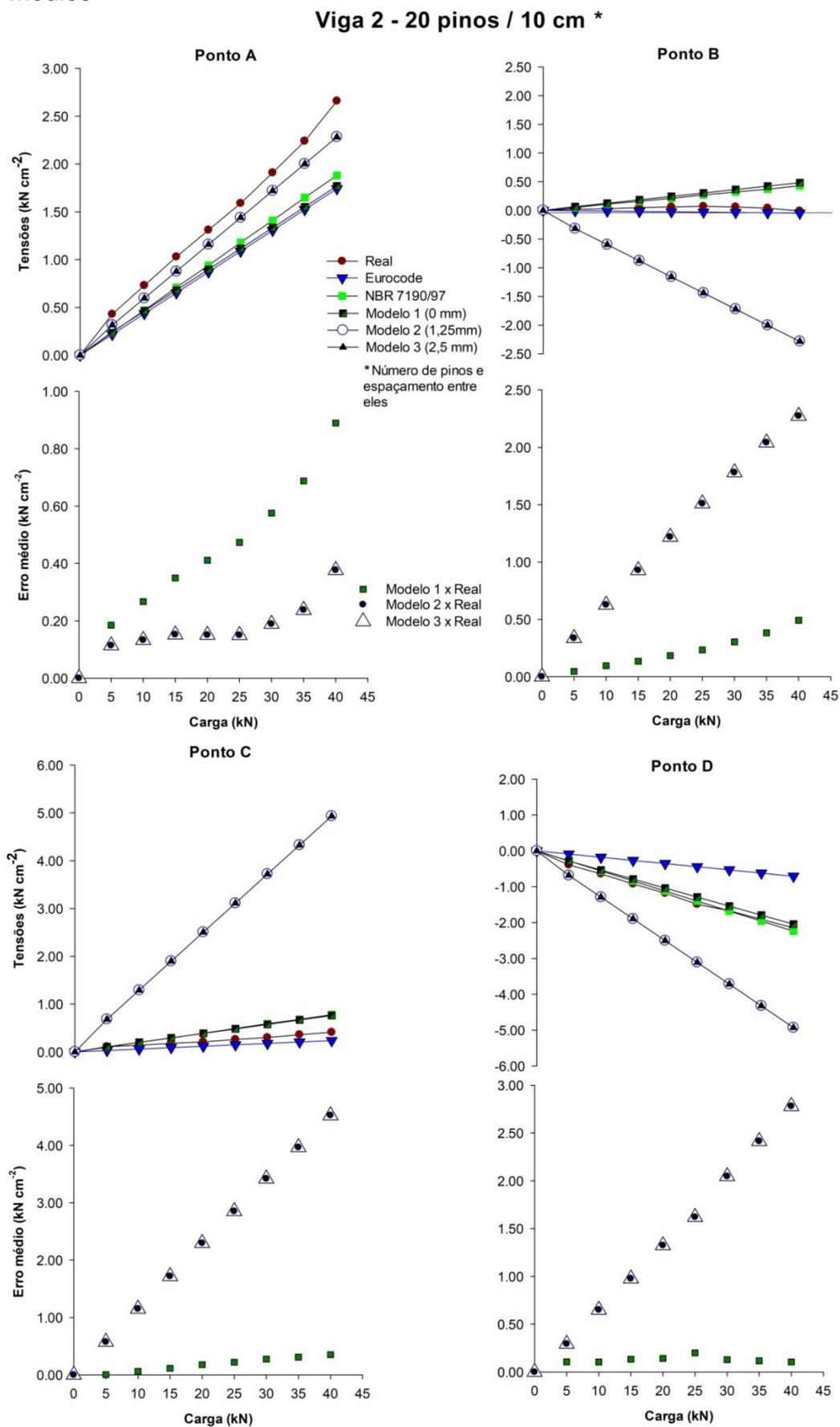


Figura 18 – Tensões aplicadas nos pontos A, B, C e D da viga 3 e comparação entre os Modelos 1, 2 e 3 com os dados reais, normas específicas e seus respectivos Erros Médios

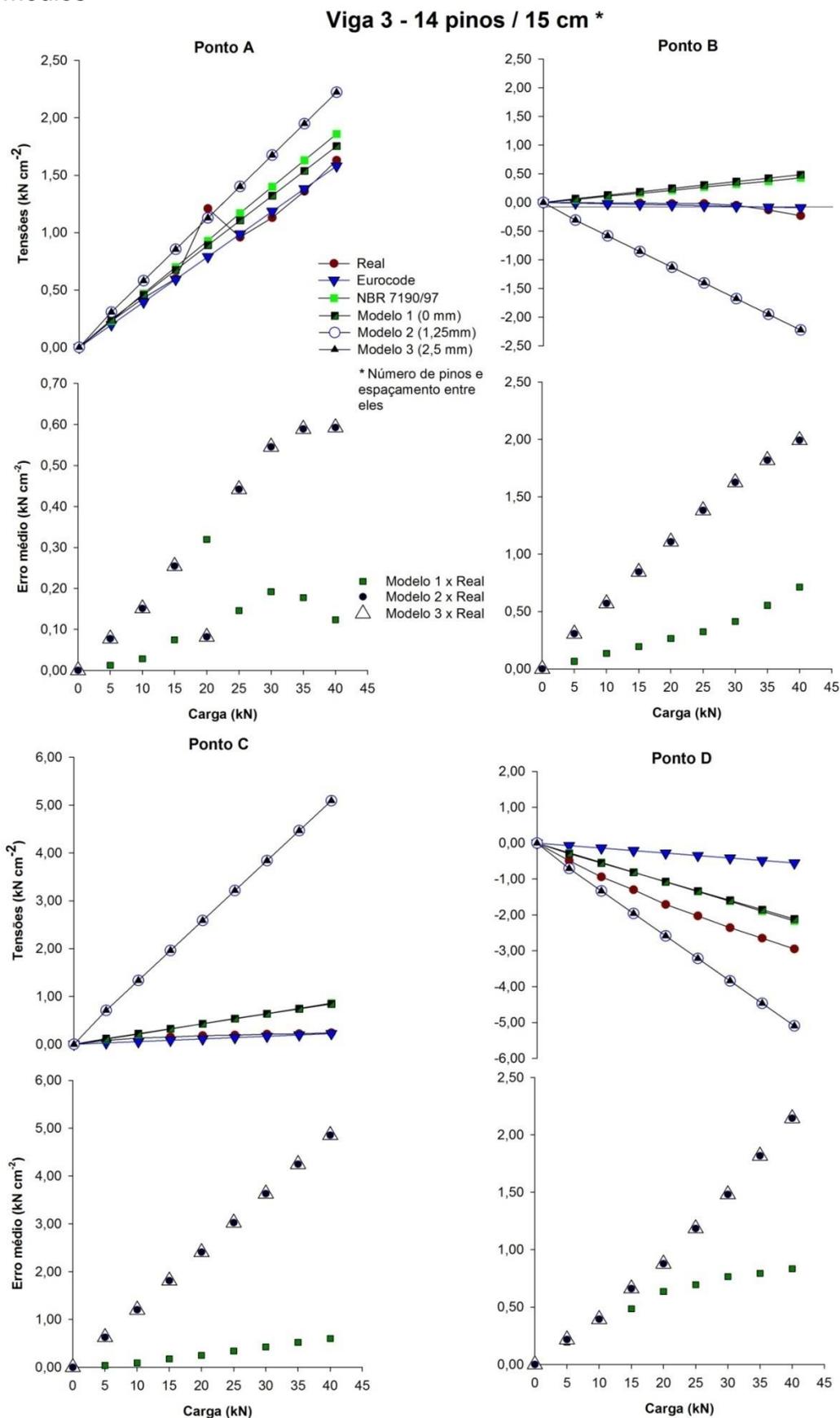


Figura 19 – Tensões aplicadas nos pontos A, B, C e D da viga 4 e comparação entre os Modelos 1, 2 e 3 com os dados reais, normas específicas e seus respectivos Erros Médios

Viga 4 - 12 pinos / 20 cm *

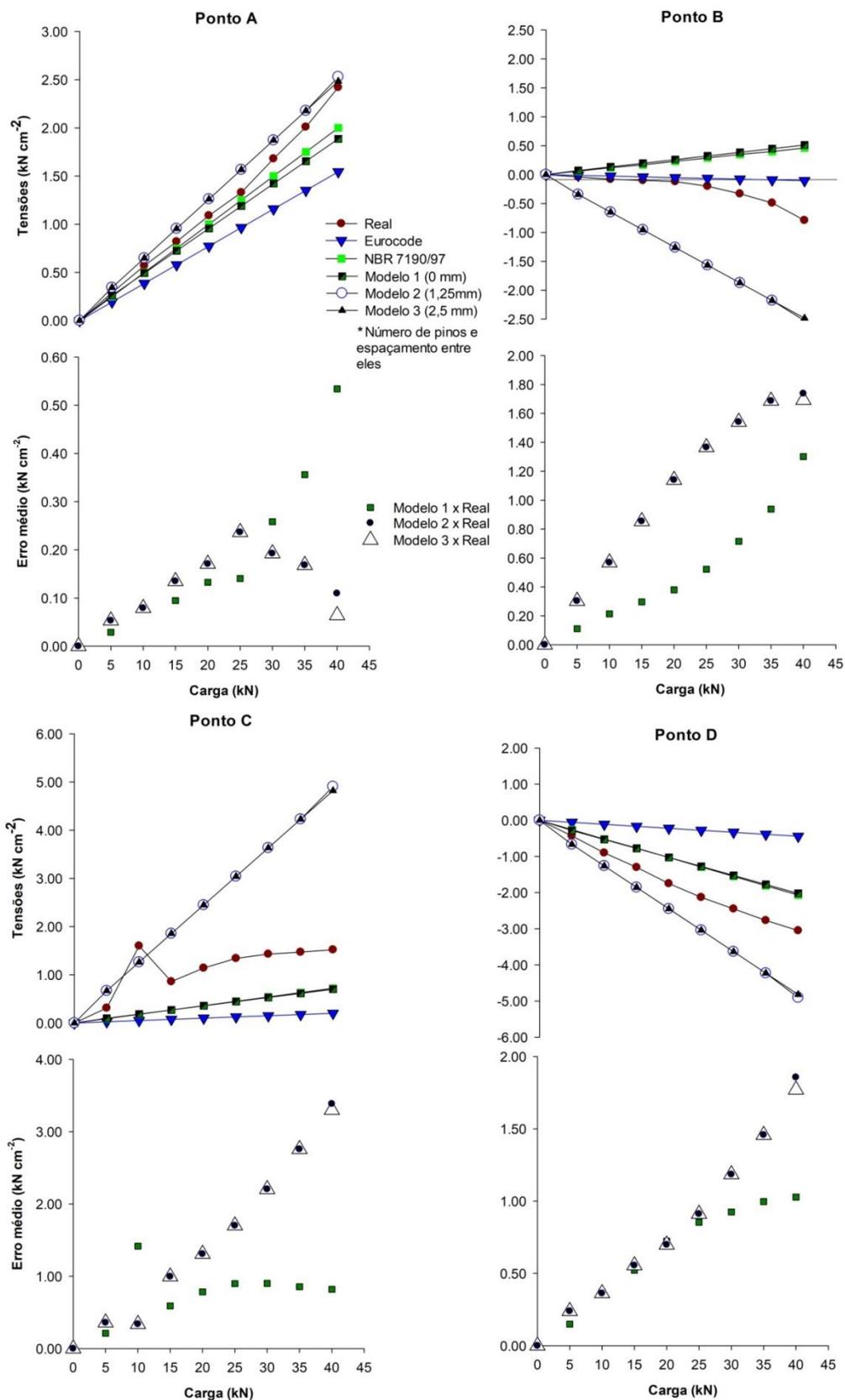


Figura 20 – Tensões aplicadas nos pontos A, B, C e D da viga 5 e comparação entre os Modelos 1, 2 e 3 com a norma específica e seus respectivos Erros Médios
Viga 5 - 20 pinos / 10 cm *

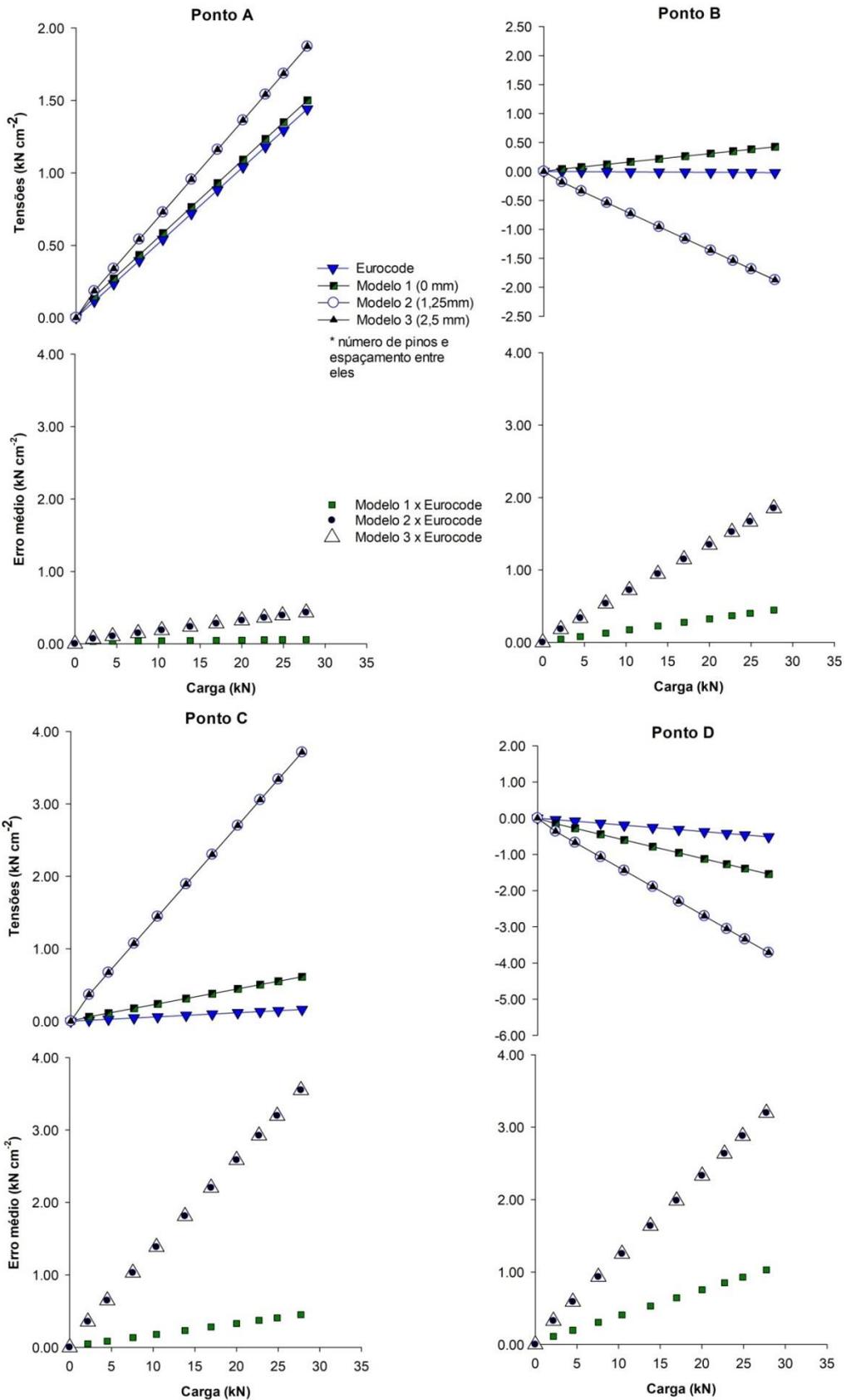


Figura 21 – Tensões aplicadas nos pontos A, B, C e D da viga 6 e comparação entre os Modelos 1, 2 e 3 com a norma específica e seus respectivos Erros Médios

Viga 6 - 14 pinos / 15 cm *

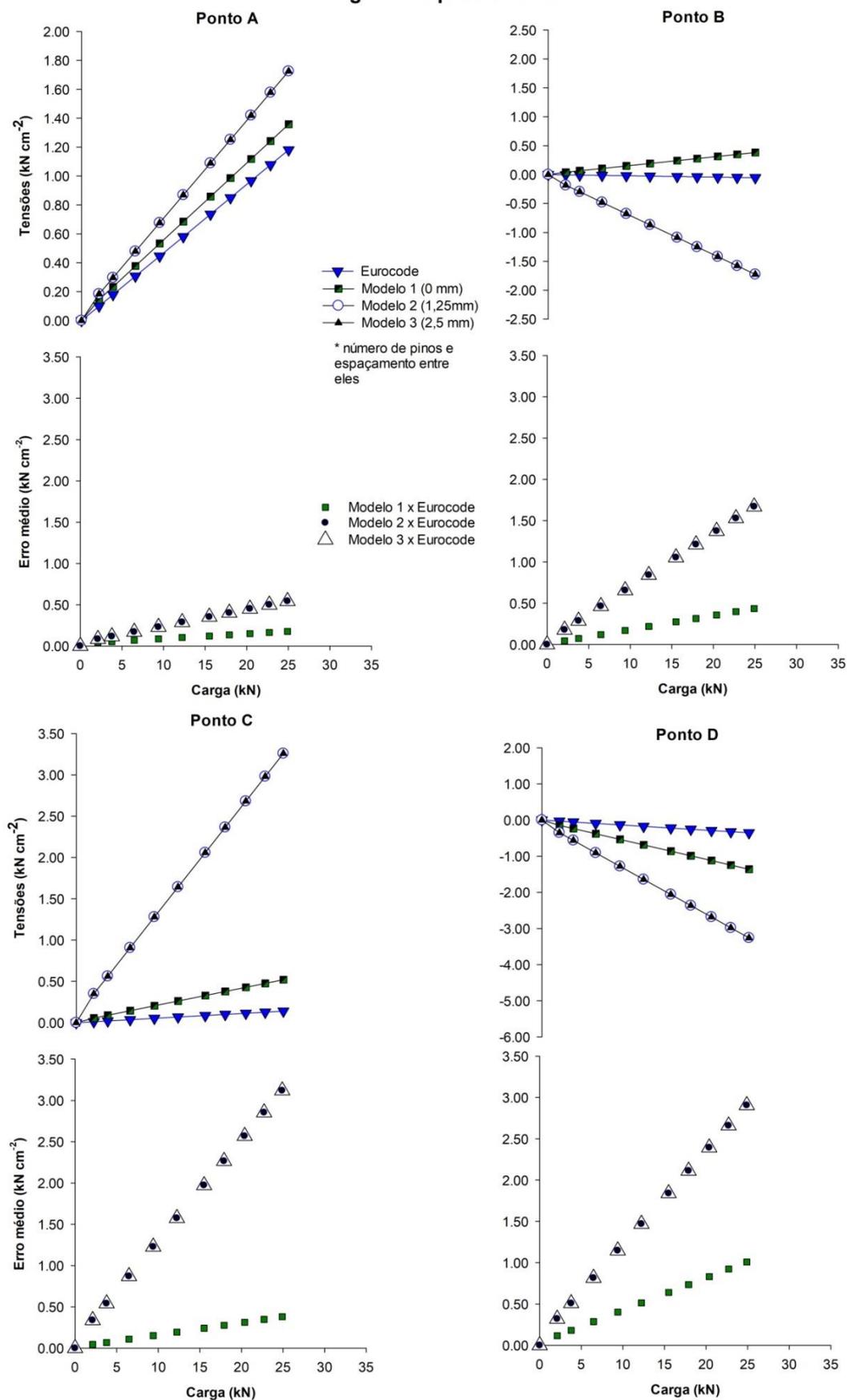


Figura 22 – Tensões aplicadas nos pontos A, B, C e D da viga 7 e comparação entre os Modelos 1, 2 e 3 com a norma específica e seus respectivos Erros Médios

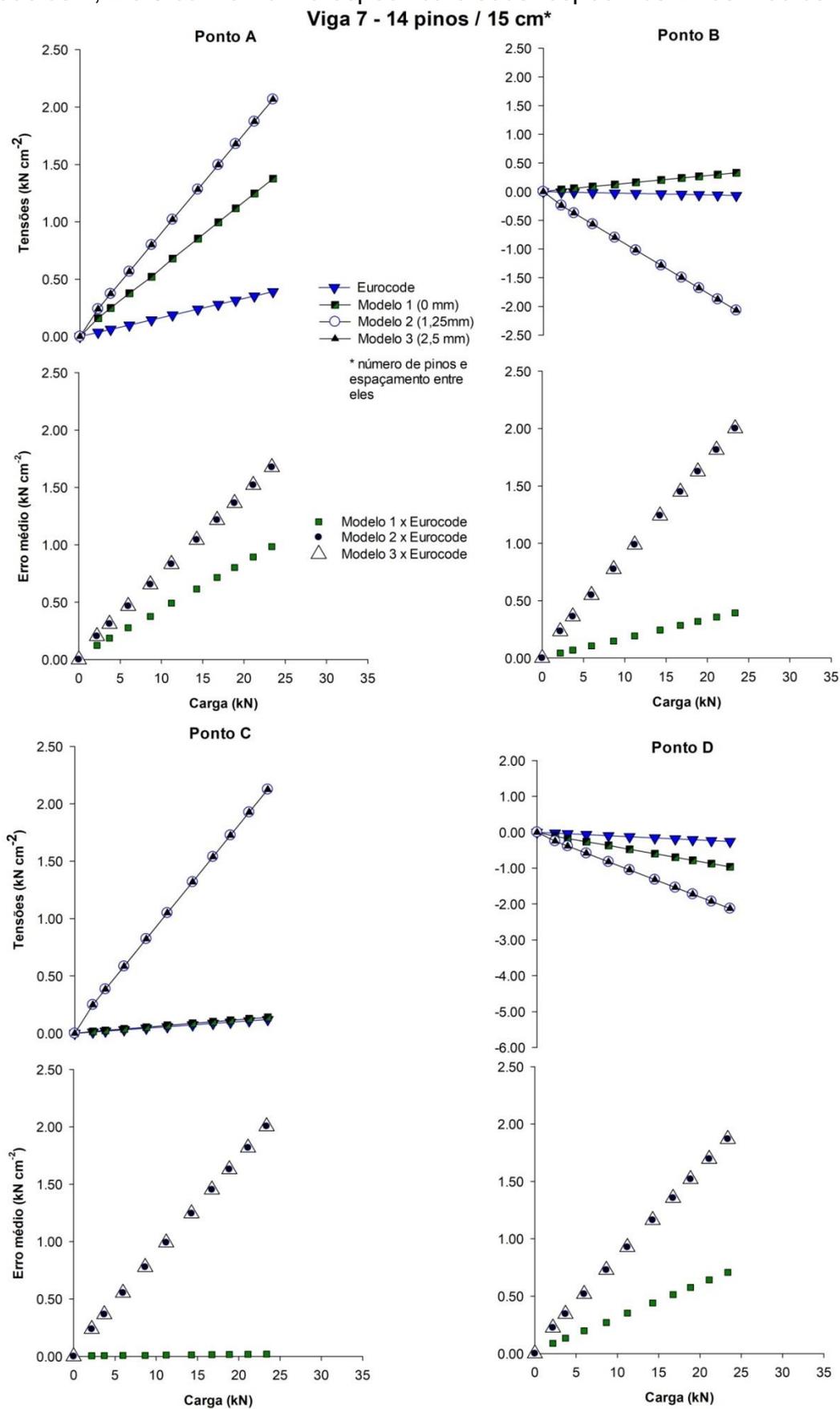
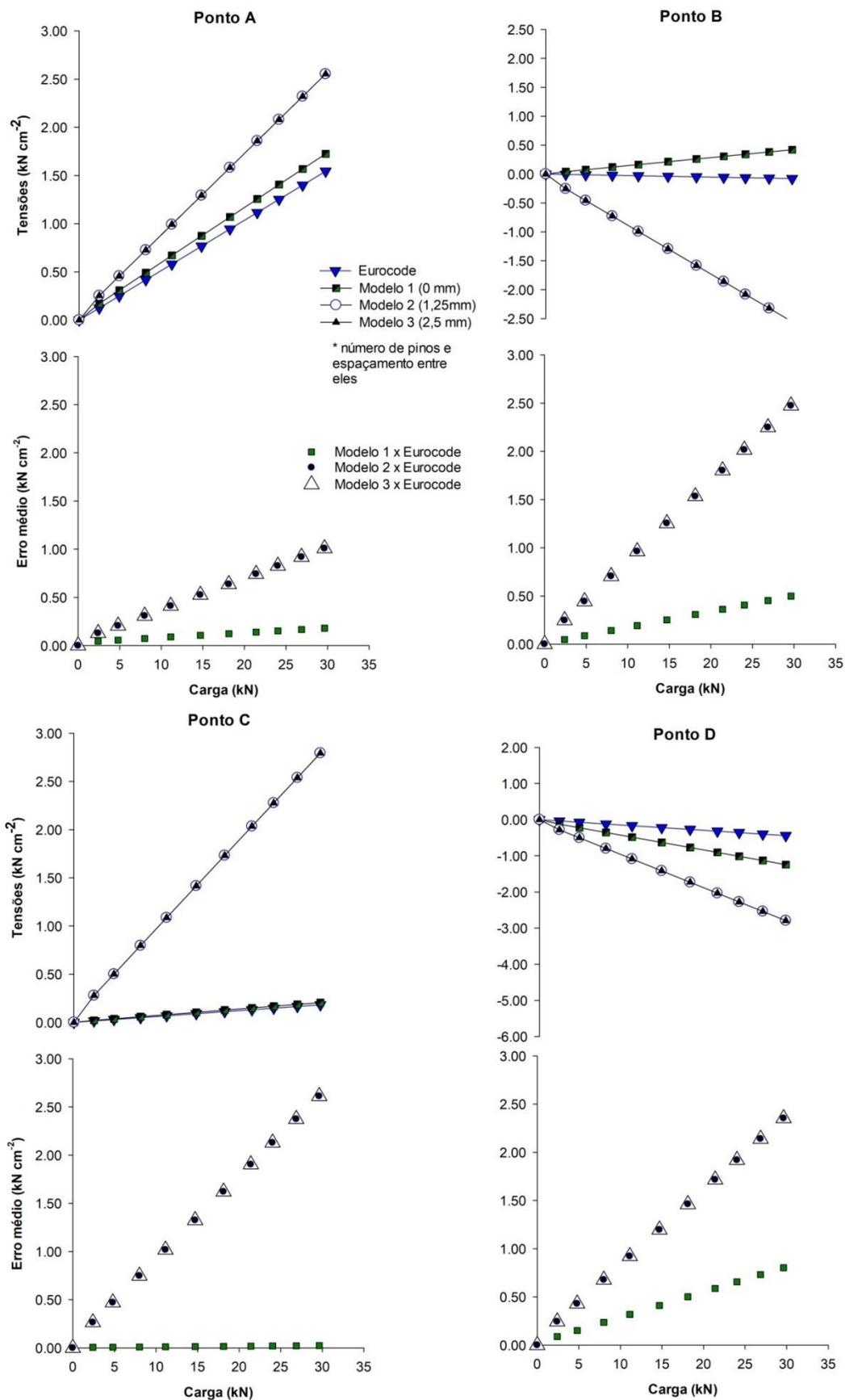


Figura 23 – Tensões aplicadas nos pontos A, B, C e D da viga 8 e comparação entre os Modelos 1, 2 e 3 com a norma específica e seus respectivos Erros Médios

Viga 8 - 20 pinos / 10 cm*



No ponto de leitura A das vigas 5 a 8, verificou-se que os valores de tensões simulados nos três modelos foram maiores do que os estimados na Eurocode 5, sendo o inverso observado nos pontos de leitura D dessas vigas. Para efeito de cálculo, que utiliza valores médios, todos os resultados obtidos são satisfatórios, pois estão dentro do coeficiente de segurança previsto no desenvolvimento dos projetos, sendo a viga 8 mais expressiva nos resultados.

Nas estruturas de madeira e concreto ocorre um equilíbrio entre a deformação lenta e as tensões últimas na zona de tração (MÄKIPURO; JUTILA, 1999), o que justifica os valores positivos e negativos encontrados nos pontos de leituras A e D, respectivamente.

Sob ponto de vista prático, Amádio et al. (2000) afirmaram que as equações aproximadas para o dimensionamento de estruturas mistas de madeira e concreto propostas pela Eurocode 5 são adequadas para os estados limite últimos, tornando-a referência em vários países.

Adicionalmente, foi verificado a influência dos conectores nas estruturas mistas de madeira e concreto, o que garantiu o melhor desempenho dos dois materiais. Branco e Cruz (2002) afirmam que a rigidez do sistema de ligação proporciona a distribuição das tensões na secção mista entre os dois materiais. Dessa forma, o próprio método de dimensionamento é condicionado pela rigidez das ligações.

Os conectores posicionados numa direção perpendicular a grã da madeira, ao serem submetidos a esforços de flexão e de corte, transmitem os esforços por meio de tensões de esmagamento localizado sobre o concreto e a madeira (BRANCO; CRUZ, 2002). Logo, as diferenças existentes entre as propriedades da madeira e do concreto afetam o comportamento global da ligação.

Contudo, a Eurocode 5 não define um método de cálculo para a capacidade de resistência das ligações mistas de madeira e concreto, citando apenas que tais ligações apresentam uma capacidade resistente 20% superior àquelas observadas em ligações entre madeiras.

Analisando essas vertentes e observando todos os gráficos gerados, verificou-se que a utilização de modelos numéricos em madeira e concreto propõe métodos simplificados e satisfatórios de análise; corroborando com os trabalhos de Molina e Calil Júnior (2009) e Molina et al. (2012).

6. CONCLUSÕES

A simulação numérica por elementos finitos possibilitou a análise do comportamento das vigas mistas de madeira e concreto, não apenas por meio da relação Força vs. Deslocamento, mas também em relação aos aspectos localizados, como as tensões nas regiões dos conectores e demais componentes do modelo.

Para efeito de cálculo, em que se utilizam valores médios, todos os resultados foram satisfatórios, pois estão dentro do coeficiente de segurança previsto nas normas.

Em análise detalhada, os melhores resultados foram observados nos Modelos 2 e 3, exceto pela viga 4, que apresentou valores de resistência inferiores aos reais, não sendo indicada para a realização de futuros ensaios ou modelagem.

Nos Modelos 2 e 3 foram verificados a influência positiva dos conectores nas estruturas mistas de madeira e concreto, o que pode ter melhorado a transferência de esforços entre os dois materiais e beneficiado seu desempenho estrutural.

7. REFERÊNCIAS

AHMADI, B. H.; SAKA, M. P. Behavior of composite timber concrete floors. **Journal of Structural Engineering**, v. 119, n. 10, p. 3111-3130, 1993.

AKGUL, T. et al. Study of Bending Strength and Numerical Modeling of Wooden and Plywood Frame Elements. **Acta Physica Polonica A**, v.127, n. 4, p. 1414-1416, 2014.

ALÉSSIO; S. C.; SABADIN, N. M.; ZANCHETT, P. S. **Processos de software**. Santa Catarina: UNIASSELVI, 2017. 235 p.

ALVA, G. M. S.; MALITE, M. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 7, n. 25, p. 51-84, 2005.

ALVIM, R. C., ALMEIDA, P. A. Estudo paramétrico da rigidez efetiva dos pisos mistos de madeira-concreto. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5, p. 15, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003.

AMADIO, C. et al. **Numerical evaluation of long-term behaviour for timber-concrete composite beams**. World Conference of Timber Engineering, session 8. Canada: Whistler Resort, 2000.

ARGYRIS, J. H.; KELSEY, S. **Energy theorems and structural analysis**. New York: Plenum Press, 1960.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (Design of concrete structures – Procedure), Rio de Janeiro, 2014.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. 1 ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. 258p.

BARALDI, L. T.; CALIL JÚNIOR, C. Método de ensaio de ligações de estruturas de madeira por chapas com dentes estampados. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, n. 18, p. 1-23, 2002.

BRANCO, J. M.; CRUZ, P. J. Lajes Mistas de Madeira-Betão. **Revista Engenharia Civil**, n. 15, p. 5-18, 2002.

BRUNNER, M. et al. Behavior of composite timber-concrete floors. **Materials and Structures**, v. 40, n. 1, p. 119-126, 2007.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.154p.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 1, n.1, p. 71-77, 1997

CALIL JÚNIOR, C. et al. **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: Suprema, 2006. 252p.

- CALIL NETO, C. et al. Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em X em corpos de prova de MLC com madeiras do tipo Eucalipto urograndis. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.
- CARMONA FILHO, A., CARMONA, T. **Fissuração nas estruturas de concreto**. ALCONPAT Internacional, 2013. (Boletim Técnico)
- CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L. C. Análise do comportamento de vigas mistas de madeira laminada colada e concreto. **Revista Engenharia Civil**, n. 18, p. 5-18, 2003.
- CASTRO, E. C. de. Procedimento para análise numérica com software ANSYS de uma viga em flexão com a forma T. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 1, p. 43-49, 2017.
- CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. **Cerâmica [online]**, v. 57, n. 341 p. 63-75, 2011.
- CECCOTTI, A. **Timber-concrete composite structures**: timber engineering – STEP1/Eurofortech lecture series. Almere: BLASS, H.J. et al., p.1-12, 1995.
- CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Determinação do módulo de elasticidade longitudinal em estruturas planas de madeira do tipo treliça. **Minerva**, v. 4, n. 2, p. 217-224, 2011.
- COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO – **EN 1995-1-1**: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, 2004.
- COUTO, J. A. S. et al. O Concreto como material de construção. **Cadernos de Graduação Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 1, n. 17, p. 49-58, 2013.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – **DIN 1052**: Structural use of timber – part 1, 2 and 3. Berlin, 1988.
- ELSHAYEB, M. et al. Utilization of Numerical Techniques to Predict the Thermal Behavior of Wood Column Subjected to Fire. **Key Engineering Materials**, v. 306-308, p. 577-582, 2006.
- FARIA, A. W.; LIMA, L. F. de. Estudo da flambagem térmica em um pilar metálico reforçado com PRFC modelado via método dos elementos finitos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.10, n. 3, p. 250-256, 2018.
- FONTE, T. F. da; CALIL JÚNIOR, C. Pontes protendidas de madeira: alternativa técnico-econômica para vias rurais. **Eng. Agríc.**, v. 27, n. 2, p. 552-559, 2007.
- FORTI, N. C. S. et al. Análise de vigas mistas de concreto e madeira pelo método dos elementos finitos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 4, p. 507-528, 2015.
- FRAGIACOMO, M.; CECCOTTI, A. Long-term behavior of timber-concrete composite beams. I: Finite Element modeling and validation. **Journal of Structural Engineering**, v. 132, n. 1, p. 1-12, 2006.
- GIRHAMMAR, U.A.; GOPU, V.K.A. Composite beam-columns with interlayer slip-exact analysis. **Journal of Structural Engineering**, v. 119, n. 4, p. 1265-1282, 1993.
- GURGEL, E. S. et al. **Conhecendo Espécie de Plantas da Amazônia**: Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl. – Goupiaceae). Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2015. (Comunicado Técnico, 262).

- HELLMEISTER, J. C. **Pontes de *Eucalyptus citriodora***.1978. Tese (livre docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1978.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, p. 9-15, 2013.
- KAVALIAUSKAS, S. et al. Evaluation of long-term behavior of composite Timber-concrete structures according to EC. **Journal of Civil Engineering and Management**,v.11, n.4, p.292-296, 2005.
- LIMA C. I. V. et al. Concreto e suas inovações. **Cadernos da graduação – Ciências exatas e tecnológicas**, v. 1, n. 1, p. 31-40, 2014.
- LOGSDON, N. B. **Contribuição ao estudo das pontes de Madeira**. São Carlos, 1982. 366 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1982.
- MÄKIPURO, R. E; JUTILA, A. **Analysing methods of a composite girder containing wood**, Helsinki University of Technology - Laboratory of bridge engineering. Nordic Timbercouncil AB, Stockholm, Sweden, 1999.
- MALITE, M. **Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios**.1990. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.
- MASCIA, N. T. et al. Study of concrete–timber composite beams using an analytical approach based on the principle of virtual work and experimental results. **Engineering Structures**, v. 46, p. 302–310, 2013.
- MASCIA, N. T. et al. Análise de vigas mistas em concreto e madeira. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 4, n. 2, p. 57-74, 2007
- MATTHIESEN, J. A. et al. Desempenho de conectores metálicos em vigas mistas de madeira e concreto no estado limite de serviço. **Minerva**, v. 7, n. 1, p. 79-89, 2010.
- MELO, C. E. L. de. Análise Estrutural com o SAP 2000. **Research Gate [online]**, 2016. 48p.
- MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Estratégia para modelagem numérica de sistemas mistos considerando diferentes modelos de ruptura para os materiais. **IGENIARE**, v. 17, n. 2, p. 256-266, 2009.
- MOLINA, J. C. et al. Análise Numérica do Comportamento de Elementos de Madeira em Situação de Incêndio. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 162-170, 2012.
- MORAIS, W. A.; BORGES, H. C. Condições técnico-econômicas para viabilizar o emprego de aços planos de elevada resistência mecânica em aplicações práticas. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, v. 6, n. 1, p. 1-6, 2009.
- MÜNCHEN, R. M. et al. Impacto nas propriedades mecânicas do concreto curado sob baixas temperaturas. **Revista Matéria**, v.24, n.2, 2019.
- NAWY, E. G.; Concrete Construction Engineering Handbook. *In*: NAWY, E. G. **Deflection of Concrete Members**, Nova Iorque: CRC Press, 2008. p. 1-22.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

- NEWMARK, N. M., SIESS, C. P., VIEST, I. M. Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction. **Proceedings of Society for Experimental Stress Analysis**, v. 9, n.1, p. 75 - 92, 1951.
- PAIVA, M. V. V. **Tabuleiro de madeira formado por duas camadas de peças ortogonais entre si e 45° com as bordas**. São Carlos, 1995. 86 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.
- PAGE, C. L., PAGE, M. M. **Durability of concrete and cement composites**. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited, 2007.
- PFEIL, W.; PFEIL M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- RICHARDSON, M., Degradation of concrete in cold weather conditions, **Research Gate** [online], 2007.
- RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. 2 ed. São Paulo: Makron Books, 1996. 408p.
- RITTER, M. A. **Timber bridges**. Madison, Forest Products Laboratory-Forest Service, 1992
- SEGUNDINHO, P. G. A. **Análise teórico-experimental de um tabuleiro misto madeira-concreto composto por vigas circulares**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2005.
- SEGUNDINHO, P. G. A.; MATTHIESEN, J. A. Análise experimental de um modelo reduzido de uma ponte mista de madeira-concreto utilizando vigas de madeira roliça. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá, MT. **Anais...** Cuiabá: UFMT, 2004.
- SEGUNDINHO, P. G. A.; MATTHIESEN, J. A. Desempenho estrutural de um protótipo de ponte de madeira-concreto. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, n. 23, ano 9, 2008.
- SEGUNDINHO, P. G. A. et al. Uso de estruturas mistas de madeira e concreto. IN: GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; ANDRADE, W. S. P. **Engenharia madeireira: pesquisa e produção**. Seropédica: UFRRJ, p. 135-150, 2018.
- SOMMERVILLE, I. **Engenharia de Software**. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 544 p.
- STEEG, H. T. et al. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. **Science**, v. 342, n. 6156, 2013.
- SORIANO, J.; MASCIA, N. T. Estruturas mistas em madeira-concreto: uma técnica racional para pontes de estradas vicinais. **Ciência Rural**, v. 39, n. 4, p.1260-1269, 2009.
- SOUTO, L. G.; BUENO, L. da S.; SILVA, P. de D. e. Técnicas construtivas utilizando madeira e sua evolução histórica. **Ignis**, v. 5, n. 2, p. 62-76, 2016.
- VLAHOVIC, M. M. et al. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3926–3934, 2011.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The finite element method**. 5. ed., v. 1. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 708p.

APÊNDICE A – Passos para a inserção dos dados e modelagem das vigas mistas de madeira e concreto no programa SAP2000

(1) Inicialmente, devem-se definir as propriedades de todos os elementos presentes na viga mista por meio dos comandos: *File > Edit > Add to Mode I from Template > New model > Select Template > Solid Models*. Neste trabalho, utilizou-se o elemento sólido (*Solid*) para a madeira e o concreto e o elemento barra (*frame*) para os pinos de ligação produzidos em aço (conectores);

(2) Ao definir o tipo de sólido, deve-se inserir as dimensões dos elementos de acordo com sua discretização. O Quadro 2 mostra a discretização realizada no elemento madeira deste trabalho;

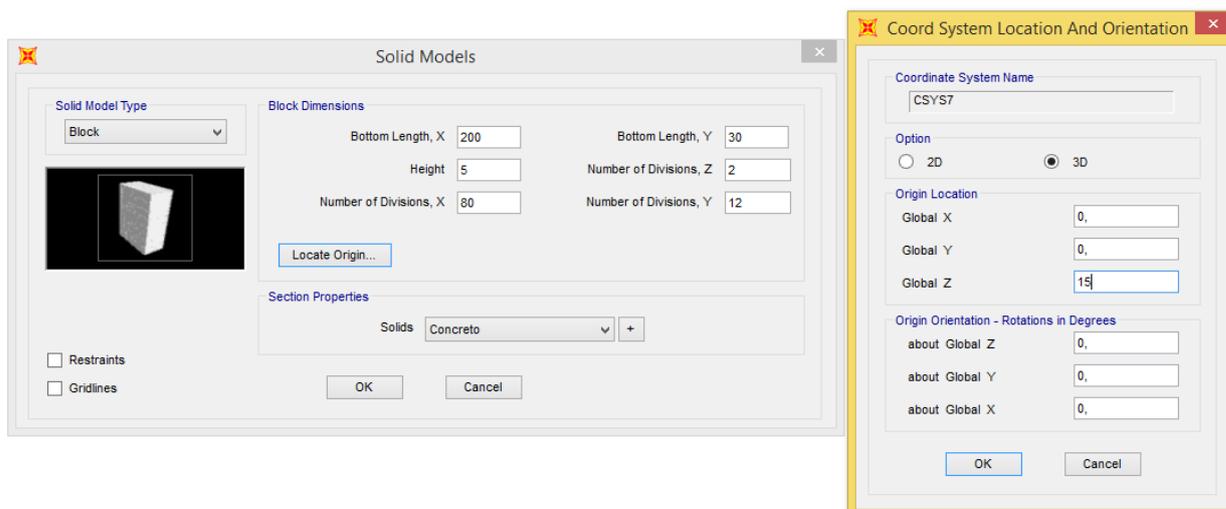
Quadro 2 – Características e dimensões da alma da viga mista conforme sua discretização

Características* da Alma da Viga mista (madeira)			
Comprimento em X	200	Comprimento em Y	5
Altura	15	Nº de divisões em Z	6
Nº de divisões em X	80	Nº de divisões em Y	2

*As características são definidas conforme as propriedades de cada material, medidas em cm.

(3) Após definir as características do elemento sólido (neste caso, a madeira), haverá a opção de locar a estrutura a partir de ponto de origem por meio do comando "*locateorigin*". Esta ferramenta serve de referência para a inserção de novos elementos sólidos na formação da estrutura final. Neste trabalho, foram definidos os pontos (X=0, Y=0, Z=0) localizados na parte central e inferior da alma da viga. A partir deste ponto, calculou-se o ponto de inserção da mesa da viga, como ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Inserção das dimensões do bloco conforme a discretização e locação dos pontos do elemento sólido

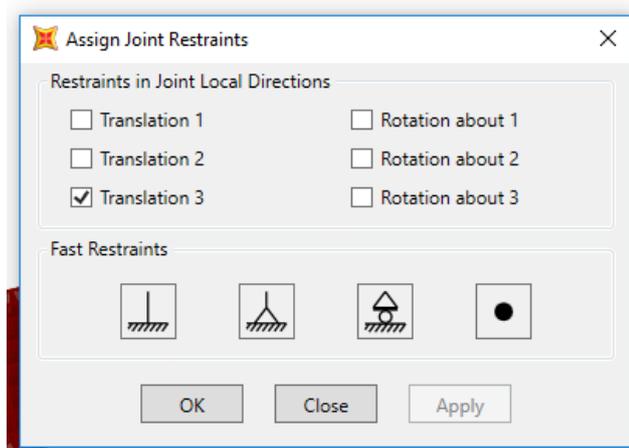


Fonte: o autor.

(4) Depois de inserir as informações da alma da viga no programa, caso não seja desejado linhas de grades na base do desenho, deve-se desmarcar as opções “*Restraints*” e “*Gridlines*”, como foi realizado neste trabalho;

(5) Após a formação da alma da viga, deve-se inserir os respectivos apoios conforme os ensaios desejados por meio dos comandos: *Assign > Joints > Restraints* (selecionar o tipo de apoio) > *Fast Restraints*. Neste trabalho, uma extremidade foi considerada fixa (opção 02) e a outra móvel (opção 03). Em seguida, deve-se marcar o ponto a ser inserido no apoio e repetir o mesmo procedimento para a inserção de outros pontos de apoio, como se observa na Figura 25.

Figura 25 – Inserção dos apoios da alma da viga mista



Fonte: o autor.

(6) Para a inserção da mesa da viga, deve-se repetir o procedimento de inserção com o comando “*um novo template*”, onde será adicionado as características e dimensões do novo elemento sólido, que no caso deste trabalho foi o concreto detalhado no Quadro 3. Deve-se, ainda, atentar para as coordenadas de inserção, mantendo fixos os eixos X e Y e alterando apenas o eixo Z, que irá definir a altura de inserção da mesa.

Quadro 3 – Características e dimensões da mesa da viga mista conforme sua discretização

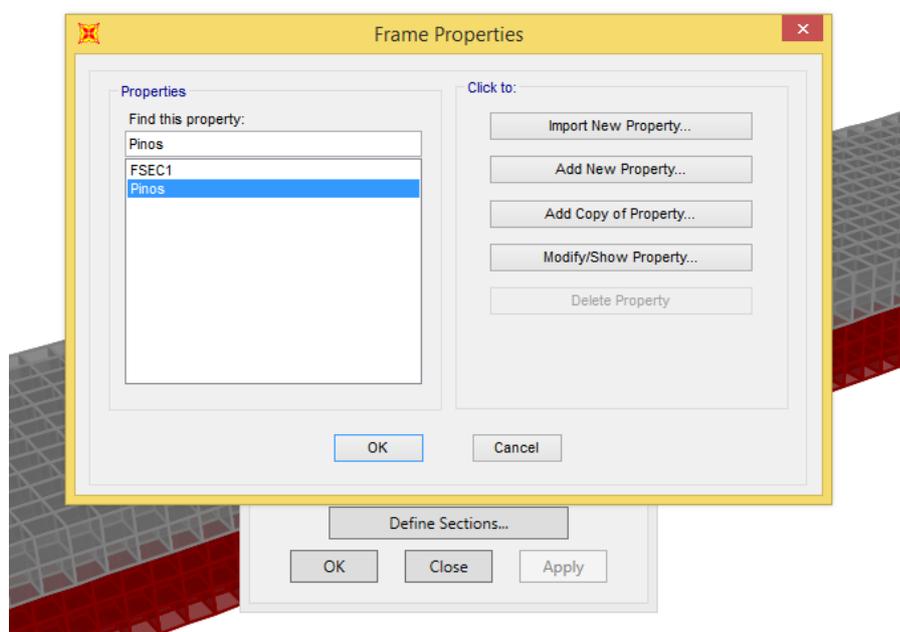
Características* da mesa da Viga mista (concreto)			
Comprimento em X	200	Comprimento em Y	30
Altura	5	Nº de divisões em Z	2
Nº de divisões em X	80	Nº de divisões em Y	12

*As características são definidas conforme as propriedades de cada material, medidas em cm

Neste trabalho, foram adotadas três alturas no eixo Y, sendo elas: 0,00mm para o Modelo 1; 1,25 mm para o Modelo 2; e 2,5mm para o Modelo 3. Essas alturas corresponderam ao afastamento existente entre a alma e a mesa das vigas, que foram conectados com pinos de ligação em aço.

(7) Para a inserção dos pinos de ligação (conectores), deve-se definir as características do material, que no caso deste trabalho foi pinos de aço, como mostra a Figura 26, e seguir os comandos: *Assign > Frame > Frame Sections*.

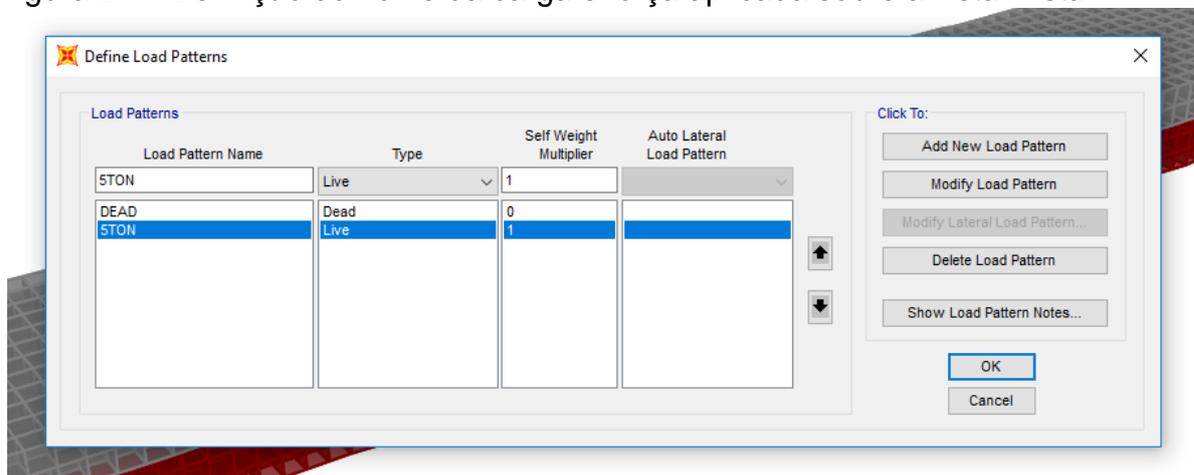
Figura 26 – Inserção dos pinos de ligação



Fonte: o autor.

- (8) Após a inserção de todos os elementos no programa, deve-se definir as cargas e forças que serão aplicadas sobre a viga por meio dos comandos: *Define > Load Patterns*, como se observa na Figura 27.

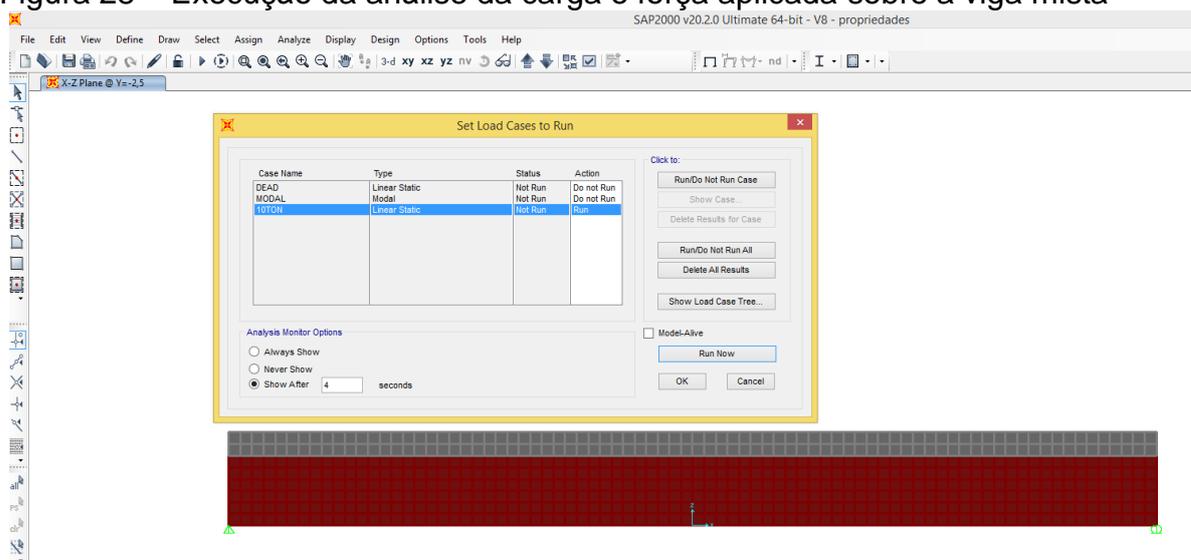
Figura 27 – Definição do nome da carga e força aplicada sobre a vista mista



Fonte: o autor.

- (9) Em seguida, deve-se definir a coordenada da força X, Y ou Z, atentando-se para o sentido negativo ou positivo da força, por meio dos comandos: *Assign > Jointsloads > forces*.
- (10) Para executar a análise da carga e força aplicada sobre a viga mista, na barra de ferramentas, localizada na parte superior da tela do SAP2000, deve-se selecionar o botão "►", abrir a janela "*definir carga para executar*" e selecionar apenas a carga aplicada no instante desejado. Com isso, posteriormente, o programa irá executar a modelagem apenas com a carga selecionada, como mostra a figura 28.

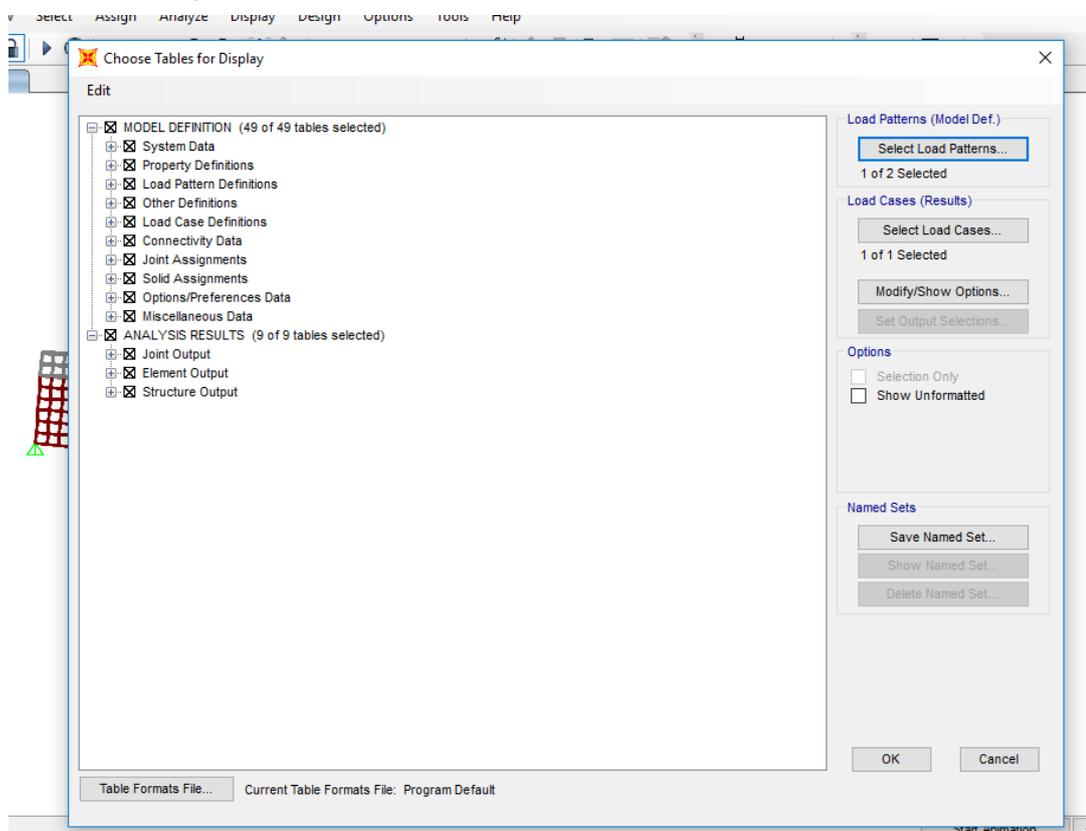
Figura 28 – Execução da análise da carga e força aplicada sobre a viga mista



Fonte: o autor.

(11) Após aplicação de todas as cargas, deve-se extrair os dados para o Excel, o que irá gerar as planilhas, por meio do comando: *Display > Show Tables*, como é observado na Figura 29.

Figura 29 – Extração dos dados para Excel

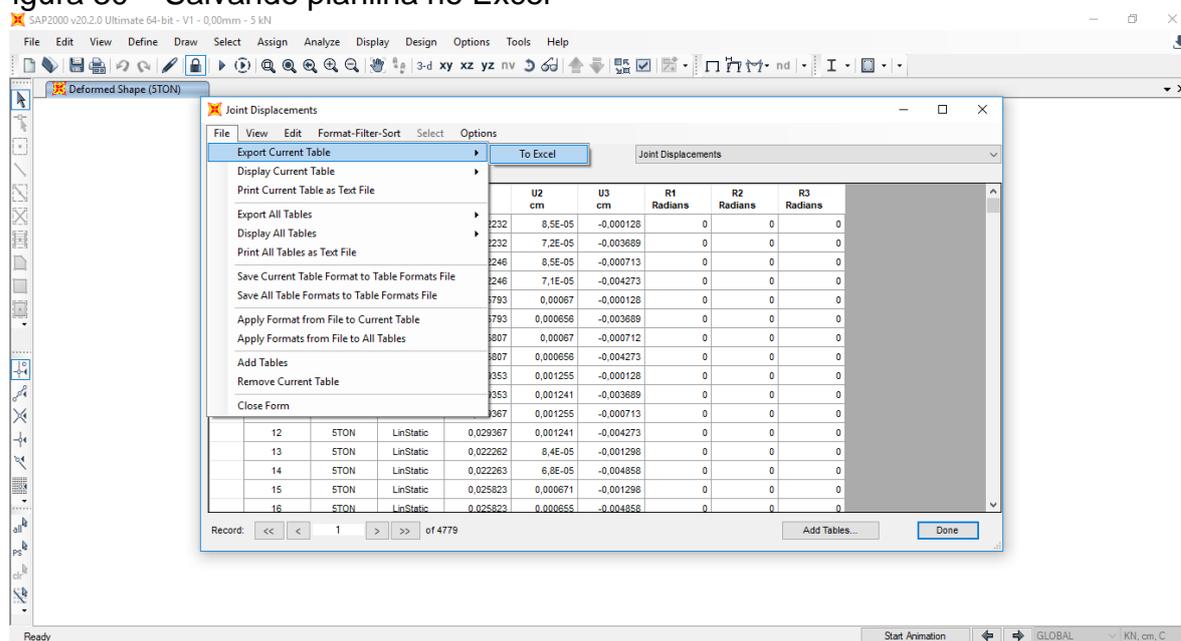


Fonte: o autor.

O programa fornece todas as informações sobre as vigas mistas, as quais podem ser extraídas em planilha do Excel. Também há a possibilidade de selecionar apenas determinados itens. Para isso, basta marcar as informações desejadas para a análise.

(12) Para salvar a planilha em Excel, deve-se seguir os comandos: *Element Stresses > Solids > Joint Displacements > Export Current Table > To Excel*, como se observa na Figura 30.

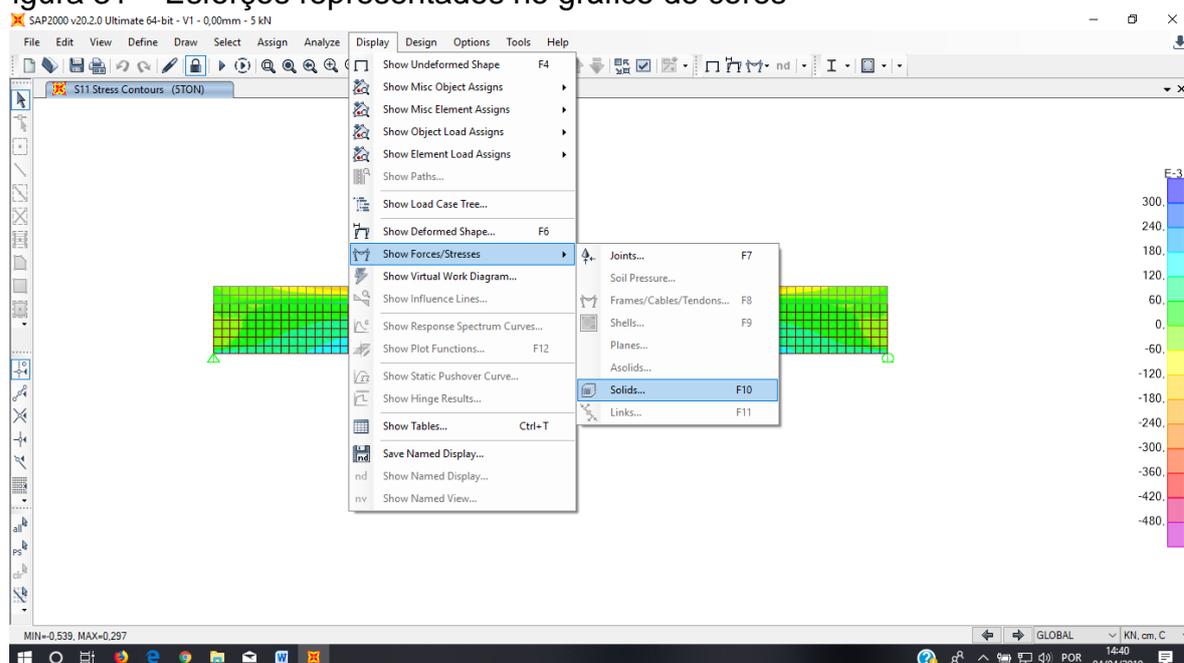
Figura 30 – Salvando planilha no Excel



Fonte: o autor.

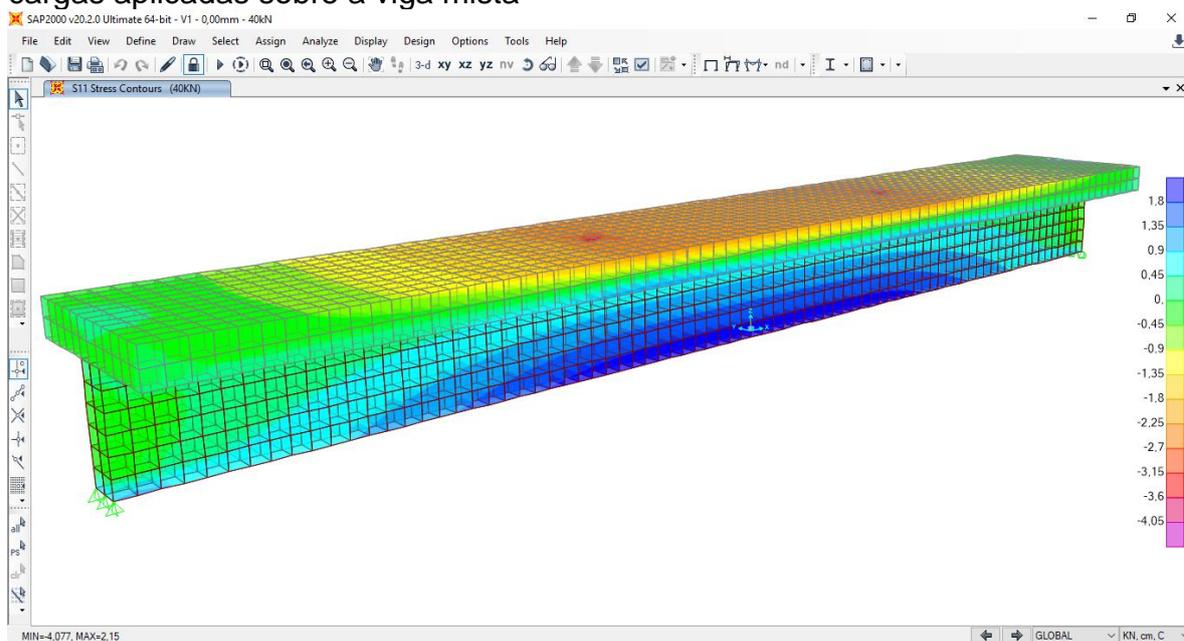
(13) Para a visualização dos esforços representados no gráfico de cores, deve-se seguir os comandos: *Display > Show Forces/ Stresses > Solids*, como mostra a Figura 31. Isso irá gerar o diagrama de tensões nas propriedades pré-definidas e melhorar a visualização das cargas aplicadas na viga mista, como se observa na Figura 32.

Figura 31 – Esforços representados no gráfico de cores



Fonte: o autor.

Figura 32 – Diagrama de tensões nas propriedades pré-definidas e distinção das cargas aplicadas sobre a viga mista



Fonte: o autor.

(14) Após extração e análise dos dados gerados em planilhas, faz-se a análise dos pontos de leitura e a seleção dos modelos que mais se assemelham com os dados experimentais, que nesta pesquisa foram obtidos por Segundinho (2005). Por fim, os modelos selecionados deverão ser validados por meio de sua comparação com dados reais publicados na literatura e normas específicas.

APÊNDICE B – Extração dos dados

Neste trabalho, os dados extraídos do programa SAP 2000 para o Excel foram o de deslocamento (*Joint displacements*) e os de tensões (*element stresses – solid*).

A Figura 12 exemplifica como foi realizada a leitura em todos os pontos das diferentes vigas, modelos e cargas analisadas neste trabalho. Por causa dessas variações, os pontos de leituras e as coordenadas foram definidos nos “nós” dos cubos que formaram cada viga, sendo localizado o mais próximo possível dos pontos de onde foram inseridos os extensômetros nos ensaios experimentais de Segundinho (2005).

Para montagem das vigas no SAP 2000, a coordenada de referência foi o ponto 0, 0, 0, X, Y e Z localizado na parte inferior e média da alma da viga, como descrito no Quadro 4.

Quadro 4 – Coordenadas de leituras dos pontos A, B e C com leitura dos dois lados da viga 1 (V1) e ponto D com ponto de leitura central na viga

Coordenadas de Leitura (V1 - 5,5 x 15 alma)						
	X	Y	Z	X	Y	Z
A	0	2,75	2,5	0	-2,75	2,5
B	0	2,75	12,5	0	-2,75	12,5
C	0	5,00	15	0	-5,00	15
D	0	0	20	-		

Fonte: o autor.

Além das variações existentes nas alturas das almas (14,50; 15,00 ou 15,50 cm), a coordenada em Z também variou de acordo com o espaçamento do modelo utilizado (0,00; 1,25 ou 2,50 mm). Já as variações no eixo Y ocorreram pela diferença da largura da alma das vigas (5,0 ou 5,5 cm).

A leitura dos pontos ocorreu após a geração de 216 modelos simulados numericamente no SAP 2000 e 448 planilhas no Excel, como exposto nas Figuras 33 e 34, onde se fez a seleção dos modelos que mais se assemelhavam com os dados experimentais obtidos por Segundinho (2005).

Figura 33 – Seleção dos modelos para a variável deslocamento (*Joint displacements*)

V1 - 1,25 deslocamento 10kN apendic

1	TABLE: Joint Displacements								
2	Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
3	Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
4	1	10KN	LinStatic	-0,060989	-0,041825	-0,022063	0	0	0
1578	1572	10KN	LinStatic	-0,039411	-0,047752	-0,57419	0	0	0
1579	1573	10KN	LinStatic	-0,039375	-0,043279	-0,571954	0	0	0
1580	1574	10KN	LinStatic	-0,039374	-0,045435	-0,572036	0	0	0
1589	1580	10KN	LinStatic	-0,039298	-0,045434	-0,568048	0	0	0
1590	1581	10KN	LinStatic	-0,039297	-0,047266	-0,567966	0	0	0
1591	1582	10KN	LinStatic	-0,039261	-0,043764	-0,566215	0	0	0
4013	7403	10KN	LinStatic	0,069146	-3,396E-10	-0,567942	0	0	0
4014	7404	10KN	LinStatic	0,069146	0,000546	-0,568713	0	0	0
4015	7405	10KN	LinStatic	0,069146	-3,397E-10	-0,568563	0	0	0
4024	7411	10KN	LinStatic	0,069149	-3,398E-10	-0,568937	0	0	0
4025	7412	10KN	LinStatic	0,06915	-0,000547	-0,568715	0	0	0
4026	7413	10KN	LinStatic	0,06915	-3,398E-10	-0,568564	0	0	0
4876	8260	10KN	LinStatic	0,047328	0,000084	-0,005793	0	0	0
4877	8261	10KN	LinStatic	0,025352	0,000028	-0,005884	0	0	0
4878	8262	10KN	LinStatic	0,003145	0,000001713	-0,005918	0	0	0

Fonte: o autor.

Figura 33 – Seleção dos modelos para a variável tensões (*element stresses – solid*)

V1 - 1,25 tensões 10kN apendice - Microsoft

1	TABLE: Element Stresses - Solids								
2	Solid	SolidElem	Joint	OutputCase	CaseType	S11	S22	DirCosMin3	
3	Text	Text	Text	Text	Text	KN/cm2	KN/cm2	Unitless	
4	1	1	1	10KN	LinStatic	0,0052	-0,0035	...	0,569148
7545	943	943	1534	10KN	LinStatic	1,4553	0,0041	...	0,999668
7546	943	943	1573	10KN	LinStatic	1,4552	0,0038	...	0,999133
7547	943	943	1532	10KN	LinStatic	0,000004699	-0,00004498	...	0,62926
7592	948	948	1542	10KN	LinStatic	-1,4545	-0,0034	...	0,000291
7593	948	948	1581	10KN	LinStatic	-1,4544	-0,0031	...	0,000158
7594	949	949	1540	10KN	LinStatic	1,4556	0,004	...	0,995216
19121	4309	4309	7383	10KN	LinStatic	0,5706	0,00001937	...	0,993374
19122	4309	4309	7404	10KN	LinStatic	0,5706	-3,721E-07	...	0,997905
19123	4309	4309	7384	10KN	LinStatic	0,5706	0,00001947	...	0,999259
19156	4313	4313	7391	10KN	LinStatic	-0,5704	0,0001018	...	0,000015
19157	4313	4313	7412	10KN	LinStatic	-0,5706	0,0000267	...	0,000224
19158	4313	4313	7392	10KN	LinStatic	-0,5712	-0,0002007	...	0,000627
23058	4800	4800	8262	10KN	LinStatic	-0,0017	-0,0005206	...	0,804062

Fonte: o autor.

APÊNDICE C – Resumo dos dados

Após a geração de 216 modelos no SAP 2000 e 432 planilhas no Excel, se fez uma pré-seleção dos dados que resultaram em 16 planilhas, onde foram gerados os gráficos para a interpretação dos resultados.

Os Quadros 5, 6 e 7 são exemplos de como foi realizado a seleção dos deslocamentos para os Modelos 1, 2 e 3 da Viga 1. O mesmo procedimento foi realizado nas demais vigas.

Quadro 5 – Deslocamentos observados nos pontos de leituras para a Viga 1 no Modelo 1

Viga 01 – Modelo 1 (0 mm)					
Carga / 2P (kN)	Pontos de Leitura				Média (cm)
	3962	3970	1573	1581	
	a (cm)	b (cm)	c (cm)	d (cm)	
5	-0,096	-0,097	-0,095	-0,097	0,10
10	-0,181	-0,183	-0,180	-0,183	0,18
15	-0,267	-0,268	-0,265	-0,269	0,27
20	-0,352	-0,354	-0,350	-0,354	0,35
25	-0,438	-0,440	-0,435	-0,440	0,44
30	-0,523	-0,526	-0,520	-0,526	0,52
35	-0,609	-0,612	-0,605	-0,612	0,61
40	-0,694	-0,698	-0,690	-0,698	0,70

Fonte: o autor.

Quadro 6 – Deslocamentos observados nos pontos de leituras para a Viga 1 no Modelo 2

Viga 01 – Modelo 2 (1,25 mm)					
Carga / 2P (kN)	Pontos de Leitura				Média (cm)
	7404	7412	1573	1581	
	a (cm)	b (cm)	c (cm)	d (cm)	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	-0,301	-0,301	-0,303	-0,300	0,30
10	-0,569	-0,569	-0,572	-0,568	0,57
15	-0,837	-0,837	-0,841	-0,835	0,84
20	-1,104	-1,104	-1,111	-1,103	1,11
25	-1,372	-1,372	-1,380	-1,370	1,37
30	-1,640	-1,640	-1,649	-1,638	1,64
35	-1,908	-1,908	-1,919	-1,905	1,91
40	-2,176	-2,176	-2,188	-2,173	2,18

Fonte: o autor.

Quadro 7 – Deslocamentos observados nos pontos de leituras para a Viga 1 no Modelo 3

Viga 01 – Modelo 3 (2,5 mm)					
Carga / 2P (kN)	Pontos de Leitura				Média (cm)
	4002	4010	1573	1581	
	a (cm)	b (cm)	c (cm)	d (cm)	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	-0,301	-0,301	-0,302	-0,301	0,30
10	-0,569	-0,569	-0,571	-0,568	0,57
15	-0,837	-0,837	-0,840	-0,835	0,84
20	-1,104	-1,104	-1,109	-1,103	1,11
25	-1,372	-1,372	-1,378	-1,370	1,37
30	-1,640	-1,640	-1,647	-1,638	1,64
35	-1,908	-1,908	-1,916	-1,905	1,91
40	-2,176	-2,176	-2,185	-2,173	2,18

Fonte: o autor.

Para os deslocamentos, avaliou-se a média obtida nos pontos de leitura A, B, C e D de cada viga para cada modelo. Já para as tensões, avaliaram-se todos os pontos de leitura isoladamente, como mostra os exemplos dos Quadros 8, 9 e 10. O mesmo procedimento foi realizado nas demais vigas.

Quadro 8 – Tensões observadas nos pontos de leituras para a Viga 1 no Modelo 1

Modelo 01 0,00 mm (cargas)	Ponto A (kN cm ⁻²)	Ponto B (kN cm ⁻²)	Ponto C (kN cm ⁻²)	Ponto D (kN cm ⁻²)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,25	0,07	0,14	-0,32
10	0,47	0,14	0,27	-0,61
15	0,70	0,20	0,40	-0,89
20	0,92	0,26	0,52	-1,17
25	1,15	0,33	0,65	-1,46
30	1,37	0,39	0,77	-1,74
35	1,59	0,45	0,90	-2,03
40	1,82	0,52	1,03	-2,31

Fonte: o autor.

Quadro 9 – Tensões observadas nos pontos de leituras para a Viga 1 no Modelo 2

Modelo 02 1,25 mm (cargas)	Ponto A (kN cm⁻²)	Ponto B (kN cm⁻²)	Ponto C (kN cm⁻²)	Ponto D (kN cm⁻²)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,30	-0,30	0,77	-0,77
10	0,57	-0,57	1,46	-1,45
15	0,84	-0,84	2,14	-2,14
20	1,11	-1,11	2,82	-2,82
25	1,38	-1,38	3,51	-3,51
30	1,65	-1,65	4,19	-4,19
35	1,91	-1,91	4,88	-4,88
40	2,18	-2,18	5,56	-5,56

Fonte: o autor.

Quadro 10 – Tensões observadas nos pontos de leituras para a Viga 1 no Modelo 3

Modelo 03 2,5 mm (cargas)	Ponto A (kN cm⁻²)	Ponto B (kN cm⁻²)	Ponto C (kN cm⁻²)	Ponto D (kN cm⁻²)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,30	-0,30	0,77	-0,77
10	0,57	-0,57	1,46	-1,45
15	0,84	-0,84	2,14	-2,14
20	1,11	-1,11	2,82	-2,82
25	1,38	-1,38	3,51	-3,51
30	1,65	-1,65	4,19	-4,19
35	1,91	-1,91	4,88	-4,88
40	2,18	-2,18	5,56	-5,56

Fonte: o autor.