

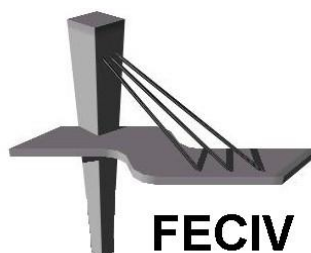


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UTILIZAÇÃO DE VIGA VAGÃO FORMADA POR
PEÇAS RETANGULARES DE MADEIRA PARA
SUSTENTAÇÃO DE FÔRMAS PARA CONCRETO**

THAÍS ALVES CUNHA



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Thaís Alves Cunha

UTILIZAÇÃO DE VIGA VAGÃO FORMADA POR PEÇAS RETANGULARES DE MADEIRA PARA SUSTENTAÇÃO DE FÔRMAS PARA CONCRETO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia das Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo

UBERLÂNDIA, MARÇO DE 2013



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 107/2013

CANDIDATA: Thaís Alves Cunha

ORIENTADOR: Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo

TÍTULO: "O sistema estrutural viga vagão formado por peças retangulares de madeira aplicado como sustentação de fôrmas para concreto"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Estruturas

DATA DA DEFESA: 21 de fevereiro de 2013

LOCAL: Sala de Projeção Prof. Celso Franco de Gouvêa

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 14:05L - 16:40L

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

(☒) APROVADA

(☐) REPROVADA

OBS: Ajustar o texto conforme as sugestões feitas pelos
membros da banca.

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: **Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia – FEC/UNICAMP**

Membro: **Prof. Dr. Jesiel Cunha – FECIV/UFU**

Uberlândia, 21 de fevereiro de 2013.

*Aos meus pais, Júnior e Fatinha,
pelo amor, vida e educação, ao
Luciano e ao Rafael, pelo
companheirismo, à tia Vilma
pelo incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que conhece todos os desejos do meu coração, filtra os meus pedidos e me dá tudo o que é necessário.

Aos meus pais que, cada um ao seu modo, me incentivam a buscar o conhecimento, a lutar na vida e não hesitam em demonstrar aos amigos o quanto se orgulham de mim.

Ao meu irmão Luciano, sempre presente.

Ao meu noivo Rafael que acredita na importância deste trabalho e abdica de horas de lazer para me ajudar direta e indiretamente na realização do mesmo.

À tia Vilma, grande incentivadora da busca pelo conhecimento.

À Christiane, sócia e amiga, pela colaboração e compreensão durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, prof. Dr. Francisco Gesualdo, pela paciência, pela compreensão das limitações de um estudante, pelas idéias, por acreditar na realização deste trabalho e, principalmente, pelo empenho no desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas James, Avelino e Veloso, trio imprescindível para realização de toda a parte experimental.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

CUNHA, Thaís Alves. *O sistema estrutural viga vagão formado por peças retangulares de madeira aplicado como fôrmas e escoramentos.* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2013. 101 p.

RESUMO

O sistema chamado de viga vagão formado por uma viga principal com seção retangular e um ou dois montantes vinculados a tirantes fixados nas extremidades da peça, passando pela parte inferior dos montantes, é uma interessante opção para uso em sustentação de fôrmas para concreto. Resulta em um sistema leve, de fácil manuseio, boa rigidez e de boa capacidade mecânica. Neste trabalho avaliou-se este sistema de forma numérica e experimental. As posições de fixações dos tirantes e montantes, bem como a relação entre vão e comprimento dos montantes foram os parâmetros considerados para entender a eficiência do sistema. A análise numérica foi feita pelo programa computacional ANSYS® que utiliza o método dos elementos finitos. Também foi feita uma comparação entre a eficiência do sistema em relação ao caso de uma viga simples formada pela peça que representa a viga principal, considerando o uso de madeiras dos gêneros Pinus e Angelim Vermelho. Conclui-se que o sistema de viga vagão produz boa eficiência, pois para vigas de Angelim Vermelho tem-se um ganho de rigidez médio de 147 % para vigas montadas com cabo de aço e 623 % para vigas com barra de aço, para as peças de tábuas de Pinus tem-se 518 % de ganho de rigidez para vigas com barra de aço.

Palavras chave: viga vagão, viga armada, madeira reforçada com aço, fôrmas e escoramentos

CUNHA, Thaís Alves. *The structural inverted truss system formed by rectangular timber used for formwork and shoring.* Msc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2013. 101 p.

ABSTRACT

The system called king or queen post truss, also inverted truss beam, formed by a main beam with rectangular cross section and one or two struts tied to rods attached to the ends of the piece through the bottom of the rods, is an interesting option for use in support of formwork for concrete. System results in a lightweight, easy handling, good stiffness and good mechanical strength. This study evaluated the system numerically and experimentally. The positions of the fixation struts and rods, as well as the relationship between span and length of the struts, were the parameters considered to understand the system's efficiency. The numerical analysis was made by the software ANSYS® using the finite element method. The efficiency of the system was evaluated by comparison between the simple beam and the inverted truss beam. The beams mounted with Angelim Vermelho have a gain in stiffness of 147 %, when wire rope is used as cable. This efficiency increases to 623 % when the cable is steel rod. Beams of Pinus had a gain of 518 % for system with steel rod.

Keywords: queen post, inverted truss, wood reinforced with wire rope, formwork and shoring

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	10
INTRODUÇÃO	10
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	10
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
CAPÍTULO 2	16
ARRANJOS ESTRUTURAIS COM MADEIRA	16
2.1 GENERALIDADES.....	16
2.2 A VIGA VAGÃO.....	19
CAPÍTULO 3	26
FÔRMAS E ESCORAMENTOS.....	26
3.1 GENERALIDADES.....	26
3.2 OS DIVERSOS SISTEMAS DE FÔRMAS E ESCORAMENTOS	28
3.3 SISTEMAS DE FÔRMAS DE MADEIRA.....	31
3.4 CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS	34
3.5 SOLICITAÇÕES NAS FÔRMAS DE MADEIRA	36
CAPÍTULO 4	41
ANÁLISES DO SISTEMA VIGA VAGÃO	41
4.1 METODOLOGIA	41
4.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA	42

4.3 MONTAGEM DO SISTEMA PARA ENSAIO	44
4.4 MONTAGEM DA VIGA VAGÃO	49
CAPÍTULO 5	54
CARACTERIZAÇÃO DO LOTE DE MADEIRA	54
5.1 GENERALIDADES SOBRE A MADEIRA	54
5.2 MADEIRAS USADAS NA EXPERIMENTAÇÃO.....	56
CAPÍTULO 6	60
ANÁLISES EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS	60
6.1 MODELOS ENSAIADOS.....	60
6.2 ENSAIOS DE VIGAS COM CABO DE AÇO	61
6.3 ENSAIOS DE VIGAS COM A BARRA CIRCULAR	73
6.4 ANÁLISE EXPERIMENTAL × ANÁLISE NUMÉRICA	84
6.5 ANÁLISE NUMÉRICA COM MODELO SIMPLIFICADO	92
CAPÍTULO 7	97
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DA PESQUISA.....	97
REFERÊNCIAS	100

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A concretagem de vigas e lajes é feita sobre fôrmas, usualmente, de madeira. Como o concreto chega à obra na forma fluida e leva algumas horas para curar e, alguns dias para adquirir a resistência de projeto, faz-se necessário o uso de escoramentos para estas fôrmas. A função do escoramento é, portanto, apoiar as fôrmas, absorvendo as solicitações da estrutura e fazendo a distribuição entre os pavimentos.

Para a execução de uma estrutura de concreto que atenda aos parâmetros de durabilidade, é fundamental um projeto de escoramento e reescoramento das lajes e vigas. Segundo Pfeil (1987), os escoramentos, por serem obras provisórias, utilizadas em período de curta duração, possuem condições de segurança diferentes das adotadas em obras de caráter permanente.

O ideal é manter o escoramento dos elementos estruturais por 28 dias ou mais para, posteriormente, iniciar a concretagem do pavimento seguinte. Isto porque aos 28 dias o concreto já atingiu a resistência suficiente para absorver o peso próprio, as ações permanentes e outras solicitações especificadas em projeto. Atualmente o sistema mais empregado consiste no uso de fôrmas com várias escoras, que dificulta o desenvolvimento de qualquer atividade sob o pavimento recém concretado, Figura 1.

Uma vez que os construtores trabalham com prazos mais curtos e visam diminuir os custos, a retirada dos escoramentos antes que o material atinja resistência adequada, é uma prática

corrente. “É preciso, então, adaptar os escoramentos e a distribuição de cargas [sic] [...]” (FARIA, 2008).



a) Escoras de madeira



b) Escoras metálicas

Figura 1 – Escoramento convencional de vigas e lajes. Fonte: Faria, 2008

Sistemas de sustentação de fôrmas com maior capacidade geram um ambiente mais limpo, com uma quantidade significativamente menor de escoras no pavimento e a possibilidade de execução de atividades simultâneas, após a concretagem. Para isto, é necessário desenvolver sistemas com rigidez e resistência apropriadas para suportar as solicitações.

Independentemente do tipo de aplicação, as estruturas precisam ter as propriedades mencionadas, sempre que possível, conseguidas por meio da forma geométrica como aliado para produzir efeitos estruturais favoráveis. Nesta categoria, podem ser citadas como exemplo as estruturas lamelares e as cúpulas geodésicas, abóbadas em que a geometria é essencial para o seu desempenho. Os sistemas estruturais são ligados às formas geométricas, principalmente ao triângulo, constituindo este trabalho fonte de estudos para a melhor elaboração dos mesmos. O modelo proposto, viga vagão, inclui-se nesta linha, onde se utiliza o fator geométrico e o posicionamento dos elementos estruturais para reduzir solicitações, promovendo ganho de eficiência com baixo consumo de material e leveza.

Pensando em aplicações para o sistema de fôrmas e escoramentos onde os componentes de sustentação são reutilizados diversas vezes e demandam grandes movimentações dentro da obra, surgiu a ideia do estudo do sistema conhecido no Brasil como viga vagão. Consiste em peças retangulares de madeira, associadas a um ou dois montantes vinculados a cabos de aço, conforme ilustra a Figura 2.



Figura 2 – Modelo do sistema viga vagão com dois montantes

Apesar de ser um sistema pouco difundido, com raras pesquisas sobre o tema, a eficiência das vigas vagão quanto ao aumento da resistência quando comparado com vigas simples pode ser comprovada. Diante da necessidade de se utilizar modelos leves, resistentes, rígidos e de fácil montagem e transporte, para escorar as fôrmas de concreto, apresenta-se neste trabalho um estudo do sistema viga vagão com maior aprofundamento, para arranjos especiais que envolvem peças metálicas (cabos) e madeira, onde são exigidos tipos especiais de fixações.

Nesse conjunto estrutural a madeira aparece como o componente predominante, pois representa a viga principal e os montantes. Foi o material escolhido pelas suas qualidades, especialmente, quanto à sua leveza, resistência e sustentabilidade. A madeira é um material natural e, portanto, renovável. Seu uso produz indicadores de melhoria no aspecto ambiental pela diminuição da erosão dos solos devido à maior cobertura vegetal, a ciclagem de nutrientes e o sequestro do CO_2 atmosférico, juntamente com a produção de O_2 . No aspecto social e econômico, representa a geração de empregos em várias etapas do processo de produção, passando pelo cultivo de mudas, manejo de floresta, corte, desdobro, transporte e comercialização. Além disto, a madeira é um material de excelentes características estruturais, pois tem uma relação peso/resistência muito baixa quando comparada aos demais materiais convencionais. Este aspecto é um dos mais importantes para utilização do material como fôrmas para concreto.

O uso da madeira é também justificado por suas características positivas relacionadas com a estética e o conforto térmico. É um material pronto, fabricado pela natureza, ao contrário dos demais materiais que exigem uma devastação ambiental significativa para a retirada da matéria-prima e um processo industrial altamente poluente (mais informações no Anexo A).

Porém, como todo material, a madeira também apresenta algumas desvantagens, são elas a biodegradação, flamabilidade, degradação por exposição à radiação solar, bem como variações dimensionais consideráveis, em função da absorção ou perda da umidade. Porém, felizmente, ela pode ser tratada. A preservação da madeira tem a função de desenvolver processos e produtos para impedir a deterioração da peça, aumentando sua durabilidade e vida útil.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é o estudo numérico e experimental do sistema viga vagão, com a finalidade de avaliar o seu desempenho estrutural, pelo aspecto de economia e eficiência. Para tanto, os objetivos específicos são:

- conhecer detalhadamente o comportamento estrutural do sistema;
- comparar o modelo numérico com o experimental;
- criar ferramentas para facilitar a análise numérica da estrutura;
- verificar os detalhes construtivos que interferem na eficiência do sistema.

O trabalho proposto se faz necessário para comprovar esta expectativa teórica e desenvolver a técnica, aprofundando em detalhes de montagem das peças, dimensões e desenvolvendo métodos simplificados para cálculo.

Os detalhes construtivos da viga vagão são de extrema importância para o funcionamento do sistema. A escolha do modelo interfere diretamente nos resultados de rigidez e resistência. Portanto, neste trabalho serão também avaliadas as ligações, emendas e seus detalhes de fixação, incluindo o posicionamento, as características elásticas e geométricas de todos os componentes do sistema.

O desenvolvimento da técnica e a difusão deste conhecimento deverão contribuir para a redução de custos e ganho de qualidade do sistema. O uso do material com base em técnicas construtivas com fundamentação teórica e experimental será capaz de gerar aumento de produtividade no canteiro de obras.

1.3 JUSTIFICATIVA

A necessidade de sistema estrutural leve, resistente e rígido para a sustentação de fôrmas para concreto induz o pensamento para o uso de arranjos estruturais tal como é a viga vagon. Ela emprega a madeira como material principal que apresenta uma relação densidade/resistência bastante favorável quando comparada com outros materiais convencionais. Peças de aço são agregadas ao sistema na forma de cabos de aço ou barras circulares solicitados exclusivamente à tração e, portanto, são bastante leves e eficientes. O agrupamento destas condições resulta em um sistema de características apropriadas para diferentes aplicações, dentre elas o uso como sustentação de fôrmas para concreto.

O uso da madeira é justificado, pois é um material renovável e uma fonte natural inesgotável. Além disto, o uso de madeira de reflorestamento pode ser entendido como uma realidade atual, para compensar a dificuldade de obtenção de madeiras provenientes de florestas naturais que estão distantes dos grandes centros consumidores, porém não por justificativas ecológicas. Minas Gerais é o estado brasileiro com a maior área plantada de *Eucalyptus* e *Pinus*, REFERÊNCIA (2012), p.68, detendo 22,6 % do total brasileiro.

Neste sentido, no Brasil, empresas como a Peugeot, Texaco, Vale e Petrobrás empreendem projetos de reflorestamento de grande escala visando uma futura obtenção de créditos de MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

A madeira proveniente de florestas naturais também é uma realidade. Muitos projetos de manejo sustentável já funcionam. Espera-se, ainda, a conscientização da sociedade para o correto entendimento sobre o significado da madeira na devastação da Amazonia. Indevidamente, creditam-se os malefícios do processo ao uso da madeira, enquanto na realidade a devastação florestal é predominantemente causada pela agricultura e pecuária.

Assim, o estudo das vigas vagão, é uma alternativa interessante, pois alia a utilização de espécies de reflorestamento, ou não, com elementos metálicos, gerando um sistema estrutural leve e eficiente. Será uma alternativa para diferentes tipos de aplicações, desde a sustentação de fôrmas para concreto, bem como, para outros fins como estruturas de coberturas e pontes.

CAPÍTULO 2

ARRANJOS ESTRUTURAIS COM MADEIRA

2.1 GENERALIDADES

A madeira é um material de construção com as excelentes possibilidades de reutilização e reciclagem. Algumas de suas características positivas são a baixa densidade, a boa resistência à tração e compressão e fácil trabalhabilidade. É reciclável, permite alta produtividade, reduz o CO₂ da atmosfera aumentando o O₂, possui boa isolamento térmica, fácil manutenção e grande durabilidade quando tem umidade controlada nas condições de serviço ou quando tratada. Se totalmente imersa em água terá durabilidade prolongada.

As madeiras incorporam um conjunto de características técnicas, econômicas e estéticas dificilmente encontradas em outros materiais. A maioria das espécies de madeira tem resistência mecânica superior à do concreto convencional, com a vantagem de ter o peso próprio reduzido. Além disto, o consumo de energia para sua produção é bastante inferior ao dos demais materiais, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre materiais e suas características

Material	Densidade (kN/m ³)	Energia p/ produção (MJ/m ³)	Resistência (MPa)
Concreto	24	1.920	20
Aço	78	234.000	250
Madeira – conífera	6	600	50
Madeira – dicotiledônea	9	630	90

Fonte: Calil Jr. E Dias (1997).

Outro fator a ser considerado, é que, em algumas situações, a opção pela madeira torna-se uma condição praticamente única. São os casos dos ambientes com grande potencial de corrosão, tais como indústrias químicas, curtumes, depósitos de fertilizantes, depósitos de sal, estruturas a beira-mar etc., onde a madeira oferece maior longevidade em comparação com as estruturas de aço e de concreto armado.

O uso da madeira no sistema de fôrmas e escoramentos é bastante significativo. Os escoramentos são divididos em dois grupos, o de peças que trabalham à compressão e as que trabalham à flexão. Na categoria de peças que trabalham à flexão, Pfeil (1987) ainda as divide em quatro outros grupos. São eles as vigas simples, vigas escoradas, vigas armadas e treliças.

O uso da madeira em conjunto com o metal, ou aço propriamente dito, é muito comum. Até mesmo nas estruturas mais simples utilizando a madeira existem ligações com parafusos metálicos, por exemplo, como exemplificado na Figura 3, retiradas em obras na cidade de Uberlândia.



a) Ligação por chapa de aço e parafusos



b) Ligação parafusada

Figura 3 – Tipos de aplicação aço e madeira

Também existem estruturas em que o aço, além da função de ligação, é aplicado como elemento estrutural, atuando juntamente com a madeira na transmissão e absorção dos esforços. Exemplos serão indicados na Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

Segundo Da Fonte e Calil Junior (2007), a estrutura básica das pontes em madeira laminada protendida consiste na junção de placas de madeira, por meio de uma barra de aço, Figura 4a. Após a montagem de todo o sistema, os cabos são protendidos (Figura 4b) e as placas de madeira tornam-se um tabuleiro único e rígido, pronto para ser apoiado na fundação ao longo das extremidades longitudinais (Figura 4c).



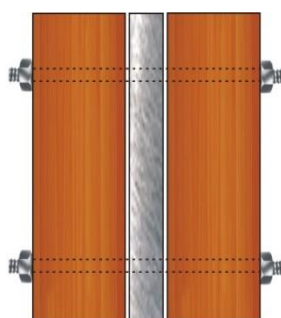
a) Pré-montagem

b) Protensão

c) Instalação

Figura 4 – Etapas de montagem de ponte de madeira protendida. Fonte: Da Fonte e Calil Junior (2007)

Outra aplicação do aço como elemento estrutural é na combinação de duas ou mais vigas de madeira que compartilham a absorção de esforços. Ritter e Faherty (1999) denominaram o sistema como viga faixa de madeira, como representado na Figura 5a. Consiste na aplicação de uma chapa de aço entre as duas ou mais vigas de madeira, e o conjunto é fixado por meio de ligações parafusadas.



a) Viga faixa (madeira e aço)



b) Viga reforçada externamente com aço

Figura 5 – Aplicações da chapa de aço na madeira

Tal sistema é empregado quando se necessita de peça com menores dimensões de altura ou quando o objetivo é reforçar membros de madeira já existentes. Também é comum encontrar o reforço da madeira por meio de chapas posicionadas na face externa inferior da mesma, conforme mostra Figura 5b.

A viga vagão, que é uma viga de madeira maciça, reforçada com cabo ou barra de aço atuando externamente à peça, é também chamada de viga armada. Porém, existe a viga armada feita de madeira laminada colada, Figura 6. Este sistema foi criado em 1998 pelos engenheiros italianos calculistas de madeira, Giovanni Cenci e Giovanni Nosedà Pedraglio, e anos depois foi patentado com o nome *LegnoArmato*[®] (EDILPORTALE, 2007).



Figura 6 – Detalhe de montagem da viga armada

Entre as lâminas de madeira que são coladas, são adicionadas as barras de aço, tanto no topo, armadura negativa, quanto próxima à base, armadura positiva, Figura 6. As barras são coladas com adesivo epóxi, nos frisos previamente criados na lâmina. Na Figura 7 nota-se uma cobertura construída utilizando a madeira laminada colada armada.



a) Montagem da estrutura



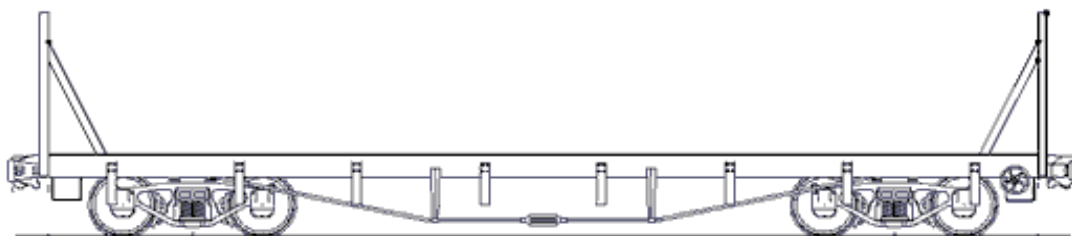
b) Estrutura de cobertura finalizada

Figura 7 – Cobertura de madeira laminada armada. Fonte: Edilportale (2007)

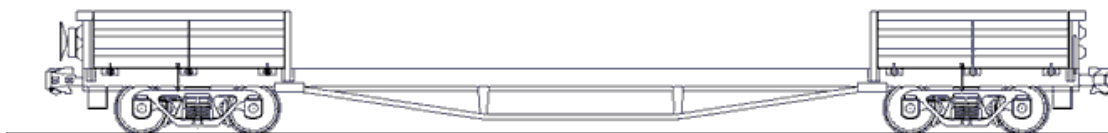
Apesar dos preconceitos existentes em relação ao uso da madeira, é notável a aplicação de alguns tipos devido ao conceito estético implantado pela sociedade. Demais características como a durabilidade e a eficiência ainda devem ser absorvidos pela maioria da população. Para isto, o uso do material deve estar seguido de aplicações tecnológicas que visam trazer melhor competitividade com relação ao aço e ao concreto.

2.2 A VIGA VAGÃO

O nome viga vagão deve-se ao fato de que esse tipo de viga é utilizada como elemento estrutural para reforço das vigas metálicas principais de vagões de trens, Figura 8.



a) Vagão tipo PBC



b) Vagão tipo PEB

Figura 8— Longarina de vagão ferroviário. Fonte: Centro Oeste (2010)

De imediato é possível notar que o sistema é leve e estável. Observa-se que não existem contenções laterais nas extremidades inferiores dos montantes. A própria viga é responsável por absorver todo o empuxo horizontal que o cabo aplica nos apoios, resultando em apenas forças verticais (REBELO e BOGÉA, 2004).

As vigas vagão representam um importante sistema estrutural capaz de promover um melhor aproveitamento do material, tendo em vista a significativa redução dos esforços e deslocamentos neste arranjo estrutural. É um sistema misto formado por madeira e aço. Na literatura internacional este tipo de viga é também chamado de *treliça invertida*.

Na peça principal de madeira, fixam-se os montantes de madeira e posteriormente, faz-se a ligação de uma extremidade da viga com a outra, por meio de tirantes de aço que passam pelos montantes, formando a configuração exibida na Figura 9. O aço é empregado como um reforço à tração para o sistema.

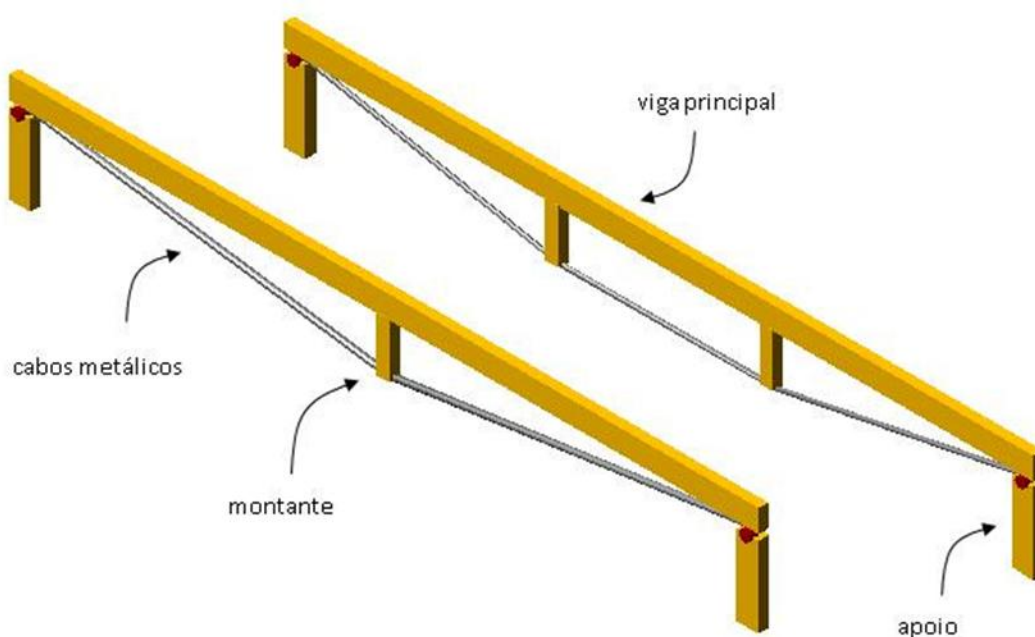
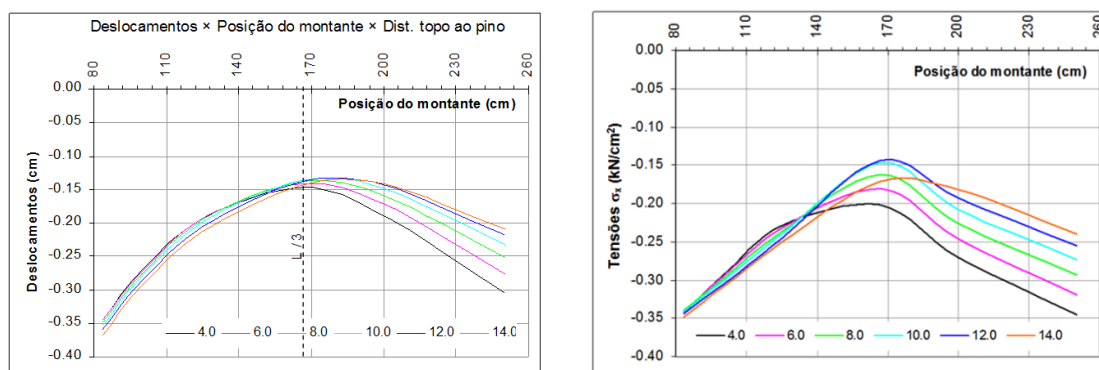


Figura 9 – Tipos básicos de viga vagão: com um e dois montantes. Fonte: Gesualdo e Lima (2004)

Para a viga vagão com um único montante, sua configuração assemelha-se à de uma treliça, sendo o cabo a barra tracionada. A partir de dois montantes, a treliça distingue-se da viga vagão por necessitar de diagonais, para formar os tramos triangulares. O sistema de treliça pode ser mais rígido que o viga vagão. Em contrapartida, é menos econômico, uma vez que necessita de mais barras e mais ligações.

Além da quantidade de montantes, o posicionamento dos mesmos é relevante no funcionamento do sistema. A Figura 10 ilustra a tensão normal e o deslocamento do sistema em função do posicionamento dos montantes, em uma viga de 500 cm de vão livre. Por isto, pode-se concluir que a condição ideal para posicionamento do montante é algo em torno de um terço do vão, uma vez que, pela Figura 10, observa-se que a curva com menor deslocamento vertical e tensão está próxima a 170 cm.



a) Influência no deslocamento do sistema

b) Influência na tensão gerada na viga

Figura 10 – Influência do posicionamento dos montantes no desempenho da viga vagão.

Fonte: Gesualdo e Cunha (2011)

Herzog et al. (2008) apresenta alguns exemplos de aplicação de vigas do tipo vagão com diferentes formas de posicionamento dos montantes. Isto garante à estrutura um comportamento tridimensional, conforme ilustrado na Figura 11.

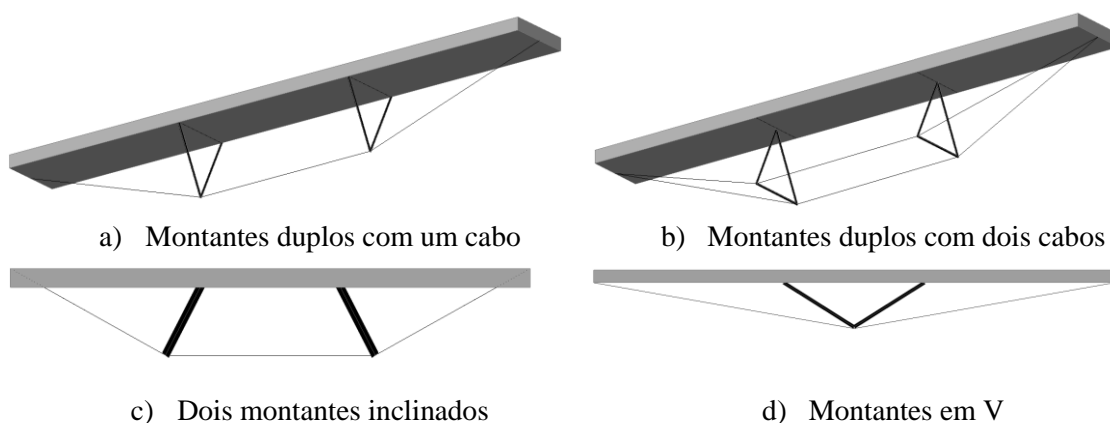


Figura 11 – Tipos de vigas vagão

A função exercida pelo cabo de aço é reforçar a viga, diminuindo-lhe o vão. Assim, vigas de menor dimensão podem vencer maiores vãos. O sistema resultante da associação de vigas com montantes e tirantes resulta no comportamento de uma viga contínua.

Os sistemas viga vagão analisados são eficientes quanto à rigidez e à resistência e, portanto, são adequados para usos em diferentes formas de estruturas constituídas por aço e madeira.

Embora não existam muitas as publicações dedicadas ao estudo acerca do tema e não seja um sistema construtivo corriqueiro na construção civil, é possível encontrar algumas construções

utilizando a viga vagão, para cobertura, em pontes e passarelas. A Figura 12 ilustra exemplos de emprego das vigas vagão no Brasil.



a) Estrutura de telhado em Uberlândia



b) Viga de aço em piso. Fonte: Vitruvius (2011)



c) Madeira e aço em cobertura. Fonte: Carpinteria (2007)



d) Madeira e aço em cobertura. Fonte: CasaPro (2009)

Figura 12 – Viga vagão no Brasil

Porém, esta ausência de conhecimentos difundidos sobre o sistema, aliado aos vícios de montagens das estruturas de madeira convencionais, às vezes, acarretam em aplicações inadequadas da viga vagão. Isto representa aumento de custos e perda de qualidade do sistema produzido.

Por se tratar de um sistema misto, sua eficiência está diretamente relacionada com a interligação de um elemento ao outro, para que trabalhem perfeitamente em conjunto. As informações divulgadas no meio científico são bastante genéricas como as apresentadas em Ritter e Faherty (1999). São informações de cálculo em sistemas reticulados onde os pontos e as formas de fixações dos tirantes não são considerados.

Quando é utilizado o cabo de aço, em viga de madeira com seção simples, existem diversas formas de fixá-lo na madeira. Gesualdo e Lima (2007) apresentam o sistema chamado de cabo enlaçado superiormente, para vigas com seção circular, no qual a ligação se dá com o auxílio de pinos transversais. De maneira semelhante existe o cabo enlaçado inferiormente. Para peças com seção retangular, as configurações do sistema estão representadas na Figura 13.

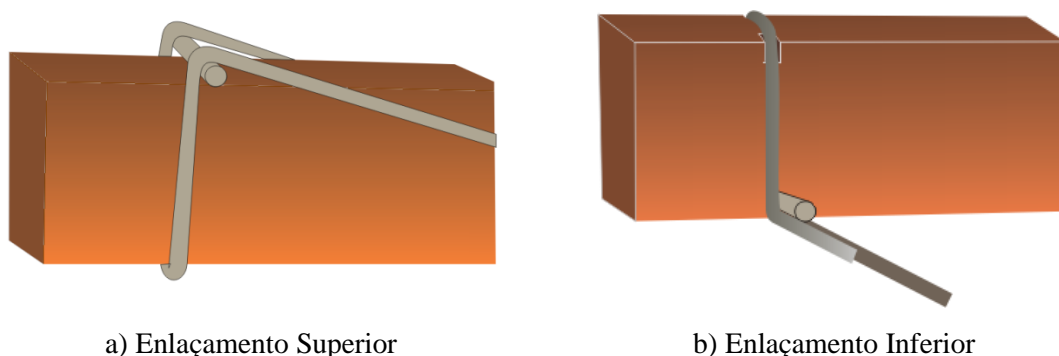


Figura 13 – Formas de fixação do cabo de aço na viga de madeira com seção transversal retangular

Gesualdo e Lima (2004) constataram que o melhor posicionamento do cabo é quando o pino está abaixo da linha neutra da viga, pois é gerado um efeito favorável em relação ao momento aplicado nas extremidades da viga. Quando posicionado acima da linha neutra, o efeito é desfavorável.

Quanto ao cabo de aço e ao pino utilizado na interface entre cabo e viga, Moraes e Gesualdo (2008) notaram que o diâmetro do pino interfere diretamente em alguns esforços, como na força de tração no cabo de aço. À medida que o diâmetro dos pinos é aumentado, a força no cabo de aço aumenta consideravelmente. Porém, quanto à tensão na viga e ao deslocamento do sistema, o aumento do diâmetro dos pinos tem efeito favorável.

Apesar de ser um sistema pouco difundido até os dias atuais, Gesualdo e Cunha (2009) comprovaram numericamente a eficiência da viga vagão quanto ao aumento da resistência quando comparada com vigas simples. A Figura 14 corresponde a análise numérica de uma viga simples bi-apoiada de seção transversal 4 cm \times 13 cm e uma viga vagão com mesmas dimensões. O referencial teórico é a fórmula do comprimento (L) sobre 200, representado no gráfico pela curva verde.

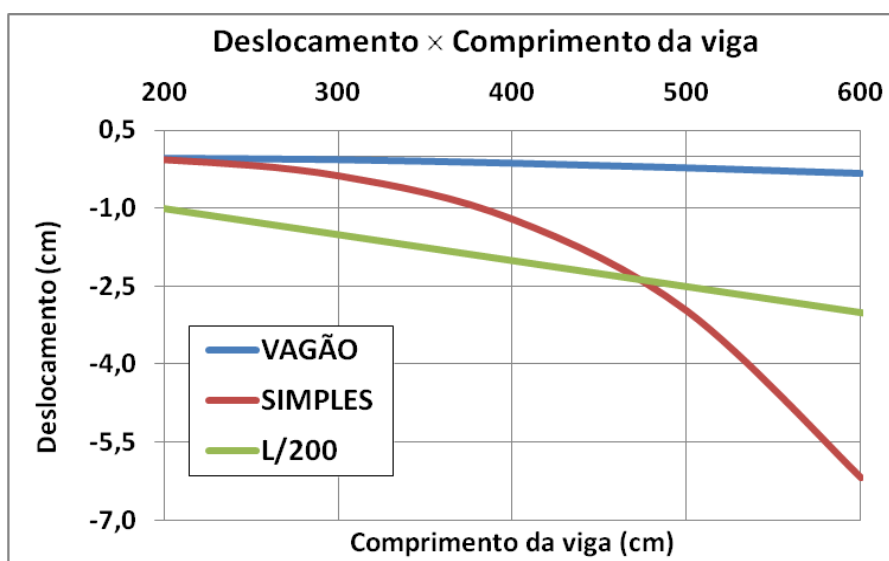


Figura 14 – Deslocamento de viga simples e viga vagão em função do comprimento.

É notório que o emprego da viga vagão, quando se trata de vencer maiores vãos, suportar maiores carregamentos, é vantajoso. Pelo gráfico exposto na Figura 14 observa-se que o aumento gradativo do comprimento da viga gera um aumento significativo na relação de eficiência entre viga simples e viga vagão. Para um sistema com 3 m de comprimento a razão viga vagão sobre viga simples é de 0,85, para o sistema com comprimento de 4 m, a razão é 0,34 e para o comprimento de 5 m, tem-se uma razão de 0,17.

Na seção seguinte serão abordadas características gerais sobre o sistema de fôrmas e escoramentos e será sugerida uma forma de aplicação da viga vagão em substituição de grande parte do escoramento necessário ao sistema convencional.

CAPÍTULO 3

FÔRMAS E ESCORAMENTOS

3.1 GENERALIDADES

Devido à abundância da madeira, décadas atrás, e aos baixos custos tanto do insumo quanto da mão de obra, criou-se na construção civil o hábito de não se preocupar com desperdícios e falta de técnica construtiva. Sempre foi dada pouca importância ao sistema de fôrma e escoramento, talvez pela sua característica de estrutura não permanente. Apesar da sua curta existência ela é essencial para a construção de peças de concreto, que dependem integralmente da sua qualidade. Qualquer falha traz prejuízos inestimáveis, às vezes, irreparáveis para a obra. Causa prejuízos econômicos significativos, atraso de cronograma e outras consequências indesejáveis.

Com o passar do tempo, sabendo da importância do sistema de fôrma, os profissionais da área foram conscientizados da necessidade de regularizar procedimentos por meio de norma técnica para a construção de fôrmas e escoramentos. Somente em 2009 surgiu a primeira norma brasileira sobre o tema por meio da ABNT NBR 15696:2009 (Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos), que fornece recomendações técnicas para o dimensionamento e aplicações de fôrmas e escoramentos.

Segundo a ABNT NBR 15696:2009, entende-se que fôrmas são estruturas provisórias que servem para moldar concreto fresco, resistindo a todas as ações provenientes das ações variáveis resultantes das pressões do lançamento do concreto fresco, até que este se torne autoportante.

Toda estrutura de concreto armado necessita da construção de fôrmas com dimensões internas exatamente iguais às dimensões da estrutura e em perfeitas condições para que o objeto moldado fique com um bom acabamento. As fôrmas, para evitar desperdícios, devem estar apuradas para não ser necessário corrigir as peças moldadas com reboco. Devem ser estanques, a fim de evitar vazamentos da nata de concreto.

O termo escoramento tem sido confundido com cimbramentos. Muitos títulos de livros e textos técnicos apresentam esta terminologia. No entanto, a forma correta é empregar a palavra escoramento, pois cimbramento está associado somente às formas curvas. Cimbre significa armação de madeira que serve de molde e suporte a arcos e abóbadas. Daí a palavra cimbramento, erroneamente empregada. A primeira edição da norma brasileira ABNT NBR 15696:2009, apropriadamente emprega o termo escoramento.

Os critérios propostos para dividir os sistemas de fôrmas baseiam-se, primeiramente, no grupo de elementos estruturais a serem moldados e, em seguida, na modulação dos painéis.

Segundo Fajerztajn (1986), o sistema de fôrmas é constituído pelos seguintes elementos: molde, estrutura do molde, escoramento e peças acessórias, o autor ainda as define como segue abaixo:

- Molde é o que caracteriza a forma da peça, definindo o formato e a textura concebidos para a peça durante o projeto. É constituído genericamente por painéis de laje, fundos e faces de vigas e faces de pilares;
- Estrutura do molde é o que dá sustentação e travamento ao molde, destinada a enrijecer o molde, garantindo que ele não se deforme quando submetido aos esforços originados pelas atividades de armação e concretagem, podendo ter diferentes configurações em função do sistema de fôrmas e da peça considerada. É constituído comumente por gravatas, sarrafos acoplados aos painéis e travessões;
- Escoramento é o que dá apoio à estrutura da fôrma. É o elemento destinado a transmitir os esforços da estrutura do molde para algum ponto de suporte no solo ou na própria estrutura de concreto constituído genericamente por guias, pontaletes e pés-direitos;

- Acessórios são os componentes utilizados para nivelamento, prumo e locação das peças, sendo constituídos comumente por aprumadores, sarrafos de pé-de-pilar e cunhas.

As opções para fôrmas e escoramentos são várias e para solidarizar a escolha, prevalece a relação custo e benefício. A determinação de qual o sistema mais econômico envolve diversos fatores como o custo direto dos materiais, custo da mão de obra na fabricação, montagem e desmontagem das fôrmas, o número de reutilizações das peças e outros aspectos. Além disso, deve ser considerado o produto final gerado, que é o tipo de acabamento superficial do concreto após serem removidas as fôrmas, ou seja, a necessidade ou não de chapisco, reboco e emboço.

Contudo, até mesmo o sistema considerado mais econômico pelos fatores acima pode tornar-se inviável pela ausência de projeto de fôrmas. O objetivo maior de se planejar e calcular as fôrmas de cada elemento é aproveitar a capacidade resistente máxima dos componentes. Assim, também se aumenta a segurança das operações de utilização, não se corre o risco de ruptura da fôrma, o que gera desperdício de concreto e se exige tempo adicional para execução dos reparos, tampouco ficam estruturas superdimensionadas com gasto desnecessário de material.

3.2 OS DIVERSOS SISTEMAS DE FÔRMAS E ESCORAMENTOS

Além da madeira, que ainda é o material mais utilizado, tem sido difundido, o uso de fôrmas metálicas, plásticas, de papelão e mistas, combinando elementos de madeira com peças metálicas, papelão, plásticos, pré-moldados e outros.

As fôrmas metálicas são constituídas por chapas de diversas espessuras dependendo das dimensões dos elementos a concretar e dos esforços que deverão resistir. O uso das fôrmas metálicas em obras ainda não é tão difundido quanto o uso de escoramentos e travamentos de madeira, pois exigem maior investimento. Além disto, o seu peso representa mais um entrave para a sua utilização. São recomendadas para situações de grande reutilização e pequena movimentação. Outra desvantagem do sistema é a pouca flexibilidade, a paginação dos elementos estruturais deve ser prevista no projeto executivo para que não sejam necessários ajustes na obra, o que pode comprometer a eficiência do conjunto de fôrmas metálicas.

Uma boa aplicação do sistema é em painéis metálicos, empregados em fábricas de elementos de concreto pré-moldados. Nas fábricas, as fôrmas de vigas, lajes, treliças e demais elementos, permanecem fixas durante as fases de armação, lançamento, adensamento e cura do concreto. Em geral possuem vibradores acoplados nas próprias fôrmas, também chamadas de mesas. Neste caso, o número de reaproveitamento da fôrma é bastante significativo.

As fôrmas plásticas são mais utilizadas na produção de lajes nervuradas, dispondo desde vãos modestos até os de grande envergadura. É um sistema que dispensa enchimento para lajes, como lajota (bloco cerâmico) e EPS, conforme mostra a Figura 15a. Além disto, são empregadas para moldarem elementos protendidos de lajes ou vigas.

Estas fôrmas também podem ser utilizadas para moldarem pilares e vigas armadas, porém devem-se projetar estruturas com dimensões modulares, uma vez que o sistema não apresenta a mesma facilidade de adaptação na obra que os sistemas de madeira.

Caracterizadas por possuírem peso específico baixo e pela simplicidade de montar e desenformar, são fôrmas de alta durabilidade, podendo ter elevado índice de reutilização. Nos casos das lajes, as fôrmas são apoiadas diretamente sobre o escoramento, conforme ilustrado na Figura 15b.



a) Fôrma plástica para lajes e vigas



b) Escoramento para fôrma plástica de laje

Figura 15 – Aplicações de fôrmas plásticas

Já as fôrmas de papelão consistem em peças de papelão com revestimento externo impermeabilizado e interno com papelão especial não aderente ao concreto. São fôrmas

autoportantes, se mantêm alinhadas e firmes, pois tem estrutura para suportar a pressão do concreto em seu interior. Portanto, não precisam de travessas, calços, escoras ou pontaletes para impedir a dilatação.

Com este tipo de fôrma é possível moldar peças com qualquer seção transversal, seja ela quadrada, retangular, hexagonal etc. Porém, é comumente utilizada para pilares ou elementos de seção circular, como ilustrado na Figura 16. Deixam o elemento moldado liso, polido, sem saliências, sulcos ou qualquer outro tipo de imperfeição, pois não possuem emendas e tem seu interior totalmente uniforme, o que também não permite o vazamento pelas laterais ou bordas.

O custo para aquisição deste sistema de fôrmas é menor que para os demais, porém não são reutilizáveis. A remoção das fôrmas dos elementos se dá facilmente, cortando uma das faces da fôrma, podendo utilizar até mesmo uma serra manual.



a) Fôrma de pilar circular



b) Elemento concretado sem acabamento

Figura 16 – Aplicação de fôrma de papelão. Fonte: Manual DIMIBU (2012)

A opção por uma ou outra solução está vinculada principalmente ao custo, aos prazos de execução das obras, ao número de utilizações ou aos três fatores simultaneamente. Pode-se

considerar, ainda, a disponibilidade de mão de obra local para execução. Além da importância econômica que as fôrmas representam (NAZAR, 2006), elas são fundamentais para garantir a vida útil para a qual a estrutura foi projetada. Apenas estes dois fatores já seriam suficientes para justificar um estudo aprofundado sobre o assunto e propor novas soluções.

3.3 SISTEMAS DE FÔRMAS DE MADEIRA

Existe uma série de explicações para o fato da madeira ser um material muito utilizado na execução de fôrmas para estruturas de concreto. Além de apresentar características físicoquímicas apropriadas para tal aplicação, como resistência, estabilidade e não toxidade, trata-se de um material de fácil trabalhabilidade, não sendo difícil encontrar mão de obra para montagem.

Segundo Nazar (2007), as fôrmas de madeira são as mais utilizadas em edifícios no país e, em sua maioria, são constituídas de painéis de madeira compensada, tábuas e pontaletes de madeira serrada, ou unicamente com tábuas e pontaletes, em obras menores e com baixo rigor de qualidade de execução.

Os painéis utilizados são constituídos por lâminas de madeiras selecionadas, sobrepostas em sentido alternado, coladas entre si com resina, uma a uma, em número ímpar, com as lâminas externas no mesmo sentido. Devido à direção alternada das fibras nas camadas de folha, esta é chamada de compensado, embora o painel não apresente a mesma rigidez nas duas direções.

O painel de madeira compensada pode se apresentar com diferentes características, dadas em função da sua espessura e do material de proteção aplicado à sua superfície. Para os sistemas de fôrmas de madeira, são utilizadas principalmente chapas de madeira compensada com acabamento resinado ou plastificado. O acabamento é o fator determinante para o número de reutilizações da fôrma.

O compensado com acabamento resinado possui a aplicação de uma resina fenólica nas lâminas externas e permite no máximo seis reutilizações, se aplicado de maneira correta. Já o compensado de acabamento plastificado é revestido com filme fenólico, é um produto cuja durabilidade gira em torno de 20, ou mais, reaproveitamentos. O painel com acabamento

plastificado é oferecido no mercado com as bordas seladas ou não, o que também interfere no número de reutilizações.

Nos travamentos de vigas e pilares, a madeira é utilizada em diversas dimensões, compondo gravatas, vigas de travamento, sarrafos de pressão etc. Pode também ser associada a outros materiais, como aço e alumínio.

A Figura 17 exibe imagens de alguns componentes do sistema de fôrmas de laje, pilar e viga.

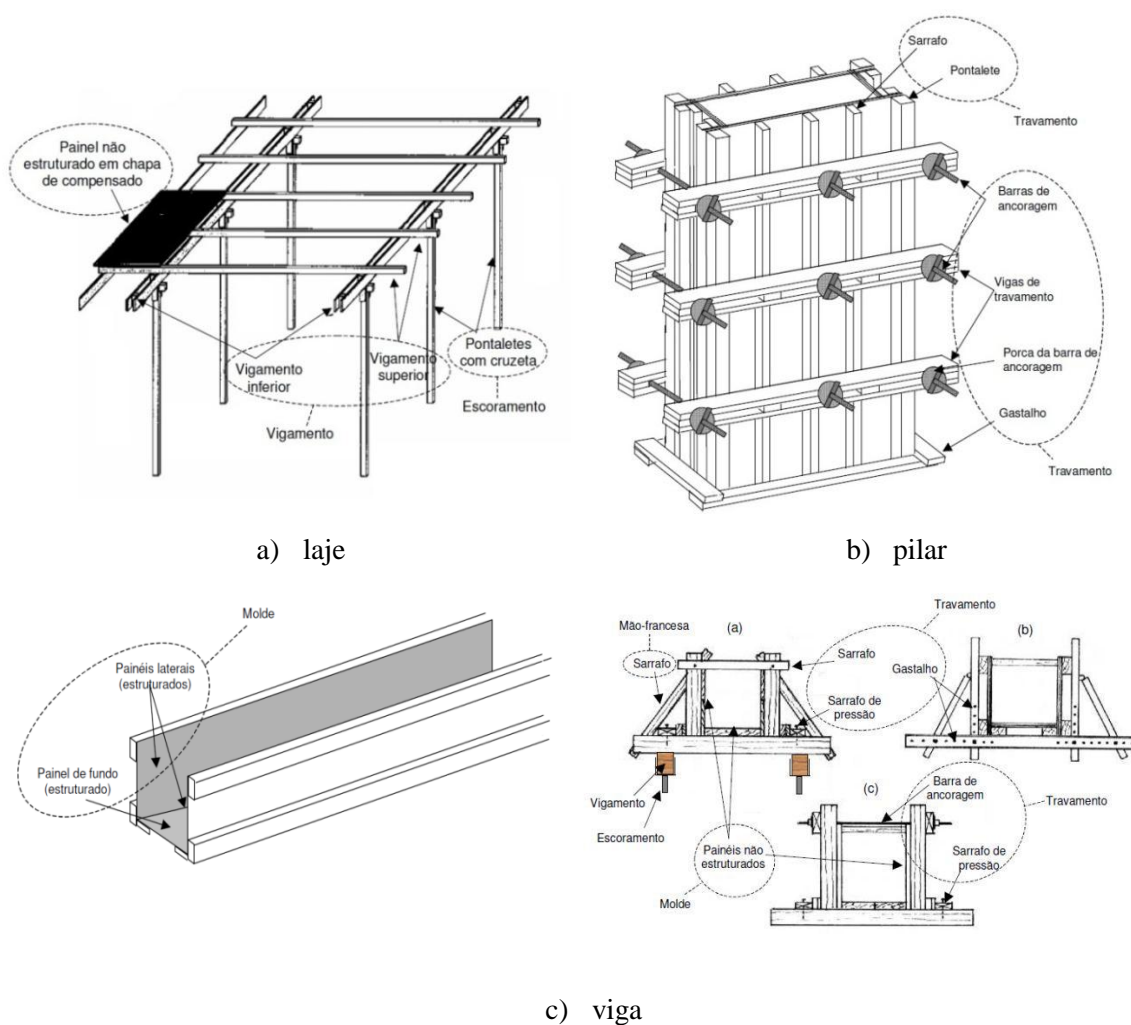


Figura 17 – Elementos dos sistemas de fôrmas e escoramentos de madeira. Fonte: Assahi (2009)

As chapas de compensado apresentam-se com diferentes espessuras, sendo mais utilizadas para fôrmas de estruturas, as seguintes dimensões: 6 mm, 10 mm, 12 mm, 18 mm, 20 mm e 25 mm. Quanto à largura e comprimento das chapas, elas são moduladas, enquanto os painéis

resinados apresentam-se nas dimensões de 1,10 m × 2,20 m, os painéis plastificados possuem 1,22 m × 2,44 m (devido à exportação).

Para a execução da estrutura do molde comumente são utilizados tábuas, sarrafos e caibros ou pontaletes, espaçados de maneira que o molde, com uma determinada espessura, suporte o carregamento previsto, ou seja, o espaçamento varia de acordo com a interação da espessura do molde com o carregamento.

Como prova da grande vantagem do uso da madeira para este tipo de aplicação, existem no mercado diversas empresas nacionais e multinacionais, especializadas no fornecimento de acessórios de diferentes características, como exemplificado na Figura 18, onde é mostrada uma viga para suporte de fôrmas desenvolvida com tecnologia.

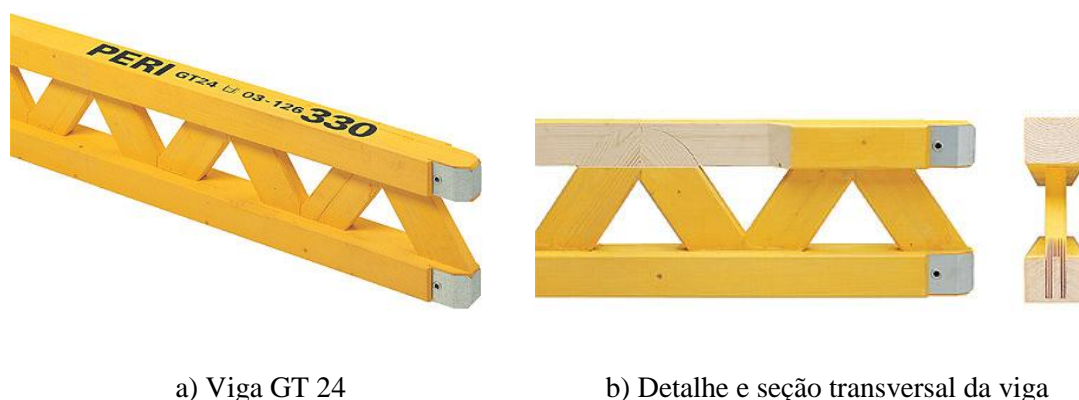


Figura 18 – Exemplo de viga de madeira empregada como elemento estrutural de fôrmas.
Fonte: Manual PERI (2005)

A Figura 18a ilustra um modelo de viga de madeira, com 24 cm de altura, constituída por duas peças retangulares principais e diagonais inclinadas ao longo do comprimento, formando uma configuração semelhante à de uma treliça. Este é um modelo em que se aproveita o máximo rendimento do conjunto de madeira, para aplicá-lo com a menor quantidade de escoras possível, conforme mostra a Figura 19.

Este componente permite reduzir a quantidade de peças e apoios, implicando em redução de custos com aluguel de escoramento e mão de obra para montagem. Neste contexto, tem-se a proposta do estudo desenvolvido neste trabalho – a viga vagão – a fim de aplicar soluções tecnológicas, de uso racional e até mesmo industrializada para melhorar a competitividade no ramo de fôrmas e escoramentos.



a) Fôrma de laje



b) Fôrma de ponte

Figura 19 – Exemplos de aplicação das vigas de madeira GT 24 como elementos de fôrmas e escoramento. Fonte: Manual PERI (2005)

3.4 CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS

As fôrmas têm um papel de grande importância no desenvolvimento de uma obra, os erros de execução a elas atribuídos provocam problemas que se arrastam até a conclusão final da construção prejudicando a maioria dos serviços sequenciais. A ABNT NBR 15696:2009 fixa os procedimentos e condições que devem ser obedecidos na execução das fôrmas e escoramentos.

A falta de um projeto de fôrmas e escoramentos pode acarretar diversos problemas construtivos, que vão de peças moldadas com geometria irregular, seções transversais inferiores ou superiores às necessárias, às deformações excessivas na estrutura da fôrma pelo peso próprio e do concreto. Outro fator relevante, em obras maiores, é que fôrmas fora de prumo podem gerar excentricidades nos elementos e modificar a transmissão de esforços para a qual a estrutura foi projetada.

Todas as fôrmas devem ser construídas de modo que permitam a retirada de seus diversos elementos com relativa facilidade, sem choques. A retirada das fôrmas deve ser progressiva, a fim de impedir o aparecimento de fissuras e trincas. Para isto, o escoramento deve apoiar-se sobre cunhas ou dispositivos semelhantes.

Além das características citadas é importante que as fôrmas sejam feitas com madeira de baixo peso específico, devem apresentar resistência razoável para garantir uma boa moldagem do elemento. Em contrapartida, devem ser maleáveis o suficiente para facilitar a serragem e a penetração e extração de pregos.

Toda a montagem da estrutura de fôrmas e escoramento de edificações deve ser executada mediante a utilização de um projeto específico de fôrmas e escoramentos. Segundo a ABNT NBR 15696:2009, este projeto deve conter:

- a) Especificação dos materiais utilizados;
- b) Definição clara e exata do posicionamento de todos os elementos utilizados;
- c) Critérios adotados para dimensionamento da fôrma, tais como pressão do concreto, velocidade de lançamento, altura de concretagem e vibração, consistência e metodologia de lançamento;
- d) Detalhamento com plantas, cortes, vistas e demais detalhes, de tal forma que não fiquem dúvidas para a correta execução da montagem.

Atualmente são poucas as obras que tem projeto de fôrmas e escoramento. O comum é encontrar canteiros com as fôrmas executadas de acordo com a experiência do mestre de obras ou do carpinteiro que já fez algo parecido em outro lugar. Tal prática ocasiona grande diversidade na utilização do material e, conseqüentemente, existem obras em que é empregado em excesso e outras em que é utilizado de forma deficiente.

A necessidade de maior qualidade (controle tecnológico dos materiais), de redução das perdas de materiais e mão de obra, de redução de prazos de entrega está fazendo com que haja uma mudança no mercado de trabalho. É fundamental o dimensionamento das fôrmas e escoramentos considerando os planos de montagem e desmontagem, bem como o reaproveitamento das mesmas.

Quanto à desmontagem, outra prática comum e igualmente incorreta é a retirada parcial e total das escoras sem planejamento, pois é muito comum visualizar obras em que elementos como vigas e lajes são reescorados erroneamente, como apresentado na Figura 20.

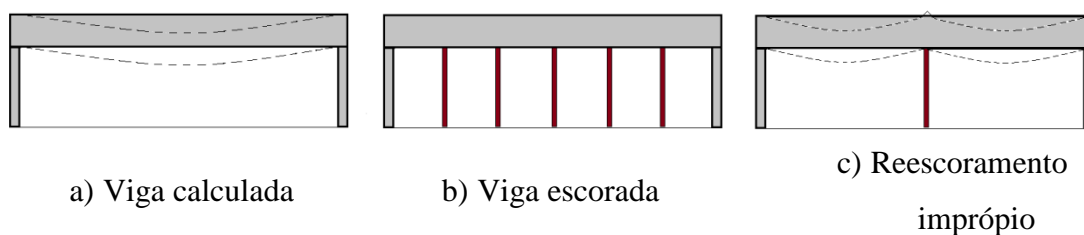


Figura 20 – Fases da concretagem da viga até a completa retirada das fôrmas

O projeto de reescoramento evita a ocorrência de solicitações indevidas nos elementos estruturais, por exemplo, o aparecimento de momento negativo em uma viga bi apoiada, dimensionada para trabalhar apenas com momento positivo.

Outra prática comum, decorrente da necessidade de se trabalhar no pavimento que suporta o escoramento, é a retirada precoce dos elementos de sustentação para fôrmas, descumprindo as exigências normativas da ABNT NBR14931:2004.

3.5 SOLICITAÇÕES NAS FÔRMAS DE MADEIRA

As estruturas para sustentação das fôrmas de concreto devem ser dimensionadas considerando além do peso próprio do material e do concreto com as armaduras, as solicitações advindas do método construtivo, ou seja, a sobrecarga dos trabalhadores e equipamentos, a pressão durante o lançamento e as ações provenientes da vibração do material.

Para determinação do peso próprio do concreto armado, a ABNT NBR 6118:2003 e a ABNT NBR 15696:2009, estabelecem que seu peso específico é igual a 25 kN/m³.

Na combinação de ações definida na Seção 4.3.1 da ABNT NBR 15696:2009, tem-se que as ações devidas ao peso próprio não são consideradas como permanentes, mas como ações variáveis.

Recomendações anteriores, por exemplo, feitas por Moliterno (1989), consideram necessário majorar em 10% o peso específico do concreto para suprir os efeitos da vibração, ou seja, para laje de 10 cm de espessura, para efeito de cálculo, deve-se acrescentar 0,25 kN/m² de sobrecarga ao peso específico, totalizando 2,75 kN/m². Já a ABNT NBR 15696:2009, no item “e” da Seção 4.2, estabelece que a sobrecarga para o estado limite último deve ser de no mínimo 2,0 kN/m². Além disto, a soma desta sobrecarga com o peso de todos os elementos que compõem a estrutura não deve ser inferior a 4,0 kN/m².

3.5.1 Solicitações devidas ao concreto e à chapa compensada: exemplo numérico

Será aqui apresentado o cálculo do sistema de fôrmas para uma laje com as dimensões de 300 cm × 600 cm. O primeiro passo é a determinação do carregamento. Posteriormente, calcula-se o molde (assoalho) das lajes, definindo o espaçamento das transversinas.

Para estabelecer o espaçamento máximo entre os elementos de apoio da chapa de compensado, deve-se proceder às verificações das solicitações normais e tangenciais, bem como garantir que os deslocamentos estejam dentro dos limites estabelecidos. Desta forma, é preciso verificar a chapa de madeira compensada no estado limite último e de utilização.

Para o cálculo da laje será considerada a chapa de madeira compensada de 12 mm de espessura, e com dimensões comerciais (122 cm × 244 cm), sendo o peso específico da mesma de 5,5 kN/m³, assim, tem-se uma força distribuída de 0,066 kN/m².

O carregamento distribuído devido ao peso do concreto, para a laje de 10 cm, é de 2,5 kN/m², e somado com o carregamento devido à fôrma, totalizam no peso próprio (ação variável), que corresponde a 2,566 kN/m², superior a 2,0 kN/m², estabelecido pela ABNT NBR 15696:2009. Atendem também ao critério que estabelece o limite mínimo de 4,0 kN/m² para a soma da sobrecarga (2,0 kN/m²) com o peso de todos os elementos que compõem a estrutura (2,566 kN/m²).

De acordo com fabricantes deste produto, a resistência média paralela às fibras é de 3,0 kN/cm² e o módulo de elasticidade médio é $E_{c0,m} = 871,56$ kN/cm². A ABNT NBR 15696:2009 define que os coeficientes de modificação da resistência são dados por $k_{mod1} = 0,9$, $k_{mod2} = 1,0$ e $k_{mod3} = 0,8$ logo, $k_{mod} = 0,72$. Isto significa que $f_{c0,k} = 0,72 \times 3,0 = 2,16$ kN/cm² e $E_{c0,ef} = 0,72 \times 871,56 = 627,52$ kN/cm². Com estes valores, e sendo o coeficiente de ponderação $\gamma_{wc} = 1,4$, é possível determinar a resistência de cálculo na compressão paralela às fibras:

$$f_{c0d} = k_{mod} \frac{f_{c0,k}}{1,4} = 0,72 \times \frac{2,16}{1,4} = 1,08 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Equação 1}$$

Para o estado limite último a ABNT NBR 15696:2009 define que as combinações de carregamentos devem ser dadas por:

$$F_d = \gamma_Q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j,ef} F_{Qi,k} \right] \quad \text{Equação 2}$$

Sendo o valor de $\gamma_Q = 1,4$ e $\psi_{0l,ef} = 1,0$ (Seção 4.3.1 da ABNT NBR 15696:2009), resume-se a combinação de carregamento a $F_d = 1,4 \sum_{j=1}^n F_{Qi,k}$.

Assim, a força distribuída valerá $q_{\text{último}} = 6,39 \text{ kN/m}^2$.

Para a verificação da flecha, emprega-se a combinação para o estado limite de utilização. Este considera apenas o peso próprio do concreto e uma sobrecarga de $1,0 \text{ kN/m}^2$, sem aplicação de coeficientes de segurança. Também é determinado o deslocamento máximo (u_{lim}), que é de $L/500 + 1 \text{ mm}$, sendo L o comprimento do vão. Assim, para verificação da flecha tem-se $q_{\text{flecha}} = 3,5 \text{ kN/m}^2$.

3.5.2 Determinação da distância entre transversinas

A determinação da distância entre as transversinas está diretamente relacionada com a resistência e a rigidez da chapa de compensado. A condição para verificação da flecha é:

$$\frac{5 \times q_{\text{flecha}} \times b \times L_{ch}^4}{384 \times E_{co,ef} \times I} \leq \frac{L_{ch}}{500} + 1 \text{ mm} \Rightarrow L_{ch} \leq 37,293 \text{ cm} \quad \text{Equação 3}$$

Ou seja, para $q_{\text{flecha}} = 3,5 \text{ kN/m}^2$, e para não ultrapassar o limite de $L/500 + 1 \text{ mm}$, o máximo vão entre os apoios da chapa de compensado é de $37,3 \text{ cm}$. Considerando uma largura de influência de $1,0 \text{ m}$ (b) da força calculada F_d , obtém-se um carregamento por metro igual a $6,39 \text{ kN/m}$. Calcula-se então o momento fletor máximo entre transversinas.

Por curiosidade, caso a parcela 1 mm da verificação da flecha fosse omitida, o resultado anterior seria $L_c = 28,42 \text{ cm}$, o que representa uma diferença da ordem de 30% na resposta.

$$M = \frac{q_{d_ultimo} \times b \times L_{ch}^2}{8} = 10,52 \text{ kN} \cdot \text{cm} \quad \text{Equação 4}$$

A partir do momento fletor máximo, e sendo y igual a metade da espessura da chapa, pode-se determinar a tensão de cálculo e compará-la com a resistência:

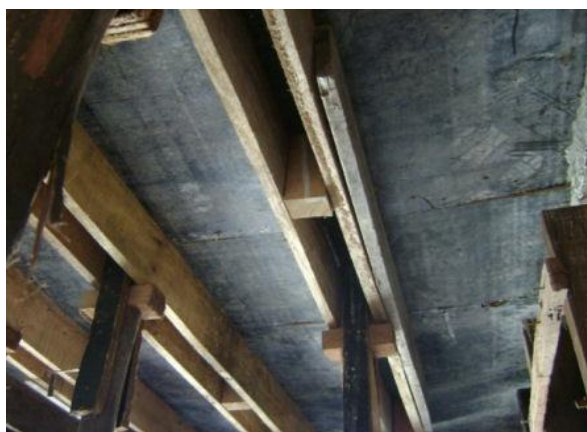
$$\sigma_d = \frac{M}{I} y = \frac{10,52}{1,44} \times 0,6 = 0,438 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{c0d_{chapa}} = 1,08 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Equação 5}$$

Portanto, como $L_c \leq 36,293$, foi adotado $L_c = 36$ cm e feitas as verificações. Assim, o carregamento solicitante nas transversinas é $q_d = q_{\text{último}} \times L_{ch} = 2,55$ kN/m.

Nas obras que utilizam sistema de fôrmas de madeira não projetado, duas das práticas comumente encontradas para a distribuição de transversinas são as expostas na Figura 21, cujas imagens foram retiradas de obras na cidade de Uberlândia. Em vários casos, é notório o superdimensionamento da estrutura por falta de conhecimento das características e propriedades do material, bem como da falta de planejamento para o uso específico.



a) Transversinas na horizontal e longarinas



b) Transversinas com seção dupla

Figura 21 – Sustentação para fôrma de lajes

Em geral, são colocadas diversas tábuas de madeira, na posição horizontal, que são as transversinas e trabalham na condição mais desfavorável da peça, ou seja, no sentido de menor rigidez. Estas transversinas devem ser apoiadas por longarinas, que por sua vez são apoiadas por escoras. O resultado é o mostrado na Figura 21a, uma obra com muito material e pouco espaço para deslocamento dos trabalhadores e material.

Em uma obra com arranjo do sistema de sustentação da fôrma um pouco mais elaborado, nota-se a distribuição das transversinas feita através de tábuas, posicionadas verticalmente e formando seção dupla. Apesar de ter um efeito melhor em relação ao exposto anteriormente, ainda não é a situação ideal, pois exige grande quantidade de pontaletes intermediários.

Para o exemplo em análise, na qual a resistência da chapa de compensado é o fator determinante para o espaçamento dos elementos de apoio, no máximo 36 cm para o exemplo citado, seriam necessárias 17 vigas vagão com comprimento de 300 cm, considerando as vigas posicionadas perpendicularmente ao maior vão (600 cm). Ainda que fossem utilizadas várias vigas vagão, haveria redução considerável de pontaletes, necessitando de apoios apenas nas extremidades.

Contudo, a situação ideal é o emprego de vigas fazendo o papel das transversinas apoiadas sobre vigas vagão. Isto reduziria, além do escoramento, a quantidade de vigas vagão necessárias, conforme esquema de montagem exposto na Figura 22.

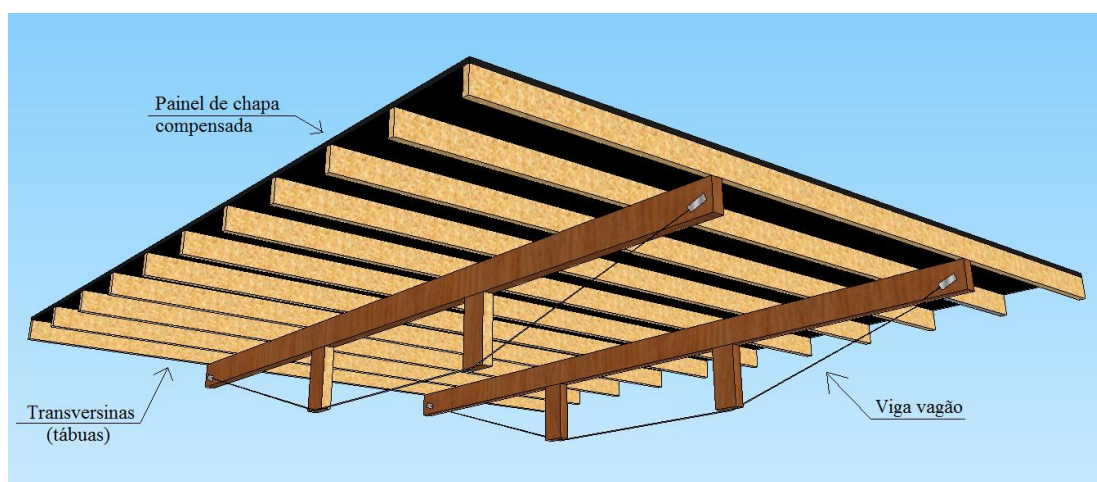


Figura 22 – Modelo de distribuição de tábuas e vigas vagão para sustentação da fôrma

Na seção seguinte serão abordadas algumas características do sistema e também a metodologia adotada para elaboração do trabalho

.

CAPÍTULO 4

ANÁLISES DO SISTEMA VIGA VAGÃO

4.1 METODOLOGIA

Inicialmente foi feita a avaliação numérica do sistema estrutural em questão, para melhor entendimento e conhecimento, bem como para definição dos modelos experimentais que foram amplamente avaliados do ponto de vista teórico. O cálculo estrutural foi feito através do uso de softwares específicos e gerais. Dois programas computacionais foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho: Gestrut e ANSYS®. O primeiro é um programa computacional para análise de sistemas reticulados tridimensionais desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia pelo orientador deste trabalho. Portanto, é de fácil acesso e permite adaptações para situações específicas. O ANSYS® é um programa computacional consagrado no meio técnico e emprega o método dos elementos finitos para solução de problemas estruturais gerais. Sua abrangência permite a avaliação de modelos bastante elaborados. Assim, estes programas computacionais compõem partes fundamentais para a análise numérica do sistema em questão.

Após a vasta pesquisa e análises numéricas do sistema (serão mostradas na Seção 4.2), foi iniciada a fase de análise experimental. Foram dois grupos de ensaios, o primeiro efetuado com cabos de aço e o segundo com barra circular de aço, ambos empregando vigas de Pinus e vigas de Angelim Vermelho. Nesta experimentação foram usadas madeira serrada, cabos, barras, parafusos, cilindros hidráulicos para aplicação de forças sobre a viga, sistema de aquisição de dados, transdutor de deslocamento etc. Todo o processo de leitura de força e deslocamentos foi feito por meio de equipamentos eletrônicos concatenados, portanto, todos os pares de medição são instantâneos e precisos.

4.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Na primeira etapa de análise foi verificado o sistema correspondente a uma viga de seção transversal $4\text{ cm} \times 13\text{ cm}$, com cabos de aço laterais, tendo um vão livre (L) igual a 200 cm. O objetivo da análise era identificar o melhor posicionamento do cabo na peça principal de madeira, portanto, foram feitas 24 combinações, variando a distância vertical do pino à extremidade inferior da viga (hf) e a horizontal, do mesmo ao centro do apoio (cv), como ilustrado na Figura 23. Das 24 estruturas calculadas, 12 foram para o sistema formado com apenas um montante e 12 para o sistema com dois montantes.

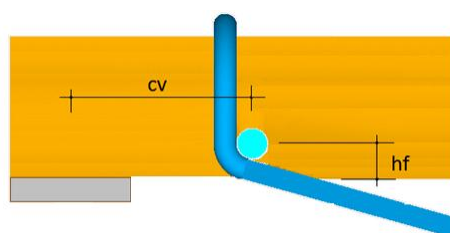


Figura 23 – Posicionamento do pino para fixação do cabo de aço

Para o parâmetro hf utilizaram-se três valores (0,65 cm, 1,00 cm, e 2,00 cm), enquanto para cv foram feitas quatro variações (5 cm, 10 cm, 15 cm e 20 cm). Os demais elementos para montagem da viga foram mantidos fixos, como o comprimento do montante (C_m) igual a $L/10$, ou seja, 20 cm. Também foram mantidos o diâmetro do pino igual a 1,27 cm e do cabo igual a 0,635 cm, equivalentes a $\frac{1}{2}$ " e $\frac{1}{4}$ ", respectivamente.

Na Figura 24 são mostrados os resultados da tensão normal (σ_x), das 24 estruturas analisadas. Cada diagrama relaciona os parâmetros de posicionamento do pino para o sistema com um e dois montantes. As diferentes curvas de resultados são identificadas, por exemplo, como 1_1M, sendo o primeiro algarismo correspondente à distância vertical do pino (hf) em relação à face inferior da viga e o segundo à existência de um montante (1M) ou dois montantes (2M).

Nota-se que para tensões favoráveis, a quantidade de montantes pouco interfere, o principal parâmetro é o posicionamento do cabo. Ou seja, o menor valor de σ_x ocorreu para o sistema com dois montantes e cabo de aço fixado mais próximo ao apoio ($cv = 5\text{ cm}$) e mais distante da face inferior da viga ($hf = 2\text{ cm}$), o segundo melhor modelo foi para o mesmo posicionamento do cabo, porém com um montante.

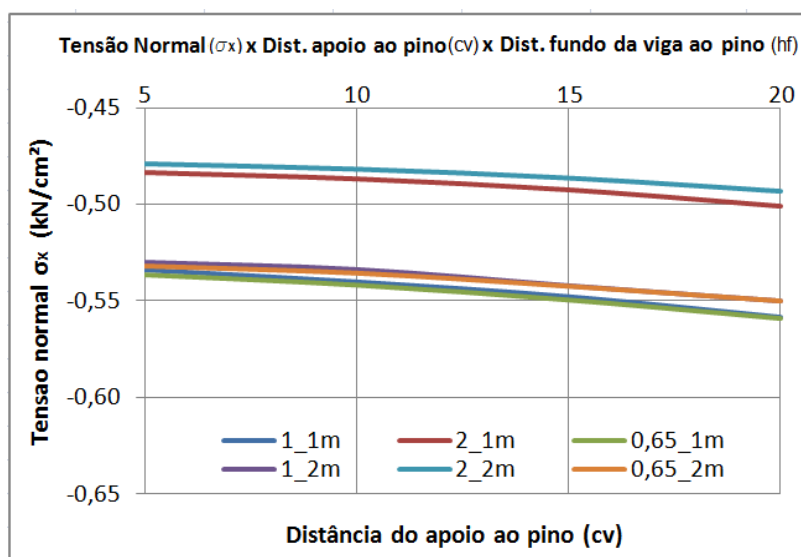


Figura 24 – Variação da Tensão normal (σ_x) em função do posicionamento do cabo e da quantidade de montantes

Também foi analisado o deslocamento vertical do sistema viga vagão em função do posicionamento do cabo na extremidade da viga. Observa-se na Figura 25 que o deslocamento é menor quando o sistema apresenta dois montantes. Quanto ao posicionamento do cabo, é possível observar que quanto mais próximo ele estiver do apoio, ou seja, para menores valores de cv , melhor o desempenho do conjunto viga vagão. Considerando o posicionamento vertical do pino, nota-se que a condição mais satisfatória é a fixação próxima à extremidade inferior da viga.

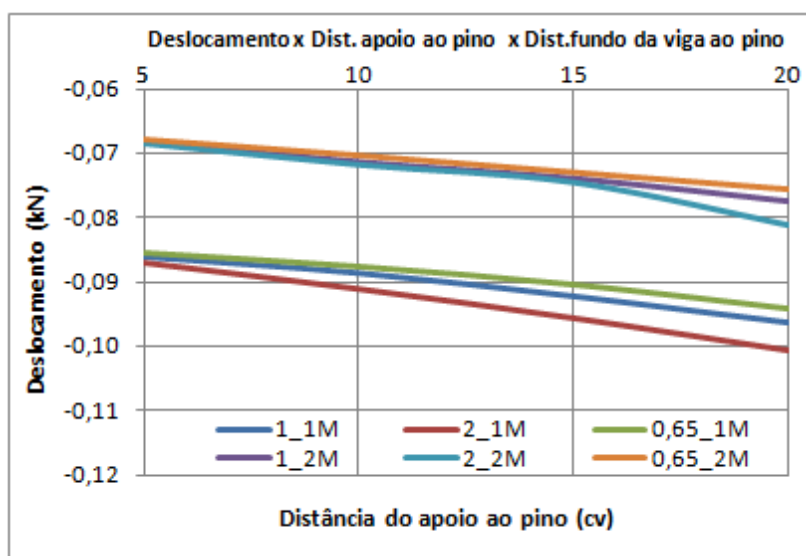


Figura 25 – Deslocamento vertical do sistema em função do posicionamento do cabo e da quantidade de montantes

Em estudos anteriores, como o de Gesualdo e Cunha (2011), foi revelada a interferência da deformação do cabo nos resultados dos ensaios. Logo, procurou-se observar a condição mais favorável para a montagem da viga vagão. Na Figura 26 está representada a variação da força no cabo em função do posicionamento do mesmo na viga. Nota-se que o melhor posicionamento é, horizontalmente, para o pino próximo ao apoio e, verticalmente, ao fundo da viga. A melhora é significativa, a redução da força no cabo é da ordem de 7,6%. Esse foi o parâmetro adotado para montagem dos sistemas ensaiados com cabo de aço.

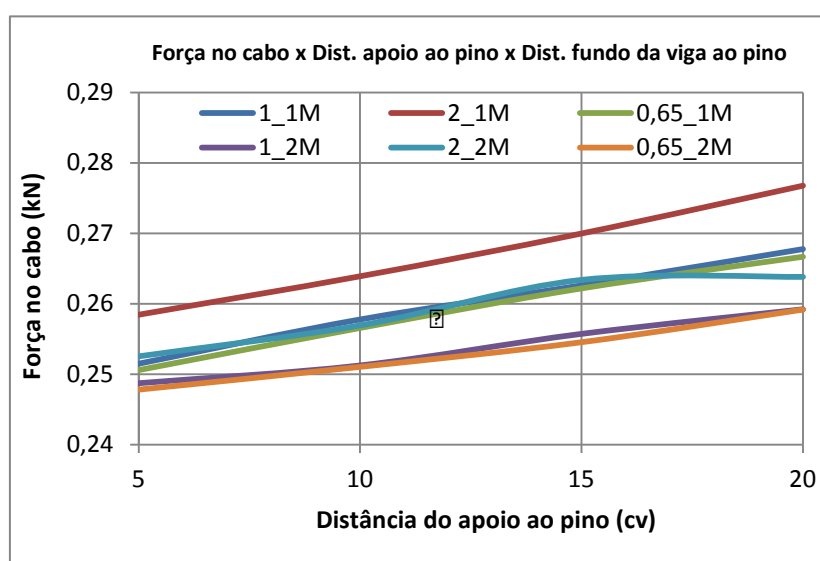


Figura 26 – Variação da força no cabo em função do posicionamento do mesmo e da quantidade de montantes

4.3 MONTAGEM DO SISTEMA PARA ENSAIO

Os ensaios das peças, tanto da viga simples quanto da viga vagão, foram realizados no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

O laboratório possui uma laje de reação de 3 m × 6 m e espessura de 60 cm, o que permite a realização dos ensaios sem a interferência de deformações para forças de até 500 kN. Esta laje possui furos a cada 50 cm, o que permite a fixação de suportes para ensaio.

O sistema para aplicação de força foi montado por meio de um conjunto formado por quatro barras rosqueáveis de aço afixadas na base da laje de reação. Suportes transversais de aço garantem a fixação do macaco hidráulico na parte superior, como ilustrado na Figura 27.



Figura 27 – Montagem do macaco hidráulico para realização dos ensaios

O macaco hidráulico é acionado por meio de uma bomba hidráulica manual, que pode ficar a alguns metros de distância do equipamento, a fim de garantir maior segurança a quem está realizando o ensaio. A Figura 28 exibe a montagem da viga com os equipamentos utilizados para realização do ensaio.

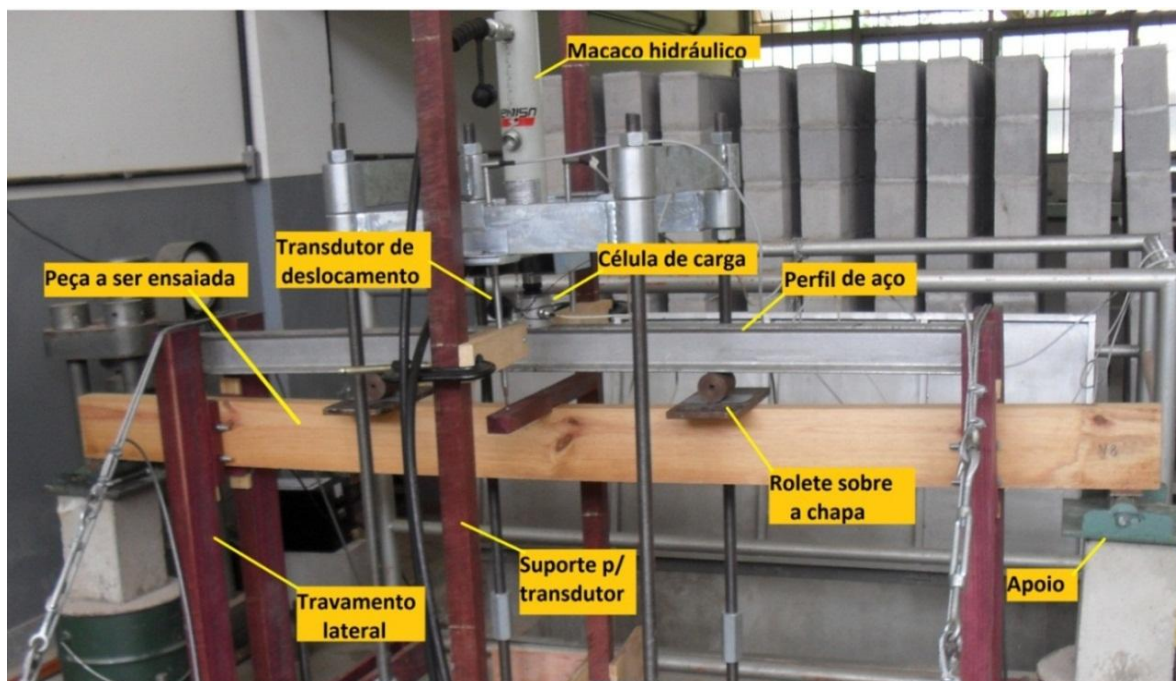
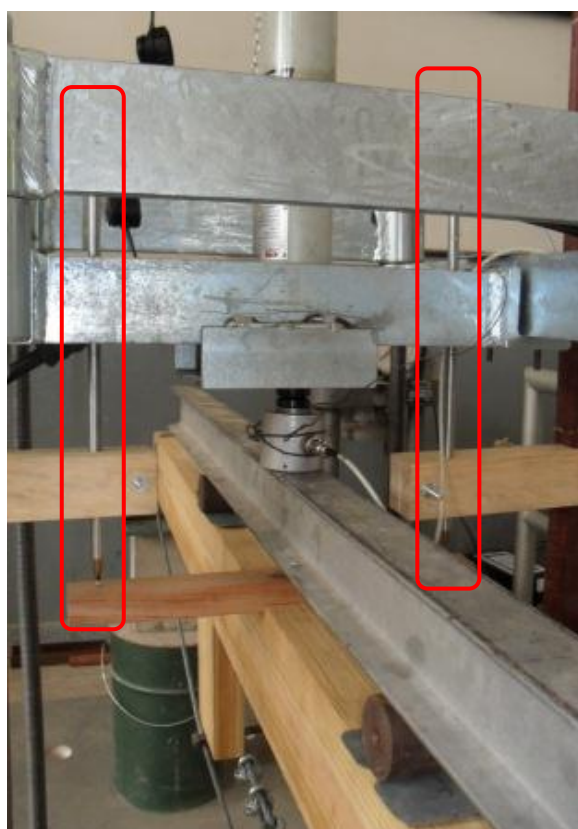


Figura 28 – Esquema dos equipamentos utilizados para realização dos ensaios

Para medir a força foi usada uma célula de carga de 100 kN. Para medição dos deslocamentos verticais foram usados dois transdutores de deslocamentos com capacidade de 100 mm, posicionados no centro do vão da viga (Figura 29). Foi empregado o sistema de aquisição de dados da marca HBM chamado Spider8. Portanto, todo o sistema de leitura de dados foi feito eletronicamente, havendo total concatenação temporal entre a leitura de forças e deslocamentos.



a) Montagem do transdutor para ensaio



b) Suporte para fixação do transdutor de deslocamento

Figura 29 – Equipamento para medição do deslocamento

Para todos os ensaios realizados, foram aplicadas duas forças concentradas sobre a peça, de modo a dividí-la em três vãos iguais. A posição mais favorável para os montantes foi verificada por análise numérica e chegou-se a conclusão que o ideal é fixá-los também dividindo a peça em três partes iguais, ficando, portanto, a força aplicada acima do montante, conforme exposto na Figura 30.

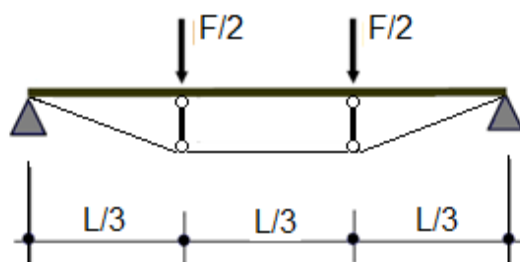
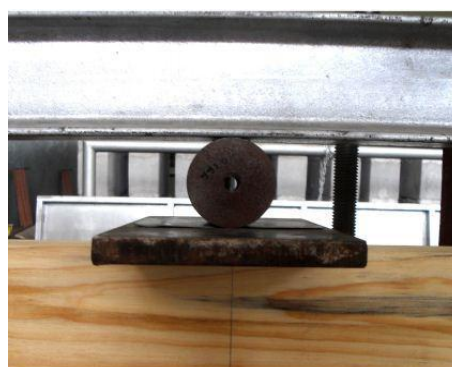


Figura 30 – Esquema de montagem da viga vagão para ensaio

Para aplicação de duas forças concentradas sobre a viga, foi utilizado um perfil metálico, sobre o qual é aplicada uma força concentrada. Sob o perfil de aço foram colocados dois roletes para a transmissão dos esforços para a viga. Os roletes, por sua vez, foram colocados sobre uma pequena chapa de aço para criar uma superfície de contato maior com a peça ensaiada. Porém, as vigas de Pinus, mesmo com a utilização desta chapa, apresentaram deformações localizadas significativas nas regiões de aplicação da força, tendo em vista a característica deste tipo de madeira, bastante macia. Portanto, a chapa foi substituída por uma com dimensões maiores. A Figura 31 ilustra os dois tipos de peças que foram utilizadas.



a) Chapa menor



b) Chapa maior

Figura 31 – Perfil sobre os roletes que se apoiam nas chapas de aço para transmitir os esforços à viga

A viga foi apoiada sobre um rolete que bloqueia apenas a movimentação vertical da peça, permitindo os deslocamentos nas outras duas direções (x e z) e a rotação. Sob estes roletes estão dois blocos de concreto considerados rígidos, apoiados na laje de reação, o que impediu qualquer deformação da estrutura de apoio durante o ensaio.



a) Rolete



b) Bloco de concreto

Figura 32 – Estrutura de apoio da peça ensaiada sobre a laje de reação

Inicialmente, as peças foram ensaiadas utilizando apenas os equipamentos descritos acima, porém houve o tombamento de algumas vigas de Pinus, devido à ocorrência de deformações localizadas na região dos apoios. Este esmagamento localizado era gerado por pequenas imperfeições de alinhamento do sistema de aplicação de forças, aliado à propriedade de maciez da espécie ensaiada. Tornava-se um processo progressivo que resultava no tombamento do sistema. Para evitar este efeito indesejável, foi criado um sistema de travamento lateral.

O travamento lateral foi utilizado com o objetivo de criar um sistema que permitisse a movimentação vertical da viga e que, ao mesmo tempo, impedisse a perda de estabilidade lateral ou tombamento. Para isto foi criado um aparato formado por um cabo de aço e duas peças verticais de madeira de alta resistência e rigidez, associados a um sistema de rolamento para garantir o deslizamento vertical da viga, como ilustrado na Figura 33.



a) Aparato de travamento



b) Mecanismo de deslocamento (“carrinho”)

Figura 33 – Peças do sistema de travamento lateral

Estas peças verticais estão ligadas a um suporte horizontal que por sua vez é fixado à laje de reação por meio de barras de aço, chapas e parafusos. Para garantir a estabilidade do conjunto, empregaram-se cabos de aço presos ao suporte da base passando pela parte superior das peças verticais. A madeira usada neste aparato foi da espécie Roxinho (*Peltogyne cf. subsessilis*).

Inicialmente o “carrinho” ficava fixo no suporte lateral, ou seja, na viga de travamento. Observou-se, com os ensaios, que isto gerava concentração de tensões na viga, pois era o contato do rolamento com a viga de Pinus. Para evitar este inconveniente, inverteu-se a posição do “carrinho”, por rotação de 180°, proporcionando redução de deformações localizadas e, também, garantindo que o “carrinho” deslizasse ao longo do suporte vertical e mantivesse todo o contato com a viga ao longo do movimento vertical, pois se mantém preso à viga por meio de um pino mostrado na Figura 34b. Assim, o sistema tornou-se mais prático e eficiente.



a) Carrinho fixo no sistema de travamento



b) Carrinho acoplado à viga ensaiada

Figura 34 – Montagem do sistema de travamento lateral para ensaios

4.4 MONTAGEM DA VIGA VAGÃO

Como exposto na Seção 2.2 o sistema viga vagão é composto por uma viga principal horizontal, com um ou dois montantes fixados na vertical, na parte inferior da viga principal e um tirante, que pode ser cabo de aço ou barra circular. As peças de madeira podem ser feitas de peças roliças ou serradas.

Neste trabalho foi estudado o sistema com dois montantes, com tirantes de cabo de aço e barra circular. Quanto à madeira foram montados três grupos de viga vagão. O primeiro com peças serradas sólidas de Pinus; o segundo com peças serradas sólidas de Angelim Vermelho e por

fim um grupo com seção transversal formada por duas tábuas pregadas de Pinus, formando uma seção transversal dupla (detalhes na Seção 6.3).

4.4.1 Sistema viga vagão com cabo de aço

Nos ensaios foram usados cabos especificados como 6×19 , onde o primeiro número indica a quantidade de pernas, e o segundo a quantidade de arames que formam as pernas. Além das pernas do cabo de aço, que são formadas por arames torcidos, existe o componente central chamado alma. Foi utilizado o cabo de aço com alma de fibra, por ser mais flexível. Na Figura 35 é mostrada a composição da seção transversal do cabo de aço.

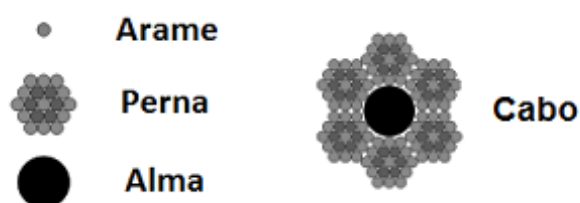


Figura 35– Composição do cabo de aço 6×19 com alma de fibra

A fixação dos cabos na viga pode ser feita por variadas formas, fazendo-se uso de outros acessórios como pinos e chapas. O tipo de ligação e o exato posicionamento interferem diretamente na eficiência do sistema, como mostrado na Seção 2.2.

As vigas montadas com cabo de aço tiveram a sua fixação conforme ilustrado na Figura 36.



Figura 36 – Cabo enlaçado na extremidade superior

Faz-se um furo na extremidade inferior da viga, passa-se um pino de aço, posteriormente, enlaça-se a viga com o cabo de aço, de modo que ele fique fixo pelo pino, impossibilitado de

deslizar na peça de madeira quando tracionado. Como o modelo ensaiado possuía seção retangular, foi necessário fazer um sulco na face superior da peça para melhor encaixe do cabo.

Os montantes são apenas colocados em contato com a viga principal, porém, para facilitar a montagem e o manuseio das peças eles foram fixados por pregos. Abaixo dos montantes, na região de contato com o cabo de aço também foi colocado um pino. Para esta ligação foi feito um pequeno sulco na peça, apenas para que o pino encaixasse, e não para que ficasse preso.

Quanto à fixação ou “fechamento” do cabo de aço, existem indicações sobre a melhor forma de se fazer o laço e posicionar o grampo. Na Figura 37 exibe-se o laço envolto na sapatilha e as formas de fixação do grampo, sendo correta a colocação da parte curva pressionando a haste terminal do cabo.

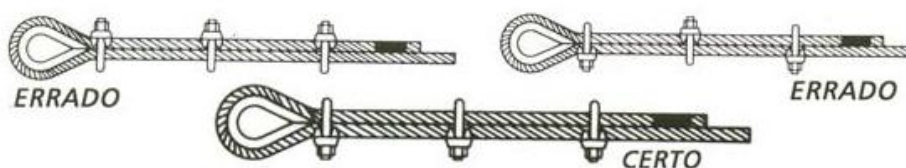


Figura 37 – Forma de colocação da sapatilha e grampos em laços de extremidades de cabos de aço.
Fonte: Cabopec (2012)

Para emendar o cabo foi indispensável o uso de um esticador com gancho em uma extremidade e olhal na outra, Figura 38. Este acessório permite a continuidade do cabo, bem como garante a possibilidade de ajuste do seu comprimento. Em alguns ensaios ocorreu a deformação do gancho, até sua total abertura, quando da solicitação do sistema (Figura 38b).



a) Modelo de esticador – gancho-olhal



b) Gancho deformado após ensaio

Figura 38 – Esticador

Outro fator relevante quanto ao uso do esticador é a necessidade do usuário saber até que ponto apertar ou ajustar o cabo sem que este fique excessivamente pré-tensionado. Primeiramente montaram-se as peças de madeira e colocaram-se os pinos. Posteriormente, foi passado o cabo de aço deixando-o bem esticado. Em seguida encaixou-se a sapatilha com o cabo no gancho do esticador e fez-se o ajuste.

4.4.2 Sistema viga vagão com barra circular

Nos ensaios com barra circular foi utilizado o aço CA50, com diâmetro de 6,3 mm. Para a montagem das 9 vigas foram necessárias cinco barras de aço, que foram caracterizadas à tração em ensaio feito no laboratório.

Para a fixação da barra na viga principal de madeira foi necessário utilizar chapas de aço e parafusos a fim de interligar os elementos e formar um sistema monolítico. A espessura da chapa, a posição de fixação dos parafusos e da chapa na viga, enfim, detalhes para montagem do sistema (Figura 39) foram previamente analisados através do programa computacional Ansys.

Foram feitas simulações para o posicionamento da chapa variando a distância do centro da chapa até a face inferior da viga (hc) e, horizontalmente, do centro do apoio até o centro da chapa (cv). Os parâmetros dx e dy são as distâncias ideais entre os parafusos e ex e ey são as distâncias do parafuso à face da chapa.

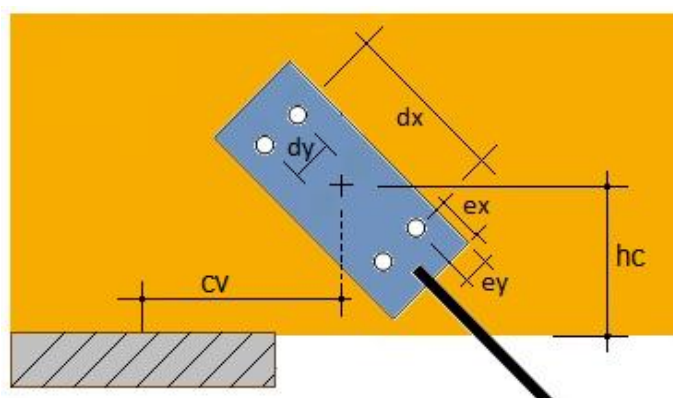


Figura 39 – Detalhe de posicionamento da chapa na viga

Para cada viga foram necessárias quatro chapas, uma em cada face e extremidade da viga, para receber a barra circular, fixada por solda, conforme ilustrado na Figura 40.



a) Fixação do tirante na chapa, por solda



b) Detalhe da chapa fixada na madeira por ligação parafusada

Figura 40 – Fixação do tirante na viga principal de madeira

Anteriormente à realização dos ensaios, foram retirados corpos de prova das vigas de madeira e estes foram ensaiados com o objetivo de caracterizar as peças envolvidas nas montagens das vigas. As informações sobre estes procedimentos estão no Capítulo 5.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO DO LOTE DE MADEIRA

5.1 GENERALIDADES SOBRE A MADEIRA

A madeira é um material orgânico, de composição complexa e não homogênea. Na árvore, ela desempenha três funções: suprimento da planta pelo transporte da seiva bruta, estocagem de reserva e sustentação. Segundo Costa (2001), para se conhecer a estrutura da madeira, torna-se fundamental o exame de três cortes realizados nos três planos perpendiculares: corte transversal perpendicular ao eixo do caule, corte radial em um plano passando pela medula, corte tangencial efetuado em um plano excêntrico e paralelo ao eixo do caule, conforme Figura 41. As três direções axial, radial e tangencial são as direções de ortotropia da madeira, e interferem de forma acentuada em suas propriedades físicas, mecânicas e tecnológicas.

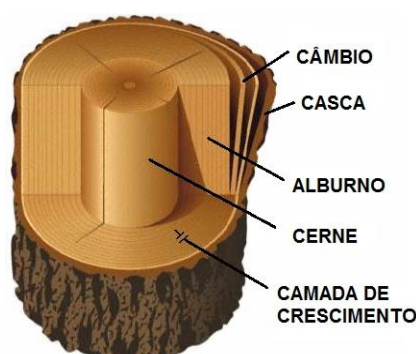


Figura 41 – Esquema da estrutura macroscópica do tronco. Fonte: Costa (2001)

Costa (2001) apresenta a definição de cada componente da estrutura do tronco de uma árvore. A casca é a proteção externa. O cerne é a camada interna e mais antiga do lenho, desprovida de células vivas e materiais de reserva. Em algumas espécies difere do alburno pela cor mais

escura, baixa permeabilidade e aumento da durabilidade natural, tem a função de sustentação do tronco. O alburno é constituído por células mortas e também células vivas que conduzem a seiva bruta em movimento ascendente, é a região da madeira que permite maior penetração durante o tratamento preservativo.

Nas seções transversais do caule, as camadas resultantes da atividade cambial aparecem em forma de anéis, formando as camadas de crescimento. Em regiões de clima frio, na primavera e início do verão, o crescimento da árvore é intenso, formando no tronco células claras de paredes finas e de grandes lumens, ao passo que, no inverno, surgem células escuras de paredes grossas e lumens pequenos. Já nas espécies de clima tropical é difícil a visualização das camadas de crescimento, pois as árvores apresentam um desenvolvimento praticamente uniforme, ao longo do ano (COSTA, 2001).

Além disto, existem diversas espécies com diferentes propriedades. Sendo assim, é necessário o conhecimento de todas estas características para um melhor aproveitamento do material. A norma brasileira para Projeto de Estruturas de Madeira, ABNT NBR 7190:1997, expõe os procedimentos para caracterização das espécies de madeira. Também é função desta norma fixar as condições gerais que devem ser seguidas no projeto, na execução e no controle das estruturas de madeira.

Dentre diversas propriedades da madeira, do ponto de vista estrutural, deve-se conhecer principalmente as seguintes características físicas e mecânicas: umidade, densidade, resistências à compressão normal e paralela às fibras, à tração, ao cisalhamento, módulo de elasticidade e embutimento.

Devido à variedade de espécies possíveis de serem utilizadas na construção civil, a ABNT NBR 7190:1997 agrupou as madeiras em classes de resistência, de acordo com a padronização das propriedades do material, a fim de melhor orientar o profissional quanto a escolha da espécie de madeira.

Para aplicações estruturais, as árvores são classificadas em dois tipos quanto à sua anatomia, coníferas e dicotiledôneas, popularmente conhecidas como madeiras moles e madeiras duras, respectivamente.

As coníferas possuem menor resistência e menor densidade em comparação com as dicotiledôneas. Têm folhas perenes com formato de escamas ou agulhas, típicas de regiões de clima frio, por exemplo, o Pinus e o Pinho do Paraná.

Por sua vez, as dicotiledôneas aclimatam-se melhor em regiões de clima quente e apresentam maior resistência e maior densidade, são exemplos o Angelim Vermelho e o Eucalipto Citriodora.

Foram estabelecidas três classes de resistência (C20, C25 e C30) para as madeiras de coníferas e quatro classes (C20, C30, C40 e C60) para as madeiras dicotiledôneas.

No Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2010) existem catalogadas diversas espécies de árvores. A busca pode ser feita pelo nome popular, nome científico ou pela região de ocorrência. Estão disponíveis ainda informações como classificação, propriedades físicas e mecânicas, características de processamento, durabilidade, tratamento e outras.

5.2 MADEIRAS USADAS NA EXPERIMENTAÇÃO

5.2.1 Generalidades

No estudo desenvolvido foram utilizadas duas espécies de madeira para a montagem das vigas vagão. Desta forma, fez-se uma caracterização simplificada das propriedades das peças usadas, apenas para conhecimento, uma vez que a análise dos deslocamentos foi feita por comparação direta entre a viga simples (sem tirantes) com a viga vagão. Por isto, sempre foram feitos dois ensaios para a mesma viga. No primeiro, determinou-se o módulo de elasticidade da viga simples em ensaio de flexão idêntico ao feito para a viga vagão.

Para caracterização das vigas foram retirados seis corpos de prova de cada, a fim de caracterizar a peça através da densidade e do módulo de elasticidade.



Figura 42 – Corpos de prova do primeiro lote

Foram ensaiadas vigas empregando peças de espécies conhecidas popularmente por Pinus (sem identificação da subespécie) e Angelim Vermelho.

5.2.2 Pinus

Árvores do gênero Pinus pertencem ao grupo das coníferas. São predominantes de regiões polares e tropicais, naturais da Europa, Ásia, América do Norte e Central.

Segundo a revista REMADE (2006), por volta de 1936, foram iniciados os primeiros ensaios de introdução de Pinus no Brasil, com espécies europeias. Contudo, não houve sucesso, em decorrência da má adaptação ao clima. Em 1948, foram introduzidas, para ensaios, as espécies americanas *P. palustris*, *P. echinata*, *P. elliottii* e *P. taeda*. Hoje existem extensas áreas de plantios na Argentina, Chile, Uruguai e nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

As principais espécies comercializadas no Brasil são *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. A madeira de ambas possui bastante semelhança na aparência, o alburno é branco amarelado e o cerne marrom avermelhado. O *P. elliottii*, comparado com o *P. taeda*, é apontado como uma madeira mais pesada, resistente, rígida e dura.

Melchiorretto e Eleotério (2003), em ensaios de acordo com a ABNT NBR 7190:1997, determinaram a densidade básica do *P. elliottii* como 0,37 g/cm³ e a densidade aparente foi de 0,46 g/cm³. De acordo com IBAMA (1997), para esta espécie, a densidade básica é de 0,40 g/cm³, e a densidade aparente, 0,48 g/cm³. Para ensaios com o *P. taeda*, Melchiorretto e Eleotério (2003) encontraram os valores de 0,37 g/cm³ e 0,45 g/m³, respectivamente, para densidade básica e aparente.

Quanto ao módulo de elasticidade, de acordo com IPT (2012), a madeira verde de *P. elliottii* apresenta o valor de 6463 MPa.

Neste trabalho foram usadas peças de pinus provenientes da região de Uberlândia com seção transversal de aproximadamente 4,0 cm × 13 cm, e comprimento de 200 cm. Para caracterização das vigas foram retirados seis corpos de prova de cada viga, a fim de caracterizar a peça através da densidade e do módulo de elasticidade, de todas as vigas usadas na experimentação.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são exibidos estes resultados para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ($E_{c0,m}$), a resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), a densidade básica ($\rho_{bas,m}$) e a densidade aparente (ρ). Os ensaios foram feitos de acordo com o Anexo B da norma ABNT NBR 7190:1997 e os resultados expostos correspondem à média obtida pelo ensaio dos seis corpos de prova de cada viga.

Tabela 2 – Propriedades das vigas de Pinus

Viga	$E_{c0,m}$ (Mpa)	$f_{c0,k}$ (Mpa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	ρ (g/cm ³)
V1	3774	28,11	0,3154	0,3773
V2	2158	54,07	0,5194	0,6289
V3	3445	41,79	0,4263	0,4686
V4	4382	44,35	0,4245	0,4903
V5	3623	40,54	0,3345	0,5178
V6	2436	26,88	0,3077	0,3906
V7	4367	46,64	0,4651	0,5668
V8	3963	44,27	0,4964	0,5510
V13	2710	52,46	0,4503	0,5239
V14	1645	38,79	0,4356	0,4984
V15	1824	43,59	0,4782	0,5575
V16	1710	41,81	0,4810	0,5504
V17	2092	49,12	0,4666	0,5654
V20	2085	42,14	0,4066	0,4896
V21	2789	28,72	0,3367	0,3963
Média Pinus	3302	39,75	0,4032	0,4877
Média tábuas	1996	45,15	0,4623	0,5391

5.2.3 Angelim Vermelho

O Angelim Vermelho, *Dinizia excelsa*, é uma árvore predominante de regiões tropicais, encontrada na Amazônia brasileira e na Guiana. Possui o cerne e o albúrneo pouco distintos pela cor, castanho-avermelhado, superfície pouco lustrosa, além de textura média a grossa. Quanto à tratabilidade química, o catálogo do IBAMA (1997) classifica esta espécie como impermeável às soluções preservativas, o cerne não é tratável com creosoto (oleossolúvel) e não é tratável com CCA (hidrossolúvel), mesmo em processo sob pressão.

Como apresentado anteriormente, pertence à classe das dicotiledôneas. Segundo o IPT (2012) o módulo de elasticidade da madeira verde é de 14073 MPa. De acordo com IBAMA (1997), a densidade básica do Angelim Vermelho é de 0,83 g/cm³.

De cada viga de Angelim Vermelho ensaiada para elaboração do presente trabalho, também foram retirados 6 corpos de prova, a fim de caracterizar a peça através do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ($E_{c0,m}$), a resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), a densidade básica ($\rho_{bas,m}$) e a densidade aparente (ρ). **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** exibe estes resultados.

Tabela 3 – Propriedades das vigas de Angelim Vermelho

Viga	$E_{c0,m}$ (MPa)	$f_{c0,k}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	ρ (g/cm ³)
V9	9257	89,43	0,8730	1,0490
V10	7360	77,23	0,9593	1,0445
V11	8652	92,98	0,8813	1,0520
V12	7259	83,54	0,9687	1,0507
V18	7565	97,34	0,9135	1,0778
V19	7335	94,38	0,8802	1,0430
Média	7905	89,15	0,9127	1,0578

Obtidos os dados característicos das madeiras utilizadas na experimentação, foram feitos os ensaios experimentais e as análises numéricas.







CAPÍTULO 6

ANÁLISES EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS

6.1 MODELOS ENSAIADOS

Ao todo foram montadas 21 vigas para realização dos ensaios, divididos em dois grupos. O primeiro para o sistema viga vagão com cabo de aço e o segundo para o sistema com barra circular. Para cada grupo houve três lotes, um com vigas de Pinus de seção transversal retangular maciça, o segundo com vigas de Angelim Vermelho (seção também retangular maciça) e, por fim, o terceiro lote com seção transversal dupla feito com tábuas de Pinus justapostas. Na Tabela 4 estão respresentados os modelos e a numeração das vigas.

Tabela 4 – Descrição dos grupos de ensaios

Grupo	Numeração	Madeira	Seção Transversal (cm)	Comprimento (cm)
Cabo de aço	V1 a V8	Pinus	 $4,5 \times 13$	210
	V9 a V12	Angelim Vermelho	 $4,1 \times 9,2$	290
	V13	Pinus	 $4,0 \times 12$	290
Barra Circular	V13 a V17	Pinus	 $4,0 \times 12$	290
	V18 e V19	Angelim Vermelho	 $4,1 \times 9,2$	290
	V20 e V21	Pinus	 $4,5 \times 13$	210

Nas próximas subseções deste texto serão apresentadas as descrições detalhadas de cada ensaio realizado. A análise dos resultados será apresentada na Seção 6.4 e 6.5.

6.2 ENSAIOS DE VIGAS COM CABO DE AÇO

6.2.1 Vigas de Pinus

O primeiro conjunto de ensaios foi realizado com 8 peças retangulares de pinus, com seção transversal nominal de 4,5 cm \times 13 cm, e comprimento total de 210 cm. Retirando os comprimentos necessários para apoios, as peças ficaram com vão livre (L) de aproximadamente 200 cm. As vigas foram montadas com dois montantes, cujo comprimento de cada é L/10 (20 cm) posicionados a L/3 (66,7 cm) do apoio e cabo de aço de 6 \times 19 com alma de fibra e diâmetro de 0,80 cm (5/16”), os pinos para fixação do cabo possuíam diâmetro de 1,27 cm (1/2”).

O processo genérico de ensaio consistiu na aplicação de uma força concentrada sobre os dois montantes da viga, inicialmente sobre a peça sem o cabo de aço, chamada viga simples. Isto, além da caracterização do módulo de elasticidade da madeira, também permite a comparação direta com a viga reforçada pelos cabos. Posteriormente ao ensaio da viga simples, foi realizado um ensaio com os cabos, até atingir certo deslocamento, com nível de solicitação abaixo do limite elástico, e então a viga foi descarregada, o que foi chamado de Ajuste dos Cabos (E1). Tal procedimento se deu devido à necessidade de ajustar o cabo, uma vez que ocorre a deformação de acomodação do mesmo quando solicitado.

Após o descarregamento da peça e o ajuste do cabo foi realizado o ensaio final, até a ruptura, representado nos gráficos por Ensaio Final (E2). Este procedimento de acomodação pode ser obtido na prática usando-se o próprio esticador do cabo de aço. Basta esticá-lo de forma a produzir uma contraflecha e aguardar até que haja a acomodação do sistema.

A forma de aplicação da força foi contínua, ou seja, sem patamares de carregamentos e descarregamentos. Isto foi feito com base na experiência em outros ensaios realizados neste mesmo laboratório que demonstrou não existir alteração quanto ao procedimento.

6.2.1.1 Viga V1

Na primeira viga, V1, com seção transversal de 4,1 cm × 13 cm, empregou-se um procedimento de ensaios conforme descrito anteriormente. Os resultados estão mostrados no gráfico da Figura 43, onde se tem a relação entre a força total aplicada no sistema e o deslocamento vertical máximo, medido no centro da viga.

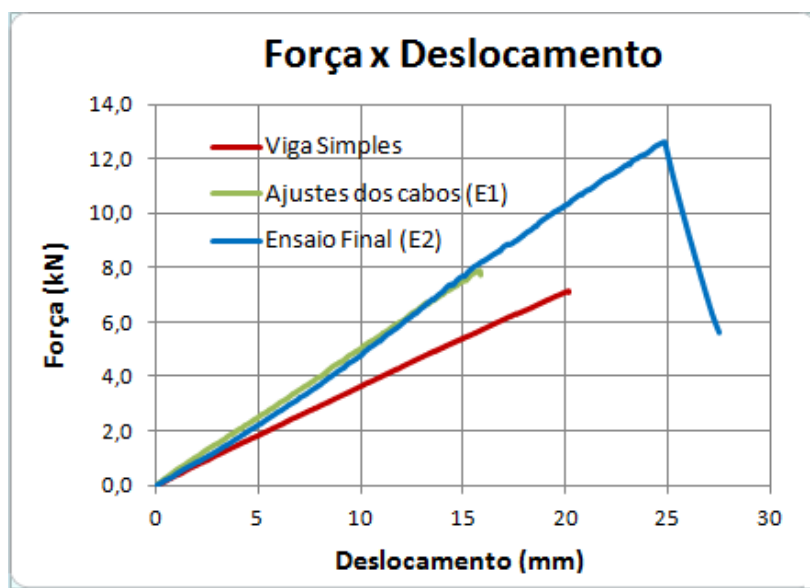


Figura 43 – Ensaio da viga V1

Ainda na Figura 43, nota-se que para viga simples, com uma força de 7,2 kN, obtém-se um deslocamento de 20 mm. Para o sistema viga vagão, com o mesmo deslocamento tem-se uma força cerca de 43 % maior (10,2 kN). Continuando a aplicação de força, a viga V1 manteve seu deslocamento com variação linear até a ruptura, que ocorreu para 12,8 kN, em um nó no centro da peça principal. Os nós provocam na sua vizinhança uma série de desvios ou descontinuidade dos tecidos lenhosos, por isso, afetam a resistência da madeira.

6.2.1.2 Viga V2

A segunda viga, V2, com seção transversal de 4,5 cm × 13 cm, foi ensaiada cinco vezes. Primeiramente foi carregado o sistema de viga simples, posteriormente o cabo foi colocado e ajustado. Para amenizar os efeitos da irregularidade da peça, foi colocada uma chapa como “calço” no apoio (Figura 44a) para o terceiro ensaio. Mesmo assim, a viga começou a tombar, como mostrado na Figura 44b. Como tentativa de solucionar o problema, fez-se o corte de parte da base da viga, Figura 44c, a fim de regularizar a região de apoio. Com esta

configuração, foi realizado mais um ensaio de ajuste do cabo (4º ensaio) e em seguida o ensaio final.

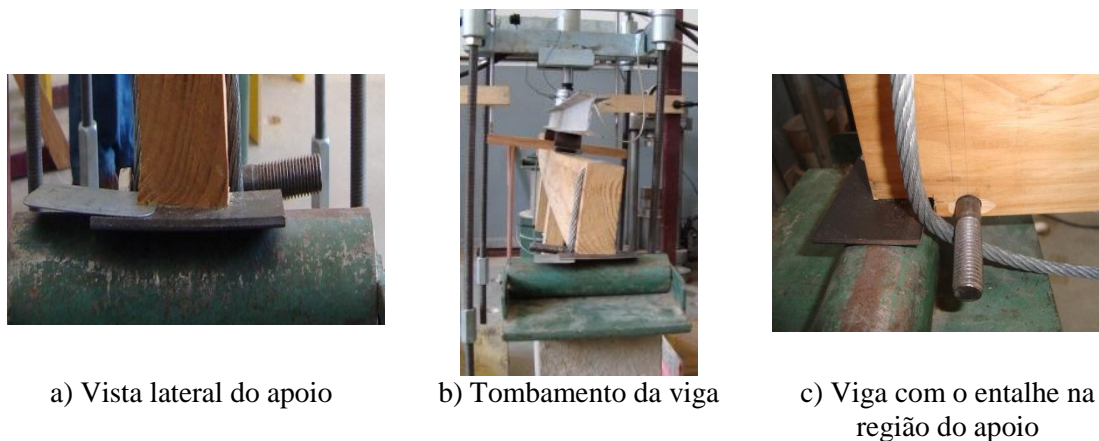


Figura 44 – Detalhe da região de apoio da viga V2

Mesmo com a tentativa de regularizar a base da viga, melhorando a região em contato com o apoio, no quinto ensaio não foi possível levar a peça à ruptura, pois a mesma tombou novamente. Porém, foi possível comparar a eficiência do sistema viga vagão analisando a relação força aplicada \times deslocamento.

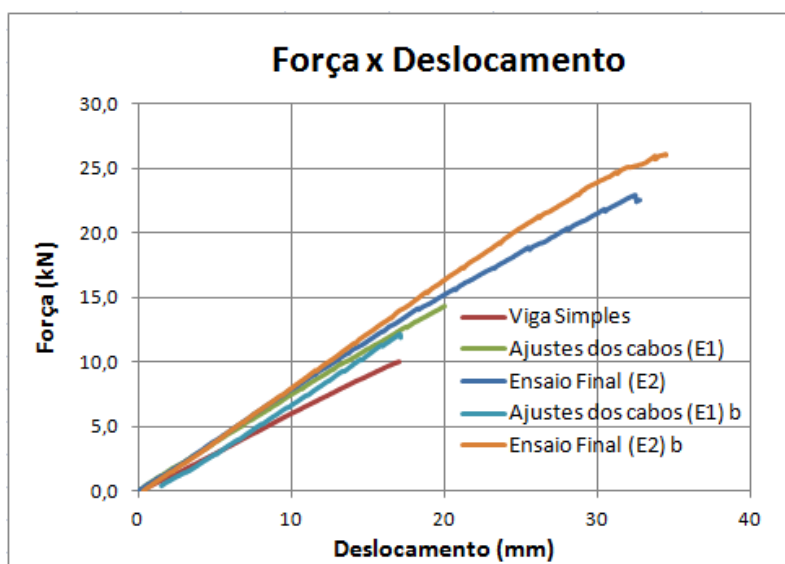


Figura 45 – Ensaio da viga V2

6.2.1.3 Viga V3

A Viga V3, com seção transversal de 4,4 cm \times 13 cm, foi ensaiada seguindo o procedimento padrão. De maneira semelhante à viga V2, esta também tombou, impossibilitando a conclusão

do ensaio. A fim de encontrar uma solução genérica e definitiva para o problema do tombamento das peças, foi criado o sistema de travamento lateral das vigas, descrito anteriormente na Seção 4.3. Na Figura 46 tem-se uma vista geral do conjunto ensaiado com os dois suportes laterais de estabilização lateral.



Figura 46 – Viga V3 com sistema de travamento lateral

Com os travamentos laterais a mesma peça (V3) foi carregada novamente. A ruptura do sistema, por tração, se deu em posição levemente deslocada do centro da viga, nas proximidades de um dos montantes, como mostrado na Figura 47. Devido à baixa dureza do pinus, foi possível observar a deformação da viga nos locais de aplicação das forças (sob as chapas).



Figura 47 – Detalhe do ponto de ruptura da Viga V3

6.2.1.4 Viga V4

O ensaio da quarta viga foi realizado também utilizando o sistema de travamento lateral. Os dados estão representados na Figura 48. Nota-se que a ruptura ocorreu para uma força de 23,6 kN com um deslocamento de 32 mm.



Figura 48 – Ensaio da viga V4

6.2.1.5 Viga V5

A quinta viga ensaiada, com seção transversal de 4,5 cm × 12,9 cm, sofreu uma deformação nos locais de aplicação da força, devido à baixa dureza do pinus, e à pressão exercida pela chapa de transição de esforços, como representado na Figura 49a. A fim de aumentar a área de contato e minimizar esse efeito de deformação, foi utilizada uma chapa com dimensões maiores que a anterior, Figura 49b.



a) Ensaio com a chapa menor



b) Ensaio com a chapa maior

Figura 49 – Montagem do sistema da viga V5

A chapa maior e mais espessa funcionou muito bem, distribuindo melhor os esforços na peça, e os resultados podem ser vistos no gráfico da Figura 50. O ensaio final E2a, seria levado à ruptura se não fosse o tombamento do perfil devido à deformação da viga pela utilização da chapa pequena. O Ensaio final 2 (E2b) foi realizado após a troca das chapas e a viga rompeu para uma força de 20,8 kN.

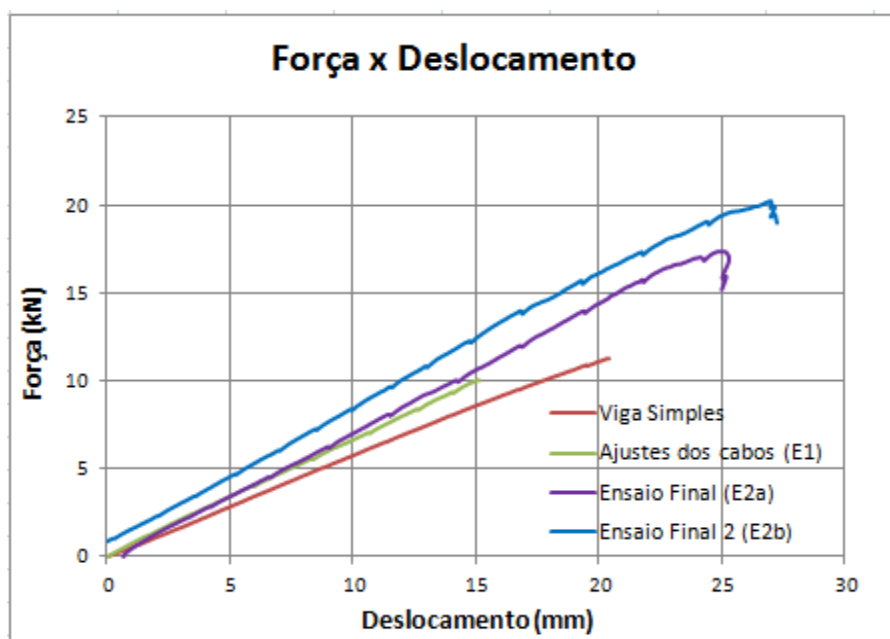


Figura 50 – Resultados do ensaio da viga V5

6.2.1.6 Viga V6

A Viga V6 teve sua seção transversal diferenciada das demais, sendo 4,5 cm × 10 cm, ou seja, uma redução de 23% na altura. A peça principal da viga vagão também apresentava um nó próximo ao centro do sistema.

A viga foi ensaiada inicialmente sem os cabos, posteriormente foi feita a análise carregando até certo valor, descarregou-se a viga, fez-se um ajuste do cabo e depois foi ensaiada até a ruptura, cujos resultados estão na Figura 51.

Durante os ensaios não houve indícios de tombamento da viga nem do perfil metálico. Foi possível comprovar que o aumento da relação b/h interfere positivamente na estabilidade do sistema.

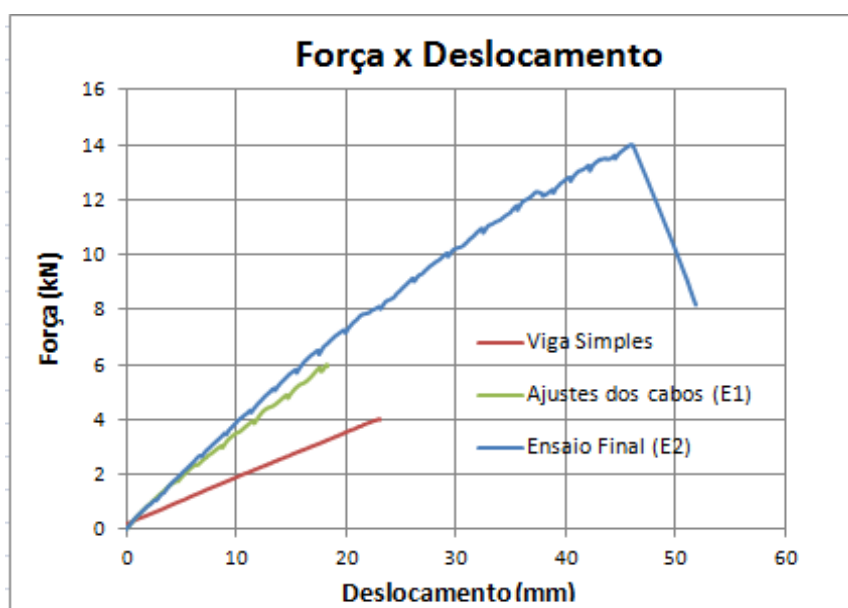


Figura 51 – Ensaio viga V6

Considerando o deslocamento ocorrido para aplicação de uma força de 3 kN, o ganho de eficiência da viga vagon para a viga simples, foi de aproximadamente 116 % (7,69 cm e 16,68 cm, respectivamente). Como esperado, a viga rompeu nas proximidades do nó. Além disto, foi possível perceber que ocorreu esmagamento da peça na parte superior da viga, por onde passam os cabos, Figura 52c. A peça de Pinus da Viga V6 apresentava um defeito relativo à existência de nó, que se tornou altamente visível após a ruptura.

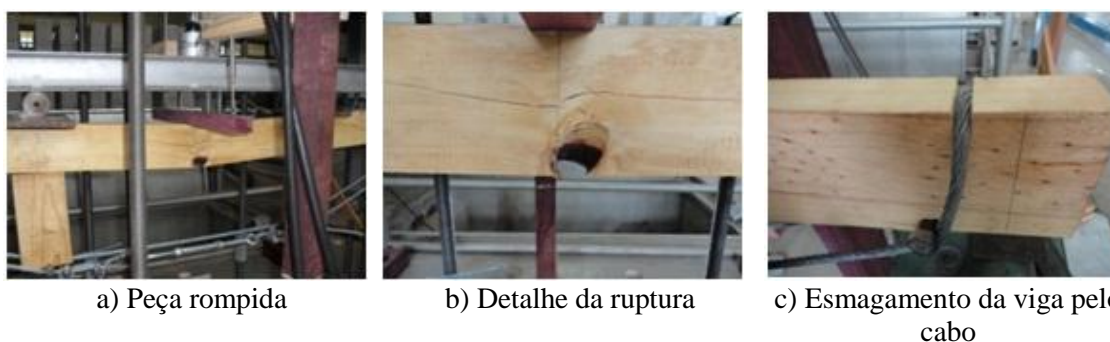


Figura 52 – Resultados do ensaio da viga V6

6.2.1.7 Vigas V7 e V8

As vigas V7 e V8 foram levadas à ruptura na forma simples, ou seja, sem os acessórios que caracterizam o sistema viga vagon. O objetivo destes ensaios foi observar o comportamento das vigas de Pinus até a ruptura, algo não possível para as vigas anteriores que foram levadas à ruptura na forma de viga vagon. Os resultados estão na Figura 53.

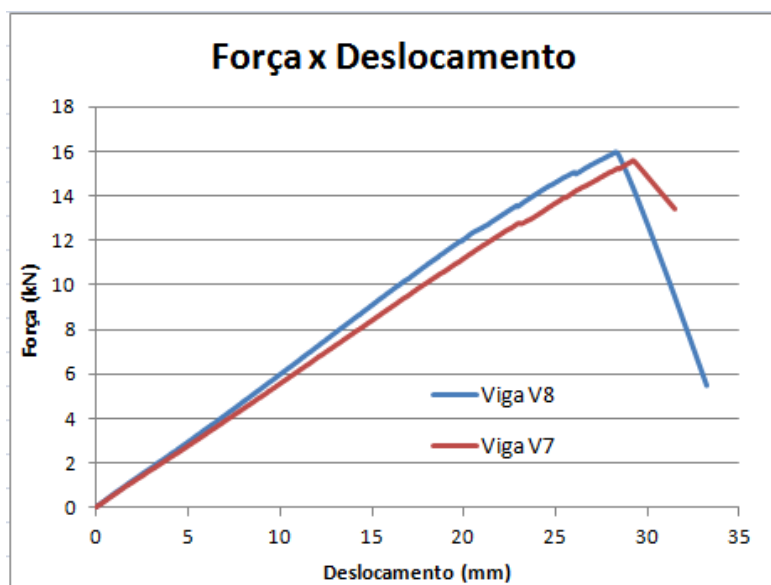


Figura 53 – Ensaio das vigas V7 e V8

6.2.2 Ensaio com vigas de Angelim Vermelho

Com as peças de Angelim, foram ensaiadas 4 vigas. A numeração destas seguiu a sequência do ensaio de Pinus, portanto a primeira viga de Angelim foi nomeada como V9, a segunda V10 e assim por diante. Como não era objetivo deste trabalho comparar as espécies de madeira, as peças de Angelim possuíam seção transversal diferenciada das de Pinus, próxima a $4,1 \text{ cm} \times 9,2 \text{ cm}$ e vão livre (L) de 290 cm. O comprimento e o posicionamento dos montantes seguiram os critérios analisados e adotados anteriormente, $L/10$ (29 cm) e $L/3$ (96,67 cm), respectivamente.

6.2.2.1 Viga V9

A viga V9, com seção transversal de $4,2 \text{ cm} \times 9,23 \text{ cm}$, após ensaio como viga simples, foi montada como viga vagon. Após carregar e descarregar o sistema, sempre ajustando o cabo, a peça foi solicitada a fim de se atingir a ruptura. No entanto, houve a ruptura do gancho do esticador do cabo. Neste caso, diferentemente dos casos anteriores ensaiados, o vão foi maior e com madeira mais resistente. Isto implicou em maior solicitação do cabo, resultando na ruptura do esticador.

As forças aplicadas e o deslocamento do sistema até que o cabo rompesse estão representadas na Figura 54.

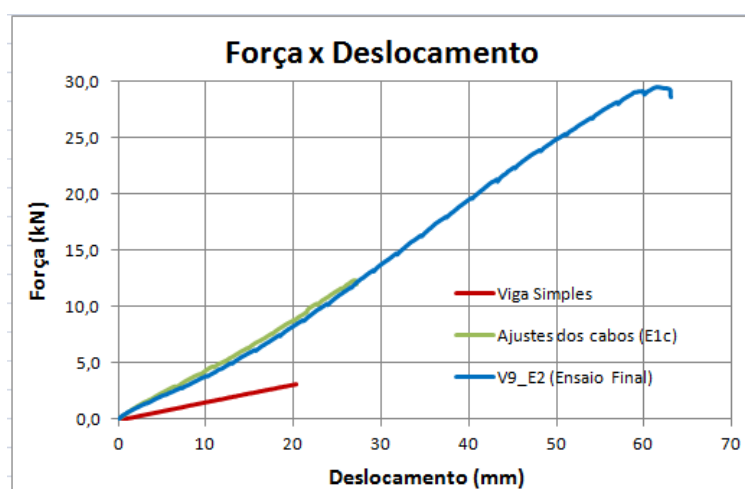


Figura 54 – Ensaio da viga V9

Na Figura 55a é possível notar a viga segundos antes da ruptura do gancho. Nota-se a deformação da peça solicitada por uma força de 28,0 kN. Na Figura 55**Erro! Fonte de referência não encontrada.**b nota-se a peça, ainda carregada, mas, com o cabo já solto, fora da condição de serviço, e a movimentação lateral do montante.



a) Antes da ruptura



b) Após ruptura do gancho



c) Gancho após ruptura



d) Gancho depois e antes da ruptura

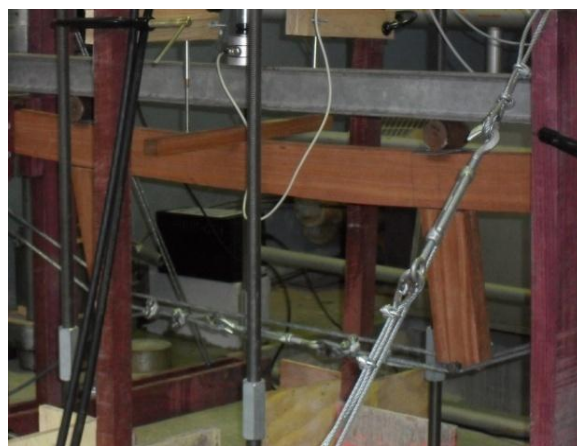
Figura 55 – Fotos do ensaio da viga V9

6.2.2.2 Viga V10

A viga V10, também com seção transversal de $4,20 \text{ cm} \times 9,23 \text{ cm}$, foi ensaiada de modo semelhante às demais, porém, durante o ensaio em que a peça seria levada à ruptura, embora o perfil e a viga permanecessem aprumados verticalmente, foi notável o “tombamento” ou “torcimento” dos montantes, Figura 56. Ao descarregar a viga foi possível observar que de um lado o cabo de aço estava tensionado (lado para o qual os montantes tombaram) e do outro lado (o lado dos ajustes do cabo) o mesmo estava frouxo.



a) Início do tombamento dos montantes



b) Tombamento acentuado dos montantes

Figura 56 – Resultados do ensaio da viga V9

Em nova tentativa para romper a viga, ajustou-se o cabo e carregou-se o sistema. Houve um deslizamento do cabo dentro das presilhas, afrouxando a ligação com a anilha, Figura 57.



Figura 57 – Deslizamento do cabo dentro das presilhas

Foram retirados o cabo de aço e os montantes para o ensaio como viga simples. Esta atingiu a ruptura aos 14,15 kN, com deslocamento acima de 100 mm. Mesmo com o ensaio tendo sido interrompido, o sistema viga vagão apresentou um alto ganho de eficiência.

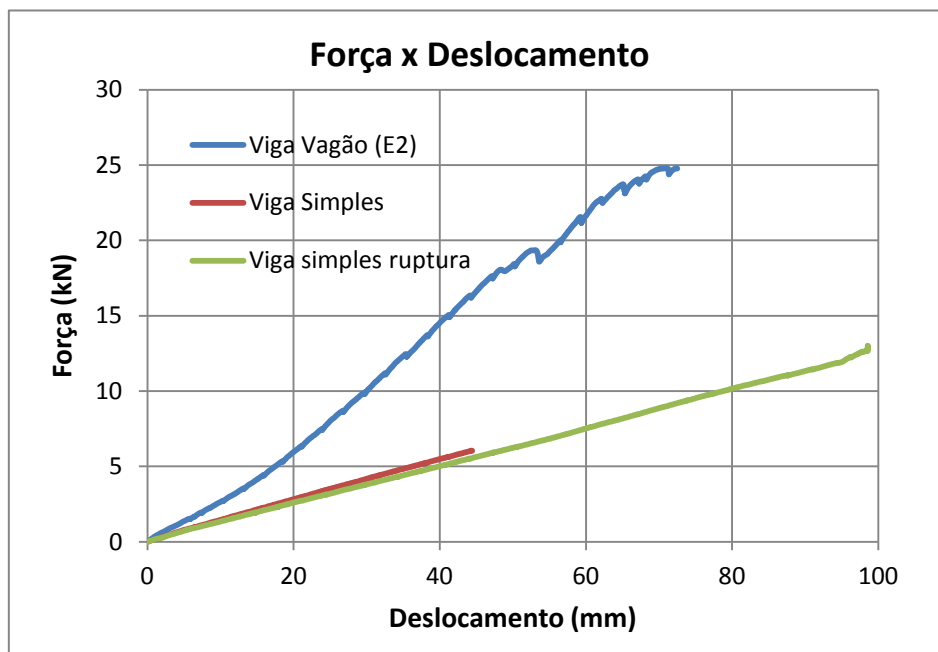


Figura 58 – Ensaio da viga V10

Enquanto a viga simples deslocou verticalmente mais de 100 mm para uma força de 14,15 kN, o sistema viga vagão gerou apenas um deslocamento de 39,2 mm, para a mesma força.

6.2.2.3 Viga V11

Para o sistema da viga V11, com seção transversal de 4,1 cm \times 9,2 cm, também não foi possível concluir o ensaio conforme o esperado, pois houve a ruptura do gancho que prende na anilha, de forma semelhante ao ocorrido com a viga V9.

Contudo, pela Figura 59 pode-se notar que a peça simples atingiu um deslocamento de 40 mm para uma força de 5,93 kN, enquanto o sistema com o cabo devidamente ajustado recebeu uma força cerca de 3 vezes maior para apresentar o mesmo deslocamento vertical.

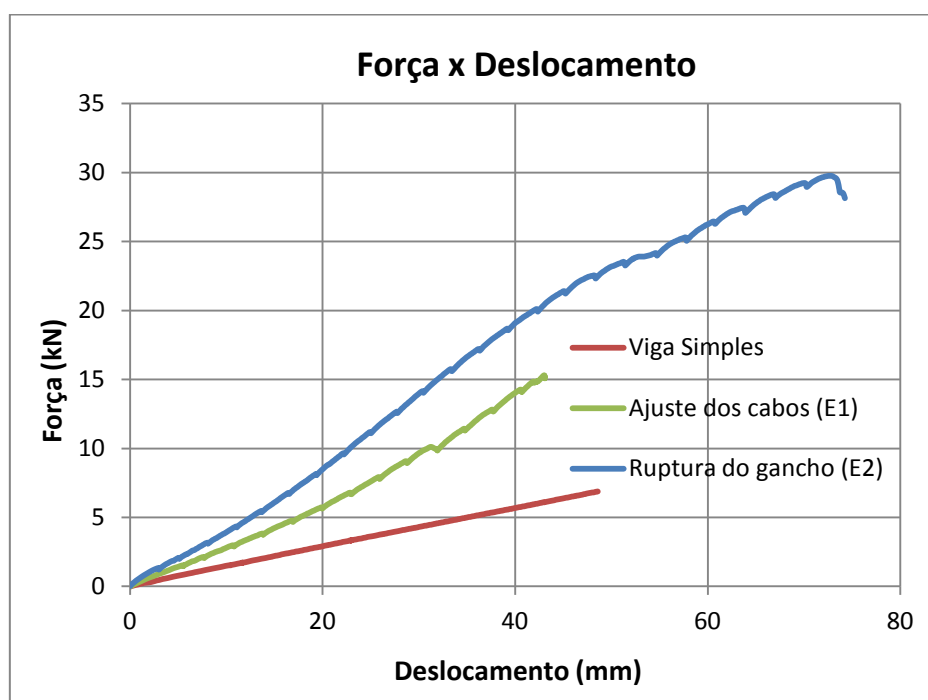


Figura 59 – Ensaio da viga V11

6.2.2.4 Viga V12

A viga V12, com seção transversal de 4,1 cm × 9,2 cm, foi a segunda viga simples levada a ruptura e, com a aplicação de uma força de 13,2 kN. O ensaio foi finalizado ao ser caracterizada de forma indiscutível a ruptura por tração das fibras inferiores (Figura 60).



Figura 60 – Ruptura da viga simples V12

6.3 ENSAIOS DE VIGAS COM A BARRA CIRCULAR

6.3.1 Tábuas de Pinus

A utilização de duas tábuas de Pinus foi uma tentativa de executar ensaios em vigas com vão acima de 200 cm. A restrição é função da disponibilidade do mercado. Há grande dificuldade de se encontrar peças desta espécie com seção transversal sólida e comprimento de 3 m ou mais. Outro aspecto é a qualidade do material. Considerando a disponibilidade no mercado de tábuas de Pinus com qualidade aparentemente aceitável, procedeu-se à esta série de ensaios em vigas de seção dupla pregada.

Para os ensaios com barra circular, a montagem foi feita conforme Seção 4.4.2 e nas vigas formadas por tábuas de Pinus foram utilizadas duas peças, colocadas justapostas formando uma seção transversal dupla, como ilustrado na Figura 61. A ligação, nas extremidades das peças, foi feita por meio de parafusos, ao longo da viga foram colocados alguns pregos apenas para maior estabilidade. Foram empregadas barras de aço com diâmetro de 6,3 mm e a chapa de dimensões 5 cm × 10 cm, com 3 mm de espessura ($\frac{1}{8}$ ").



Figura 61 – Detalhe das vigas formadas por tábuas de Pinus, com ligação parafusada

6.3.1.1 Viga V13

A viga V13 foi montada com seção transversal dupla de dimensões 12,05 cm × 4,30 cm. Foi ensaiada como viga simples (sem barras e sem cabo) e, posteriormente, foram fixadas as chapas de aço com a barra circular soldada nas mesmas, dando-se início à segunda etapa do ensaio como viga vagão.

Para uma força aplicada de aproximadamente 27 kN o perfil metálico que a distribui para a viga começou a tombar. O ensaio foi paralisado. Após descarregar o sistema para aprumar o perfil, notou-se que a viga voltou à posição original, porém a barra de aço havia deformado excessivamente e não retornou à posição de origem.



Figura 62 – Início do ensaio da viga de seção transversal dupla com barra circular

Com o afrouxamento da barra de aço, optou-se por trocar a barra de aço por cabo de aço, uma vez que não houve visível comprometimento da viga. Como esta já estava inutilizada, fez-se uma tentativa de reaproveitamento. Foi feito o ensaio para ajuste do cabo e posteriormente o ensaio “VV cabo de aço – RUPTURA”. Uma face da viga rompeu para uma força de 7 kN, quase quatro vezes menor do que a força suportada pelo sistema com barra circular, que foi paralisado antes de apresentar sinais de ruptura. Observa-se pelo diagrama da Figura 63 que o comportamento da viga foi linear, mesmo na segunda tentativa com o cabo de aço.

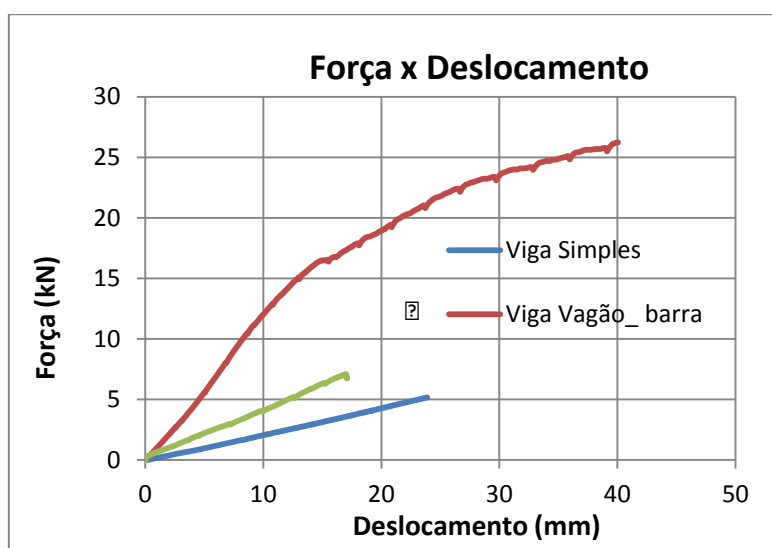


Figura 63 – Ensaio da viga V13



a) Viga com cabo de aço



b) Detalhe da ruptura da viga

Figura 64 – Viga V13: ensaios com o cabo de aço

6.3.1.2 Viga V14

A viga V14, também formada por tábuas de Pinus, foi primeiramente ensaiada como viga simples, sem a barra, e posteriormente foi carregada até o limite de 19,38 kN, momento em que uma das tábuas rompeu. Foi possível notar que durante o ensaio a viga flambou, assumindo a configuração de um “S”.



a) Viga no momento da ruptura, deformada lateralmente



b) Vista superior do ponto de ruptura



c) Detalhe do montante rompido

Figura 65 – Detalhes do ensaio da viga V14

Também foi notório o rompimento ocorrido no montante. A barra de aço, que trabalha como um tirante no sistema, transmite parte dos esforços absorvidos à viga, como força normal. A instabilidade lateral da viga pode ser resultado dessa força de compressão associada à flexão da viga.

Na Figura 66 tem-se a representação do comportamento das tábuas de Pinus trabalhando como estrutura simples e como viga vagão.

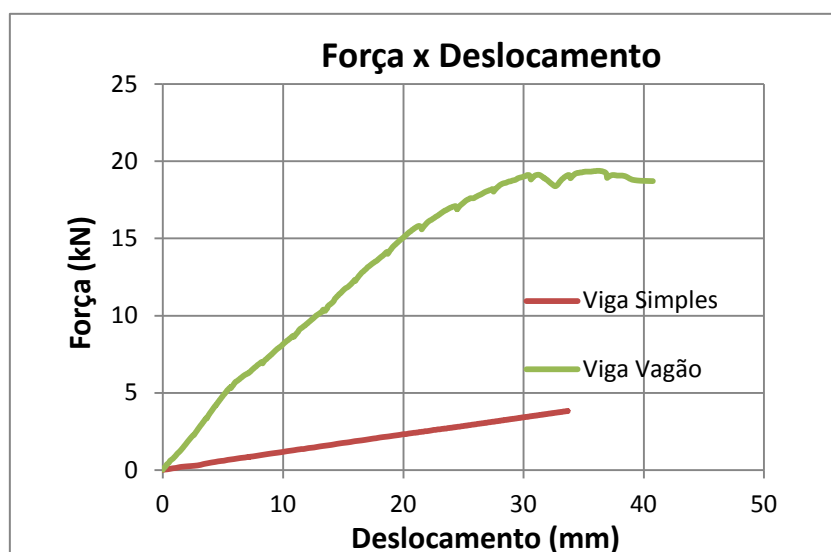
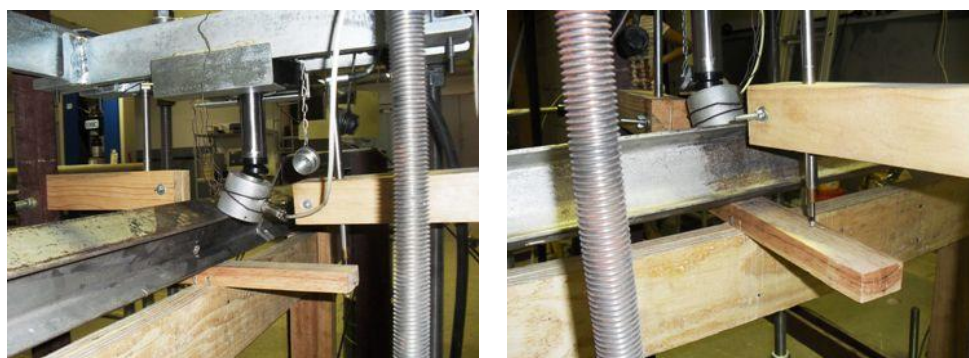


Figura 66 – Ensaio da viga V14

6.3.1.3 Viga V15

Viga V15 foi ensaiada como simples e, posteriormente, com a barra de aço. Apresentava seção transversal de $12,0 \text{ cm} \times 3,8 \text{ cm}$. Durante o ensaio a viga permaneceu aprumada, porém, com a força próximo a 21 kN, o perfil metálico tombou, conforme ilustrado na Figura 67.



a) Visão da esquerda para direita

b) Visão de trás

Figura 67 – Perfil metálico e célula de carga tombados no ensaio da viga V15

Quando descarregado o sistema, como o esperado, a peça de madeira voltou à sua posição original, contudo a barra de aço deformada permaneceu alongada.

Como o ensaio foi interrompido antes de qualquer sinal de ruptura da viga, decidiu-se refazer o ensaio mesmo com a barra “solta” dos montantes no início. Os acessórios foram reposicionados e foi colocado um calço sob a chapa que fica sob os roletes, a fim de evitar novo tombamento do perfil. O terceiro ensaio foi feito com a mesma viga e mesma barra de

aço, e devido à deformação inicial da barra, no começo do ensaio a viga trabalhou como viga simples, e próximo aos 20 mm de deslocamento a barra começou a trabalhar em conjunto com a viga de madeira. Pelo gráfico da Figura 68 é possível observar o comportamento dos sistemas.

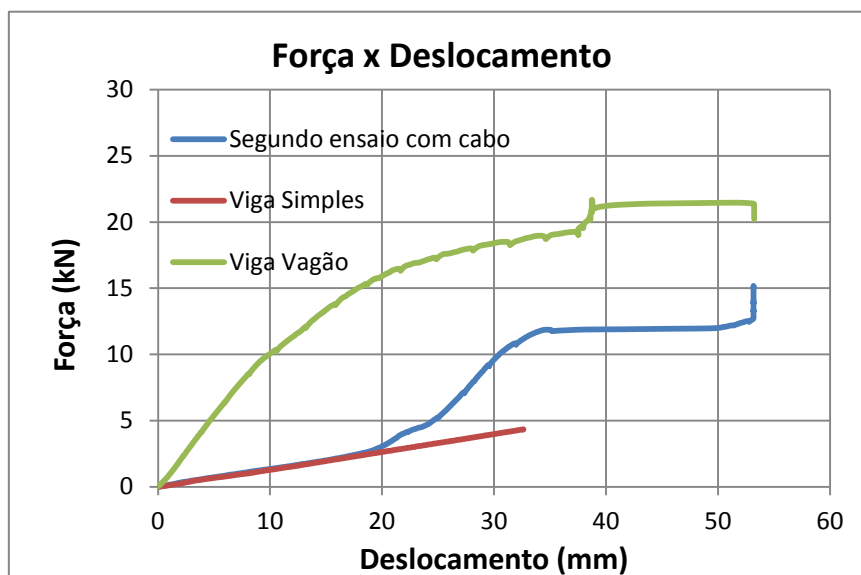


Figura 68 – Ensaio da viga V15

No segundo ensaio, a ruptura da viga se deu para uma força de 15,17 kN. Foi possível notar a mesma configuração em S assumida pela viga V14 (Figura 69). Para medir o deslocamento vertical do grupo de ensaios com barra circular foi utilizado um transdutor com capacidade máxima de 50 mm, o que impossibilitou a medição do deslocamento real no fim do ensaio.



Figura 69 – Flambagem da viga V15 durante realização do ensaio

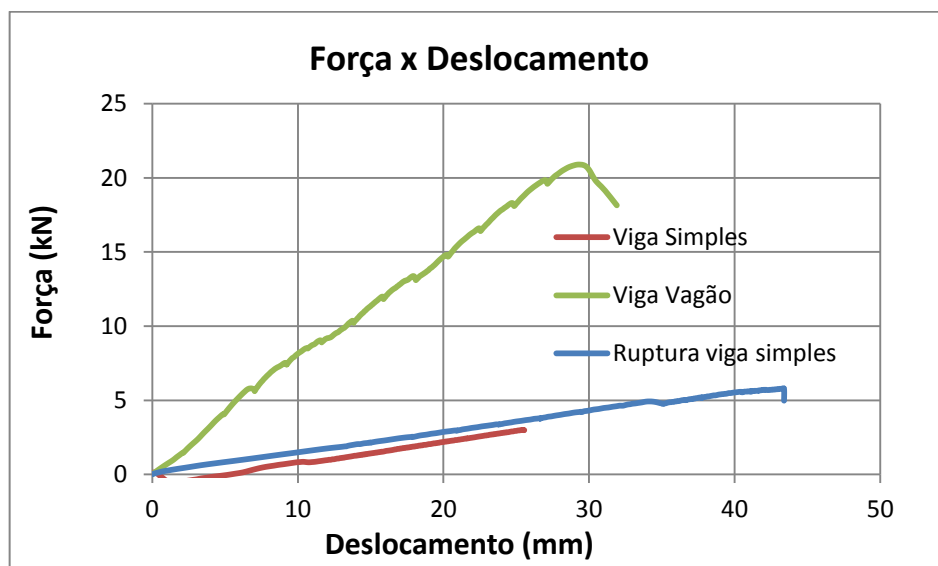
6.3.1.4 Viga V16

A viga V16 possuía seção transversal de 12,0 cm × 4,0 cm. Durante a realização do ensaio houve a mesma instabilidade lateral ocorrida nas demais vigas com tábuas de Pinus, fazendo com que durante o ensaio a V16 assumisse a configuração de “S” e o ensaio também foi paralisado devido ao tombamento do perfil metálico.

Como o aço havia deformado, foram retiradas as barras e feito um ensaio com viga simples de seção transversal dupla até atingir a ruptura.



a) Ruptura de uma das tábuas próximo ao nó



b) Representação gráfica do comportamento da viga V16

Figura 70 – Ensaio viga V16

6.3.1.5 Viga V17

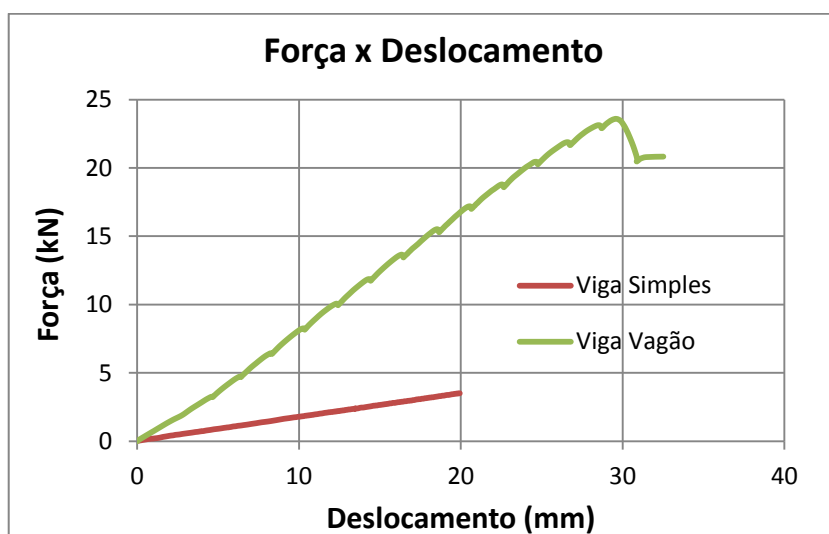
Com seção transversal $11,9 \text{ cm} \times 4,2 \text{ cm}$, a viga V17 teve seu ensaio semelhante aos demais para as vigas formadas por tábuas de Pinus. Quando atingiu a ruptura, verificou-se que a viga havia perdido a estabilidade lateral. O sistema atingiu a ruptura para uma força de 23,58 kN, com rompimento de uma das tábuas, conforme ilustrado na Figura 71.



a) Início do ensaio



b) Ruptura da viga



c) Comportamento da viga simples e viga vagão

Figura 71 – Ensaio da viga V17

6.3.2 Vigas de Angelim Vermelho

Foram montadas duas vigas de Angelim Vermelho, com vão livre de 290 cm, para o ensaio com as barras de aço. Foi seguido o procedimento normal, primeiro fez-se o carregamento do sistema para a viga simples, a fim de caracterizar o material e, posteriormente, como viga vagão, para análise da eficiência.

6.3.2.1 Viga V18

A viga V18, com seção transversal $3,9 \text{ cm} \times 9,3 \text{ cm}$, foi montada com barras de 6,3 mm de diâmetro, soldadas à chapa de 3 mm de espessura. Durante o ensaio da viga vagão houve a ruptura de uma das barras de aço, próxima à região de solda.



a) Viga no início do ensaio

b) Ruptura da barra de aço

Figura 72 – Ensaio da viga V18

Em análise superficial da peça de madeira, esta não estava danificada, portanto, foram retiradas as chapas da viga e feito um novo ensaio da viga V18 simples, até a ruptura. No gráfico da Figura 73 nota-se que a viga simples rompeu para a aplicação de uma força de 10,34 kN, para esta mesma força o sistema viga vagão apenas apresentou um deslocamento vertical de 10 mm.

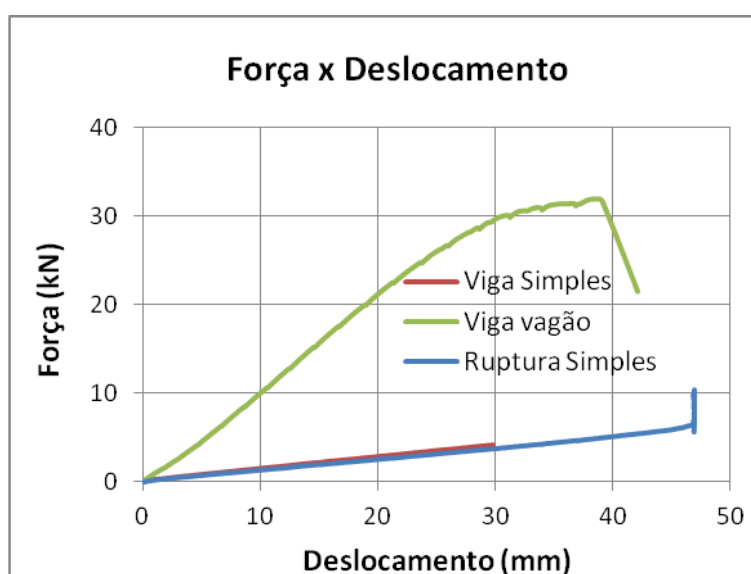


Figura 73 – Representação gráfica do ensaio da viga V18

6.3.2.2 Viga V19

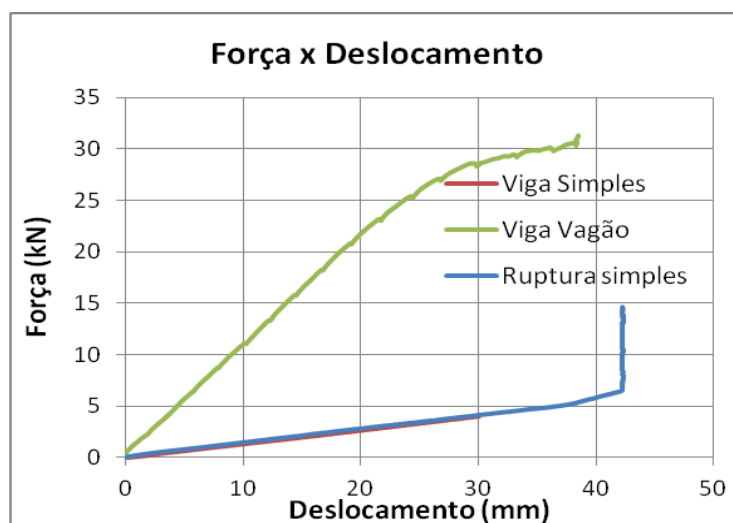
A viga V19, com seção transversal 3,8 cm × 9,1 cm, assim como a V18 foi rompida como viga simples. No ensaio da viga vagão houve tombamento dos montantes, assim, o ensaio foi paralizado com uma força de 31,86 kN, a deformação excessiva da barra impossibilitou a continuação do ensaio. Removidas as chapas com as barras, a viga foi ensaída novamente, atingindo uma força de 14,9 kN no momento em que rompeu.



a) Tombamento dos montantes



b) Ruptura como viga simples



c) Gráfico Força × Delocamento

Figura 74 – Ensaios da viga V19

6.3.3 Vigas de Pinus

As vigas V20 e V21 foram montadas com peças de Pinus serrada, com seção retangular. A barra circular, utilizada como tirante, foi soldada na chapa e esta fixada na madeira por meio de parafusos, como ilustrado na Figura 75.

O sistema foi montado para a viga com 200 cm de vão livre, ou seja, 30% menor que as outras vigas.

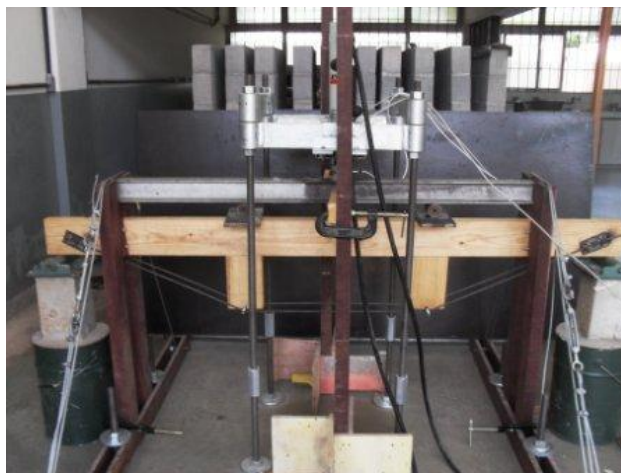


Figura 75 – Modelo viga de Pinus com barra de aço

6.3.3.1 Viga V20

A viga vagão V20 foi montada com uma peça principal de Pinus, com seção transversal 13 cm \times 4,5 cm e barra de aço de 6,3 mm. Após a paralisação do ensaio foi possível notar a grande deformação da peça de madeira na região do apoio. Por falha no experimento, não foi utilizada uma chapa de distribuição de tensões na região do apoio. Isto provocou um significativo esmagamento localizado do Pinus – Figura 76. Apesar disto, a ruptura se deu no centro da viga, para a aplicação de uma força de 34,3 kN.

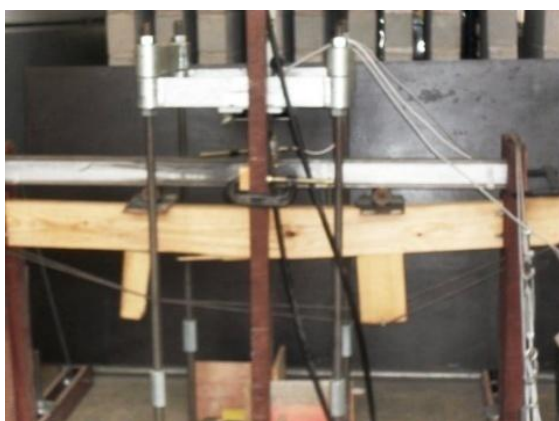


a) Viga apoiada no início do ensaio



b) Deformação da viga após o ensaio

Figura 76 – Detalhe da região do apoio antes e após ensaio



a) Peça rompida



b) Detalhe da seção rompida

Figura 77 – Viga V20 após ensaio

6.3.3.2 Viga V21

A viga V21, com seção transversal 13 cm \times 4,5 cm foi ensaiada primeiramente como viga simples. Foi observada a região de apoio da viga, mas ela não estava afetada, por se tratar da aplicação de uma força consideravelmente menor. No segundo ensaio, feito com a barra de aço fixada, foi possível notar abaulamento da peça nas regiões em contato com o aparelho de apoio, de forma semelhante ao ocorrido com a viga V20. O gráfico da Figura 78 exibe os resultados dos ensaios.

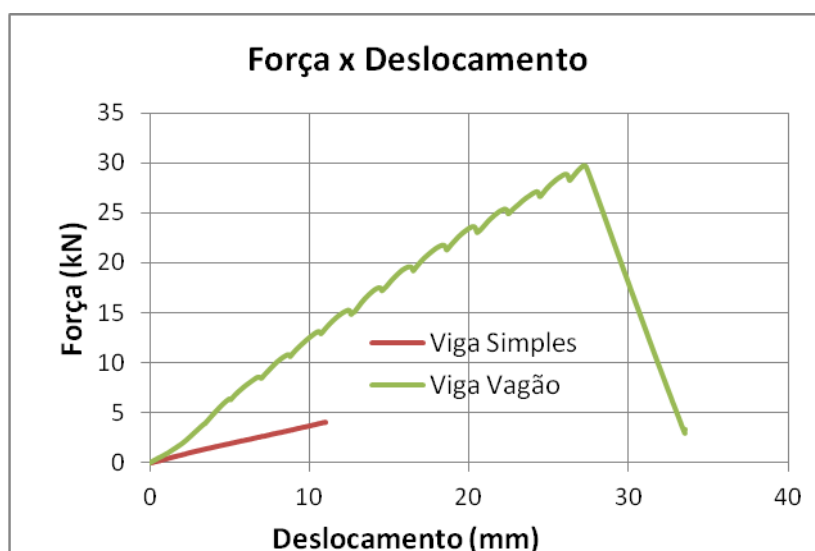


Figura 78 – Ensaio da viga V20

O sistema teve uma ruptura localizada no apoio do lado direito, para uma força de 29,71 kN. Pela Figura 79 nota-se que no momento de soldar a barra de aço na chapa houve um

aquecimento excessivo que causou a carbonização superficial da madeira. Após a ruptura foi possível observar que a profundidade da carbonização, em algumas regiões, chegou a 0,3 cm.



a) Ruptura na região de fixação da chapa



b) Viga vagão levada à ruptura

Figura 79 – Viga V21 no ensaio final

6.4 ANÁLISE EXPERIMENTAL × ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica foi realizada através do método dos elementos finitos, com o uso do software ANSYS®. A fim de facilitar a geração de dados, foi empregado o programa computacional, desenvolvido pelo orientador do presente trabalho, chamado de Viga Vagão.

O objetivo do programa é transformar os dados básicos da viga vagão em código APDL, que é entendido pelo ANSYS®. De maneira rápida e interativa o usuário preenche os dados da viga, ou do sistema que deseja analisar, e o programa computacional gera o arquivo que será lido e interpretado pelo ANSYS®. Assim, a análise de viga vagão pelo método dos elementos finitos é facilitada, pois não há perda de tempo em gerar o modelo numérico.

Na Figura 80 são mostradas duas telas de inserção de dados do programa computacional Viga Vagão. Para análise comparativa entre os resultados dos modelos experimentais e os resultados obtidos numericamente, foi necessário, inicialmente, a determinação do módulo de elasticidade de cada viga vagão ensaiada como viga simples.

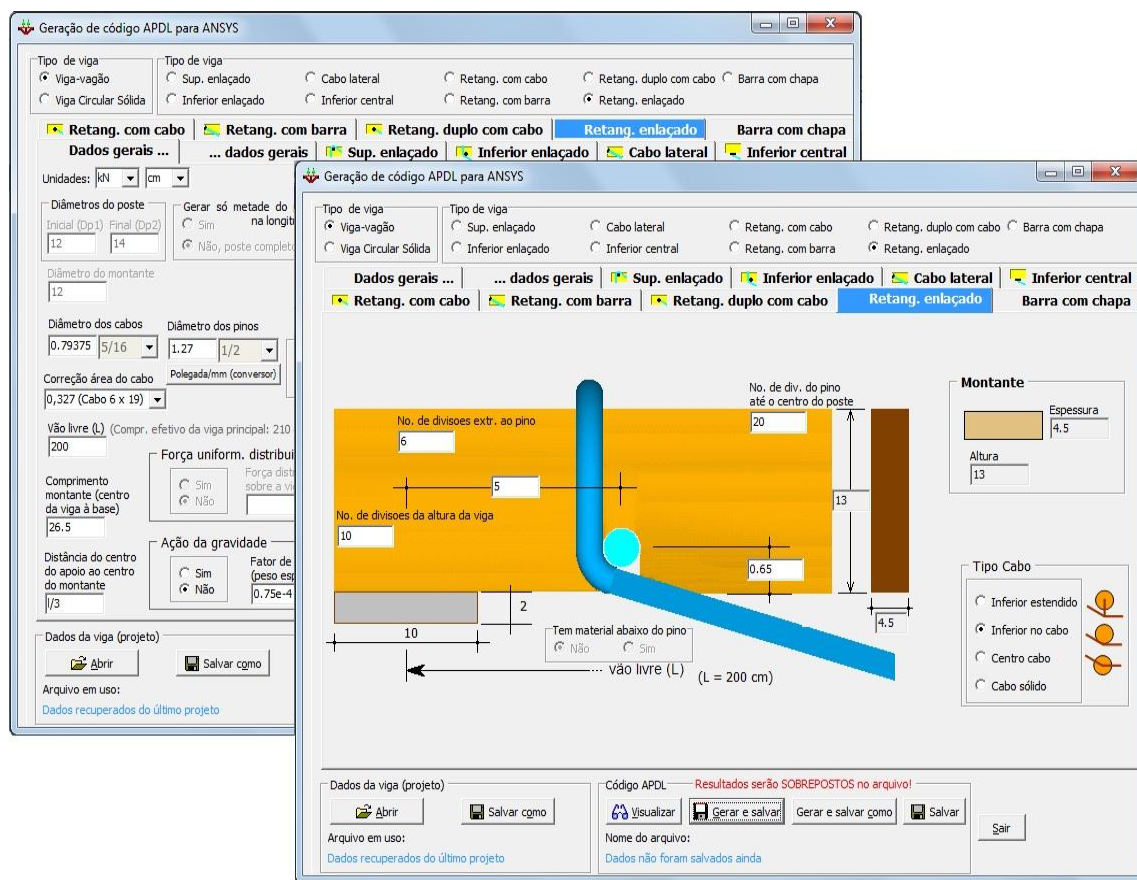


Figura 80 – Telas do programa Viga Vagão

Utilizando as formulações do Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), pode-se determinar o módulo de elasticidade das peças ensaiadas. Para viga biapoiada, com a força aplicada em dois pontos, conforme mostra a Figura 81, tem-se:

$$E = \frac{F \times a}{24 \times \delta \times I} (3 \times L^2 - 4 \times a^2)$$

Equação 6

Onde:

F = força aplicada

a = distância de aplicação da força ao apoio

L = vão livre

I = momento de inércia da seção transversal

δ = deslocamento no meio do vão

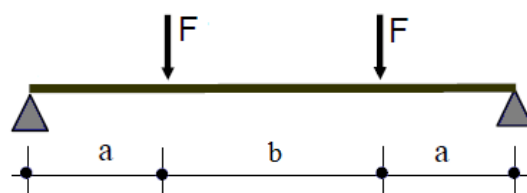


Figura 81 – Esquema do sistema ensaiado

Na Tabela 5 e a na Tabela 6 estão os valores encontrados para o módulo de elasticidade à flexão (E_{M0}) de cada peça do primeiro grupo ensaiado (sistema com cabo de aço).

Tabela 5 – Dados do ensaio com vigas de Pinus

Viga Pinus	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
$E_{M0}(\text{kN/cm}^2)$	723	1048	724	950	1020	859	697	1040
$F_{rup}(\text{kN})$ (viga vagon)	12,63	-	29,61	23,73	20,17	14,02	-	-
$F_{rup}(\text{kN})$ (viga simples)	-	-	-	-	-		15,614	15,96

Tabela 6 – Dados do ensaio com vigas de Angelim

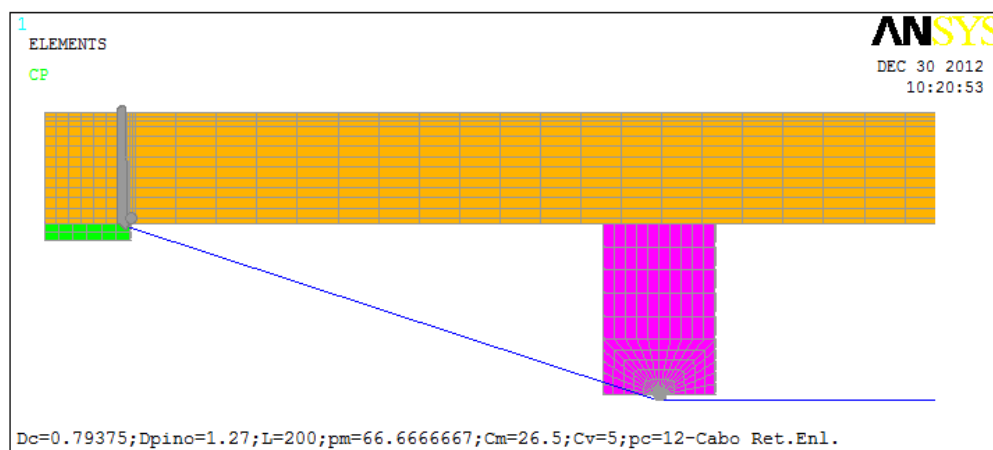
Viga Angelim	V9	V10	V11	V12
$E_{M0}(\text{kN/cm}^2)$	2419	2207	2321	2140
$F_{rup}(\text{kN})$ (viga vagon)	29,39*	-	28,07*	
$F_{rup}(\text{kN})$ (viga simples)	-	14,15	-	13,20

* Ruptura devida à abertura do gancho do esticador (não houve ruptura da viga)

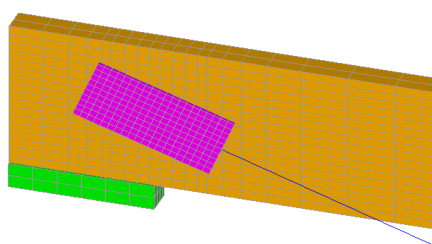
Com o valor do módulo de elasticidade definido para cada peça é possível fazer a análise numérica de forma mais realista utilizando o software viga vagon para gerar o modelo e posteriormente o ANSYS®, para o cálculo. Além disto, outros parâmetros também devem ser definidos. Para efetuar o cálculo pelo método dos elementos finitos, deve-se determinar a densidade da malha a ser gerada, especialmente para a viga principal, uma vez que influencia na precisão dos resultados.

Gesualdo e Cunha (2009) apresentaram um estudo sobre a interferência da densidade da malha nos resultados de três parâmetros principais, tais como: deslocamento, força no cabo e tensão normal. O estudo revela que a estabilização ocorre a partir de um número de divisões em torno de 40, embora a variação percentual das respostas seja bastante pequena, mesmo para número de divisões menores.

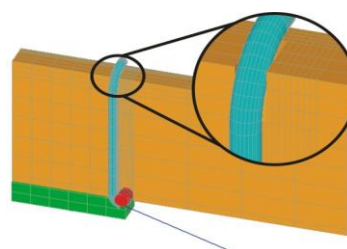
Assim, no presente trabalho foi empregada uma malha com 6 divisões da extremidade da viga ao pino e 15 divisões do pino ao centro da viga, ilustrada na Figura 82. Considerando a simetria da peça, foi utilizada uma malha de 42 divisões e empregados elementos retangulares do tipo SOLID45.



a) Densidade da malha para sistema viga vagão com cabo de aço



b) Sistema com chapa e barra de aço



c) Sistema com cabo de aço

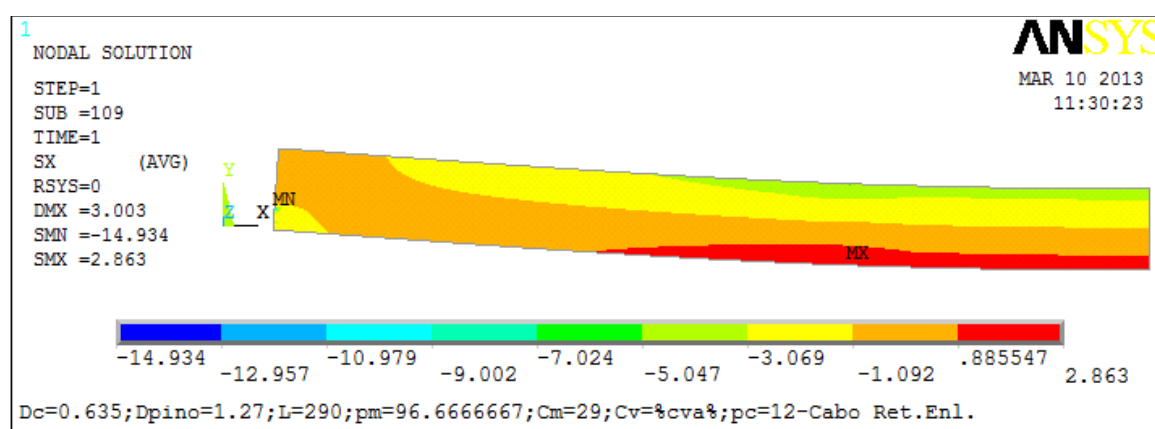
Figura 82 – Densidade da malha utilizada no cálculo pelo método dos elementos finitos

Para se obter resultados mais precisos, o modelo gerado pelo programa computacional Viga Vagão, leva em consideração as condições reais usando os elementos de contato, as condições de apoio e detalhes para fixação do cabo ou da barra na viga. Foi empregado um modelo tridimensional constituído por elementos sólidos, do tipo SOLID45, definido por 8 nós, com três graus de liberdade cada.

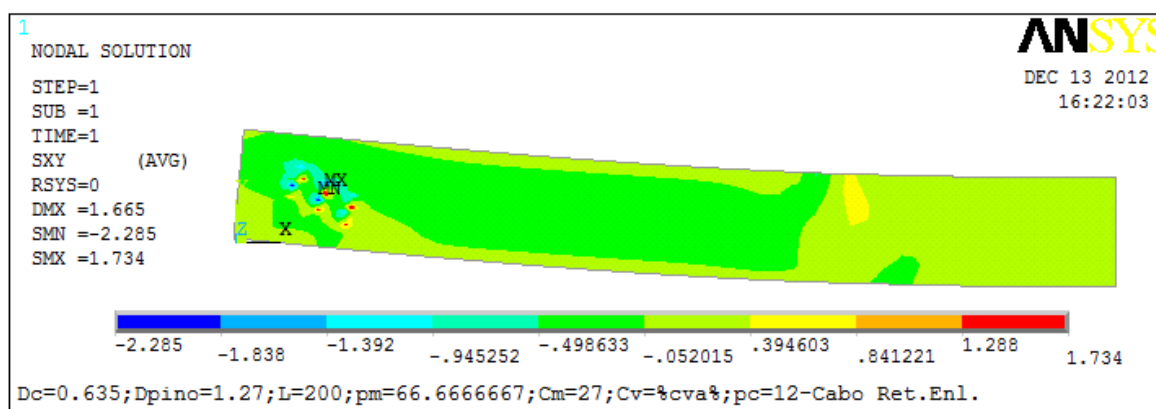
Para a modelagem dos pinos foi utilizado o elemento COMBIN39 que permite incluir a relação força \times deslocamento correspondente ao comportamento do pino. Além disso, foram considerados elementos do tipo LINK10 para representar o cabo contínuo e nas regiões com mudanças de inclinações ou contato, considerou-se o cabo como elemento tridimensional.

Através do código gerado pelo Viga Vagão, além do deslocamento, é possível avaliar as tensões normais e tangenciais para cada sistema. Na Figura 83 tem-se a representação da distribuição de tensões na viga.

Tanto para a viga com cabo de aço quanto para a viga com barra de aço, as concentrações de tensões mais significativas ocorrem nas regiões de contato entre a peça principal e o pino ou parafuso. Na Figura 83b é possível observar a tensão tangencial nas regiões de fixação das barras na viga.



a) Tensão normal (σ_x) na peça principal da viga vagão



b) Tensão tangencial (σ_{xy}) na peça principal da viga vagão

Figura 83 – Distribuição de tensões na viga vagão

Na Figura 84 tem-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos experimentalmente e os provenientes do cálculo por meio do método dos elementos finitos, para os sistemas com cabo de aço. Observou-se que para as vigas de Angelim o modelo foi satisfatório, com boa aderência às curvas obtidas experimentalmente. Contudo, para o Pinus há alguma variação entre o teórico e experimental. Em breve análise do conjunto, é notório que para as vigas

simples, independentemente da espécie da madeira, os resultados numéricos e experimentais são correspondentes, comprovando a eficiência do modelo numérico empregado (vigas V7, V8, V10 e V12).

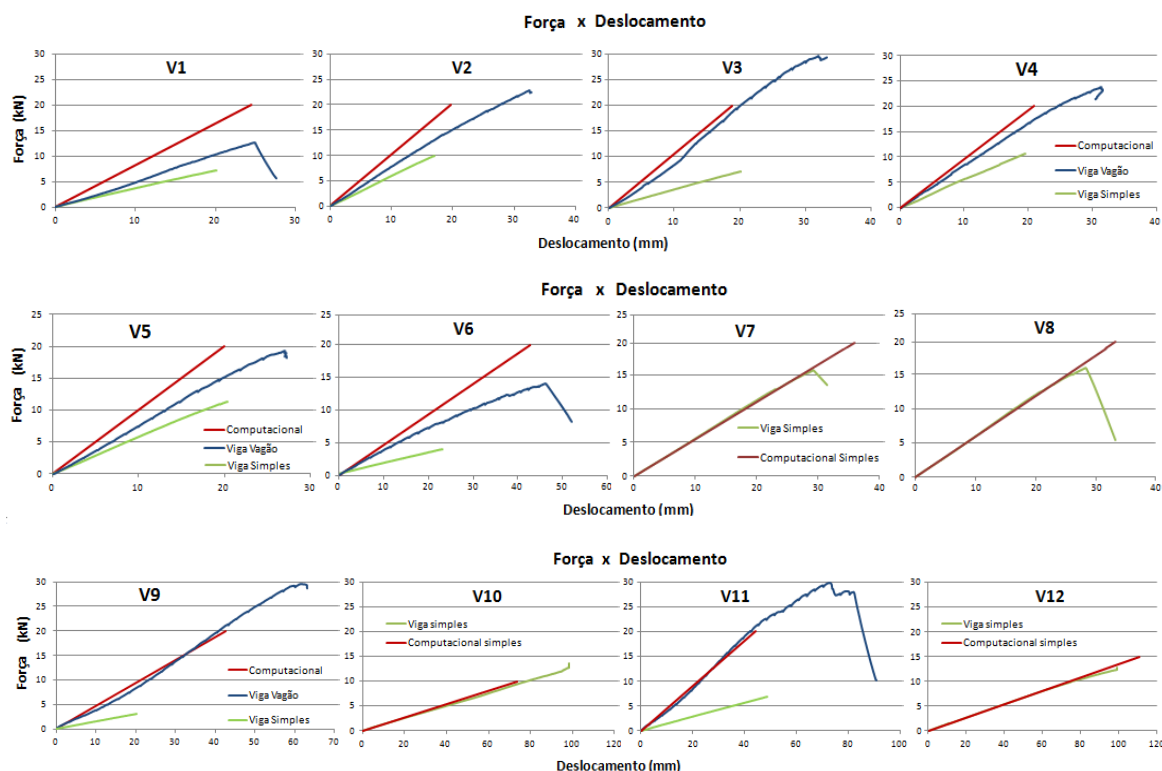


Figura 84 – Resultados numéricos e experimentais para sistema com cabo de aço: Vigas V1 a V8 são de Pinus, Vigas V9 a V12 são de Angelim

Para viga vagão, as peças de Angelim (V9 e V11) ficaram com resultados também muito próximos à realidade. As vigas de Pinus apresentaram alguma variação, ficando a V3, V4 e V6 com uma configuração satisfatória, enquanto as demais (V1, V2 e V5) apresentaram alguma diferenciação entre o resultado numérico e experimental. Tal variação pode ser justificada pela deformação do cabo de aço, pela dificuldade em obter o real módulo de elasticidade do mesmo e demais problemas de acomodação da viga ao longo do ensaio.

Os ensaios comprovaram a grande dificuldade no manuseio de peças de Pinus. A quantidade de pontos com defeitos (nós), às vezes não perceptíveis visualmente, além da baixa dureza do material proporcionam grande variação nos resultados.

As respostas positivas para as vigas de Angelim podem ter sido influenciadas pelo aumento do vão.

Para o sistema montado com barra circular, após a obtenção do módulo de elasticidade real, também foi feita a comparação entre as vigas ensaiadas em laboratório e os resultados numéricos obtidos por cálculos no Ansys, utilizando o programa computacional Viga Vagão. A Figura 85 exhibe a tela de inserção de dados no Viga Vagão para sistema de barra com chapa.

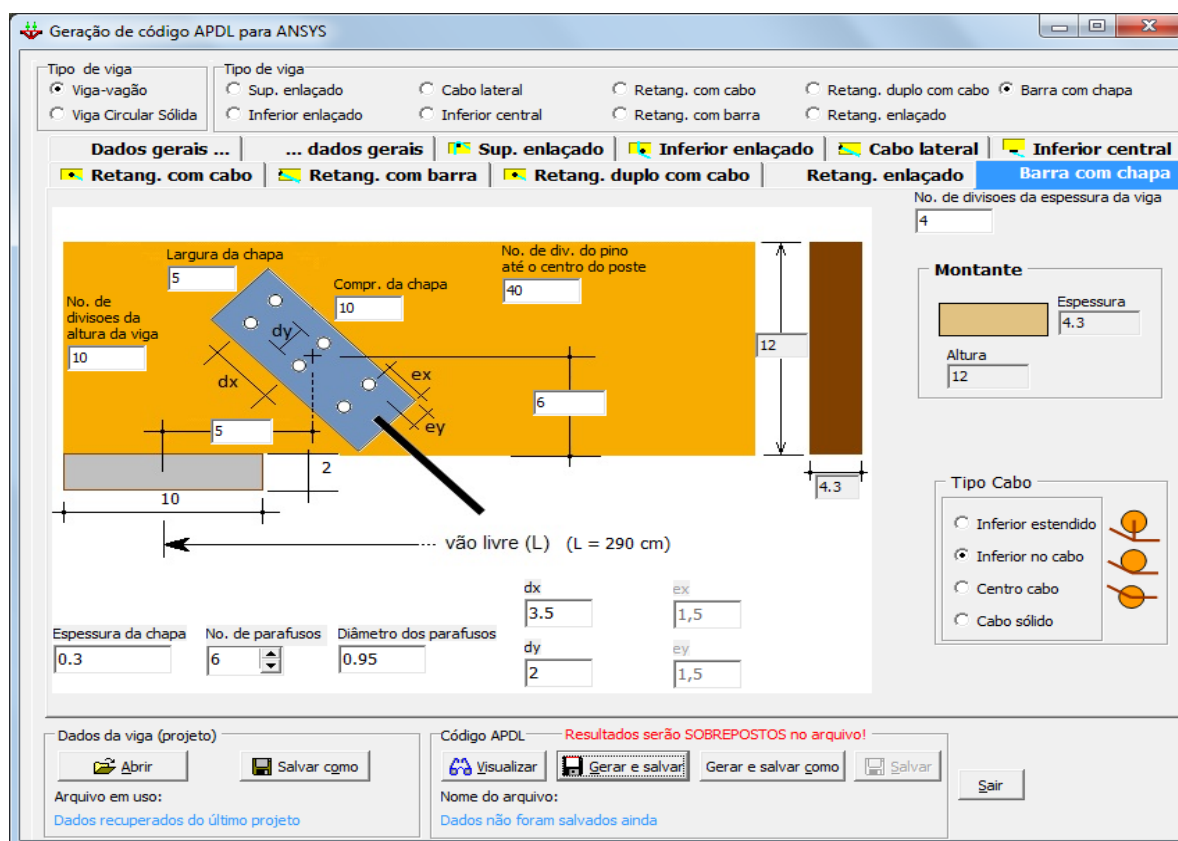


Figura 85 – Tela do programa computacional Viga Vagão para definição dos parâmetros do sistema barra com chapa

Na Tabela 7 e na Tabela 8 estão representados os módulos de elasticidade à flexão (E_{M0}) de cada viga ensaiada e a força máxima atingida durante o ensaio.

Tabela 7 – Dados do ensaio com vigas de Pinus

Viga Pinus	V13	V14	V15	V16	V17	V20	V21
$E_{M0}(\text{kN/cm}^2)$	1470	823	1046	799	1288	1258	636
$F_{rup}(\text{kN})$ (viga vagão)	7,1*	19,38	15,17	-	23,58	34,3	29,71
$F_{rup}(\text{kN})$ (viga simples)	-	-	-	5,9	-	-	-

* Ruptura da viga vagão com cabo de aço

Tabela 8 – Dados do ensaio com vigas de Angelim

Viga Angelim	V18	V19
$E_{M0}(kN/cm^2)$	2404	2408
$F_{rup}(kN)$ (viga vagão)	-	-
$F_{rup}(kN)$ (viga simples)	10,34	14,9

Na Figura 86 tem-se a análise comparativa entre os resultados obtidos experimentalmente e os provenientes do cálculo por meio do método dos elementos finitos, para os sistemas com barra de aço. De modo geral, observa-se que o modelo empregado foi satisfatório para representar a realidade.

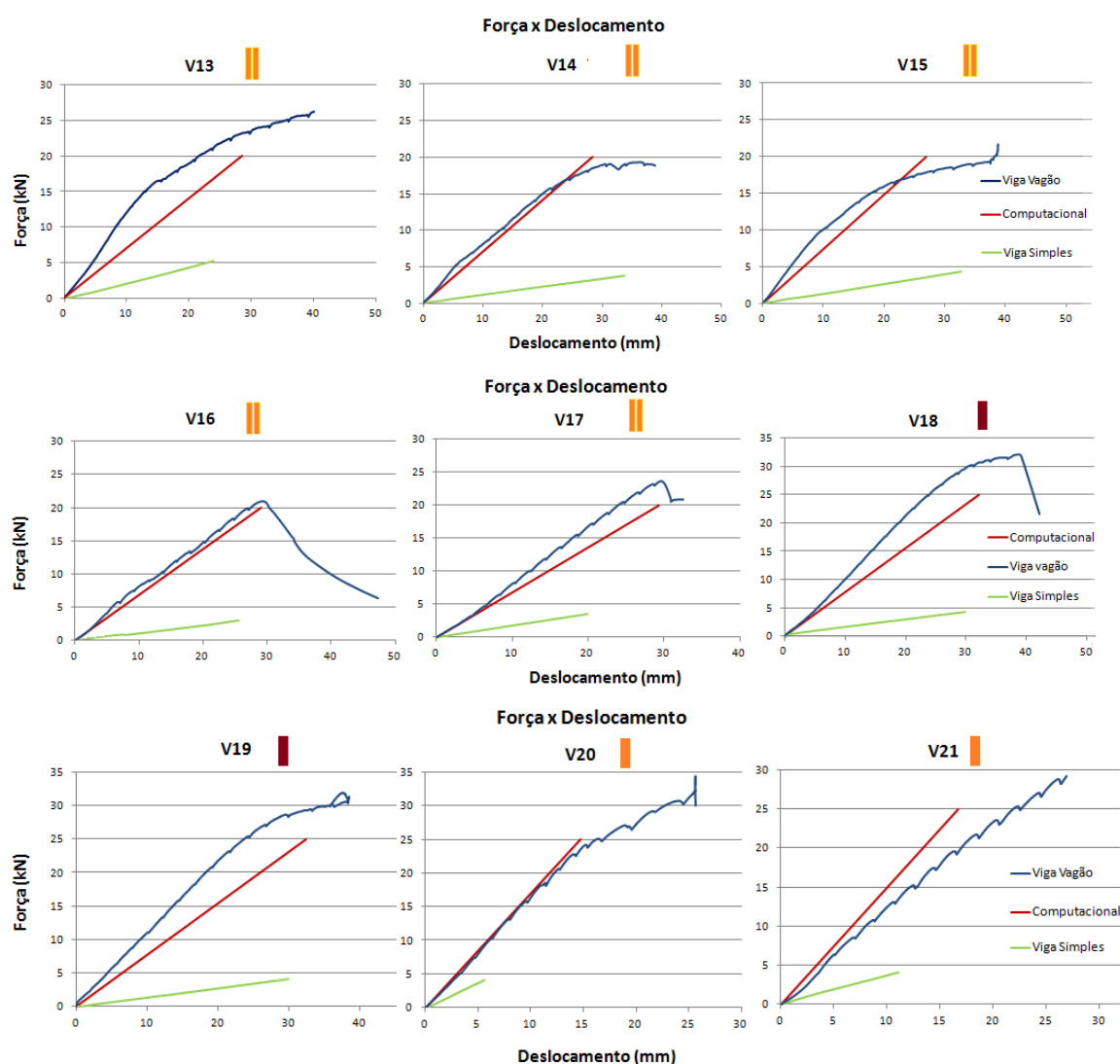




Figura 86 – Resultados numéricos e experimentais para sistema com barra circular de aço: Vigas V13 a V1

Da análise computacional feita para as cinco vigas montadas com tábuas de Pinus, formando uma seção transversal dupla, quatro apresentaram boa aderência às curvas obtidas experimentalmente. As vigas de Angelim Vermelho montadas com barra de aço, ao contrário do ocorrido para as vigas com cabo, apresentaram uma leve divergência entre os modelos. Em contrapartida, para as duas vigas de Pinus (V20 e V21) a curva experimental apresentou comportamento satisfatório, comparado com a curva gerada pelo modelo numérico.

Na análise comparativa entre os sistemas viga simples e viga vagão comprovou-se a eficiência do sistema estudado, o ganho de rigidez está representado na Tabela 9.

Tabela 9 – Ganho de eficiência do sistema viga vagão comparado com viga simples

Ganho de eficiência	Viga com cabo de aço 		Viga com barra circular de aço 		
	Pinus	Angelim	Pinus	Angelim	Tábuas de Pinus
Rigidez	71,07 %	147,12 %	159,71 %	623,01 %	517,71 %

Outra análise interessante é o grau de rigidez atingido quando se trata de vigas montadas com a barra de aço. Enquanto as vigas com cabo de aço apresentam uma maior facilidade de montagem, as vigas com a barra apresentam uma eficiência ainda melhor, para peças de Pinus, com 200 cm de vão livre, a rigidez aumentou em 71 % nos ensaios com cabo e 147 % nos ensaios com barra.

As vigas de Angelim Vermelho, por sua vez, haviam apresentado um aumento de rigidez de 147 % considerando o sistema viga vagão montado com cabo de aço em relação ao sistema de viga simples. Para as vigas com barra de aço, houve um ganho de rigidez da ordem de cinco vezes maior, passando para 623 % a relação entre viga simples e viga vagão.

6.5 ANÁLISE NUMÉRICA COM MODELO SIMPLIFICADO

Considerando que o ANSYS é um programa computacional pouco utilizado no mercado de trabalho, tanto pelo custo relativamente alto, quando comparado aos demais programas quanto pelo grau de sofisticação empregado, neste trabalho será apresentado também o cálculo realizado por um modelo simplificado.

No ANSYS o cálculo foi feito através do método dos elementos finitos. No Gestrut o cálculo é feito para um modelo mais simples, por considerar o sistema como reticulado. O objetivo é avaliar a eficiência – ou a perda de precisão – quando se utiliza um modelo de cálculo mais acessível à maioria dos projetistas, que no caso não considera os detalhes de posicionamento de chapas, cabos, fixações, deformações localizadas, nem transferência de tensões por contato.

O Gestrut – versão acadêmica – foi desenvolvido pelo orientador do trabalho. É um sistema para análise de estruturas tridimensionais reticuladas, com a vantagem de ter excelente interface com o usuário, uma vez que tem módulos especiais para geração de dados para este tipo de estrutura. O programa possui um banco de dados onde é possível determinar os elementos como a viga e os montantes de madeira e o tirante de cabo ou barra de aço. Pode-se criar novas seções e informar dados como densidade e módulo de elasticidade. Na Figura 87 exibe-se a tela principal do Gestrut, com a visualização da estrutura indeformada (pontilhada) e da estrutura deformada, devido a ação das forças concentradas inseridas.

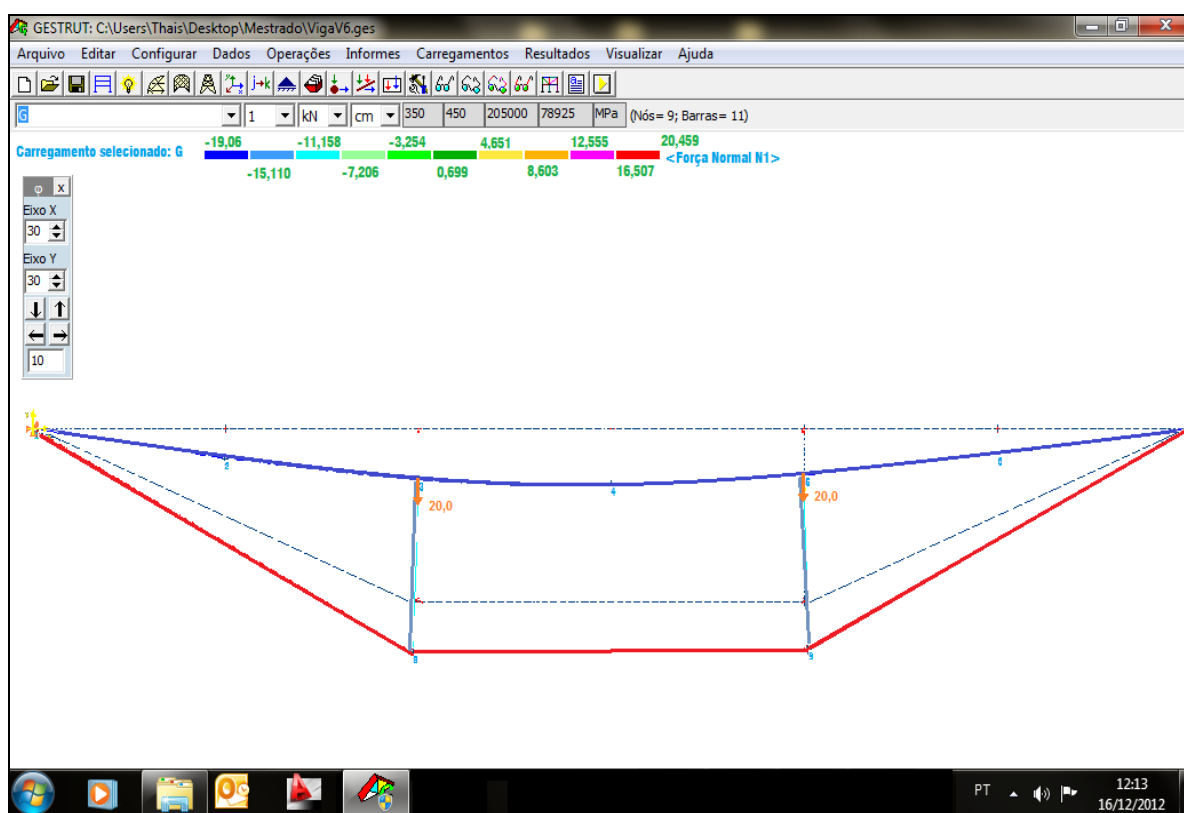


Figura 87 – Visualização da estrutura deformada no Gestrut

Os resultados obtidos pelo cálculo da estrutura como sistema reticulado foram comparados com os valores obtidos experimentalmente e também os valores numéricos provenientes do cálculo pelo método dos elementos finitos.

Para as vigas vagão de Pinus, montadas com cabo de aço (V1 a V6), o resultado do modelo gerado e calculado no Gestrut foi muito satisfatório, na Figura 88 estão representadas as curvas experimental e numéricas das vigas. Já as vigas de V7 e V8, também de Pinus, foram ensaiadas apenas como viga simples. É importante ressaltar que os gráficos apresentados a seguir possuem escalas horizontal e vertical diferenciadas, devendo ser observado cada gráfico isoladamente.

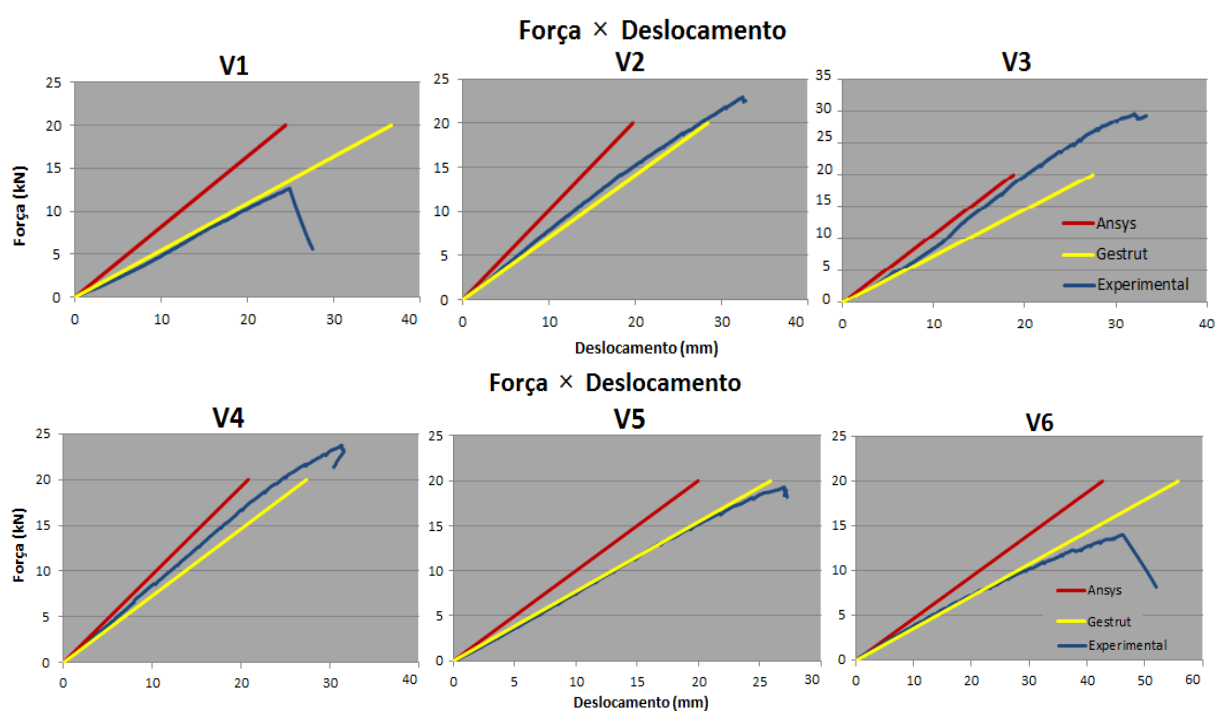


Figura 88 – Comparação entre modelos de cálculo para vigas de Pinus e cabo de aço

Para os sistemas montados com Angelim Vermelho e cabo de aço, nota-se que o cálculo no Gestrut apresentou excelente resultado para as vigas V10 e V11, ficando as curvas com boa aderência tanto à curva experimental quanto à curva gerada pelo cálculo no método dos elementos finitos. A viga V12 foi ensaiada apenas para caracterização da madeira, como viga simples.

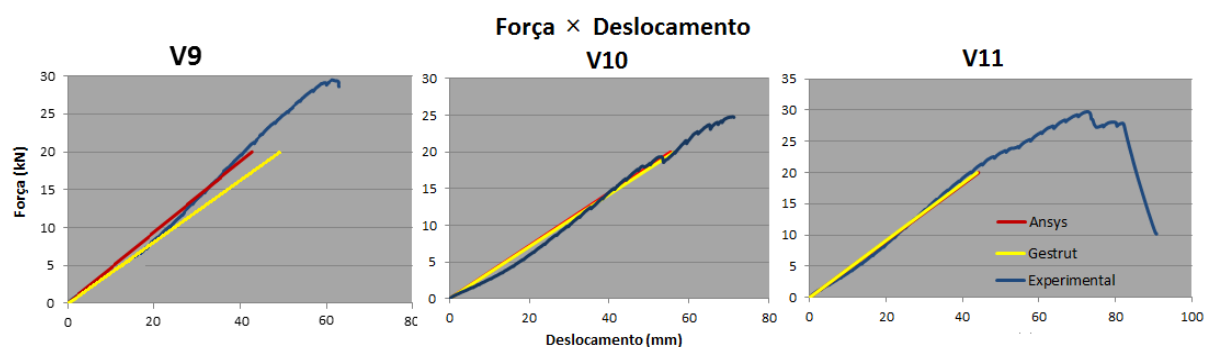


Figura 89 – Comparação entre modelos de cálculo para vigas de Angelim Vermelho e cabo de aço

De forma semelhante ao ocorrido para as vigas com cabo de aço, os resultados para viga vagão com barra circular calculados pelo modelo simplificado, também foram satisfatórios, independente do tipo de viga analisada (seção retangular maciça de Pinus, Angelim Vermelho ou seção transversal dupla). Na Figura 90 estão representadas as curvas para os resultados obtidos no laboratório e para os resultados numéricos, calculados pelos dois métodos.

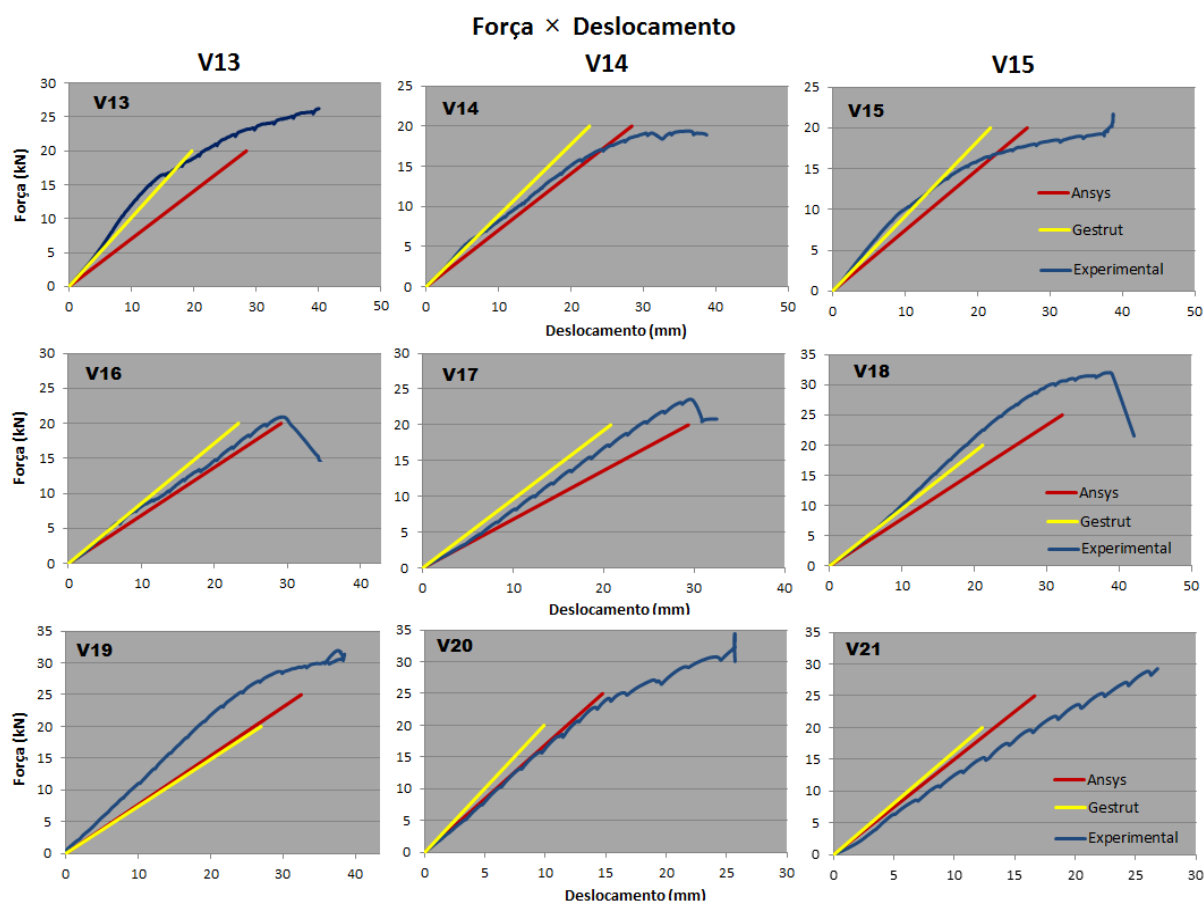


Figura 90 – Comparação entre modelos de cálculo para vigas com barra de aço

As análises efetuadas e os gráficos anteriormente expostos validam o uso do modelo simplificado para dimensionamento da estrutura viga vagão. O cálculo utilizando o software Gestrut (modelo reticulado) foi satisfatório quando comparado com o Ansys, tanto para o sistema de vigas com cabo, como também para o uso da barra de aço.

Outra vantagem relacionada ao uso do Gestrut é quanto à operacionalidade do sistema. Por existir um módulo específico para cálculo de viga vagão o usuário rapidamente monta o seu modelo e obtém as informações desejadas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DA PESQUISA

No estudo desenvolvido sobre o sistema estrutural viga vagão, constituído por uma peça principal de madeira e tirantes, foi analisado o comportamento do sistema com dois diferentes materiais: cabo de aço e barra circular de aço.

O sistema de viga vagão, com tirante tanto em forma de cabos de aço quanto em forma de barra de aço mostrou-se eficiente pela redução do deslocamento vertical, quando comparado com ensaios do sistema convencional de viga simples. Este estudo comprovou a viabilidade do uso deste tipo de arranjo estrutural por apresentar acréscimo significativo na rigidez (em torno de 71 % para o cabo de aço e 160 % para a barra de aço).

Contudo, devido à acomodação do feixe de fios e hastes que compõem o cabo de aço, este sofre deformações quando solicitado e necessita ser pré-esticado para a realização dos ensaios. Outro fator importante associado ao uso do cabo refere-se aos esticadores, que podem limitar a capacidade do sistema devido à abertura do gancho.

Para vigas de Pinus, com comprimento de 200 cm e inércia aproximada de 824 cm^4 , foram detectados problemas quanto à estabilidade lateral, situação desfavorável que dificilmente ocorrerá em obra, uma vez que serão utilizadas diversas peças interligadas para trabalharem conjuntamente. Assim, para melhor rendimento do sistema foi empregado um sistema de travamento lateral. As vigas de Angelim Vermelho, com comprimento de 290 cm e inércia de 266 cm^4 , apresentaram rendimento melhor que as de Pinus. Além da madeira ser mais resistente, o aumento do vão pode ter sido decisivo para esta resposta, conforme foi observado

anteriormente em análise numérica. Neste caso, o cabo foi mais solicitado, o que definiu a forma de ruptura.

Devido às limitações do cabo de aço, a título de análise de outro arranjo estrutural, foram empregadas barras de aço, o que necessitou de novo sistema de montagem das vigas. Na análise numérica feita previamente utilizando os softwares Viga Vagão e Ansys, a substituição do cabo pelas barras aumentaria significativamente a rigidez do sistema, fato que posteriormente foi comprovado nas análises experimentais realizadas no laboratório. Foi possível observar que vigas vagão com barra de aço são altamente viáveis quando analisados os parâmetros de deslocamento e força no cabo.

Quanto ao sistema montado com tábuas de Pinus, com seção transversal dupla, deve-se analisar melhor o método de fixação das tábuas para evitar que o esforço normal gerado pela barra de aço não seja fator limitante para a estabilidade do sistema. Há que ser observado que mesmo com o surgimento da instabilidade, a resposta foi positiva, definindo-se a instabilidade como modo de ruptura. No entanto, como já destacado, na prática o sistema terá travamento da borda comprimida de forma quase contínua, o que permitirá vigas mais eficientes, com forças limites iguais ou superiores às encontradas neste trabalho.

No que tange à avaliação numérica, foram feitos cálculos do sistema estrutural viga vagão no modelo reticulado, a fim de obter como orientação uma primeira análise mais simples e mais provável de ser utilizada no meio prático. A comparação dos resultados obtidos com os dados experimentais e com os resultados do cálculo pelo método dos elementos finitos demonstrou que o seu uso é satisfatório para qualquer um dos modelos.

Enfim, pode ser concluído que a eficiência do sistema de viga vagão apresenta um acréscimo de rigidez no sistema para vigas de Angelim Vermelho da ordem de 147 % para o uso de cabos de aço e 623 % para o uso de barras de aço. Para as vigas com densidade e resistência menores, como as de Pinus, o acréscimo de rigidez é de 71 % para sistema com cabo de aço e 160 % para sistema com barras de aço.

A vantagem do uso de cabo de aço é a sua flexibilidade e facilidade de montagem, pois não envolve soldas, nem preparação de peças adicionais. Além disto, a montagem e desmontagem são muito simples e, se necessário, permite sua desmontagem para o transporte. Outro aspecto

interessante é a facilidade do ajuste do cabo por meio do esticador. De outro lado, há o inconveniente do pré-esticamento devido à acomodação dos fios à medida que o cabo é solicitado.

O uso das barras de aço confere maior eficiência ao sistema, porém são inconvenientes quanto ao processo de montagem, exigindo processo de soldagem e bastante cuidado na fixação. A barra, dobrada previamente, ao ser soldada nas chapas exige um ajuste perfeito às dimensões do seu contorno, para que fique sem folgas no contato com os montantes, permitindo o funcionamento da viga, mesmo com pequenas solicitações.

O uso do Pinus é bastante interessante, especialmente pela sua baixa densidade. No entanto, exige cuidados especiais, devido à sua dureza, afetando o seu transporte e o seu posicionamento (prumo), pois pode representar um detalhe para a falha do sistema. Outro fator complicador é a sua disponibilidade no mercado, talvez pela falta de tradição do seu uso, os fornecedores oferecem um produto de baixa qualidade, com muitos defeitos e dimensões limitadas.

Finalmente, pode ser afirmado que o sistema de viga vagão é uma opção bastante interessante, com destaque ao seu baixo peso e alta resistência e rigidez, pois reúne materiais de forma harmônica: a madeira com baixa relação densidade/resistência e o aço solicitado por tração que, portanto, gera elementos também muito leves, por trabalhar na forma de tirantes. É um sistema que pode ser empregado em diferentes situações, como em sustentação de fôrmas, coberturas, pontes etc. Não há restrição de uso e pode ser montada com qualquer espécie de madeira. É uma opção para o mercado, que pode ser construída de forma simples e rápida.

A fim de aproveitar ao máximo a eficiência do sistema, outras opções para realização da ligação da barra de aço com a viga de madeira, são importantes sugestões para pesquisas futuras. Além disto, pode-se desenvolver também, alternativas para industrializar o processo construtivo das vigas vagão.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 6118:** Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007

_____. **NBR 14931:** Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004

_____. **NBR 15696:** Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro, 2009

CABOPEC. **Conhecendo melhor os cabos de aço.** Disponível em <http://www.cabopec.com.br/portal/node/8> Acesso em: 15 abr. 2012.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Agriambi: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, v. 1, n. 1, p.71-77, set./dez. 1997.

CARPINTERIA. **Vigas Vagão Curvas.** Disponível em: <http://estruturasdemadeira.blogspot.com.br/2007/04/armstrong-spallumchem-arena-vigas-vago.html> Acesso em: 10 ago. 2011.

CASAPRO. **Projetos Casa Eucaliptos 7.** Revisado em dez. 2009. Disponível em: <http://pro.casa.abril.com.br/photo/casa-eucaliptus-8-1/next?context=user> Acesso em: 20 jan. 2011.

CENTRO OESTE. **Características de vagões.** Disponível em: <<http://vfco.brazilia.jor.br/vag/vagALL/peb.shtml>>. Acesso em: 05 mar. 2012.

COSTA, A. **Coletâneas de Anatomia da Madeira.** Faculdade de Biologia. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2001. 42 p. Apostila.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** Lisboa: LNEC, 1988. 1 v.

DA FONTE, T. F., CALIL JUNIOR, C. Pontes protendidas de madeira: alternativa técnico-econômica para vias rurais. In: JORNADA DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2., 2007, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: Construções Rurais e Ambiência, 2007. v. 27, n. 2.

DIMIBU MULTIFORMA. **Concretubo.** Catálogo on line. Disponível em: <<http://www.dimibu.com.br/catalogo.pdf>> Acesso em: 09 abr. 2012.

EDILPORTALE. **Rinforzo Strutturale per travi lamellari.** Disponível em: <http://www.edilportale.com/prodotti/cenci-legno/rinforzo-strutturale-per-travi-lamellari/legno-armato_2134.html> Acesso em 05 mar. 2012.

FAJERZTAJN, H. A escolha do sistema de fôrmas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE CONSTRUÇÃO, 2, 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1986. p. 171-180.

FARIA, R. **Garantia de boa estrutura.** Revista Tchne. São Paulo, n. 115, out. 2006. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/115/imprime32969.asp>> Acesso em: 04 dez 2010.

GESTRUT: Análise de estruturas tridimensionais reticuladas. Versão educacional. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2010. Software.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de Madeira:** Notas de Aula. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2011. 93 p. Apostila.

GESUALDO, F. A. R.; CUNHA, T.A. Two wood inverted trussed beams using transverse steel pins evaluated via finite element method compared with reticulated system. In: III JORNADAS CHILENAS DE ESTRUCTURAS DE MADERA Y EL I CONGRESO LATINO AMERICANO DE ESTRUCTURAS DE MADERA, 2009, Concepcion. **Anais...** Concepcion-Chile, 2009. p. 1-13.

GESUALDO, F. A. R.; CUNHA, T.A. Efeito da rigidez de cabos de aço e barras circulares em vigas vagão de seção transversal retangular de folhosas e coníferas. In: CIMAD 2011 1º CONGRESSO IBERO-LATINO AMERICANO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, 2011, Coimbra. **Anais...** Coimbra-Portugal, 2011. p. 1-10.

GESUALDO, F. A. R., LIMA, M. C. V. Avaliação de vigas de madeira reforçadas com tirantes metálicos. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9, Cuiabá, 2004, **Anais...** Cuiabá: EdUFMT, 2004. 1 CD-ROM. 12 p.

HERZOG, T.; NATTERER, J.; SCHWEITZER, R.; VOLZ, M.; WINTER, W. **Timber Construction Manual**. Basel: Birkhauser, 2008. 375 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT
Fichas de Características das Madeiras Brasileiras. Disponível em:
<http://www.ipt.br/informacoes_madeiras.php?qual=informacoessobremadeira> Acesso em:
20 jun. 2012

JESUS, M. A.; MORAIS, J. W.; ABREU, R. L. S.; CARDIAS, M. F. C. Durabilidade natural de 46 espécies de madeira amazônica em contato com o solo em ambiente florestal. **Scientia Forestalis**, São Paulo, n. 54, p. 81-92, dez. 1998.

CIMAF. **Manual técnico de cabos de aço.** Disponível em:
<<http://www.cimafbrasil.com.br/publica.php>> Acesso em: 21 nov. 2011

MELCHIORETTO, D.; ELEOTÉRIO, J. R. Caracterização, classificação e comparação da madeira de *Pinus patula*, *P. elliottii* e *P. taeda* através de suas propriedades físicas e mecânicas. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 18., 2003, Blumenau. **Anais...** Blumenau: FURB, 2003. 5 p.

NAZAR, N. Fôrmas e Escoramentos para edifícios: Critérios para dimensionamento e escolha do sistema. 1. ed. São Paulo: PINI, 2007. 173 p.

PECUÁRIA NA AMAZÔNIA gera 44% das emissões. **Referência:** a revista da indústria da madeira. Curitiba, n. 95, p. 78, set. 2009.

PFEIL, W. **Cimbramentos**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 1987. 431p.

PINUS na Silvicultura Brasileira. **REMADE: Revista da Madeira**. Curitiba, n. 99, set. 2006.

REBELLO, Y.C.P.; BÓGEA, M. V. **Geometria dos elementos estruturais: Uma chave para a compreensão do comportamento estrutural**. Integração, 2004. Disponível em: <[ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/127_37.pdf](http://ftp.usjt.br/pub/revint/127_37.pdf)> Acesso em: 6 dez. 2010.

RITTER, M. A.; FAHERT, K. F. Miscellaneous wood structures. In: FAHERTY, K. F.; WILLIAMSON, T. G. **Wood engineering and construction**, 3. ed. Boston: McGraw Hill, 1999, p. 66-76.

RODRIGUES, R. M. S. C. O. **Construções antigas de madeira: Experiência de obra de reforço estrutural**. 2004, 287 f. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade do Minho. Minho, 2004.

SÁLVIO, F. E. C.; MEDINA, H. V. Produção Sustentável de Aço no Brasil. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16. 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 160-166.

SOUZA, M.H.; MAGLIANO, M.M.; CAMARGOS, J.A.A. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. 2. Ed. Brasília: IBAMA/LPF - Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente E Dos Recursos Naturais Renováveis /Laboratório de Produtos Florestais, 1997. 152 p.

VITRUVIUS. **Projeto Casa Grelha**. Forte, Gimenes & Marcondes Ferraz Arquitetos. Disponível em: <<http://vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/11.131/4072?page=3>> Acesso em: 09 nov. 2011.