

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS EM MADEIRA,
COM SEÇÃO I, DE MESAS EM PINUS MACIÇO E ALMA EM OSB

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

ANDRÉ LUIZ LIMA

FLORIANÓPOLIS, 18 DE MARÇO DE 2005

“COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS EM MADEIRA,
COM SEÇÃO I, DE MESAS EM PINUS MACIÇO E ALMA EM OSB”

ANDRÉ LUIZ LIMA

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof^ª. Henriette Lebre La Rovere – Coordenadora do PPGEC

Prof. Dr.-Ing. Carlos Alberto Szücs – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dr. Alfredo Petruski - UNIOESTE

Dr.-Ing. Poliana Dias de Moraes - ECV/UFSC

Henriette Lebre La Rovere, Ph.D. - ECV/UFSC

Dedicado à
Heloisa I. de Jesus Lima
amada esposa
que me apoiou e incentivou
na realização do Mestrado.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida...

Ao professor Carlos Alberto Szücs pela orientação no trabalho, confiança e amizade...

Aos amigos Altevir Castro dos Santos e Gustavo Lacerda Dias, parceiros na realização deste trabalho e à Joana Geraldí Velloso pela presteza que sempre atendeu nossas solicitações junto ao GIEM, bem como pela amizade sincera...

Aos estagiários Caroline Strutzel Striani, Rafael Andrigheto, Willian Pescador pela colaboração na realização dos ensaios e ao Edi Assini Júnior pela confecção de alguns dispositivos de ensaio...

Aos professores Ângela do Vale, Felix Alberto Díaz Díaz e Henriette Lebre La Rovere pela participação na banca de qualificação na qual trouxeram inúmeras contribuições...

Aos professores Alfredo Petruski, Poliana Dias de Moraes e Henriette Lebre La Rovere pela participação na banca de defesa final...

À empresa MASISA do Brasil pela doação das chapas de OSB, à empresa BATISTELA pela doação do Pinus, à CIM DO BRASIL pela doação dos pregos, utilizados na confecção das vigas...

Ao CNPq pela bolsa de pesquisa concedida...

Ao Grupo Interdisciplinar de Estruturas de Madeira – GIEM por abrir sua portas e ceder sua infra-estrutura para que este trabalho pudesse ser realizado...

Aos professores que transmitiram seus conhecimentos nas disciplinas e demais pessoas e amigos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho...

...Muito Obrigado

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Objetivo geral	13
1.3 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Chapas de madeira reconstituída	14
2.1.1 Processo de fabricação do OSB.....	16
2.2 Viga I em madeira	18
2.2.1 Critérios de dimensionamento	19
2.2.2 Pré-fabricação na indústria	20
3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	21
3.1 Pinus	21
3.1.1 Umidade e densidade.....	24
3.1.2 Compressão paralela às fibras	25
3.1.3 Flexão	27
3.1.4 Resultados referentes à caracterização do Pinus	29
3.2 OSB	30
3.2.1 Flexão estática	31
3.2.2 Cisalhamento	36
3.2.3 Resultados referentes à caracterização do OSB	38

4	LIGAÇÃO PREGADA ENTRE A ALMA E AS MESAS.....	40
4.1	Ensaio preliminares.....	40
4.2	Primeira bateria	42
4.2.1	Conclusões relativas à 1ª bateria de ligações.....	52
4.3	Segunda bateria	53
5	CONFECÇÃO DAS VIGAS.....	57
6	ANÁLISES E ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	63
6.1	Análise teórica	63
6.2	Dimensionamento pelo Eurocode 5.....	66
6.3	Modelagem e análise pelo método dos elementos finitos	68
6.4	Análise experimental	70
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
7.1	Formas de ruptura das vigas	76
7.2	Análise estatística	78
7.3	Comparação entre os métodos analíticos, numéricos e a análise experimental	80
7.4	Comparação entre as análises numérica (MEF) e experimental.....	84
7.5	Comparação entre os modelos de elementos finitos 1 e 2.....	86
8	CONCLUSÕES	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Módulo de elasticidade das mesas de Pinus obtidas no ensaio expedito.....	23
Tabela 2 – Resumo da caracterização do Pinus.....	30
Tabela 3 – Resumo da caracterização do OSB 12 mm.....	39
Tabela 4 – Resumo da caracterização do OSB 18 mm.....	39
Tabela 5 – Análise estatística Anova com relação à $F_{m\acute{a}x}$ para ligações com OSB 12 mm	47
Tabela 6 – Classificação das ligações com OSB 12 mm quanto ao critério $F_{m\acute{a}x}$	48
Tabela 7 – Análise estatística Anova com relação à K_s para ligações com OSB 12 mm	49
Tabela 8 – Classificação das ligações com OSB 12 mm quanto ao critério K_s	49
Tabela 9 – Análise estatística Anova com relação à $F_{m\acute{a}x}$ para ligações com OSB 18 mm	50
Tabela 10 – Classificação das ligações com OSB 18 mm quanto ao critério $F_{m\acute{a}x}$	51
Tabela 11 – Análise estatística Anova com relação à K_s para ligações com OSB 18 mm.....	51
Tabela 12 – Resultado da 2ª bateria para as ligações com OSB de 12 mm.....	55
Tabela 13 – Resultado da 2ª bateria para as ligações com OSB de 18 mm.....	56
Tabela 14 – Mesas para as vigas de 12 mm	59
Tabela 15 – Mesas para as vigas de 18 mm	59
Tabela 16 – Anova com relação à $F_{m\acute{a}x}$ para as vigas com alma de 12 mm.....	78
Tabela 17 – Classificação das vigas com alma de 12 mm quanto ao critério $F_{m\acute{a}x}$	79
Tabela 18 – Anova com relação à $F_{m\acute{a}x}$ para as vigas com alma 18 mm.....	79
Tabela 21 – Classificação das ligações com alma de 18 mm quanto ao critério $F_{m\acute{a}x}$	79
Tabela 24 – Força máxima para as vigas I	81
Tabela 25 – Rigidez para as vigas com OSB de 12 mm.....	82
Tabela 26 – Rigidez para as vigas com OSB de 18 mm.....	83
Tabela 27 – Deslocamento no meio do vão para uma carga de 1000 daN, em mm.....	87
Tabela 28 – Tensões obtidas para as vigas I.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Chapa estrutural OSB. (fonte: MASISA, 2000)	14
Figura 2 – Utilização do OSB em vigas I e em paredes. (fonte: www.apawood.org).....	15
Figura 3 – Processo de fabricação do OSB. (fonte: www.osbguide.com/manufacturing.html)....	17
Figura 4 – Identificação das peças de Pinus com seção de 30x30 mm.	22
Figura 5 – Ensaio expedito de flexão a três pontos.	22
Figura 6 – Corpo-de-prova para determinação da umidade e da densidade da madeira.	24
Figura 7 – Diagrama tensão deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras. (fonte: NBR 7190/97).....	25
Figura 8 – Ensaio de compressão paralela às fibras.	26
Figura 9 – Diagrama carga x flecha na flexão. (fonte: NBR 7190/97)	28
Figura 10 – Corpo-de-prova para determinação do módulo de elasticidade.	29
Figura 11 – Ensaio de flexão a quatro pontos.	29
Figura 12 – Esquema do ensaio de flexão estática.	32
Figura 13 – Ensaio de flexão transversal e longitudinal.....	35
Figura 14 – Ensaio de flexão vertical.	36
Figura 15 – Esquema do ensaio de cisalhamento. (fonte: BODIG & JAYNE, 1992).....	37
Figura 16 – Ensaio de cisalhamento.	38
Figura 17 – Corpos-de-prova utilizados nos ensaios preliminares das ligações pregadas.	40
Figura 18 – Ensaios preliminares das ligações pregadas com 1 prego e 4 pregos.	41
Figura 19 – Corpos-de-prova utilizados na 1ª bateria dos ensaios de ligações pregadas.....	42
Figura 20 – Pregos utilizados.	43
Figura 21 – Ensaio para caracterização da ligação (1ª bateria).	44
Figura 22 – Diagrama médio força x deslocamento para as ligações com OSB 12 mm.....	45
Figura 23 – Diagrama médio força x deslocamento para as ligações com OSB 18 mm.....	45
Figura 24 – Rupturas encontradas no ensaio de ligação.....	46
Figura 25 – Força máxima obtida no ensaio de ligação com OSB de 12 mm.....	47
Figura 26 – Rigidez da ligação com OSB de 12 mm.	48
Figura 27 – Força máxima obtida no ensaio de ligação com OSB de 18 mm.....	50
Figura 28 – Rigidez da ligação com OSB de 18 mm.	51
Figura 29 – Corpos-de-prova utilizados na 2ª bateria dos ensaios de ligações pregadas.....	53

Figura 30 – Ensaio da ligação pregada entre a alma e as mesas da viga (2ª bateria).....	54
Figura 31 – Diagrama médio força x deslocamento para as ligação (2ª bateria).....	55
Figura 32 – Seção transversal da viga e arranjo do ensaio de flexão a quatro pontos.....	57
Figura 33 – Montagem das vigas com OSB de 12 mm.....	60
Figura 34 – Montagem das vigas com OSB de 18 mm.....	60
Figura 35 – Confecção das vigas pregadas.....	61
Figura 36 – Preparo da cola.....	62
Figura 37 – Confecção das vigas coladas.....	62
Figura 38 – Seção homogeneizada da viga I, em mm.....	64
Figura 39 – Seção transversal e distribuição de tensões em vigas I. (fonte: Eurocode 5).....	66
Figura 40 – Malhas utilizadas na modelagem das vigas I.....	69
Figura 41 – Modelo 1: carregamento e apoios sobre a LN.....	70
Figura 42 – Modelo 2: carregamento e apoios conforme ensaio experimental.....	70
Figura 43 – Pórtico sobre a laje de reação no qual foram ensaiadas as vigas.....	71
Figura 44 – Instrumentação do ensaio.....	71
Figura 45 – Sapatas para distribuição dos esforços utilizadas nas vigas coladas.....	72
Figura 46 – Dispositivo utilizado para obter o módulo de elasticidade circular.....	72
Figura 47 – Detalhe do prolongador utilizado nos ensaios das vigas pregadas.....	73
Figura 48 – Ruptura por flambagem ocorrida em algumas vigas coladas.....	74
Figura 49 – Fixação do dispositivo de aplicação de carga por meio de um cinto.....	74
Figura 50 – Diagrama força x deslocamento das vigas ensaiadas.....	75
Figura 51 – Ruptura típica das vigas pregadas.....	76
Figura 52 – Ruptura típica das vigas com ligação colada e pregada.....	77
Figura 53 – Ruptura típica das vigas coladas.....	77
Figura 54 – Força máxima obtida no ensaio das vigas.....	78
Figura 55 – Rigidez das vigas.....	80
Figura 56 – Comportamento inicial médio obtido nos ensaios.....	84
Figura 57 – Comportamento inicial médio apresentado pela análise de elementos finitos.....	84
Figura 58 – Comparação entre o comportamento inicial obtido no ensaio e na modelagem.....	85
Figura 59 – Deslocamentos verticais encontrados na análise pelo MEF.....	86
Figura 60 – Tensões obtidas na análise pelo MEF ao longo da viga com alma de 12 mm.....	88
Figura 61 – Tensões obtidas na análise pelo MEF ao longo da viga com alma de 18 mm.....	89

RESUMO

Com a crescente escassez das peças de madeira maciça de grandes dimensões, a utilização de madeira reconstituída é uma tendência atual, e, dentro deste contexto, as chapas de lascas orientadas, conhecidas por OSB (*Oriented Strand Board*), destacam-se pelas suas características mecânicas e preço competitivo, podendo ser utilizadas em diversas aplicações na construção civil, tais como: fechamento de paredes, contrapiso, forro de cobertura, vigas I, fôrmas para concreto armado, reforço de estruturas, bem como na fabricação de móveis.

Apesar da sua utilização estar amplamente difundida na maioria dos países do hemisfério norte, ainda é um material novo no Brasil, uma vez que a produção de chapas OSB no país é recente. Sendo assim, é de fundamental importância a avaliação do comportamento deste material quando empregado em componentes estruturais.

Neste trabalho, estudou-se o comportamento de vigas I submetidas a ensaio de flexão a 4 pontos, considerando a alma em OSB e as mesas em Pinus maciço. Paralelamente à análise experimental realizou-se a modelagem das vigas pelo Método de Elementos Finitos analisadas através do programa SAP2000, utilizando-se elementos sólidos de 8 nós, e uma análise teórica através do método da homogeneização da seção.

Ao final do trabalho comparam-se os resultados obtidos a partir das análises experimental, numérica e teórica e são extraídas algumas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

ABSTRACT

As the supply of solid wood with large cross sections is getting everyday more and more difficult, the use of wood-based materials is becoming more attractive. In this context, Oriented Strand Boards stand out due to their mechanical properties and competitive prices, besides the use in many different applications in civil engineering, as for example: wall and floor sheathing, floor underlayment, roof sheathing, wood I-joists, concrete forming, and furniture.

Although OSB is largely used throughout most of the countries in northern hemisphere, it is still a new product in Brazil since only recently OSB factories have been introduced. Therefore, it is very important to evaluate the material behavior for structural applications.

This dissertation aims to study the behavior of wood I-joists subjected to four-point bending, with flanges made of pinus and webs made of OSB. Besides the experimental analysis, a numerical analysis by means of the Finite Element is also performed. The I-joists are modeled by 8-node solid elements and the SAP2000 program is employed in the analyses. An analytical method based on Timoshenko beam theory and on the transformed section approach is also employed.

Finally, a comparison between experimental, analytical and numerical results is performed. A few conclusions and recommendations are given at the end of the work.

1 INTRODUÇÃO

Na condição de material de construção, a madeira incorpora todo um conjunto de características técnicas, econômicas e estéticas que dificilmente se encontram em outro material existente. No entanto, há um sentimento entre a população, de descrédito em relação aos produtos com madeira. Isto se deve à falta generalizada de divulgação de informações e de busca do conhecimento pelos usuários em potencial sobre o material em si, bem como, das formas corretas de aplicação do mesmo.

O cenário atual do setor florestal brasileiro demonstra os reflexos da exploração predatória das florestas naturais, onde a falta de uma política de monitoramento da exploração, via manejo sustentado, contribuiu para agravar a situação (MENDES, et. al, 2000). Em decorrência, torna-se cada vez mais difícil encontrar peças de madeira maciça com grandes dimensões e de boa qualidade.

Dentro deste contexto, a tendência evolutiva lógica consiste na utilização de madeira reconstituída, sendo as chapas de madeira produtos de grande aceitação no mercado mundial em função de suas características e diversidade de aplicações (MENDES, et. al, 2000; TIBURCIO e GONÇALVES, 1998). O painel estrutural OSB (*Oriented Strand Board*) é considerado como uma evolução nas chapas estruturais em madeira reconstituída, tendo a sua produção iniciada no Brasil em fevereiro de 2002.

Uma das aplicações estruturais do OSB é sob a forma de vigas I, utilizando-se este material na composição da alma. Estas vigas são versáteis quanto à sua confecção, podendo ser fabricadas em canteiro de obras ou pré-fabricadas em indústrias.

1.1 Justificativa

As vigas I com alma em OSB consistem em elementos estruturais simples e eficientes, que são utilizados largamente nos Estados Unidos, Canadá e Europa. No entanto, sendo o OSB um material novo em nosso país, é de fundamental importância a avaliação de seu comportamento estrutural para obtenção de parâmetros que visem a sua utilização em sistemas construtivos.

1.2 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação do comportamento estrutural de vigas I em madeira com mesas em Pinus e alma em OSB, submetidas a ensaio de flexão a quatro pontos, inferindo-se sobre o desempenho estrutural das mesmas. Esta avaliação contemplou: a análise experimental variando-se o tipo de ligação entre a mesa e a alma: (A) pregada, (B) colada e pregada e (C) colada; a análise numérica baseada na formulação da resistência dos materiais, empregando-se o Método da Homogeneização da Seção (MHS); e a análise das mesmas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), através do programa computacional SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. 1996). Ao final do trabalho compararam-se os resultados obtidos, extraíndo-se algumas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- caracterização do material;
- caracterização da ligação pregada entre a alma e as mesas;
- análise teórica do problema baseada na formulação da resistência dos materiais considerando-se a seção homogeneizada;
- validação do critério de projeto do Eurocode 5 para vigas pregadas;
- modelagem pelo MEF através do programa computacional SAP2000;
- teste e avaliação de desempenho das vigas I por critérios de resistência e rigidez.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Chapas de madeira reconstituída

As chapas de madeira reconstituída possuem uma larga utilização, sendo encontradas principalmente nas indústrias do setor moveleiro e da construção civil, que se encontram em plena evolução tecnológica (ALBUQUERQUE 2001). Uma vantagem considerável das chapas industrializadas em relação à madeira maciça é sua facilidade de aplicação. Por possuírem dimensões definidas e padronizadas, possibilitam ao usuário uma economia de mão de obra especializada e rapidez na aplicação em comparação com o uso da madeira serrada.

As principais chapas usadas comercialmente são classificadas como: aglomerado, compensado, sarrafeado, MDF (*Medium Density Fiberboard*) e OSB.

Na fabricação das chapas de OSB (Figura 1) pode-se utilizar madeiras de qualidades inferiores, de árvores de pequeno diâmetro, de espécies de baixo valor comercial. A largura das chapas é determinada pela tecnologia de produção e não em função do comprimento das toras. Segundo EINSFELD et. al (1998), enquanto os processos de produção do compensado permitem que se utilize entre 50% e 60% das toras, na fabricação do OSB é utilizada virtualmente 100% da madeira aplicada.



Figura 1 – Chapa estrutural OSB. (fonte: MASISA, 2000)

O OSB é produzido a partir de lascas de madeira tipo “strand” (de espessura da ordem de 1 mm, largura variável e comprimento de 90 mm a 150 mm) com a incorporação de resina à prova d’água e parafina, orientadas numa direção durante o processo de deposição e consolidados por meio de prensagem à quente. São comercializados normalmente nas dimensões de 1220x2440 mm (MENDES et. al 2000, EINSFELD et. al 2000).

Estas chapas podem substituir a madeira compensada na maioria das suas aplicações. A definição da orientação das lascas da madeira, obtida no processo de manufatura do produto, assegura propriedades estruturais às chapas que permitem a sua plena utilização em obras de edificações, tanto para sustentação estrutural quanto para fechamento de paredes.

Uma das principais aplicações de OSB nos Estados Unidos e Canadá está na fabricação de vigas I com mesas em LVL e alma de OSB (Figura 2), utilizadas principalmente na sustentação de pisos e telhados. Outras aplicações consistem em: produção de divisórias de ambientes; utilização nas formas para concreto armado; utilização no fechamento de paredes, nos contrapisos e nos forros de coberturas e fabricação de móveis.

Devido ao seu baixo custo e bom desempenho estrutural, as chapas OSB substituíram integralmente a madeira compensada na construção de unidades residenciais na América do Norte dentro do sistema LWF (*Light Wood Framing*). A substituição do compensado pelo OSB pode ser considerada como a mais importante das inovações ocorridas dentro deste sistema de construção das duas últimas décadas (EINSFELD et. al 2000).



Figura 2 – Utilização do OSB em vigas I e em paredes. (fonte: www.apawood.org)

A defasagem do Brasil na produção de OSB em relação aos principais países produtores é considerável. Tendo surgido em 1975, teve sua produção iniciada no Brasil em 2002, ou seja 27 anos depois (Mendes et. al 2000).

O custo da matéria-prima no Brasil pode ser menor, em função das condições climáticas. A utilização de madeiras provenientes de florestas plantadas, para a produção de chapas OSB, significa empregar matéria-prima mais homogênea, permitindo uma produção com qualidade.

O estudo de espécies exóticas e nativas de rápido crescimento, com potencial para fornecimento de madeira em larga escala, deve ser intensificado, buscando uma maior variabilidade de matéria-prima, assim como redução da dependência dos gêneros mais utilizados: Pinus e Eucalipto. Algumas pesquisas já vêm sendo desenvolvidas no Brasil buscando a utilização de espécies nativas brasileiras que podem ser viabilizadas através de florestas plantadas.

NASCIMENTO e LAHR (2002), testando chapas de lascas fabricadas com angico, concluíram que os resultados de resistência à flexão estática obtidos foram satisfatórios.

De um modo geral, a mistura de espécies traz vantagens para as propriedades mecânicas das chapas, tendo em vista ajustar a densidade básica da matéria-prima para valores médios, conforme sugeriram HILLING et. al (2002), que trabalharam com chapas de acácia e eucalipto.

2.1.1 Processo de fabricação do OSB

Vários parâmetros são controlados no processo de manufatura do OSB, como: relação entre a densidade da madeira e a da chapa (taxa de compressão); geometria e orientação das lascas; quantidade de material nas camadas do miolo e face da chapa; teor de umidade; conteúdo de resina; tempo de prensagem e de fechamento da prensa (BRITO et. al 2000).

Em geral, todas as propriedades físico-mecânicas das chapas, em maior ou menor grau, são afetadas pela taxa de compressão. De uma maneira sucinta, pode-se ressaltar que taxas de compressão muito baixas não produzem bom contato entre as lascas, prejudicando a colagem e a resistência da chapa. Em contrapartida, chapas feitas sob altas taxas de compressão necessitam maior força de prensagem, ocasionando problemas com relação à liberação da água evaporada no momento da prensagem e também um consumo excessivo de matéria-prima. Além disso, causam a produção de chapas de alta densidade e conseqüentemente muito pesadas (HILLING et. al 2002).

As fases do processo de fabricação do OSB podem ser visualizadas na Figura 3.

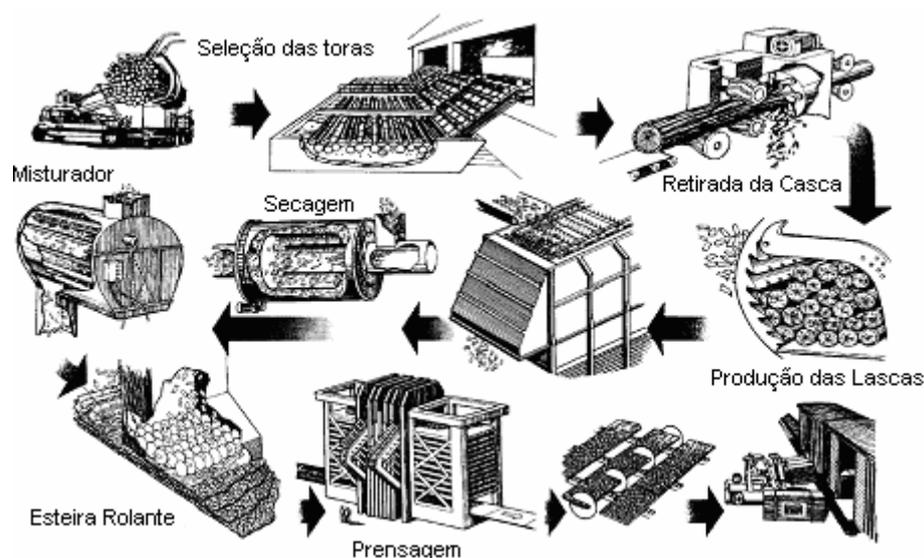


Figura 3 – Processo de fabricação do OSB. (fonte: www.osbguide.com/manufacturing.html)

Na produção das lascas de madeira as toras são empurradas transversalmente ao encontro da serra. Pequenas lâminas de aço espaçadas transversalmente ao plano da serra estabelecem o comprimento das lascas de madeira.

Na etapa de secagem, as lascas de madeira são deslocadas por indução para o interior do secador mantido em temperatura adequada. Com controle preciso do teor de umidade é possível melhorar significativamente a resistência e a flexibilidade das lascas.

Deve-se ressaltar que a secagem das lascas de madeira é uma importante operação, que pode limitar a capacidade produtiva das indústrias. A baixa eficiência dos secadores pode causar o “estrangulamento” da produção, além de provocar aumento no consumo energético final.

No misturador, a resina e a parafina líquidas são espargidas de modo a cobrir toda a superfície das lascas. A quantidade destes produtos, além de ser determinante no custo de produção, irá também condicionar a qualidade final do produto.

As lascas de madeira são depositadas na esteira rolante em camadas com orientação definida, totalizando uma espessura em torno de 100 mm (para uma espessura da chapa prensada entre 5 e 10 mm). São utilizadas quatro camadas, sendo as camadas externas orientadas na direção da esteira e as internas transversalmente a estas. A orientação definida das fibras assegura qualidade estrutural ao produto.

Depois esta camada de lascas é comprimida a uma temperatura de aproximadamente 205° C, com controle de tempo e pressão. Após o esfriamento as chapas são cortadas nas dimensões de 1220x2440 mm. Em seguida são preparadas para a comercialização.

2.2 Viga I em madeira

Segundo STAMATO e CALIL JR. (1998), o progresso da tecnologia nas estruturas de madeira está na utilização de estruturas espaciais mais leves, com sistemas construtivos mais simples, para torná-las competitivas com as estruturas de aço e de concreto.

Por ser um material de fabricação recente no Brasil, o OSB ainda foi pouco explorado em utilizações estruturais, no entanto, diversas pesquisas já foram desenvolvidas aplicando-se as chapas de compensado na alma de vigas I. Apesar do potencial do sistema construtivo composto de madeira maciça com chapas estruturais, em especial em um país com a capacidade de produção de madeira e derivados como o Brasil, o desenvolvimento desta tecnologia está limitado pela falta de conhecimento, por parte dos projetistas, do comportamento de elementos estruturais compostos, tornam-se assim necessários estudos sobre a união dos elementos que compõem a peça estrutural.

A utilização de estruturas compostas por madeira maciça e compensado é uma alternativa viável técnica e economicamente para esta finalidade, tendo sua utilização difundida, e solidamente estabelecida, em muitos países desenvolvidos, como Alemanha, Austrália, Estados Unidos e outros (STAMATO e CALIL JR. 1998). Entre outras vantagens deste sistema está a versatilidade na sua produção, que pode ser industrial ou no próprio canteiro de obras e a agilidade de sua execução, diminuindo custos de mão de obra (STAMATO e CALIL JR. 2000).

De acordo com SANTANA e MASCIA (1998), as vigas de madeira com alma em chapa de compensado e mesas em madeira maciça apresentam elevada rigidez e resistência. As partes da seção são ligadas para formar perfis I ou caixão de alta eficiência. As mesas, distanciadas entre si, têm como função transmitir a maior parte das tensões normais, enquanto que a alma, as tensões tangenciais.

SZÜCS e PRADA (2000) afirmam que vigas compostas com seção I apresentam alta resistência com baixo peso próprio, podendo ser empregadas como elemento estrutural definitivo no sistema construtivo industrializado em madeira e em sistema convencional de construção, destinados à habitação residencial.

2.2.1 Critérios de dimensionamento

A NBR 7190/97 permite a caracterização simplificada da resistência da madeira serrada de espécies usuais, na qual a partir dos resultados de resistência e rigidez do ensaio de compressão paralela às fibras, obtêm-se as demais propriedades através de relações. A Norma não cita valores específicos para chapas de madeira, porém, sabe-se que essas relações não podem ser usadas neste caso, devido à compensação das propriedades proporcionada pela composição da chapa.

Segundo a norma NBR 7190/97, para a consideração das ligações na rigidez, o momento de inércia da viga composta deve ser reduzido por um fator α_r igual a 0,85 para seções “I”. No entanto, não apresenta nenhuma diferenciação no dimensionamento de ligações utilizando painéis estruturais de madeira.

Segundo STAMATO e CALIL JR. (1998), o comportamento das estruturas compostas é diretamente relacionado com o comportamento da ligação entre os elementos que a compõem, ligações estas que podem ser químicas (adesivos) ou mecânicas (pinos metálicos). As ligações mecânicas por pinos metálicos em madeira compensada dependem, assim como na madeira maciça, da combinação entre a flexão do pino e o embutimento deste na madeira. O autor conclui que o embutimento na madeira compensada tem um comportamento diferenciado em relação à madeira maciça. Isto se deve ao fato de o compensado ter menor tendência ao fendilhamento que a madeira maciça.

Os métodos de dimensionamento de ligações por pinos resultam que, antes de seu estado limite último, as mesmas comportam-se de forma não linear, esta não linearidade pode acontecer em um nível relativamente baixo de carga, influenciando no desempenho da viga composta até mesmo antes do seu estado limite de utilização (SANTANA e MASCIA, 2000).

2.2.2 Pré-fabricação na indústria

A pré-fabricação de peças e componentes de madeira dentro da indústria passa a ter grande importância no emprego mais adequado deste material. Com a industrialização, podem-se sistematizar as etapas de todo o processo construtivo das peças e dos componentes a serem padronizados. Assim, consegue-se maior controle de qualidade em toda linha de produção, economia nos custos, possibilidades de arranjos estruturais diversificados e flexibilidade na concepção arquitetônica (SZÜCS e PRADA, 2000).

O processo de pré-fabricação de vigas I com alma em OSB é vantajoso na medida em que se unem elementos estruturais de alto desempenho, baixo custo e baixo peso. A execução da união entre a alma e as mesas por meio de adesivo proporciona boa rigidez à ligação, garantindo que o mesmo resista de forma mais homogênea aos esforços de flexão.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O objetivo da caracterização física e mecânica dos materiais foi a obtenção de parâmetros para as análises numéricas e para o planejamento dos ensaios experimentais.

A fase experimental deste trabalho foi conduzida nas dependências do Laboratório de Experimentação de Estruturas da Universidade Federal de Santa Catarina, no período de Março a Setembro de 2004.

Os ensaios da caracterização mecânica foram realizados na máquina universal de ensaios, marca MOHR & FEDERHAFF AG com capacidade de 200 kN, utilizando-se a escala adequada para cada ensaio. Os deslocamentos foram medidos utilizando-se transdutores de deslocamento da marca HBM. Para leitura da força utilizaram-se células de carga. As células de carga e os transdutores de deslocamentos estavam interligados ao sistema de aquisição de dados Spider 8, este sendo gerenciado pelo software Catman, que permitia a leitura simultânea dos dispositivos a cada segundo do ensaio.

3.1 Pinus

A madeira de Pinus utilizada na confecção das mesas da Viga I era proveniente de duas florestas com idades diferentes, doze e trinta anos. Como as toras foram misturadas no pátio da indústria, o lote fornecido era heterogêneo. Assim, buscou-se trabalhar com valores expeditos.

Foram selecionados noventa e nove barrotes com seção transversal de 30x60 mm e comprimento de 2500 mm. Como não foi possível selecionar todos os barrotes isentos de defeitos, permitiu-se utilizar aqueles nos quais os nós fossem pequenos e localizados nas extremidades. Nesta seleção optou-se também, quando possível, pelos barrotes que apresentassem pelo menos um dos lados com acabamento liso, para um bom desempenho na colagem.

Estes barrotes foram desdobrados em duas peças com seção transversal de 30x30 mm, sendo identificados com os números de um a noventa e nove e diferenciando-se as peças do mesmo barrote pelas letras A e B (Figura 4).



Figura 4 – Identificação das peças de Pinus com seção de 30x30 mm.

Realizou-se um ensaio de flexão expedito com estas cento e noventa e oito peças, para caracterizar o módulo de elasticidade na flexão a três pontos de cada peça. Este ensaio consistiu na aplicação de dois pesos padrão no meio do vão, medindo-se os respectivos deslocamentos (Figura 5). Os pesos aplicados corresponderam a aproximadamente 10% e 50% da força de ruptura média do Pinus, obtida em literatura. A posição ensaiada foi a mesma utilizada na confecção das vigas.



Figura 5 – Ensaio expedito de flexão a três pontos.

O módulo de elasticidade médio foi de 12526 MPa, com um coeficiente de variação na ordem de 19%. O menor valor encontrado foi de 6167 MPa para a peça 07A e o maior foi de 17931 MPa para a peça 90A.

Na Tabela 1, são apresentados os valores de módulo de elasticidade encontrados para cada peça. Pode-se observar que as peças A e B, retiradas do mesmo barrote, não apresentam, necessariamente, o mesmo módulo de elasticidade. Em destaque na Tabela estão o barrote 33 que apresentou a maior diferença (4487 MPa) e o barrote 75 com a menor diferença (20 MPa). Uma parte dessas diferenças deve-se ao fato de que os anéis de crescimento do Pinus não são simétricos no barrote, ficando mais concentrados em uma das peças desdobradas do que na outra. Outro motivo é o fato de que alguns barrotes selecionados apresentavam pequenos nós que no desdobro passaram a influenciar negativamente apenas uma das peças.

Tabela 1 – Módulo de elasticidade das mesas de Pinus obtidas no ensaio expedito

Peça	E(MPa)																
01A	15337	12A	8610	23A	12327	34A	12170	45A	15266	56A	12993	67A	14369	78A	11357	89A	9953
01B	12566	12B	11973	23B	11070	34B	14541	45B	17403	56B	12933	67B	14615	78B	13679	89B	10973
02A	14683	13A	11129	24A	15958	35A	11819	46A	13286	57A	11798	68A	12420	79A	12107	90A	17931
02B	12069	13B	12658	24B	11997	35B	9042	46B	13446	57B	13674	68B	13963	79B	13513	90B	16479
03A	15001	14A	12065	25A	9888	36A	10115	47A	9558	58A	13244	69A	13817	80A	8087	91A	14128
03B	12495	14B	15808	25B	13014	36B	12540	47B	12928	58B	11112	69B	13049	80B	9195	91B	14703
04A	10713	15A	12314	26A	12319	37A	11389	48A	9292	59A	11815	70A	7259	81A	11700	92A	9724
04B	12785	15B	13607	26B	14434	37B	13612	48B	10508	59B	10127	70B	7068	81B	11422	92B	11474
05A	7833	16A	12958	27A	10327	38A	10900	49A	11355	60A	6806	71A	15260	82A	14068	93A	14475
05B	7908	16B	14869	27B	12640	38B	12051	49B	13206	60B	6747	71B	14524	82B	12512	93B	15389
06A	12640	17A	15432	28A	11325	39A	13460	50A	9323	61A	11122	72A	11476	83A	13617	94A	13127
06B	16641	17B	17670	28B	14595	39B	14945	50B	7920	61B	12304	72B	12232	83B	12534	94B	12922
07A	6167	18A	12236	29A	12273	40A	14627	51A	11252	62A	13931	73A	11347	84A	12475	95A	11864
07B	8026	18B	14806	29B	14863	40B	16932	51B	10969	62B	14326	73B	10323	84B	11251	95B	12945
08A	7597	19A	11677	30A	9897	41A	12140	52A	10588	63A	12566	74A	14312	85A	14627	96A	14721
08B	10062	19B	14068	30B	11505	41B	12516	52B	11331	63B	13237	74B	13743	85B	12673	96B	16335
09A	13007	20A	10347	31A	11541	42A	11279	53A	15733	64A	14524	75A	12564	86A	15231	97A	12331
09B	15919	20B	13189	31B	15857	42B	14815	53B	14740	64B	13912	75B	12544	86B	13936	97B	12213
10A	12753	21A	10347	32A	12531	43A	14982	54A	9139	65A	10817	76A	16039	87A	8392	98A	12051
10B	15441	21B	8320	32B	16240	43B	15767	54B	9982	65B	11315	76B	17000	87B	9513	98B	12926
11A	10703	22A	17271	33A	10199	44A	10290	55A	10776	66A	11066	77A	16905	88A	8972	99A	17870
11B	15376	22B	12780	33B	14686	44B	8737	55B	11842	66B	11109	77B	15139	88B	9872	99B	15581

Para a confecção de uma viga são necessárias quatro peças de Pinus; como foram confeccionadas e ensaiadas quarenta e oito vigas I, foram utilizadas para este fim cento e noventa e duas peças. Com as seis peças restantes (04B, 07A, 17B, 38A, 44A e 76B) foram realizados ensaios de teor de umidade, densidade, compressão paralela às fibras e flexão. A confecção dos corpos-de-prova e os procedimentos de ensaios para esta caracterização basearam-se no Anexo B da NBR 7190/97, com ajustes nas dimensões baseados na seção transversal de 30x30 mm. Com estas peças também se ensaiou ligações pregadas, apresentadas no próximo capítulo (2ª bateria).

3.1.1 Umidade e densidade

O teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, dado por:

$$U(\%) = \left(\frac{m_i - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

onde:

“ m_i ” é a massa inicial da madeira, em g;

“ m_s ” é a massa da madeira seca, em g.

Após a determinação da massa inicial, colocou-se o corpo-de-prova na câmara de secagem (estufa), com temperatura máxima de $103^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$. A massa do corpo-de-prova foi medida a cada 6 h, até que a variação, entre duas medidas consecutivas, fosse menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Esta massa foi considerada como a massa seca.

A densidade básica é uma massa específica convencional definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, sendo dada por:

$$\rho_{\text{bas}} = \frac{m_s}{V_{\text{sat}}} \quad (2)$$

onde:

“ m_s ” é a massa da madeira seca, em kg;

“ V_{sat} ” é o volume da madeira saturada, em m^3 .

O corpo-de-prova utilizado possuía seção transversal retangular, com dimensões nominais de 30x30 mm e comprimento, ao longo das fibras, de 50 mm (Figura 6).

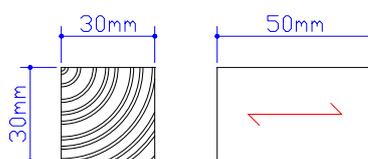


Figura 6 – Corpo-de-prova para determinação da umidade e da densidade da madeira.

3.1.2 Compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo-de-prova, sendo dada por:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (3)$$

onde:

“ $F_{c0,max}$ ” é a máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova paralelamente à direção das fibras durante o ensaio, em N;

“ A ” é a área inicial da seção transversal comprimida, em mm²;

“ f_{c0} ” é a resistência à compressão paralela às fibras, em MPa.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão deformação específica, como indicado na Figura 7, sendo expresso em MPa.

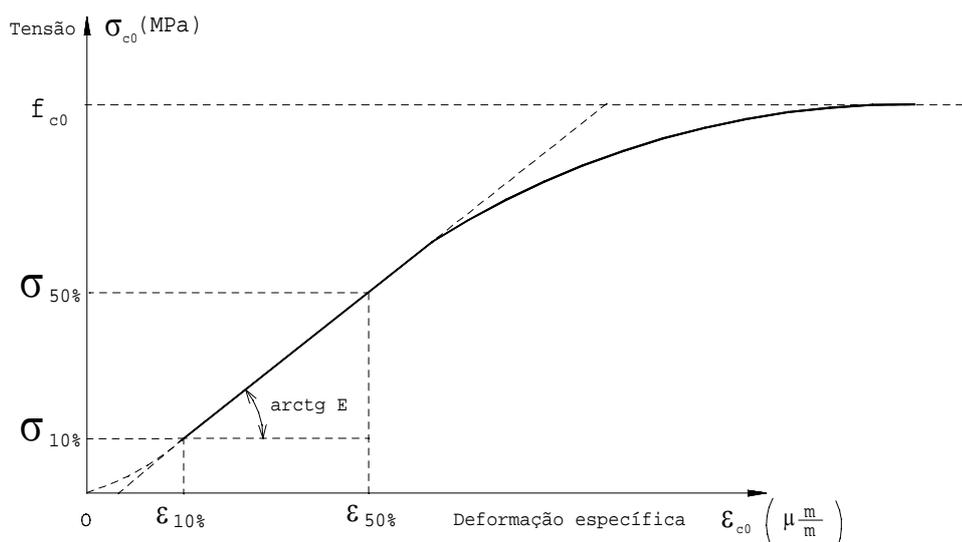


Figura 7 – Diagrama tensão deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras. (fonte: NBR 7190/97)

Para esta finalidade, o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}; \epsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%}; \epsilon_{50\%})$, correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras medida no ensaio, sendo dado por:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (4)$$

onde:

“ $\sigma_{10\%}$ ” e “ $\sigma_{50\%}$ ” são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência “ f_{c0} ”;

“ $\epsilon_{10\%}$ ” e “ $\epsilon_{50\%}$ ” são as deformações específicas de compressão medidas no corpo-de-prova, correspondentes às tensões de “ $\sigma_{10\%}$ ” e “ $\sigma_{50\%}$ ”, respectivamente.

Para a condução deste ensaio trabalhou-se com um corpo-de-prova com seção transversal quadrada de 30 mm de lado e comprimento de 150 mm. Os transdutores de deslocamento, com curso de 10 mm, foram fixados através de dispositivo metálico, com uma distância de leitura nominal de 100 mm. Para a medição da força utilizou-se uma célula de carga HBM, com capacidade de 50 kN. Aplicou-se um pré-carregamento para acomodação do corpo-de-prova e ajuste da rótula. Na Figura 8 pode-se visualizar a montagem do ensaio.

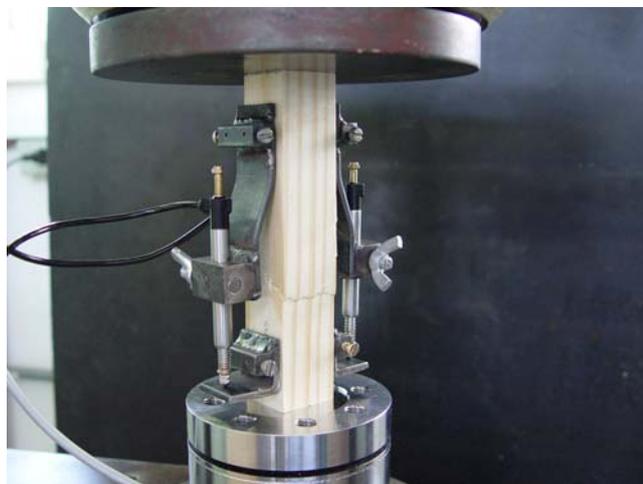


Figura 8 – Ensaio de compressão paralela às fibras.

3.1.3 Flexão

A NBR 7190/97 preconiza o ensaio de flexão a três pontos, onde a seção sujeita ao carregamento máximo é justamente a seção média ($x = L/2$), na qual atua o aplicador de carga (Guitard, 1987).

Optou-se pelo ensaio de flexão a quatro pontos, onde o momento máximo no trecho central é constante, permitindo ao corpo de prova romper em qualquer ponto deste trecho.

A resistência da madeira à flexão é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão, calculado com a hipótese da madeira ser um material elástico, sendo dado por:

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_e} \quad (5)$$

onde:

“ M_{\max} ” é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova, em N·mm;

“ W_e ” é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova, dado por $bh^2/6$, em mm^3 .

A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama carga deslocamento, indicado na Figura 9.

Para esta finalidade o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga deslocamento no meio do vão, definida pelos pontos $(F_{10\%}; v_{10\%})$ e $(F_{50\%}; v_{50\%})$ correspondentes respectivamente a 10% e 50% da carga máxima de ensaio estimada por meio de um corpo-de-prova gêmeo, sendo dado por:

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})a}{(v_{50\%} - v_{10\%})2bh^3} (3L^2 - 4a^2) \quad (6)$$

onde:

“ $F_{M,10\%}$ ” e “ $F_{M,50\%}$ ” são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima aplicada ao corpo-de-prova, em N;

“ $v_{10\%}$ ” e “ $v_{50\%}$ ” são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima “ F_M ”, em mm;

“ b ” e “ h ” correspondem respectivamente à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em mm;

“ L ” é o vão entre os apoios, em mm.

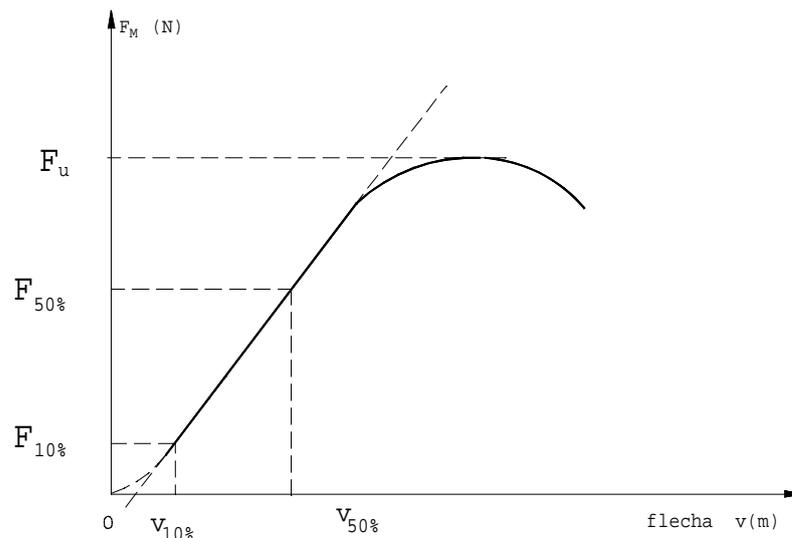


Figura 9 – Diagrama carga x flecha na flexão. (fonte: NBR 7190/97)

Salienta-se que neste método para determinação da rigidez, o módulo de elasticidade devido à flexão encontrado é aparente, pois há uma parcela de deslocamento embutida devida ao esforço cortante, sendo esta desprezível quando se trabalha com uma relação de vão livre entre apoios de $21 \cdot h$ (BODIG & JAYNE, 1982).

Os corpos-de-prova utilizados possuíam forma prismática, com seção transversal quadrada de 30 mm de lado e comprimento de 650 mm na direção paralela às fibras. A leitura do deslocamento foi realizada através de um transdutor de deslocamento marca HBM, com curso de 10 mm, fixado através de uma base magnética. A leitura do carregamento aplicado foi realizada por uma célula de carga em S, com capacidade de 50 kN. Na Figura 10 e na Figura 11 pode-se visualizar, respectivamente, o corpo-de-prova e a montagem do ensaio.

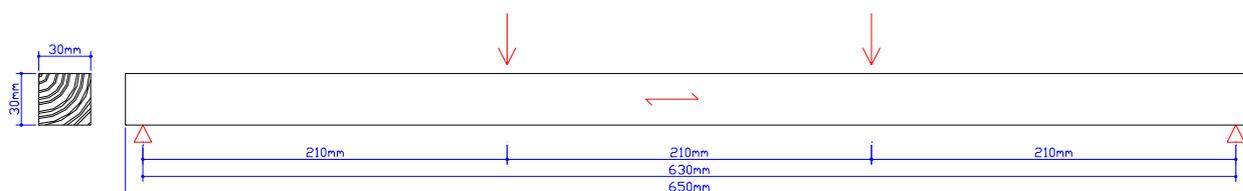


Figura 10 – Corpo-de-prova para determinação do módulo de elasticidade.



Figura 11 – Ensaio de flexão a quatro pontos.

3.1.4 Resultados referentes à caracterização do Pinus

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos na caracterização das seis peças de Pinus que não foram utilizadas na confecção das vigas. O teor de umidade médio encontrado foi de 10,70%. Como era de se esperar os coeficientes de variação nos ensaios mecânicos ficou elevado, haja vista a heterogeneidade do lote que possuía módulos de elasticidade, obtidos no ensaio expedito, variando de 6167 MPa a 17670 MPa. Nesta tabela também estão apresentadas as médias das peças pertencentes aos lotes das vigas com 12 mm e 18 mm.

Pode-se observar nesta tabela que os valores encontrados no ensaio expedito nem sempre condizem com os módulos de elasticidade encontrados no ensaio de compressão e de flexão, isto se justifica pelo fato do ensaio expedito caracterizar a peça de 2,5 m como um todo, ao passo que nos outros dois ensaios são caracterizadas amostras desta peça, que caso apresentem algum defeito irá resultar em resultados aquém do expedito e vice-versa. Ressalta-se também o fato de que no ensaio expedito foi feita flexão a 3 pontos e na caracterização a 4 pontos, ou seja, com menor incidência de flecha devida ao esforço cortante.

Visando a otimização das cargas de ruptura do Pinus e do OSB, utilizou-se o Pinus com módulo de elasticidade expedito abaixo de 12531 MPa para as vigas com o OSB de 12 mm de espessura, e acima deste valor para as vigas com o OSB de 18 mm.

Tabela 2 – Resumo da caracterização do Pinus

Corpo de prova Nº	Umidade (%)	Densidade Básica (Kg/m ³)	Resistência (Mpa)		Rigidez (Mpa)		
			Compressão Paralela	Flexão	Compressão Paralela	Flexão	Expedito
07A	10,8	286,3	28,3	54,5	5485	6792	6167
44A	11,5	337,2	39,3	60,2	13647	8091	10290
38A	10,6	345,5	45,7	65,8	11287	14633	10900
04B	10,5	338,7	42,0	59,0	10245	10872	12785
76B	10,3	338,8	53,2	95,0	17852	13579	17000
17B	10,5	404,2	55,1	105,2	17149	11570	17670
Média	10,7	341,8	43,9	73,3	12611	10923	12469
CV (%)	3,8	11,0	22,4	29,1	36,7	27,9	34,9
OSB 12mm							
Média	11,0	323,0	37,8	60,2	10140	9838	9119
CV (%)	4,2	9,9	23,3	9,4	41,4	42,7	28,2
OSB 18mm							
Média	10,4	360,5	50,1	86,4	15082	12007	15818
CV (%)	1,1	10,5	14,1	28,1	27,9	11,7	16,7

3.2 OSB

Os painéis OSB utilizados na confecção das vigas possuíam as seguintes dimensões:

- 12 mm de espessura, 1220 mm de largura e 2440 mm de comprimento; e
- 18 mm de espessura, 850 mm de largura e 2500 mm de comprimento.

A NBR 7190/97 não apresenta procedimentos para determinação das propriedades mecânicas das chapas de madeira reconstituída, sendo assim foram utilizados os procedimentos propostos pelas Normas norte-americanas da ASTM - *American Society for Testing and Materials*.

Foram determinadas as seguintes propriedades mecânicas das chapas de OSB: resistência e rigidez na flexão, nas direções: longitudinal, transversal e vertical; resistência e rigidez ao cisalhamento ao longo da espessura. Para isso, selecionaram-se 8 chapas de cada espessura, além de uma extra para testemunho. A escolha foi aleatória, a partir de um universo composto por 200 chapas de 12 mm e 300 chapas de 18 mm. Buscou-se retirar os corpos-de-prova de diferentes regiões em cada chapa.

3.2.1 Flexão estática

A resistência da madeira à flexão é um valor convencional, dada pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão, calculado com a hipótese da madeira ser um material elástico, sendo dado por:

$$f_M = \frac{M_{\text{máx}}}{W_e} \quad (5)$$

onde:

“ $M_{\text{máx}}$ ” é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova, em N·mm;

“ W_e ” é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova, dado por $bh^2/6$, em mm^3 .

O módulo de elasticidade de um corpo-de-prova prismático está relacionado à medida da sua rigidez à flexão. Contudo, algumas normas de ensaio podem divergir com relação à forma de se obter a medida da deflexão no meio do vão, o que traz algumas implicações importantes e que precisam estar bem compreendidas.

As normas ASTM empregadas neste estudo para os ensaios de flexão estática apresentam este tipo de diferença. Enquanto a norma ASTM D 3043-95 – *Standard methods of testing structural panels in flexure* especifica ensaio a quatro pontos, a norma ASTM D 4761-96 – *Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material* prevê ensaio de flexão a três pontos.

Na Figura 12 são apresentados os esquemas de ensaio a três e quatro pontos, bem como a maneira como deve ser feita a medida da deflexão no meio do vão.

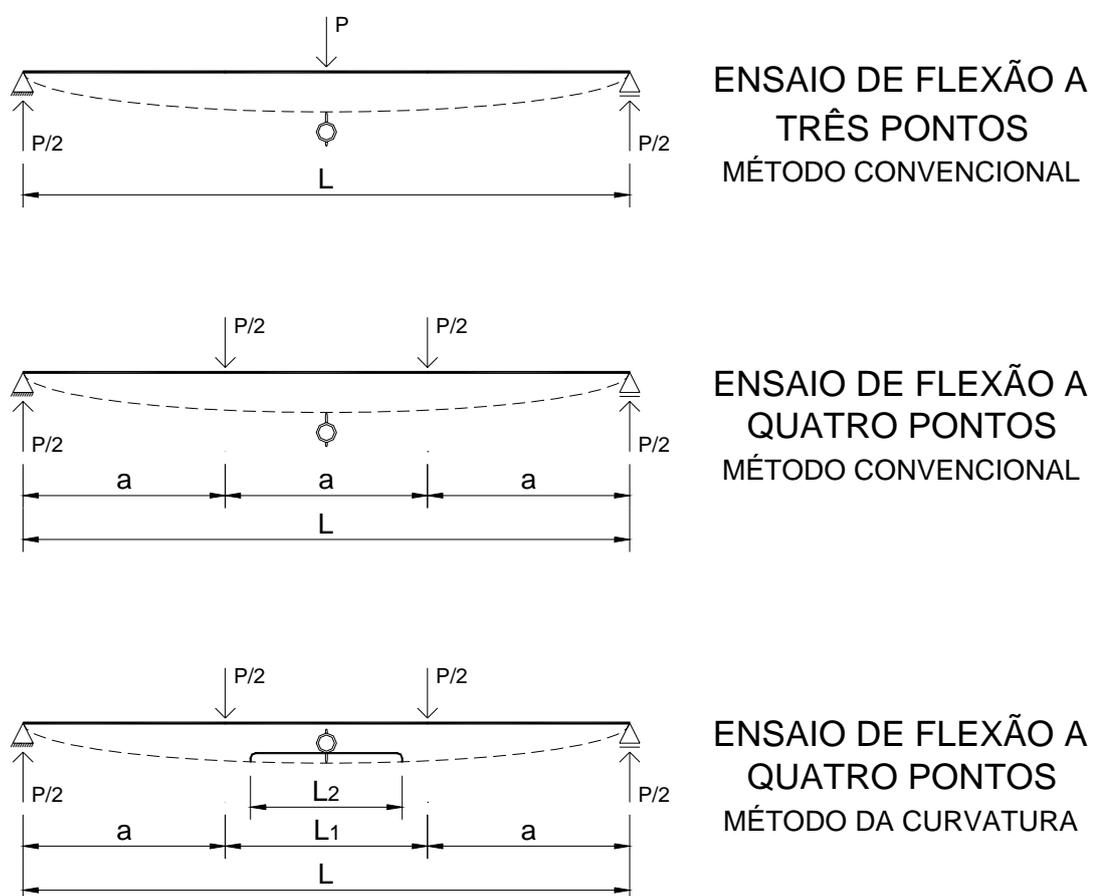


Figura 12 – Esquema do ensaio de flexão estática.

Segundo GUITARD (1987), a diferença fundamental entre estes métodos está no produto final, isto é, no módulo de elasticidade à flexão obtido.

Na flexão a três pontos, o diagrama carga-deslocamento é obtido com o registro simultâneo da carga aplicada e da deflexão total no meio do vão. A interpretação dos resultados é feita com base na teoria clássica da resistência dos materiais aplicada às vigas retas. Neste caso, obtém-se o módulo de elasticidade aparente (E_a), pois o deslocamento vertical registrado no meio do vão incorpora tanto uma parcela devida a momento fletor, bem como outra devida a esforço cortante. O módulo de elasticidade é obtido a partir da inclinação do trecho inicial retilíneo do diagrama carga-deslocamento. No caso de peças de seção retangular, tem-se:

$$E_a = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})48I} \quad (7)$$

onde:

“ $F_{M,10\%}$ ” e “ $F_{M,50\%}$ ” são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima aplicada ao corpo-de-prova, em N;

“ $v_{10\%}$ ” e “ $v_{50\%}$ ” são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima “ F_M ”, em mm;

“ I ” corresponde ao momento de inércia da seção transversal do corpo-de-prova, em mm^4 ;

“ L ” é o vão entre os apoios, em mm.

O esquema estrutural do ensaio a quatro pontos apresenta um trecho central com momento fletor constante e, ao mesmo tempo, esforço cortante nulo. Neste caso, se for obtida a deflexão total no meio do vão, isto é, referente aos apoios extremos, obtém-se o módulo de elasticidade aparente (E_a) através da seguinte equação:

$$E_a = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})a}{(v_{50\%} - v_{10\%})2bh^3} (3L^2 - 4a^2) \quad (6)$$

onde:

“ $F_{M,10\%}$ ” e “ $F_{M,50\%}$ ” são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima aplicada ao corpo-de-prova, em N;

“ $v_{10\%}$ ” e “ $v_{50\%}$ ” são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima “ F_M ”, em mm;

“ b ” e “ h ” correspondem respectivamente à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em mm;

“ L ” é o vão entre os apoios, em mm;

“ a ” é a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga, em mm.

No entanto, no ensaio a quatro pontos emprega-se geralmente o Método da Curvatura, no qual registra-se o deslocamento vertical no meio do vão, porém relativo a outros pontos situados entre os aplicadores de carga (sendo preferíveis pontos mais afastados possíveis do meio do vão). A interpretação dos resultados é feita a partir do registro da variação da curvatura em função das cargas aplicadas. Neste caso, obtém-se o módulo de elasticidade a flexão (E_x) baseado exclusivamente na deformação por momento fletor. O desenvolvimento matemático conduz à equação:

$$E_x = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})a}{(v'_{50\%} - v'_{10\%})8bh^3} (3(L - L_1)L_2^2) \quad (8)$$

onde:

“ $F_{M,10\%}$ ” e “ $F_{M,50\%}$ ” são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima aplicada ao corpo-de-prova, em N;

“ $v'_{10\%}$ ” e “ $v'_{50\%}$ ” são os deslocamentos no meio do vão, medidos entre os pontos de aplicação de carga, correspondentes a 10% e 50% da carga máxima “ F_M ”, em mm;

“ b ” e “ h ” correspondem respectivamente à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em mm;

“ L ” é o vão entre os apoios, em mm;

“ L_1 ” é a distância entre os pontos de aplicação de carga, em mm;

“ L_2 ” é a distância de referência para medição do deslocamento no vão central, em mm;

“ a ” é a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga, em mm.

Como visto, os dois métodos podem fornecer valores diferentes para o módulo de elasticidade, pelo fato da parcela do deslocamento devida ao cisalhamento estar sendo considerada ou não. Entretanto quanto maior a relação entre o vão livre e a altura da peça, menor a contribuição da parcela de esforço cortante na deflexão da viga. Para valores “L/h” de aproximadamente 21, esta contribuição é praticamente desprezível. A norma ASTM D 4761-96, que adota o ensaio de flexão a três pontos, preconiza que a relação “L/h” para o ensaio de chapas na posição vertical deve estar situada entre 17 e 21. Nestes casos, o módulo de elasticidade aparente (E_a) se aproxima do módulo de elasticidade (E_x).

Na Figura 13 é mostrada a montagem do ensaio à flexão da chapa nas posições longitudinal e transversal. As propriedades de resistência e rigidez obtidas neste ensaio são importantes quando a chapa recebe carregamento normal ao seu plano. No caso de diafragmas de piso e parede, por exemplo, estas propriedades definem a espessura da chapa a ser empregada, bem como o espaçamento entre montantes de parede ou entre as vigas de piso.



Figura 13 – Ensaio de flexão transversal e longitudinal.

É apresentada na Figura 14 a realização do ensaio à flexão da chapa na posição vertical. A resistência e rigidez obtidas neste ensaio são fundamentais em determinados casos, como, por exemplo, quando do emprego do OSB compondo a alma de perfis em madeira.



Figura 14 – Ensaio de flexão vertical.

3.2.2 Cisalhamento

O objetivo deste ensaio é a determinação da resistência e da rigidez ao cisalhamento. Os corpos-de-prova e os procedimentos de ensaios foram executados de acordo com o método B (corpos-de-prova de grandes dimensões) da norma norte-americana ASTM D 2719-89 – *Standard test methods for structural panels in shear through-the-thickness*.

No corpo-de-prova a área de cisalhamento deve ter no mínimo 610 mm de lado. Quando a espessura da chapa for menor que 12,7 mm, duas ou mais chapas devem ser coladas para garantir no mínimo essa espessura, tendo sido este procedimento adotado no caso das chapas de 12 mm. As quinas do corpo-de-prova devem ser arredondadas, com raio de 12,5 mm. As extremidades do corpo de prova são enrijecidas através de guias de madeira maciça coladas rigidamente em ambos os lados do corpo-de-prova, sendo necessárias para receber a aplicação do carregamento.

Segundo BODIG & JAYNE (1992), o ensaio de cisalhamento ao longo da espessura foi concebido de modo a submeter o corpo-de-prova a um estado puro de tensões de cisalhamento no plano da chapa. O dispositivo de ensaio transforma as forças de tração aplicadas às extremidades do dispositivo em esforços cisalhantes ao longo das arestas da chapa (Figura 15). A deformação deve ser registrada posicionando-se um transdutor de deslocamento, em ambas as faces, na direção da diagonal da chapa coincidente com a direção de atuação das forças de tração. Fazendo-se uma transformação adequada, esta medida pode ser usada para a determinação da deformação de cisalhamento da chapa.

A resistência ao cisalhamento deve ser tomada como sendo:

$$\tau = 0,707 \left(\frac{P}{Lt} \right) \quad (9)$$

onde:

“ τ ” é a resistência ao cisalhamento, em N/m²;

“P” é a força máxima aplicada, em N;

“L” é o comprimento de cisalhamento de uma das arestas do CP, em m;

“t” é a espessura do corpo-de-prova, em m.

O módulo de elasticidade ao cisalhamento no plano da chapa é obtido a partir da relação tensão-deformação ao cisalhamento. A norma ASTM D 2719-89 fornece a equação para o cálculo do módulo de elasticidade ao cisalhamento (G), reproduzida a seguir:

$$G = 0,3536 \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{L_1}{Lt} \quad (10)$$

onde:

“G” é o módulo de elasticidade transversal, em MPa;

“P/ Δ ” é o coeficiente angular da curva carga x deformação, em N/mm;

“L₁” é o comprimento da medida do deslocamento, em mm;

“L” é o comprimento de cisalhamento das arestas do corpo-de-prova, em mm;

“t” é a espessura do corpo-de-prova, em mm.

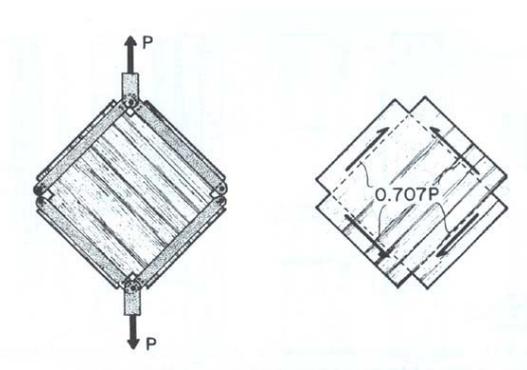


Figura 15 – Esquema do ensaio de cisalhamento. (fonte: BODIG & JAYNE, 1992)

Ainda segundo BODIG & JAYNE (1992), este método requer corpos-de-prova de grandes dimensões e um intrincado dispositivo de ensaio, sendo por esta razão pouco empregado. Entretanto, fazem a ressalva de que este método constitui-se num dos poucos métodos diretos de determinação do módulo de elasticidade ao cisalhamento, tornando-se uma opção promissora e que conduz a resultados satisfatórios.

O ensaio de cisalhamento ao longo da espessura está ilustrado na Figura 16. Em perfis de madeira sujeitos à flexão e em diafragmas de piso e parede submetidos a carregamento lateral (ex.: vento), a rigidez ao cisalhamento ao longo da espessura é empregada no cálculo da deflexão e da distorção destes elementos, respectivamente.



Figura 16 – Ensaio de cisalhamento.

3.2.3 Resultados referentes à caracterização do OSB

Nas Tabela 3 e Tabela 4 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios. Observa-se inicialmente que os coeficientes de variação das chapas de OSB, tanto para os valores de resistência bem como para os de rigidez, são significativamente inferiores àqueles normalmente apresentados pela madeira maciça. Isto é uma característica típica das chapas de madeira reconstituída em geral, e se deve ao processo industrial que tende a homogeneizar as propriedades do material.

Tabela 3 – Resumo da caracterização do OSB 12 mm

Corpo de prova Nº	Resistência (MPa)			Rigidez - Circular (MPa)		Rigidez - Aparente (MPa)			Cisalhamento	
	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Vertical	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Vertical	Resistência (MPa)	Rigidez (MPa)
CP-01	14,7	22,7	19,4	2314,4	5303,0	2253,3	5431,8	4222,3	-	1698,3
CP-02	15,1	23,6	14,1	2505,1	5640,4	2282,8	5727,9	4257,0	-	-
CP-03	17,2	25,0	15,3	2567,6	5401,5	2577,6	6060,4	4541,9	-	1716,8
CP-04	14,8	23,0	20,1	2191,2	5471,0	2209,2	5533,4	4558,7	-	1775,3
CP-05	16,4	21,5	16,9	2680,2	4883,9	2530,2	5243,3	4809,1	-	1687,0
CP-06	14,5	22,7	20,8	2444,4	5369,0	2399,0	5629,3	4185,4	-	1826,1
CP-07	16,1	22,0	19,8	2639,7	4995,2	2494,5	4993,6	4324,5	-	1763,9
CP-08	15,9	22,4	20,6	2771,7	4952,2	2722,8	5084,7	4868,3	-	1806,4
Média	15,6	22,9	18,4	2514,3	5252,0	2433,7	5463,1	4470,9	-	1753,4
Desvio-Padrão	1,0	1,1	2,6	193,4	274,8	179,0	353,0	266,1	-	54,0
CV (%)	6,2	4,7	14,1	7,7	5,2	7,4	6,5	6,0	-	3,1

Tabela 4 – Resumo da caracterização do OSB 18 mm

Corpo de prova Nº	Resistência (MPa)			Rigidez - Circular (MPa)		Rigidez - Aparente (MPa)			Cisalhamento	
	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Vertical	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Transversal	Flexão Longitudinal	Flexão Vertical	Resistência (MPa)	Rigidez (MPa)
CP-01	19,0	29,1	33,8	3004,4	6062,6	2852,5	6149,9	5788,2	5,1	1788,1
CP-02	19,1	24,6	25,5	2610,8	5273,1	2531,5	5495,2	4379,8	4,9	1893,0
CP-03	19,3	27,5	33,5	2967,9	5686,0	2708,2	5852,5	5443,4	5,5	1755,8
CP-04	16,7	29,7	24,3	2769,2	6042,1	2581,7	6043,2	4345,7	5,4	1817,4
CP-05	16,8	26,1	25,3	2839,0	5633,1	2629,8	5682,6	4615,8	4,6	1867,7
CP-06	17,6	24,5	32,7	2701,3	5322,6	2626,2	5716,5	5094,6	4,5	1753,1
CP-07	19,6	29,4	24,5	3065,2	5673,7	2900,8	6116,0	4804,4	5,1	1707,8
CP-08	18,8	27,8	23,6	3110,4	5499,5	2924,5	5879,9	4257,5	5,4	1865,3
Média	18,4	27,3	27,9	2883,5	5649,1	2719,4	5867,0	4841,2	5,1	1806,0
Desvio-Padrão	1,1	2,1	4,5	180,8	292,3	153,0	229,4	557,4	0,4	65,8
CV (%)	6,3	7,7	16,2	6,3	5,2	5,6	3,9	11,5	7,7	3,6

As propriedades mecânicas das chapas de OSB de 18 mm de espessura apresentaram valores ligeiramente superiores aos das chapas de 12 mm de espessura, à exceção dos resultados de resistência à flexão vertical, cujos resultados foram semelhantes. A maior diferença foi verificada nas resistências à flexão longitudinal e transversal, que foi de aproximadamente 18%.

No ensaio de cisalhamento das chapas de 12 mm de espessura, de acordo com o prescrito pela norma ASTM D2719-1989, foram coladas duas chapas para evitar problemas de flambagem durante o carregamento. Com este procedimento adotado, em função de limitações do dispositivo de ensaio, não foi possível atingir a ruptura do material. Entretanto, a carga alcançada permitiu a determinação do módulo de cisalhamento (G).

Os resultados obtidos de resistência e rigidez, aliados às formas coerentes de ruptura das chapas, denotam a viabilidade dos procedimentos de ensaio contidos nas normas ASTM adotadas neste estudo experimental, sendo os valores de resistência e rigidez à flexão um pouco superiores aos fornecidos pelo fabricante.

4 LIGAÇÃO PREGADA ENTRE A ALMA E AS MESAS

Foram realizados ensaios para avaliar o comportamento da ligação pregada buscando-se parâmetros para a determinação do espaçamento entre os pregos. Nesta etapa foram analisados os parâmetros de rigidez (K_s) e resistência ($F_{m\acute{a}x}$) de ligações confeccionadas com OSB e Pinus, simulando a ligação entre a alma e as mesas de uma viga I.

4.1 Ensaios preliminares

Para a definição da configuração do corpo-de-prova foram realizados alguns testes preliminares, nos quais variou-se a quantidade de pregos. Ensaiou-se corpos submetidos à tração com um prego e corpos submetidos à compressão com dois e quatro pregos (Figura 17).

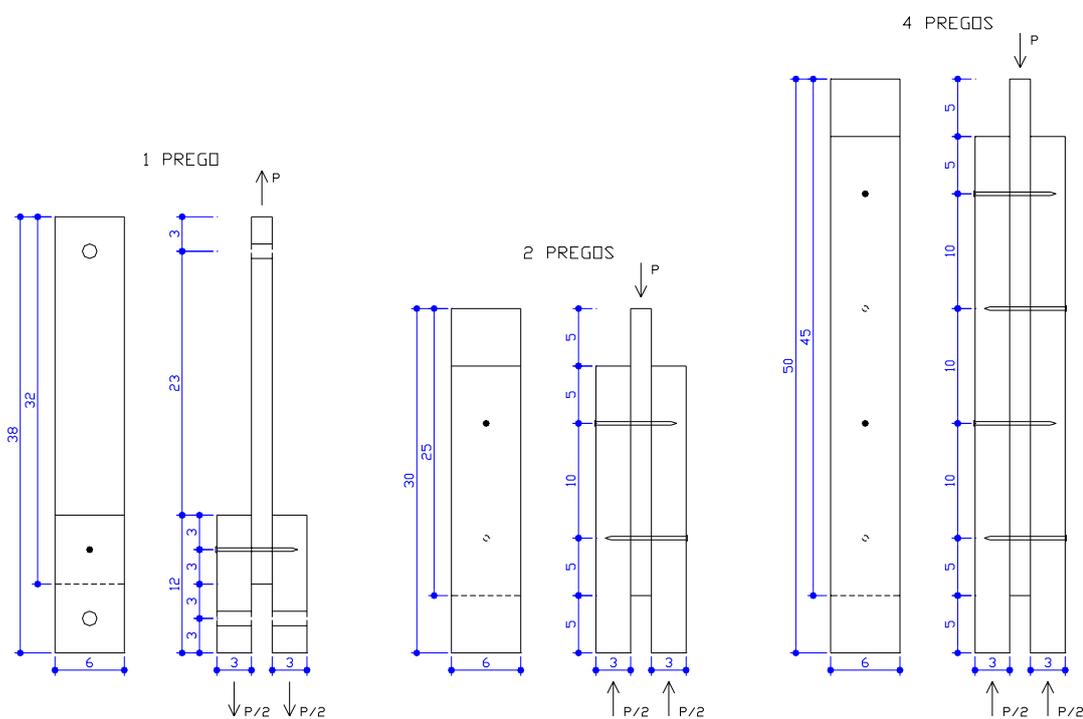


Figura 17 – Corpos-de-prova utilizados nos ensaios preliminares das ligações pregadas.

Na viga I as ligações pregadas unem as mesas com a alma, no entanto, o deslocamento relativo entre a chapa de OSB e as peças de Pinus vai ocorrer devido às características dos materiais de se deformarem mais ou menos quando submetidas às tensões de tração ou compressão. No ensaio de flexão a quatro pontos, a mesa superior estará submetida à compressão e a mesa inferior à tração, ou seja, tanto o OSB quanto o Pinus tendem a se deslocar na mesma direção, e os pregos vão tentar impedir que um dos materiais se desloque mais do que o outro, não ocorrendo portanto, grandes deslocamentos relativos entre os materiais, como acontece no ensaio das ligações, uma vez que nestas últimas o OSB e o Pinus estão se deslocando em direções opostas.

Nos ensaios preliminares utilizou-se apenas a chapa de OSB com 18 mm de espessura. Nos ensaios das ligações com apenas um prego utilizou-se um grampo de aperto rápido (sargento) segurando a alma e as mesas para evitar um afastamento entre as mesmas, tendo em vista que não há este afastamento no ensaio da viga, pois há pregos em ambos os lados da mesa. Na Figura 18 pode-se visualizar o arranjo dos ensaios preliminares das ligações pregadas.

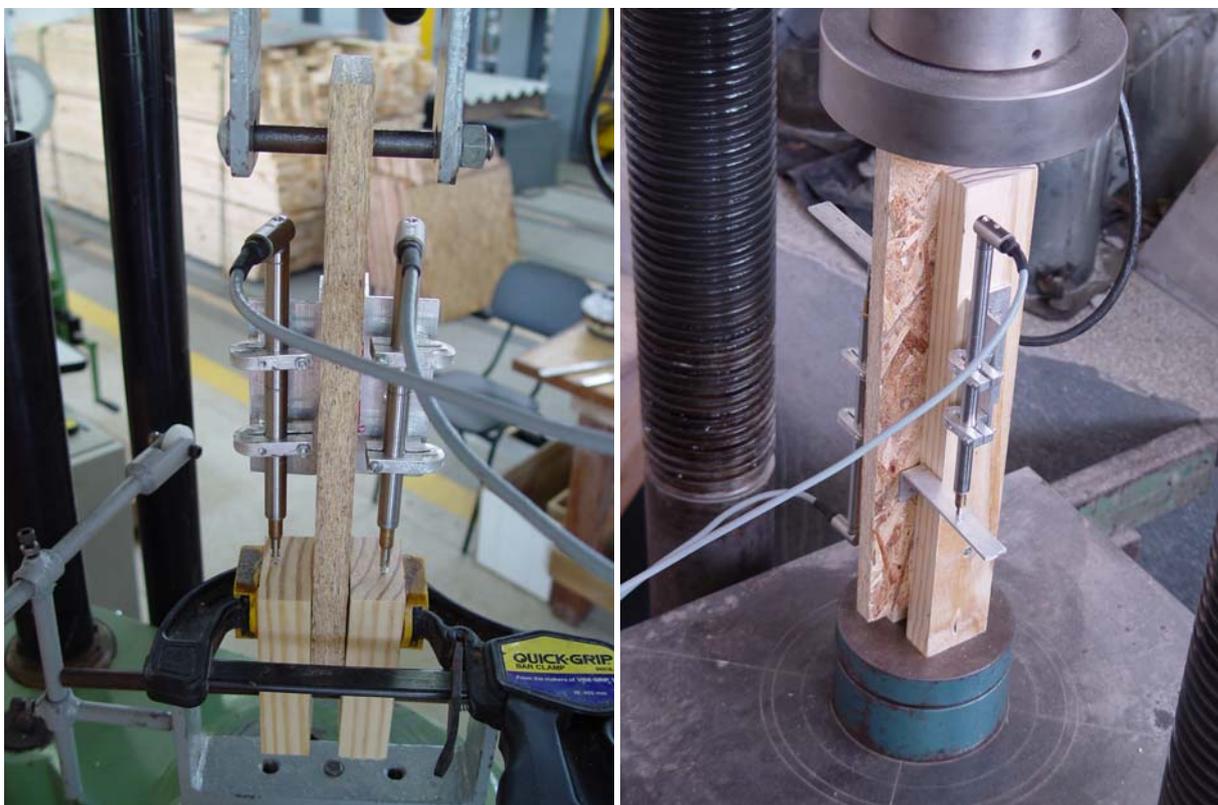


Figura 18 – Ensaios preliminares das ligações pregadas com 1 prego e 4 pregos.

Os ensaios permitiram concluir que o desempenho das ligações é proporcional à quantidade de pregos utilizados, obtendo-se resultados equivalentes independente de se ensaiar ligações com 1, 2 ou 4 pregos. Sendo assim, optou-se pelo corpo-de-prova com 1 prego para realizar a caracterização da ligação.

A norma brasileira de madeiras NBR 7190/97 não permite o ensaio de ligações com apenas um prego, no entanto, a norma americana ASTM D 1761-2000 – *Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood* prescreve um ensaio de caracterização de ligação utilizando apenas um conector. Baseada nesta norma, com adaptações para simular a ligação da viga, é que foi proposta a ligação com apenas um prego.

4.2 Primeira bateria

Na Figura 19 estão apresentados os corpos-de-prova para cada espessura de OSB. Foi avaliada a utilização de diferentes pregos (fustes lisos, anelados e espiralados), fixados através de pregação manual e de pregadeira pneumática, determinando-se o prego que apresentou o melhor desempenho para ser adotado na viga.

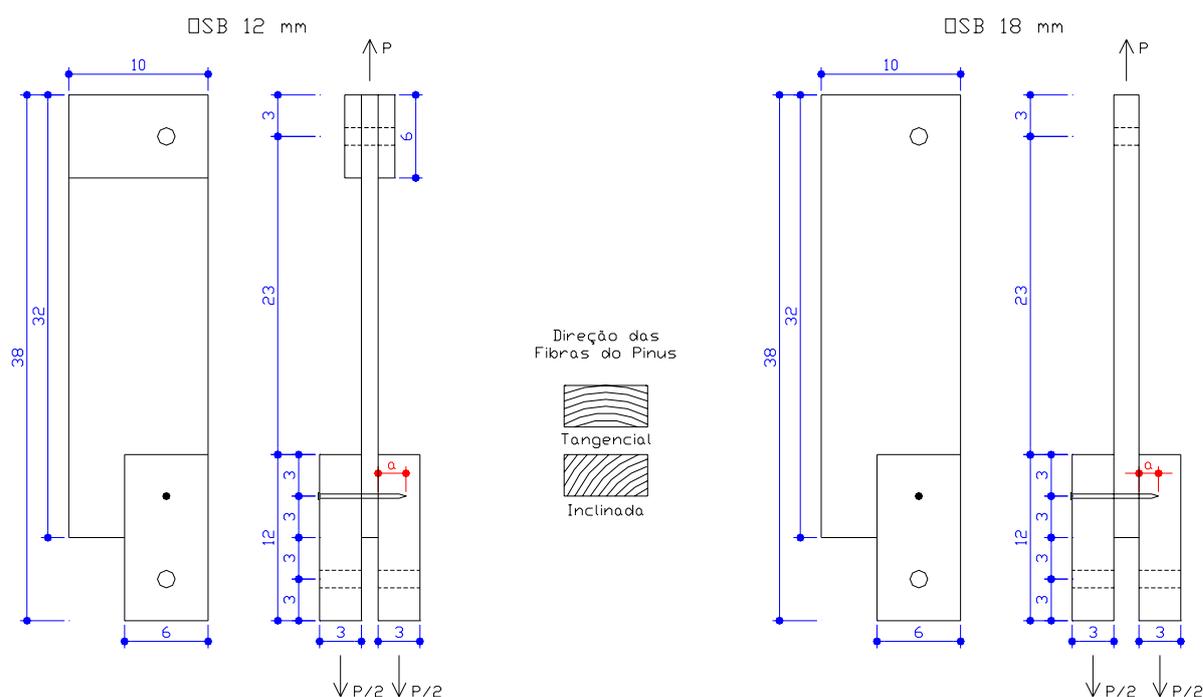


Figura 19 – Corpos-de-prova utilizados na 1ª bateria dos ensaios de ligações pregadas.

Foram selecionados doze barrotes de Pinus com seção 30x60 mm, sendo seis para o OSB de 18 mm e seis para o OSB de 12 mm. Nestes grupos de seis barrotes, por sua vez, havia três peças com os anéis de crescimento do Pinus na direção tangencial e três com distribuição inclinada (Figura 19). De cada barrote foram confeccionados um corpo-de-prova para cada tipo de prego e pregação utilizados. Esta é uma vantagem da configuração com apenas 1 prego, haja vista que o consumo de Pinus é pequeno, podendo ser confeccionadas diversas ligações com a mesma peça, de forma que é possível comparar o desempenho do prego com características idênticas.

Na Figura 20 podem ser vistos os diferentes pregos e o equipamento de pregação utilizado. Não foram encontrados no mercado pregos com a mesma dimensão, buscou-se trabalhar com tamanhos próximos, para minimizar esta influência.



Figura 20 – Pregos utilizados.

Na Figura 21 são mostradas fotos do ensaio realizado, onde pode-se ver o dispositivo utilizado. Nestes ensaios o sargento utilizado nas ligações preliminares foi substituído por um grampo, por ser mais fácil de fixar, bem como para homogeneizar a pressão aplicada.



Figura 21 – Ensaio para caracterização da ligação (1ª bateria).

A instrumentação do ensaio foi feita com a fixação de um transdutor de deslocamento com curso de 20 mm preso à chapa de OSB, permitindo a medição do deslocamento relativo entre a chapa e o Pinus, e a leitura concomitante da carga aplicada através de uma célula de carga com capacidade para 5000 N. Os dados foram armazenados por um sistema de aquisição de dados (HBM Spider-8), com visualização do diagrama carga-deslocamento em tempo real.

Para cada corpo-de-prova ensaiado, obtiveram-se os valores máximos de carga ($F_{\text{máx}}$) e os diagramas carga-deslocamento que foram empregados para o cálculo dos valores de rigidez das ligações (K_s), conforme recomendação da Norma Europeia EN 26891-91. A rigidez da ligação é dada por:

$$K_s = \frac{0,4F_{\text{máx}}}{\frac{4}{3}(\delta_{0,4F_{\text{máx}}} - \delta_{0,1F_{\text{máx}}})} \quad (11)$$

onde:

“ $F_{\text{máx}}$ ” é o valor máximo da carga, em N;

“ $\delta_{0,1F_{\text{máx}}}$ ” e “ $\delta_{0,4F_{\text{máx}}}$ ” são os deslocamentos correspondentes a 10% e a 40% da “ $F_{\text{máx}}$ ”, em mm.

Nas Figura 22 e Figura 23 estão apresentados o diagrama médio para as ligações com OSB de 12 mm e 18 mm respectivamente. Foi utilizada a seguinte abreviação para a identificação dos pregos: “P” - Pneumático; “M” - Manual; “L” - Liso; “A” - Anelado e “E” - Espiralado.

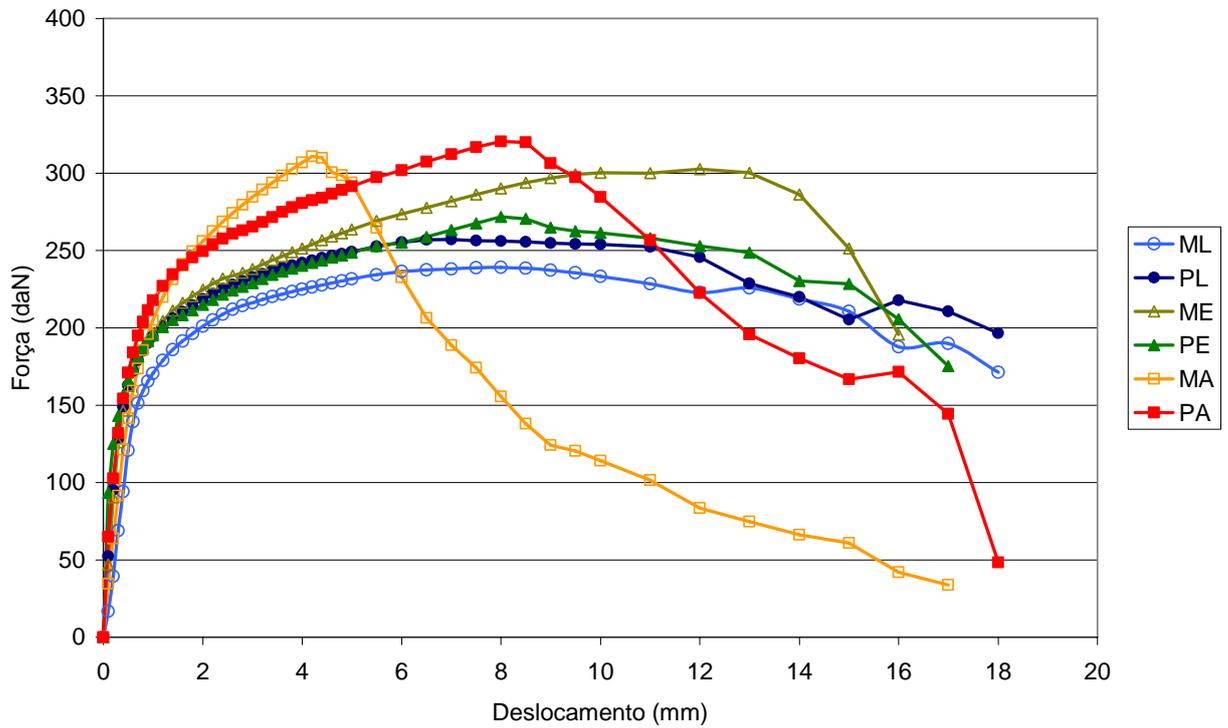


Figura 22 – Diagrama médio força x deslocamento para as ligações com OSB 12 mm.

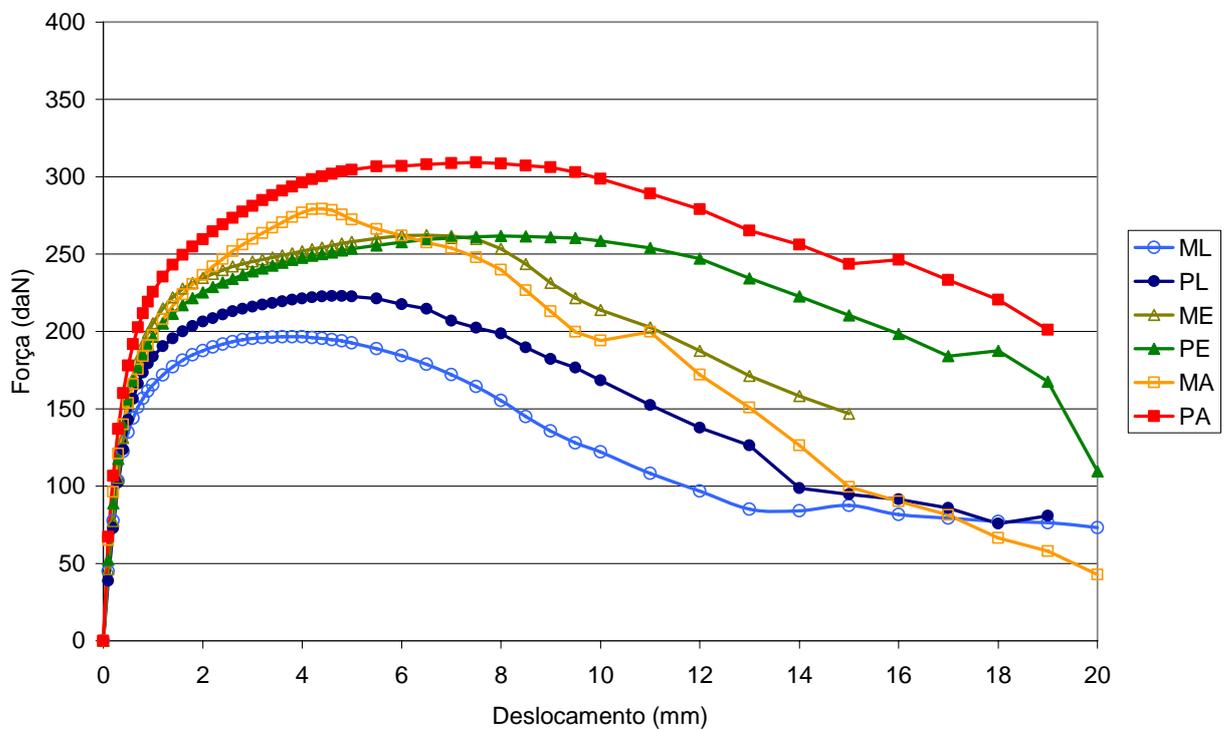


Figura 23 – Diagrama médio força x deslocamento para as ligações com OSB 18 mm.

Comparando-se os gráficos das Figura 22 e Figura 23, percebe-se que as ligações com OSB de 12 mm atingiram forças máximas maiores do que as ligações com OSB de 18 mm, este comportamento é explicado pelo fato da ancoragem do prego na peça de Pinus ser maior nas ligações com OSB de 12 mm, uma vez que os pregos utilizados são os mesmos para ambas espessuras. Na Figura 19 pode-se observar esta ancoragem, que está representada em vermelho pela letra “a”.

As ligações com prego anelado no OSB de 12 mm, tanto com pregação manual quanto pneumática, apresentaram uma queda abrupta de força, este fenômeno também é visível na pregação manual do prego anelado com OSB de 18 mm. Esta queda deve-se ao fato de o prego anelado apresentar uma resistência ao arrancamento maior do que os pregos liso e espiralado, o que leva à ruptura do prego.

Na Figura 24 pode-se observar algumas formas de ruptura ocorridas nos ensaios. Na primeira foto está apresentada uma ruptura por embutimento ocorrida no OSB de 12 mm; na segunda foi a peça de Pinus que fissurou na pregação, ocasionando uma ruptura por fendilhamento na alma. Estas duas primeiras formas de ruptura não eram desejadas, e quando de suas ocorrências o procedimento adotado foi repetir o ensaio com outro corpo-de-prova utilizando a mesma madeira, e quando da impossibilidade de repetição os dados do ensaio foram descartados. A forma mais comum de ruptura está representada na terceira foto, que é a deformação excessiva da ligação através do deslizamento do prego de dentro da ligação, principalmente nos pregos lisos. Na última foto a ruptura é a descrita no parágrafo anterior, na qual ocorria o rompimento do prego anelado. Outras formas de ruptura também foram observadas de forma isoladas, não caracterizando um comportamento geral.



Figura 24 – Rupturas encontradas no ensaio de ligação.

Na Figura 25 estão os dados referentes à força máxima encontrados no ensaio de ligações com OSB de 12 mm.

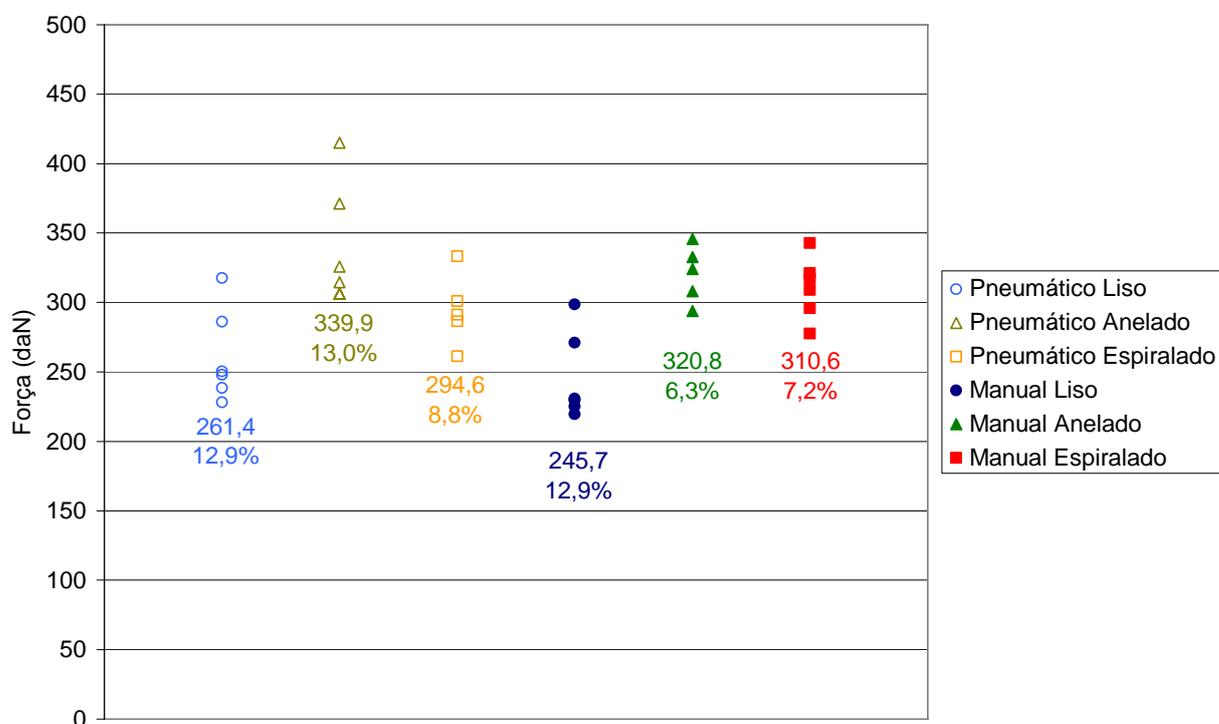


Figura 25 – Força máxima obtida no ensaio de ligação com OSB de 12 mm.

Estes dados foram submetidos à análise de variância (Anova) apresentada na Tabela 5, na qual observa-se que houve diferença significativa entre as médias, ao nível de 5% de significância. Nesta tabela utilizou-se as seguintes abreviações: “SQ” – Soma dos Quadrados, “GDL” – Graus De Liberdade, “MQ” – Médias Quadradas, “F” é a divisão entre a média quadrada do grupo pela média quadrada do resíduo e “ F_{α} ” obtida da “Distribuição F”. Quando “F” é maior que “ F_{α} ” existe diferença significativa entre as médias.

Tabela 5 – Análise estatística Anova com relação à F_{\max} para ligações com OSB 12 mm

Fonte	SQ	gdl	MQ	F	F_{α}	Conclusão
Prego	38200,6	5	7640,1	7,8	2,6	Existe diferença significativa entre as médias
Resíduo	27325,3	28	975,9			
Total	65525,9	33				

Na Tabela 6 estão comparadas as médias de “ $F_{m\acute{a}x}$ ” para cada tratamento. Observa-se que os pregos anelados e espiralados apresentaram desempenhos semelhantes (classe A), no entanto o prego espiralado com fixação pneumática não difere do prego liso também fixado pneumaticamente (classe B), este último por sua vez teve um desempenho semelhante estatisticamente ao prego liso com fixação manual (classe C).

Tabela 6 – Classificação das ligações com OSB 12 mm quanto ao critério $F_{m\acute{a}x}$

Prego	Média	Classe		
PA	339,9	A		
MA	320,8	A		
ME	310,6	A		
PE	294,6	A	B	
PL	261,4		B	C
ML	245,7			C

Na Figura 26 estão os dados referentes à rigidez encontrados no ensaio de ligações com OSB de 12 mm.

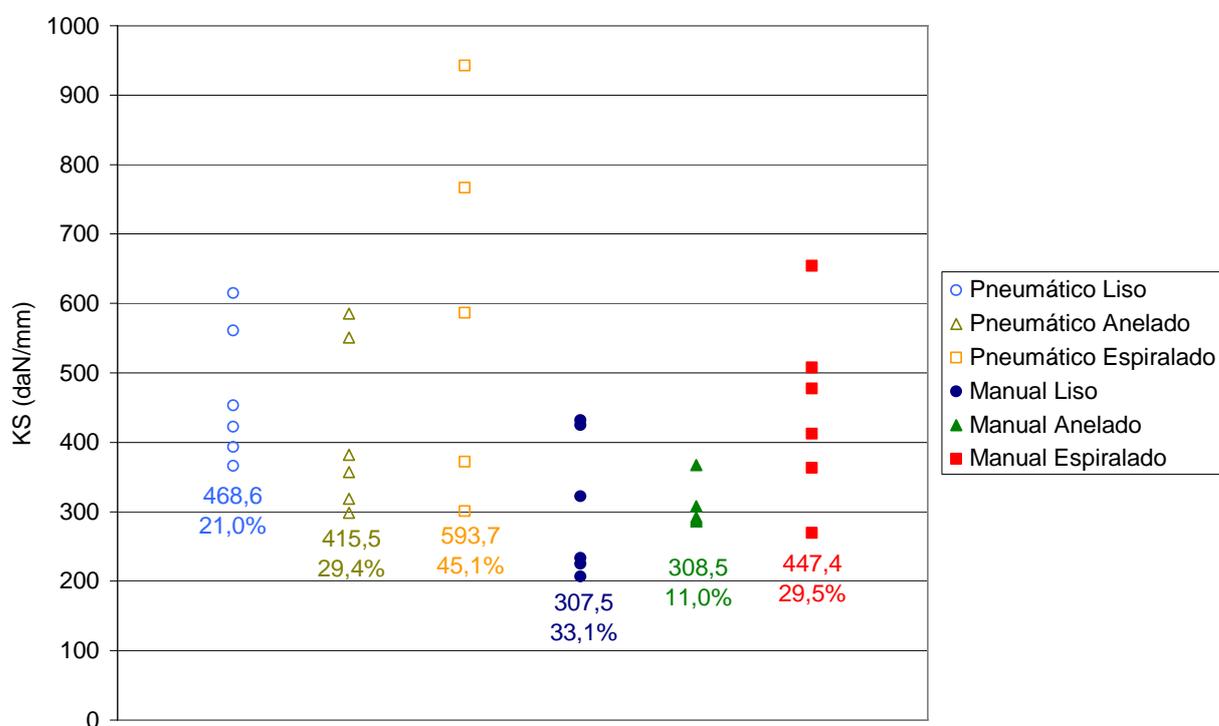


Figura 26 – Rigidez da ligação com OSB de 12 mm.

A análise de variância destes dados está apresentada na Tabela 7, na qual observa-se que houve diferença significativa entre as médias, ao nível de 5% de significância.

Tabela 7 – Análise estatística Anova com relação à K_s para ligações com OSB 12 mm

Fonte	SQ	gdl	MQ	F	F α	Conclusão
Prego	307725,0	5	61545,0	3,1	2,6	Existe diferença significativa entre as médias
Resíduo	553783,2	28	19778,0			
Total	861508,2	33				

Na Tabela 8 estão comparadas as médias de “ K_s ” para cada tratamento. Observa-se na classe A que o prego espiralado com fixação pneumática difere neste critério dos pregos anelado e liso, ambos com fixação manual, os demais pregos apresentaram desempenhos semelhantes (classe B).

Tabela 8 – Classificação das ligações com OSB 12 mm quanto ao critério K_s

Prego	Média	Classe	
PE	593,7	A	
PL	468,6	A	B
ME	447,4	A	B
PA	415,5	A	B
MA	308,5		B
ML	307,5		B

Na Figura 27 estão os dados referentes à força máxima encontrados no ensaio de ligações com OSB de 18 mm.

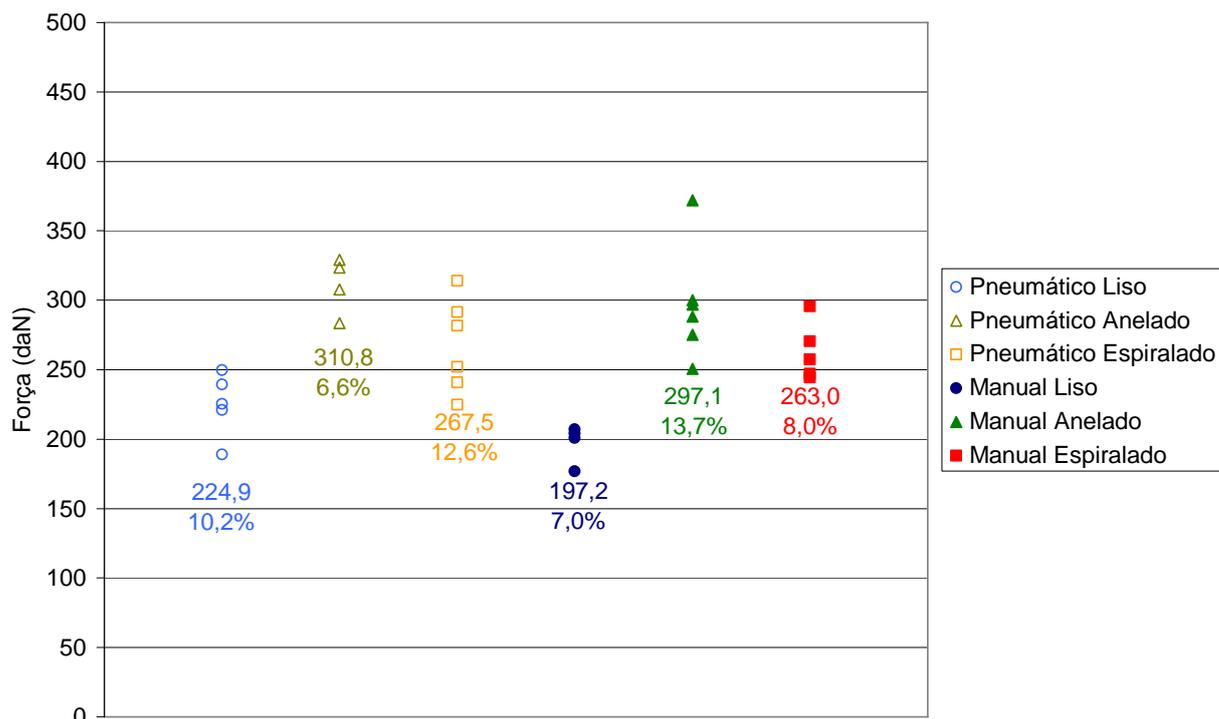


Figura 27 – Força máxima obtida no ensaio de ligação com OSB de 18 mm.

Na Tabela 9 observa-se que houve diferença significativa entre as médias, ao nível de 5% de significância, neste critério para estas ligações.

Tabela 9 – Análise estatística Anova com relação à $F_{\text{máx}}$ para ligações com OSB 18 mm

Fonte	SQ	gdl	MQ	F	F_{α}	Conclusão
Prego	40812,9	5	8162,6	9,9	2,6	Existe diferença significativa entre as médias
Resíduo	19746,3	24	822,8			
Total	60559,2	29				

Na Tabela 10 estão comparadas as médias de “ $F_{\text{máx}}$ ” para cada tratamento. Observa-se que os pregos anelados e espiralados apresentaram desempenhos semelhantes (classe A), no entanto os pregos espiralados não diferem do prego liso com fixação pneumática (classe B), que por sua vez é semelhante estatisticamente ao prego liso com fixação manual (classe C).

Tabela 10 – Classificação das ligações com OSB 18 mm quanto ao critério $F_{m\acute{a}x}$

Prego	Média	Classe		
PA	310,8	A		
MA	297,1	A		
PE	267,5	A	B	
ME	263,0	A	B	
PL	224,9		B	C
ML	197,2			C

Na Figura 28 estão os dados referentes à rigidez encontrados no ensaio de ligações com OSB de 18 mm. Como pode ser visto na Tabela 11 estes dados não apresentam diferença significativa entre as médias, ao nível de 5% de significância. Logo, os tratamentos estão classificados apenas na classe A.

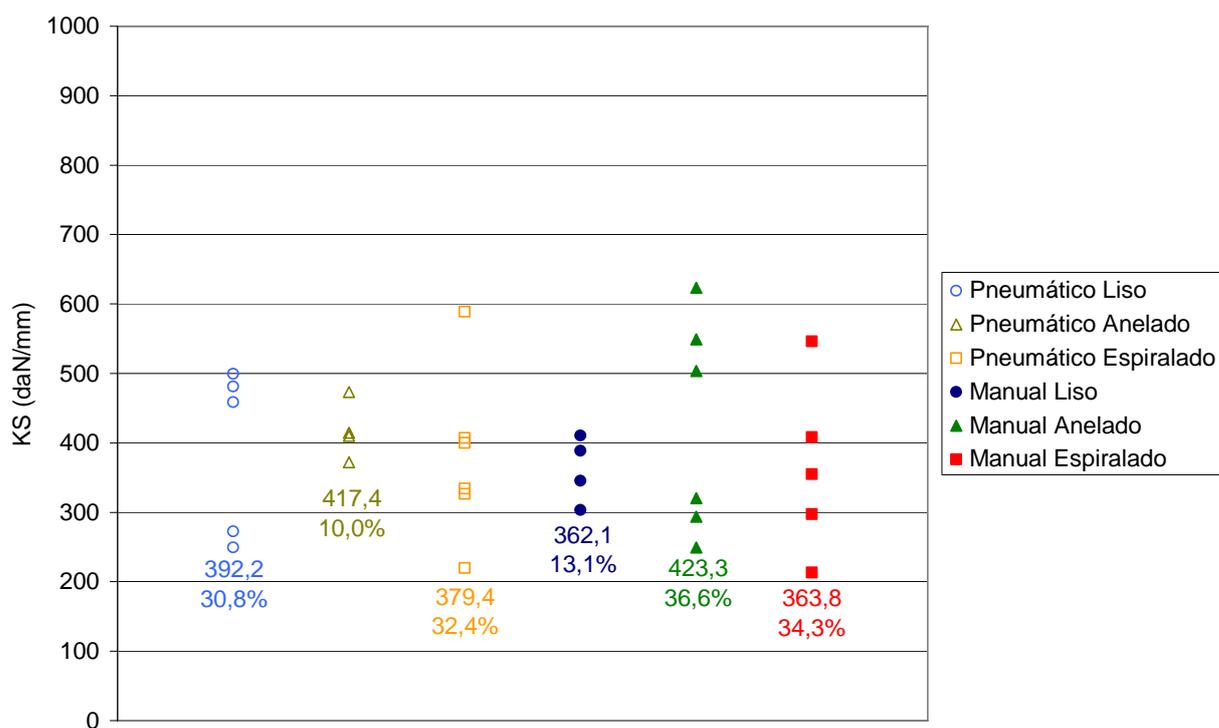


Figura 28 – Rigidez da ligação com OSB de 18 mm.

Tabela 11 – Análise estatística Anova com relação à K_s para ligações com OSB 18 mm

Fonte	SQ	gdl	MQ	F	$F\alpha$	Conclusão
Prego	16880,0	5	3376,0	0,2	2,6	As médias não diferem significativamente
Resíduo	328129,9	24	13672,1			
Total	345009,9	29				

4.2.1 Conclusões relativas à 1ª bateria de ligações

No dimensionamento de vigas I um dos critérios a ser atendido é o deslocamento admissível (flecha máxima) no meio do vão, igual a $L/350$. No ensaio de flexão a quatro pontos das vigas em questão, dificilmente a ligação será exigida ao máximo sem que haja a ruptura da viga (seja por cisalhamento na alma, e/ou por tração ou compressão nas mesas). Sendo assim o critério fundamental analisado nesta etapa refere-se à rigidez da ligação, ou seja, o quanto a ligação se deforma durante a aplicação do carregamento.

Não foi possível trabalhar com tratamentos estatísticos separados para tipo de prego e tipo de pregação, haja vista que os pregos não possuíam as mesmas dimensões, bem como não pertenciam ao mesmo fabricante, sendo assim optou-se pelos seis tratamentos conjugados: PL, PA, PE, ML, MA e ME.

Os coeficientes de variação do estudo variaram entre 10% e 45% para o critério “ K_s ” e entre 6% e 15% para o critério “ $F_{m\acute{a}x}$ ”. Sendo assim, em alguns casos, o tamanho da amostra utilizada foi insuficiente para permitir conclusões mais significativas, ou seja, não foi possível provar diferenças tendo que se aceitar a igualdade entre a maioria das ligações.

Ficou evidente que os pregos lisos, pregados manualmente, apresentaram médias de “ $F_{m\acute{a}x}$ ” e “ K_s ”, em geral, inferiores aos demais pregos estudados.

Verificou-se também que a direção das fibras do Pinus (anéis de crescimento) não influenciou os resultados obtidos, não sendo necessário observar esta direção no momento da confecção das vigas I.

Optou-se para a execução das vigas pelo prego Anelado, uma vez que este prego é de fácil localização no mercado e pela fixação pneumática para otimização do tempo de confecção.

4.3 Segunda bateria

Devido ao efeito indesejado de fissura no Pinus quando da pregação, ocasionando ruptura por fendilhamento nas almas da viga I, para a confecção destas últimas optou-se por um prego com um diâmetro menor, sendo assim necessária uma segunda bateria de ensaios, realizada apenas com o prego definido na primeira bateria: anelado com fixação pneumática com diâmetro de 2,7 mm por 70 mm de comprimento (2,7x70 mm).

Para a confecção destes corpos-de-prova foram utilizadas as peças de Pinus com seção transversal 30x30 mm que foram pré-classificadas no ensaio expedito e não foram utilizadas na confecção das vigas: 04B, 07A, 17B, 38A, 44A e 76B. Conforme explicado no capítulo seguinte, utilizaram-se as três peças com menor módulo de elasticidade (07A, 38A e 44A) para confeccionar seis ligações com o OSB de 12 mm, e com as três restantes (04B, 17B e 76B) para o OSB de 18 mm. Na Figura 29 pode-se observar a configuração adotada nos corpos-de-prova da segunda bateria e na Figura 30 tem-se uma foto da realização do ensaio. Os equipamentos utilizados na instrumentação do ensaio foram os mesmos da 1ª bateria.

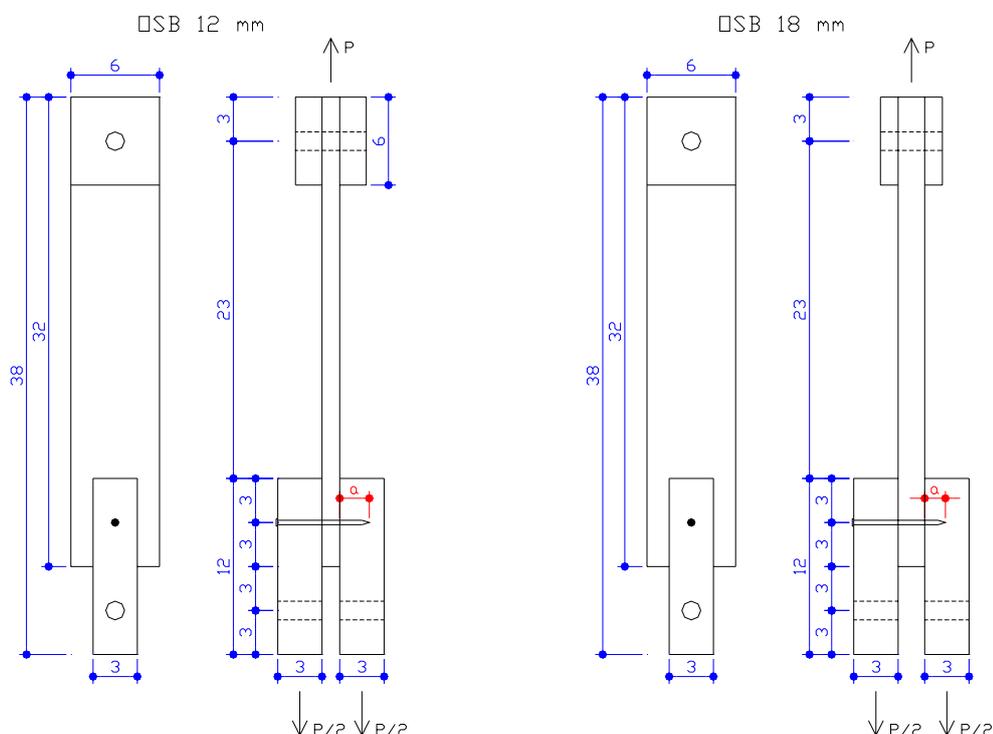


Figura 29 – Corpos-de-prova utilizados na 2ª bateria dos ensaios de ligações pregadas.



Figura 30 – Ensaio da ligação pregada entre a alma e as mesas da viga (2ª bateria).

Na Figura 31 estão apresentadas as curvas médias força x deslocamento obtidas no ensaio de ligação pregada (2ª bateria) para os OSB de 12 mm e 18 mm. Observa-se que o comportamento médio para as duas espessuras de OSB é bastante semelhante, apesar de utilizar-se o Pinus com módulo de elasticidade expedito inferior com OSB de 12 mm. Este bom desempenho para esta última espessura deve-se novamente a uma maior ancoragem do prego no Pinus, conforme indicado em vermelho pela letra “a” na Figura 29. Estas curvas foram utilizadas na modelagem das vigas pregadas, para caracterizar o comportamento não linear deste tipo de estrutura.

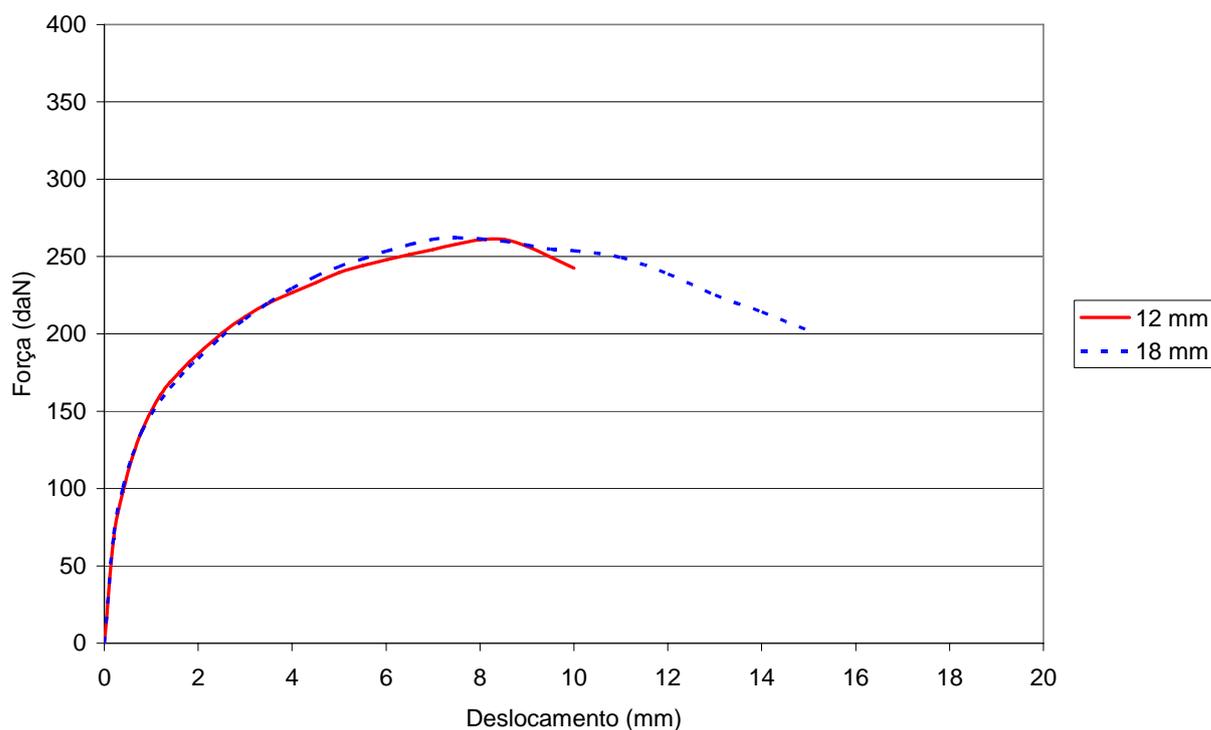


Figura 31 – Diagrama médio força x deslocamento para as ligações (2ª bateria).

Nas Tabela 12 e Tabela 13 estão apresentados os resultados obtidos nas ligações com o prego anelado adotado nas vigas I. Como era de se esperar estes resultados estão aquém daqueles obtidos pelo prego anelado com fixação pneumática na primeira bateria de ensaios de ligações, ou seja, a diminuição do diâmetro do prego resulta em uma ligação mais deformável e menos resistente.

Tabela 12 – Resultado da 2ª bateria para as ligações com OSB de 12 mm

CP	E (MPa) Expedido	Força (daN)	Ks (daN/mm)
01-07A	6167	270,0	152,6
02-07A	6167	255,9	137,4
03-44A	10290	297,0	159,4
04-44A	10290	264,9	195,1
05-38A	10900	320,0	173,8
06-38A	10900	269,9	261,0
Média	9119	279,6	179,9
CV (%)	25,3	8,6	24,6

Tabela 13 – Resultado da 2ª bateria para as ligações com OSB de 18 mm

CP	E (MPa) Expedido	Força (daN)	Ks (daN/mm)
07-04B	12785	302,7	112,7
08-04B	12785	289,2	123,6
09-76B	17000	253,2	149,1
10-76B	17000	271,7	224,7
11-17B	17670	251,2	285,4
12-17B	17670	272,3	390,8
Média	15818	273,4	214,4
CV (%)	15,0	7,3	50,7

A obtenção destes resultados finaliza a etapa de caracterização da ligação, partindo-se então para a confecção das vigas.

5 CONFECÇÃO DAS VIGAS

As vigas foram confeccionadas com as dimensões mostradas na Figura 32 (em mm).

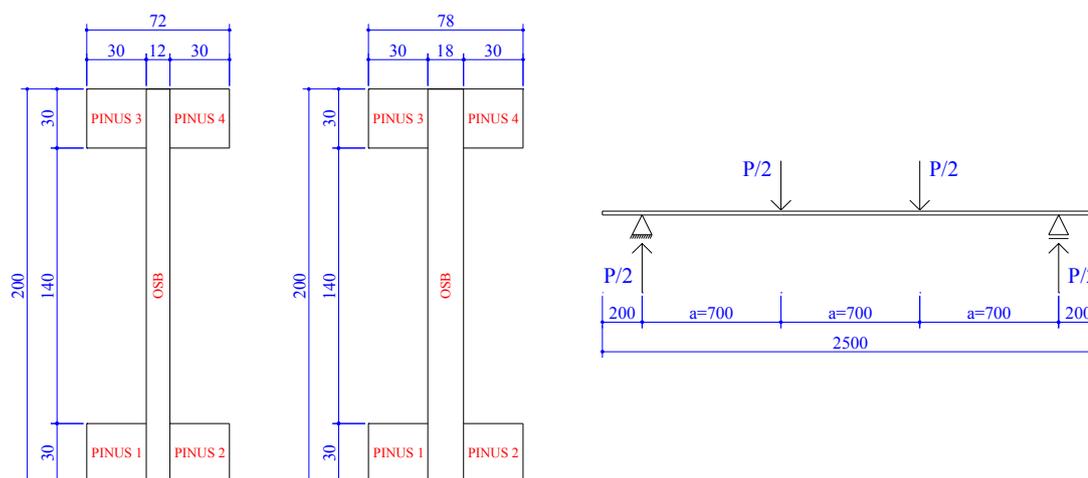


Figura 32 – Seção transversal da viga e arranjo do ensaio de flexão a quatro pontos.

Na composição das vigas I buscou-se trabalhar com mesas que apresentassem a menor diferença possível entre os módulos de elasticidade das peças de pinus, evitando-se assim efeitos de flambagem.

Na viga I, as mesas resistem aos esforços normais e a alma resiste aos esforços cisalhantes. Buscando-se otimizar as tensões de ruptura do pinus e do OSB, dividiram-se as peças de pinus em dois lotes, empregando-se o lote com menor módulo de elasticidade com o OSB de 12 mm de espessura, e o lote com maior módulo de elasticidade com o OSB de 18 mm de espessura.

Para as vigas com o OSB de 12 mm de espessura, utilizou-se o pinus com módulo de elasticidade variando entre 6747 MPa e 12531 MPa, sendo o valor médio deste lote de peças igual a 10671 MPa, com um coeficiente de variação de 14%. Nas vigas com o OSB de 18 mm de espessura, o módulo de elasticidade do Pinus variou entre 12534 MPa e 17931 MPa; o valor médio ficou em 14385 MPa com um coeficiente de variação de 9%.

Foram confeccionadas 8 vigas para cada tipo de ligação. No primeiro tipo, a ligação se deu por pregos utilizando-se uma pregadeira pneumática; no segundo foi por adesivo com a pressão de colagem fornecida por pregos utilizando-se uma pregadeira pneumática; e no terceiro a ligação foi apenas por adesivo com a pressão de colagem fornecida por meio de prensagem. A dificuldade na execução da ligação foi aumentando do primeiro tratamento para o último, sendo que o primeiro pode ser executado em canteiro de obras, o último indicado para execução em indústria e, o segundo tratamento é intermediário, buscando-se minimizar o custo de produção na indústria, bem como não impedir que seja executado em canteiro de obras.

Para não privilegiar nenhuma das ligações entre a alma e as mesas, cada par de peças de Pinus que compunham uma das mesas foi alocada para um tipo diferente de ligação, conforme indicado na Tabela 14 e Tabela 15. Nestas tabelas cada linha representa uma mesa formada por um par de peças de Pinus, a cada seis mesas formou-se um lote do qual foram confeccionadas três Vigas I, sendo uma para cada ligação: (A) pregada; (B) colada e pregada; e (C) colada.

Tendo em vista que a madeira resiste melhor à tração do que à compressão, as peças com maior módulo de elasticidade, dentro de um mesmo lote, foram posicionadas na mesa comprimida, ou seja, na mesa superior da viga I.

Na Figura 33 e Figura 34 pode-se visualizar a montagem das 48 vigas, separadas por tipo de ligação. Abaixo da viga está representado o módulo de elasticidade ponderado da mesma em MPa, composto pelas 4 peças de pinus das mesas mais a alma em OSB, sendo que para a chapa de 12 mm considerou-se $E = 4471$ MPa e para a chapa de 18 mm considerou-se $E = 4840$ MPa.. O módulo ponderado, para as vigas com cola, foi obtido através da Equação 12. Para as vigas pregadas o critério é semelhante, mas considera os coeficientes de minoração utilizados pelo Eurocode.

$$E_{\text{pond}} = \frac{E_i \cdot I_i}{I_t} \quad (12)$$

Tabela 14 – Mesas para as vigas de 12 mm

	Peça	E (MPa)	Peça	E (MPa)	Ligação
Lote 1	60B	6747	60A	6806	A
	70B	7068	70A	7259	B
	08A	7597	05A	7833	C
	05B	7908	50B	7920	C
	07B	8026	80A	8087	B
	21B	8320	87A	8392	A
Lote 2	12A	8610	44B	8737	B
	88A	8972	35B	9042	C
	54A	9139	80B	9195	A
	48A	9292	50A	9323	A
	87B	9513	47A	9558	C
	92A	9724	88B	9872	B
Lote 3	25A	9888	30A	9897	C
	89A	9953	54B	9982	A
	08B	10062	36A	10115	B
	59B	10127	33A	10199	B
	73B	10323	27A	10327	A
	21A	10347	20A	10347	C
Lote 4	48B	10508	52A	10588	A
	11A	10703	04A	10713	B
	55A	10776	65A	10817	C
	51B	10969	89B	10973	C
	66A	11066	23B	11070	B
	66B	11109	58B	11112	A
Lote 5	61A	11122	13A	11129	B
	84B	11251	51A	11252	C
	42A	11279	65B	11315	A
	28A	11325	52B	11331	A
	73A	11347	49A	11355	C
	78A	11357	37A	11389	B
Lote 6	81B	11422	92B	11474	C
	72A	11476	30B	11505	A
	31A	11541	19A	11677	B
	81A	11700	57A	11798	B
	59A	11815	35A	11819	A
	55B	11842	95A	11864	C
Lote 7	12B	11973	24B	11997	A
	38B	12051	98A	12051	B
	14A	12065	02B	12069	C
	79A	12107	41A	12140	C
	34A	12170	97B	12213	B
	72B	12232	18A	12236	A
Lote 8	29A	12273	61B	12304	B
	15A	12314	26A	12319	C
	23A	12327	97A	12331	A
	68A	12420	84A	12475	A
	03B	12495	82B	12512	C
	41B	12516	32A	12531	B

Tabela 15 – Mesas para as vigas de 18 mm

	Peça	E (MPa)	Peça	E (MPa)	Ligação
Lote 9	83B	12534	36B	12540	A
	75B	12544	75A	12564	B
	63A	12566	01B	12566	C
	27B	12640	06A	12640	C
	13B	12658	85B	12673	B
	10A	12753	22B	12780	A
Lote 10	94B	12922	98B	12926	B
	47B	12928	56B	12933	C
	95B	12945	16A	12958	A
	56A	12993	09A	13007	A
	25B	13014	69B	13049	C
	94A	13127	20B	13189	B
Lote 11	49B	13206	63B	13237	C
	58A	13244	46A	13286	A
	46B	13446	39A	13460	B
	79B	13513	15B	13607	B
	37B	13612	83A	13617	A
	57B	13674	78B	13679	C
Lote 12	74B	13743	69A	13817	A
	64B	13912	62A	13931	B
	86B	13936	68B	13963	C
	19B	14068	82A	14068	C
	91A	14128	74A	14312	B
	62B	14326	67A	14369	A
Lote 13	26B	14434	93A	14475	B
	64A	14524	71B	14524	C
	34B	14541	28B	14595	A
	67B	14615	40A	14627	A
	85A	14627	02A	14683	C
	33B	14686	91B	14703	B
Lote 14	96A	14721	53B	14740	C
	18B	14806	42B	14815	A
	29B	14863	16B	14869	B
	39B	14945	43A	14982	B
	03A	15001	77B	15139	A
	86A	15231	71A	15260	C
Lote 15	45A	15266	01A	15337	A
	11B	15376	93B	15389	B
	17A	15432	10B	15441	C
	99B	15581	53A	15733	C
	43B	15767	14B	15808	B
	31B	15857	09B	15919	A
Lote 16	24A	15958	76A	16039	B
	32B	16240	96B	16335	C
	90B	16479	06B	16641	A
	77A	16905	40B	16932	A
	22A	17271	45B	17403	C
	99A	17870	90A	17931	B

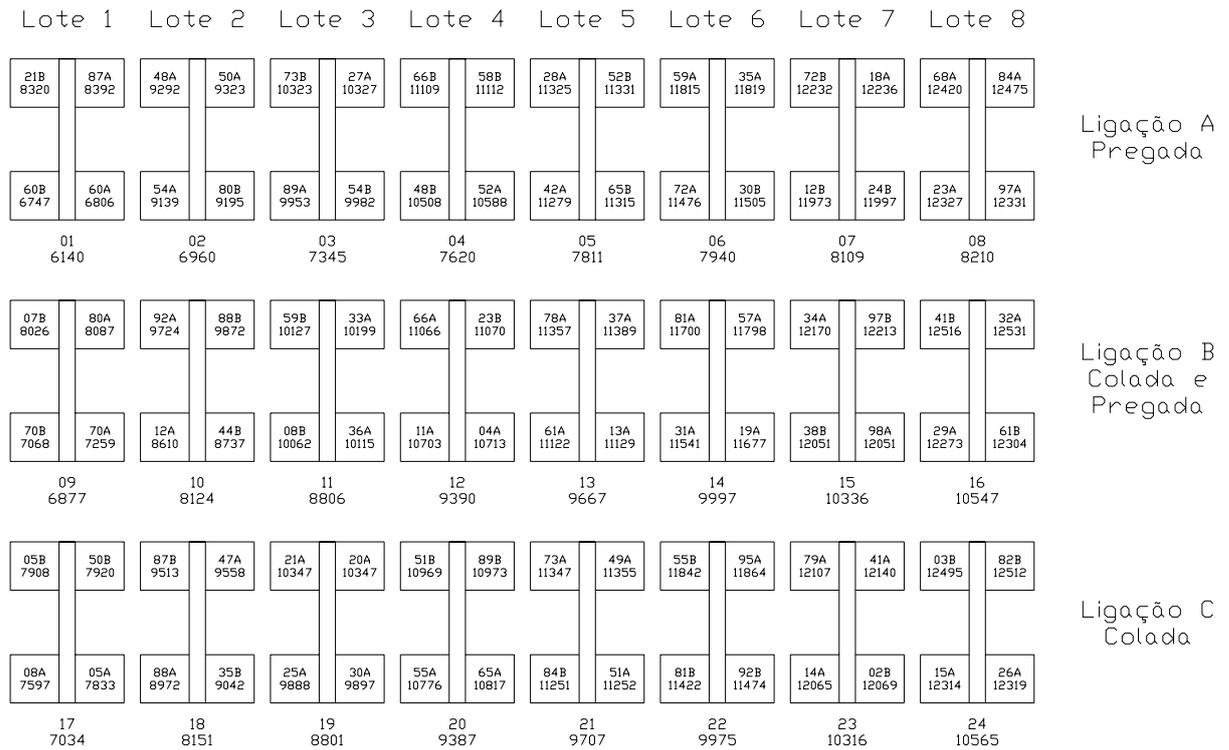


Figura 33 – Montagem das vigas com OSB de 12 mm.

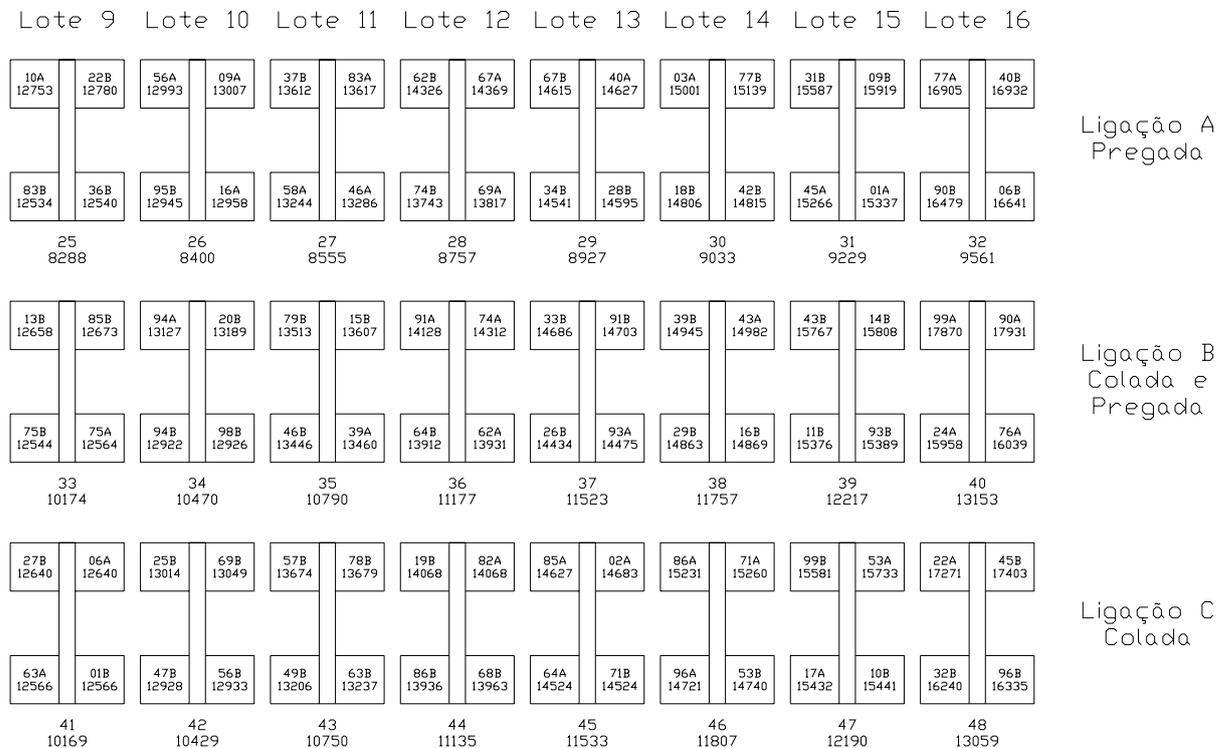


Figura 34 – Montagem das vigas com OSB de 18 mm.

A montagem das vigas foi realizada em um gabarito que facilitava o alinhamento das mesas com a alma. Na Figura 35 podem-se observar algumas etapas seguidas para a confecção das vigas pregadas: 1) colocação das peças de Pinus para compor o lado direito das mesas; 2) colocação da chapa de OSB e do lado esquerdo das mesas; 3) pregação utilizando-se a pregadeira pneumática. Nos dois lados da viga foram utilizados espaçadores que eram retirados após a pregação. A pregação foi realizada intercalada pelos dois lados da viga, com espaçamento entre pregos de 10 cm.

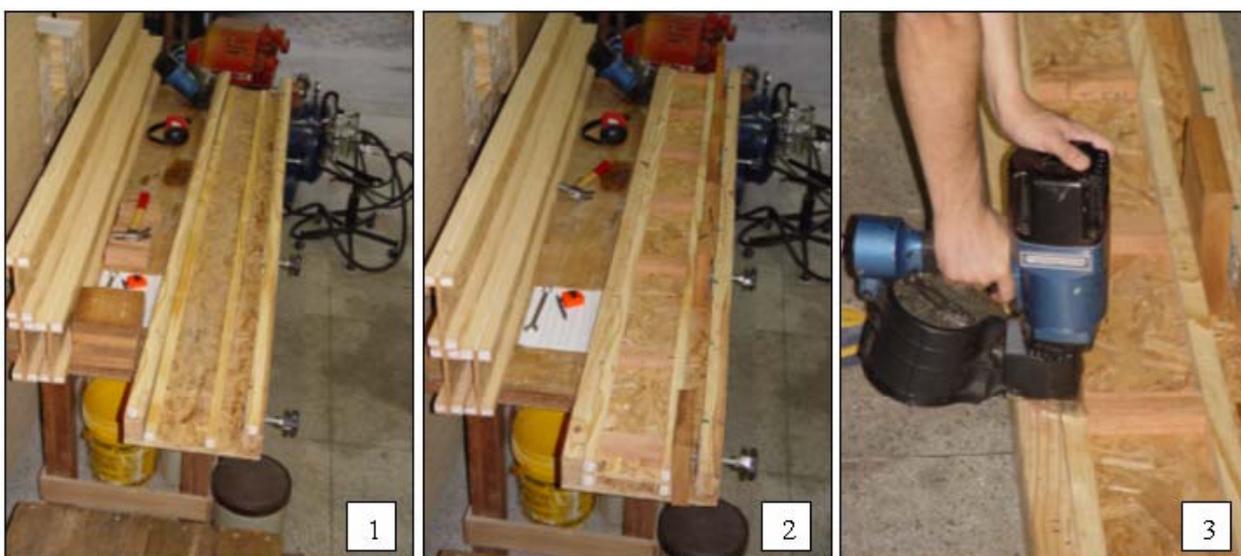


Figura 35 – Confeção das vigas pregadas.

As vigas coladas e pregadas, ou seja, aquelas em que a pressão de colagem foi realizada pelos pregos, foram confeccionadas de forma semelhante, diferenciando-se apenas pela adição de cola na face do Pinus que ficava em contato com o OSB.

A cola utilizada foi a Melanina Uréia Formol – MUF, que deve ser preparada adicionando-se o catalisador à resina propriamente dita. Respeitaram-se as recomendações do fabricante, trabalhando-se com 20 partes por peso de catalisador para cada 100 partes por peso de cola. A gramatura utilizada foi de 400 g/m² aplicadas apenas no pinus. Para um melhor desempenho na colagem as peças eram limpas com o auxílio de um compressor de ar, retirando-se a poeira armazenada sobre as superfícies a serem coladas. Na Figura 36 são mostrados os componentes utilizados para o preparo do adesivo, bem como os equipamentos utilizados.



Figura 36 – Preparo da cola.

Na montagem das vigas coladas, com pressão de colagem na prensa, tomou-se o cuidado de forrar o gabarito e os espaçadores com um plástico, de modo a evitar que a viga ficasse colada nos mesmos, haja vista que o tempo de prensagem foi no mínimo de 10 horas. A pressão de colagem foi de $0,5 \text{ N/mm}^2$ (5 kg/cm^2). A prensa utilizada foi montada no laboratório com o auxílio de um pórtico sobre a laje de reação, um macaco hidráulico e dois perfis metálicos rígidos entre os quais eram colocadas as vigas.

Na Figura 37 podem ser visualizadas as etapas para confecção das vigas coladas: 1, 2 e 3) aplicação do adesivo; 4) colocação das peças de Pinus para compor o lado direito das mesas; 5) colocação da chapa de OSB e do lado esquerdo das mesas; 6 e 7) colocação na prensa; 8) vista geral da prensa com o sistema de aquisição de dados ao fundo. A prensagem foi monitorada, compensando-se o carregamento sempre que necessário.



Figura 37 – Confecção das vigas coladas.

Após a confecção de todas as vigas partiu-se para a etapa de modelagem e análise teórica para se estimar o comportamento das mesmas nos ensaios experimentais.

6 ANÁLISES E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo é dividido em duas partes, uma analítica e outra experimental. A parte analítica consistiu em três etapas: análise teórica das vigas coladas pelo método da homogeneização da seção, dimensionamento das vigas pregadas pelo Eurocode 5 e análise de todas as vigas pelo método dos elementos finitos. A análise experimental consistiu no ensaio em laboratório das 48 vigas confeccionadas.

6.1 Análise teórica

Na análise teórica adotou-se a Teoria de Viga de Timoshenko, que leva em conta a deformação por cisalhamento no cálculo dos deslocamentos verticais ou flechas da viga fletida, utilizou-se também o Método da Homogeneização da Seção, o qual consiste em substituir a seção transversal de uma peça de material heterogêneo em uma seção equivalente de material homogêneo (LA ROVERE, 1998). Com os valores obtidos na caracterização do material encontrou-se a relação entre o módulo de elasticidade longitudinal do Pinus e do OSB, obtendo-se a seção homogeneizada da viga, conforme ilustrado na Figura 38.

$$\eta_i = \frac{E_{\text{PINUS}_i}}{E_{\text{OSB}}} \quad (13)$$

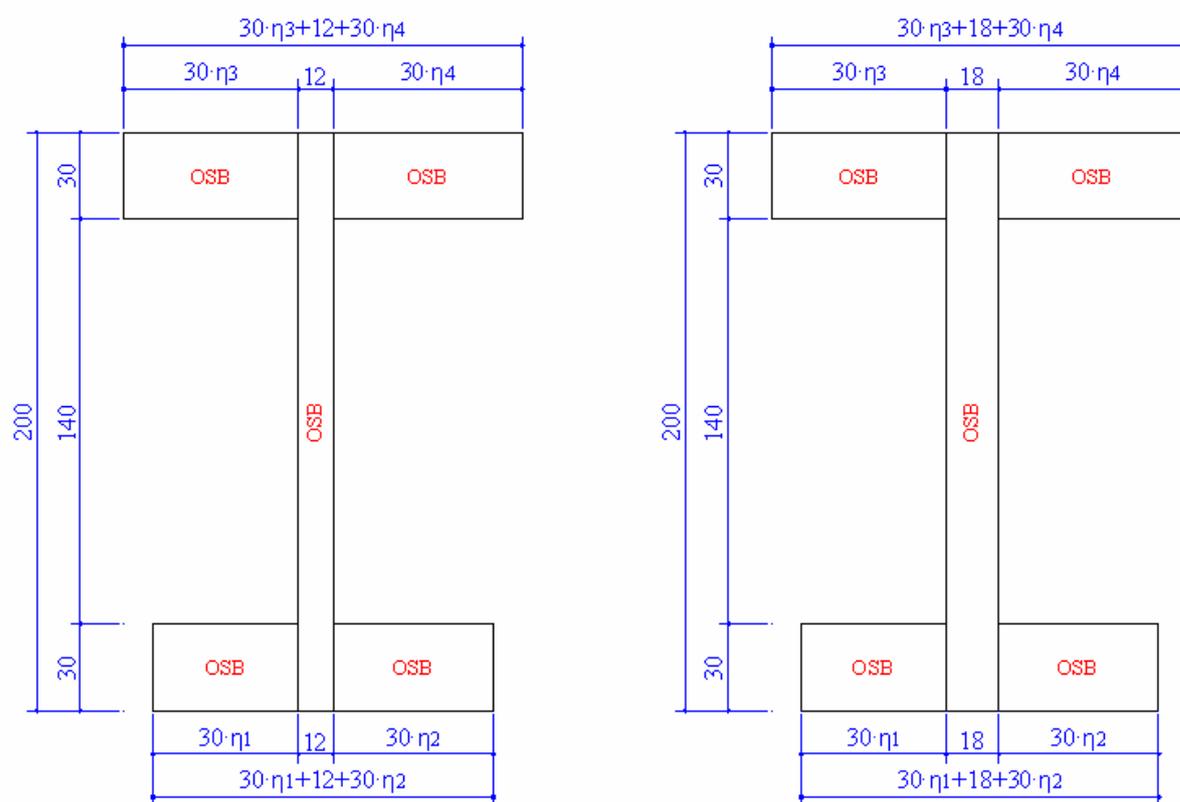


Figura 38 – Seção homogeneizada da viga I, em mm.

Pelo Princípio dos Trabalhos Virtuais da carga unitária, a flecha teórica considerando-se o momento fletor (M) e o esforço cortante (V) pode ser obtida através da seguinte fórmula:

$$\delta = \delta_F + \delta_C = \int_L \frac{M\bar{M}}{E_{OSB}I_H} ds + \int_L \chi \frac{V\bar{V}}{G_{OSB}A_H} ds \quad (14)$$

onde:

“ I_H ” é a inércia da seção homogeneizada, em mm^4 ;

“ A_H ” é a área da seção homogeneizada, em mm^2 ;

“ χ ” é o fator de forma da seção homogeneizada;

“ \bar{M} ” e “ \bar{V} ” correspondem aos esforços de flexão e cortante respectivamente causados pela carga unitária.

Tendo em vista que neste trabalho as vigas serão ensaiadas sob flexão a 4 pontos, calculou-se a flecha máxima no meio do vão pela equação 14 considerando-se a viga bi-apoiada e submetida a duas cargas concentradas iguais a “P/2”, aplicadas a uma distância “a” dos apoios, obtendo-se:

$$\delta = \frac{23Pa^3}{48E_{OSB}I_H} + \chi \frac{Pa}{2G_{OSB}A_H} \quad (15)$$

Para cada seção homogeneizada encontrou-se o respectivo coeficiente de forma (χ), calculado de acordo com DÍAZ DÍAZ (2002).

As tensões de tração e compressão para o OSB e para o pinus são calculadas através das seguintes equações:

$$\sigma_{OSB} = \frac{My}{I_H} \quad (16)$$

$$\sigma_{PINUS} = \eta \frac{My}{I_H} \quad (17)$$

Onde:

“M” é o momento fletor atuante na viga, em N·mm;

“y” é a distância entre a linha neutra e a borda superior ou inferior da viga, em mm.

A tensão de cisalhamento para o OSB é calculada através da seguinte equação:

$$\tau_{OSB} = \frac{VQ_H}{I_H b} \quad (18)$$

Onde:

“V” é o esforço cortante atuante na viga, em N;

“Q” é o momento estático da seção homogeneizada, em mm³;

“b” é a espessura do OSB, em mm.

6.2 Dimensionamento pelo Eurocode 5

A seguir apresentam-se os critérios de dimensionamento de vigas I unidas por conectores metálicos pelo anexo B do Eurocode 5.

Para a seção I os parâmetros indicados na Figura 39 são considerados:

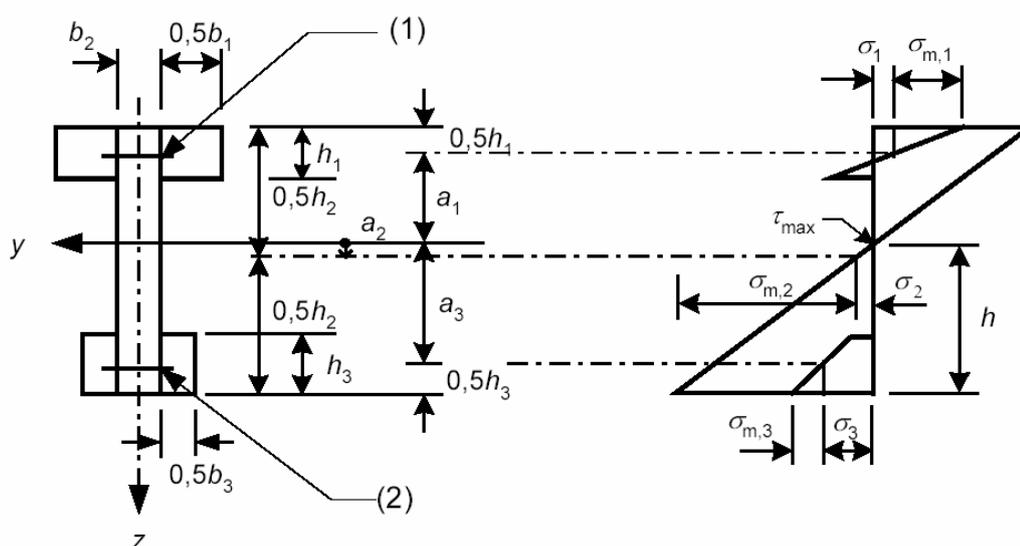


Figura 39 – Seção transversal e distribuição de tensões em vigas I. (fonte: Eurocode 5)

A rigidez efetiva ao momento é dada por:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (19)$$

onde:

“i” é o índice que vale “1” para a mesa superior, “2” para a alma e “3” para a mesa inferior, considerando-se para as mesas apenas a área de Pinus e a alma em toda a altura da viga;

“ E_i ” é o módulo de elasticidade dos materiais, em MPa;

“ I_i ” é o momento de Inércia, em mm^4 ;

“ γ_i ” é um coeficiente de minoração;

“ A_i ” é a área, em mm^2 ;

“ a_i ” é a distância entre a linha neutra e o centro geométrico de cada setor, em mm.

O coeficiente de minoração considera o espaçamento entre os conectores (s), a rigidez da ligação (K) e o vão entre os apoios da viga (ℓ), e é calculado por:

$$\gamma_2 = 1 \quad (20)$$

$$\gamma_i = \left(1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i \ell^2} \right)^{-1} \text{ para } i=1 \text{ e } i=3 \quad (21)$$

O valor de “ a ” é calculado por:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i} \quad (22)$$

$$a_1 = \left(\frac{h_2 - h_1}{2} \right) - a_2 \quad (23)$$

$$a_3 = \left(\frac{h_2 - h_3}{2} \right) + a_2 \quad (24)$$

As tensões normais são calculadas por:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}} \quad (25)$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M}{(EI)_{ef}} \quad (26)$$

A máxima tensão de cisalhamento ocorre onde as tensões normais são nulas. A máxima tensão de cisalhamento na alma (parte 2 da Figura 39) é dada por:

$$\tau_{2,\max} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h_2^2}{b_2 (EI)_{\text{ef}}} V \quad (27)$$

A carga no conector é calculada através da seguinte equação:

$$F_i = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i s_i}{(EI)_{\text{ef}}} V \quad (28)$$

6.3 Modelagem e análise pelo método dos elementos finitos

Com os valores obtidos na caracterização dos materiais realizou-se uma análise numérica pelo método dos elementos finitos (MEF), através do programa SAP 2000, utilizando-se elementos sólidos de 8 nós. Foi feito inicialmente um estudo, refinando-se a malha de elementos finitos até se chegar à convergência da solução, monitorando-se o deslocamento vertical no meio do vão e a descontinuidade de tensões entre elementos. Chegou-se a uma malha de 4400 elementos e 6969 nós para as vigas coladas e uma malha de 4400 elementos e 8181 nós para as vigas pregadas, conforme Figura 40.

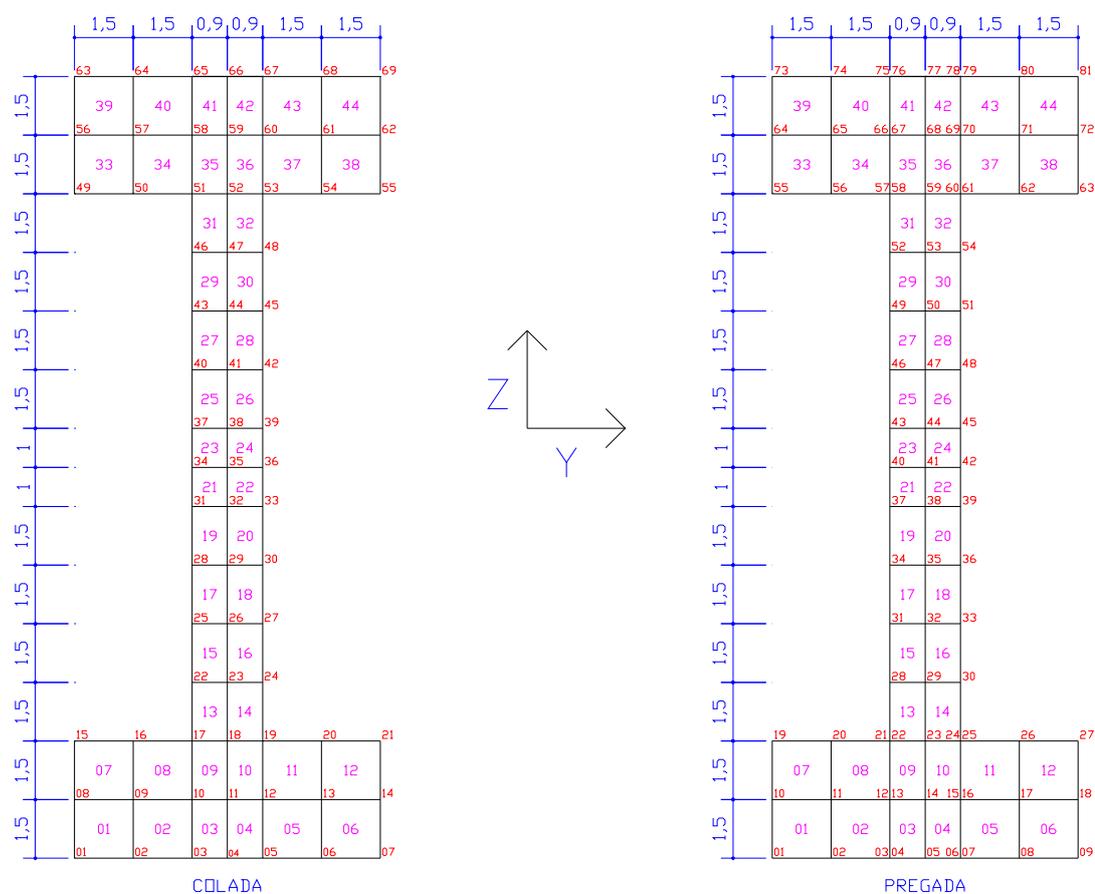


Figura 40 – Malhas utilizadas na modelagem das vigas I.

Na malha das vigas coladas, o pinus utiliza o mesmo nó do OSB, pois admite-se que o adesivo faz com que os dois materiais trabalhem solidariamente. Nas malhas das vigas pregadas os nós são independentes para o Pinus e para o OSB, e para unir estes dois materiais utilizou-se, a cada 10 cm, o elemento NLink Multilinear, que neste caso simula a ligação ensaiada com o prego anelado.

O carregamento foi aplicado sobre os nós, de acordo com o vetor de cargas consistente obtido a partir de um carregamento uniformemente distribuído. Considerou-se que os apoios da viga (rótulas) impedem apenas o deslocamento nas direções y e z.

Para comparar os resultados obtidos através da modelagem com os resultados da análise teórica, os apoios e o carregamento foram considerados na Linha Neutra (LN). O deslocamento na direção x foi impedido no meio do vão nos 3 nós da LN. Este modelo, denominado “*modelo 1*”, está apresentado na Figura 41, e é assim considerado de forma que as tensões obtidas sejam simétricas em relação à LN, de acordo com a análise teórica.



Figura 41 – Modelo 1: carregamento e apoios sobre a LN.

Um segundo modelo foi gerado nesta fase, buscando-se a simulação do ensaio real, estando os apoios fixados sob a viga e sendo o deslocamento em x impedido nos pontos de aplicação da carga (sobre a viga). Este modelo, denominado “*modelo 2*”, está apresentado na Figura 42, e possui fundamental importância quando da realização dos ensaios da viga em laboratório, pois através dele pode-se entender melhor a distribuição das tensões no comportamento real da viga ensaiada a flexão a 4 pontos.

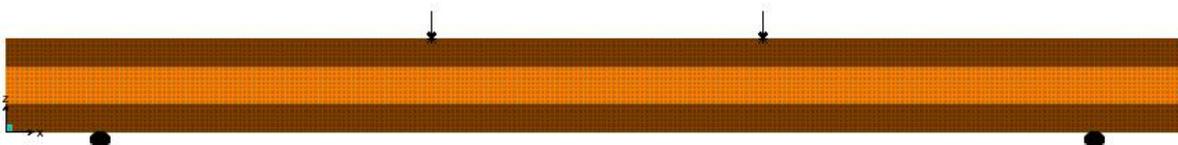


Figura 42 – Modelo 2: carregamento e apoios conforme ensaio experimental.

6.4 Análise experimental

A análise experimental das vigas foi realizada através de ensaio de flexão a quatro pontos, em um pórtico montado sobre a laje de reação (Figura 43), com o auxílio de uma célula de carga com capacidade de 20 kN. O vão livre empregado foi de 2100 mm e o espaçamento entre os apoios e os pontos de aplicação de carga de 700 mm.



Figura 43 – Pórtico sobre a laje de reação no qual foram ensaiadas as vigas.

Os deslocamentos foram medidos no meio do vão utilizando-se LVDT's, um em cada lado da viga, fixados através de régulas de alumínio que por sua vez estão fixadas na linha neutra da viga e sobre os apoios, de forma a minimizar qualquer influência do esmagamento nos apoios (Figura 44). Assim como a célula de carga, os LVDT's foram interligados ao sistema de captação de dados SPIDER 8 da HBM. Os dados foram coletados a cada segundo até a ruptura da viga.



Figura 44 – Instrumentação do ensaio.

A análise experimental foi sendo aprimorada durante os ensaios. Primeiramente foram rompidas todas as vigas pregadas. A carga de ruptura dessas vigas foi relativamente baixa, não ocorrendo esmagamento da viga nas regiões dos apoios e dos aplicadores de carga. Este efeito no entanto foi percebido nas vigas coladas, e, para evitar que isso acontecesse, foram utilizadas sapatas de distribuição de esforços (Figura 45), primeiramente apenas nos aplicadores de carga e, posteriormente, nos apoios, buscando-se evitar também o efeito de instabilidade global por flexo-torção da viga.



Figura 45 – Sapatas para distribuição dos esforços utilizadas nas vigas coladas.

Assim como no ensaio de flexão da caracterização do OSB, buscou-se obter o módulo de elasticidade pelo método da curvatura, ou seja, em função apenas do momento fletor, para tal utilizou-se um transdutor de deslocamento com curso de 10 mm, fixado no dispositivo mostrado na Figura 46, cujo vão é de 305 mm.



Figura 46 – Dispositivo utilizado para obter o módulo de elasticidade circular.

O deslocamento medido por este transdutor era a deflexão na viga entre os apoios do dispositivo que de um lado estava sobre o OSB e do outro sobre o pinus, que nem sempre estavam nivelados, distorcendo a leitura. Como o vão entre os aplicadores de carga é de 700 mm, o vão do dispositivo levou a leituras próximas de zero em quase todo o ensaio, os maiores deslocamentos medidos ficaram em torno de 0,3 mm, obtidos próximos da ruptura da viga. Sendo assim, estes dados foram descartados pois levaram a resultados incoerentes. O ideal seria ter trabalhado com um dispositivo com um vão próximo do vão dos aplicadores de carga, registrando-se deslocamentos maiores e mais confiáveis.

Nos ensaios das vigas pregadas utilizou-se um prolongador (Figura 47) nos transdutores de deslocamento que mascarou os resultados obtidos. Como as vigas pregadas já fletiam com a aplicação de cargas pequenas, não ficou visível durante o ensaio que os resultados não estavam coerentes. Quando o ensaio das vigas coladas iniciou, pode-se perceber que a leitura dos deslocamentos somente iniciava com cargas em torno de 30% da carga de ruptura, o prolongador foi retirado e a leitura se normalizou.

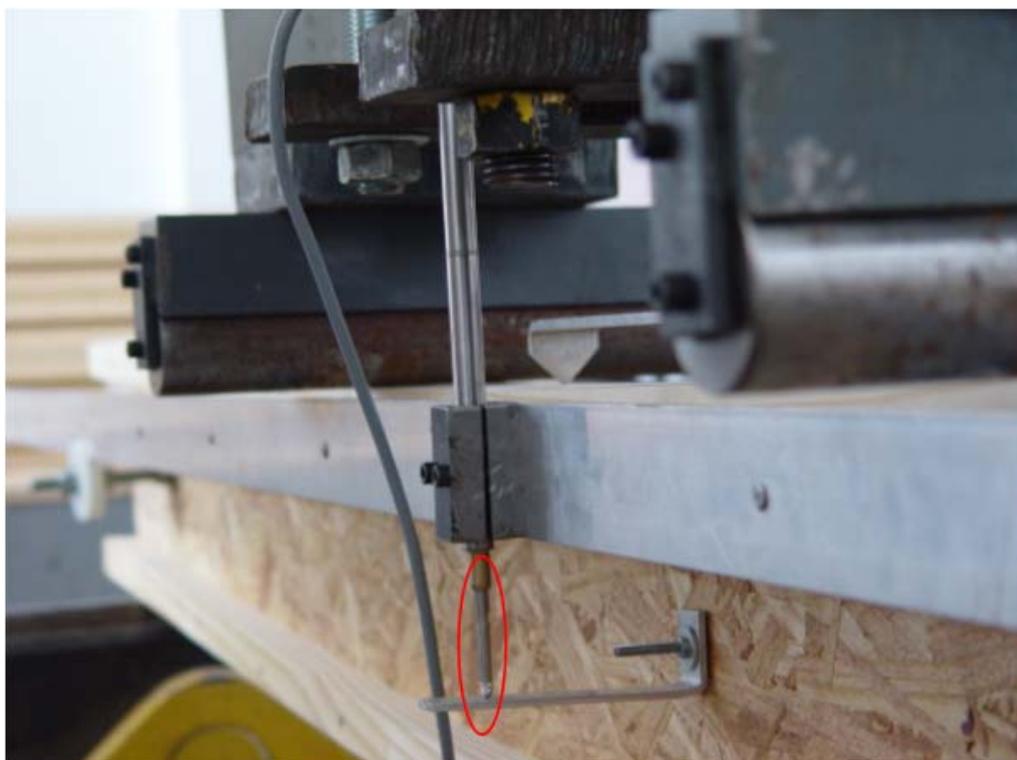


Figura 47 – Detalhe do prolongador utilizado nos ensaios das vigas pregadas.

No ensaio das vigas coladas observou-se a ruptura por instabilidade, modo global de flexo-torção (Figura 48). Para evitar este efeito procurou-se fixar o dispositivo de aplicação de carga por meio de um cinto (Figura 49) e utilizar a sapata de distribuição de esforços sobre o apoio também.

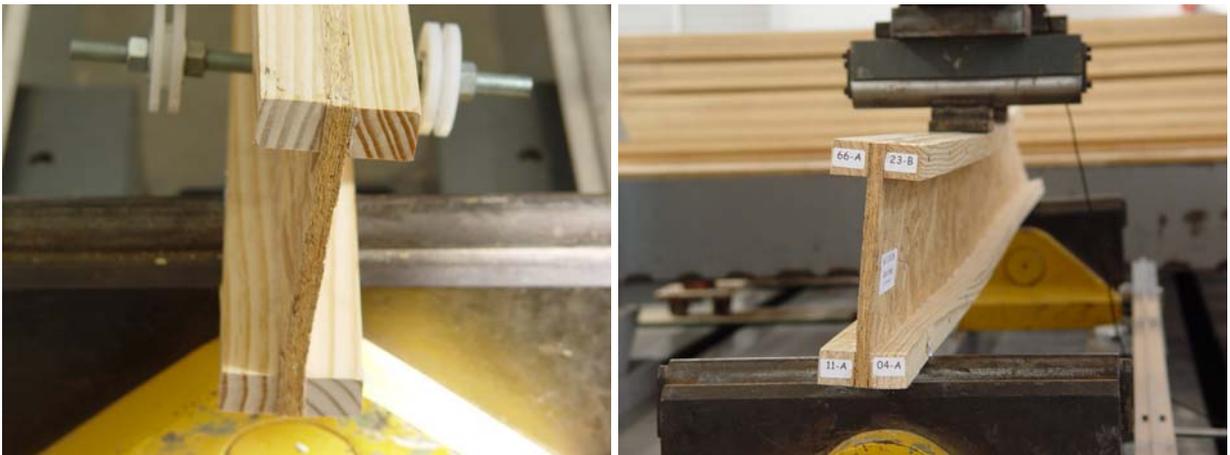


Figura 48 – Ruptura por flambagem ocorrida em algumas vigas coladas.



Figura 49 – Fixação do dispositivo de aplicação de carga por meio de um cinto.

Com base nos resultados experimentais foi avaliado se o cálculo analítico realizado através da Teoria de Viga de Timoshenko; o dimensionamento através do Eurocode 5 e a análise através de elementos finitos forneceram valores compatíveis com a prática.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 50 estão os diagramas força x deslocamento das 48 vigas ensaiadas, separadas por espessura do OSB da alma e pelo tipo da ligação. Nas ligações pregadas observa-se, de forma geral, a ocorrência da ruptura em dois estágios, que ocorreram no OSB nas regiões abaixo dos aplicadores de carga. Nas vigas coladas a ruptura ocorre uma única vez e de forma brusca.

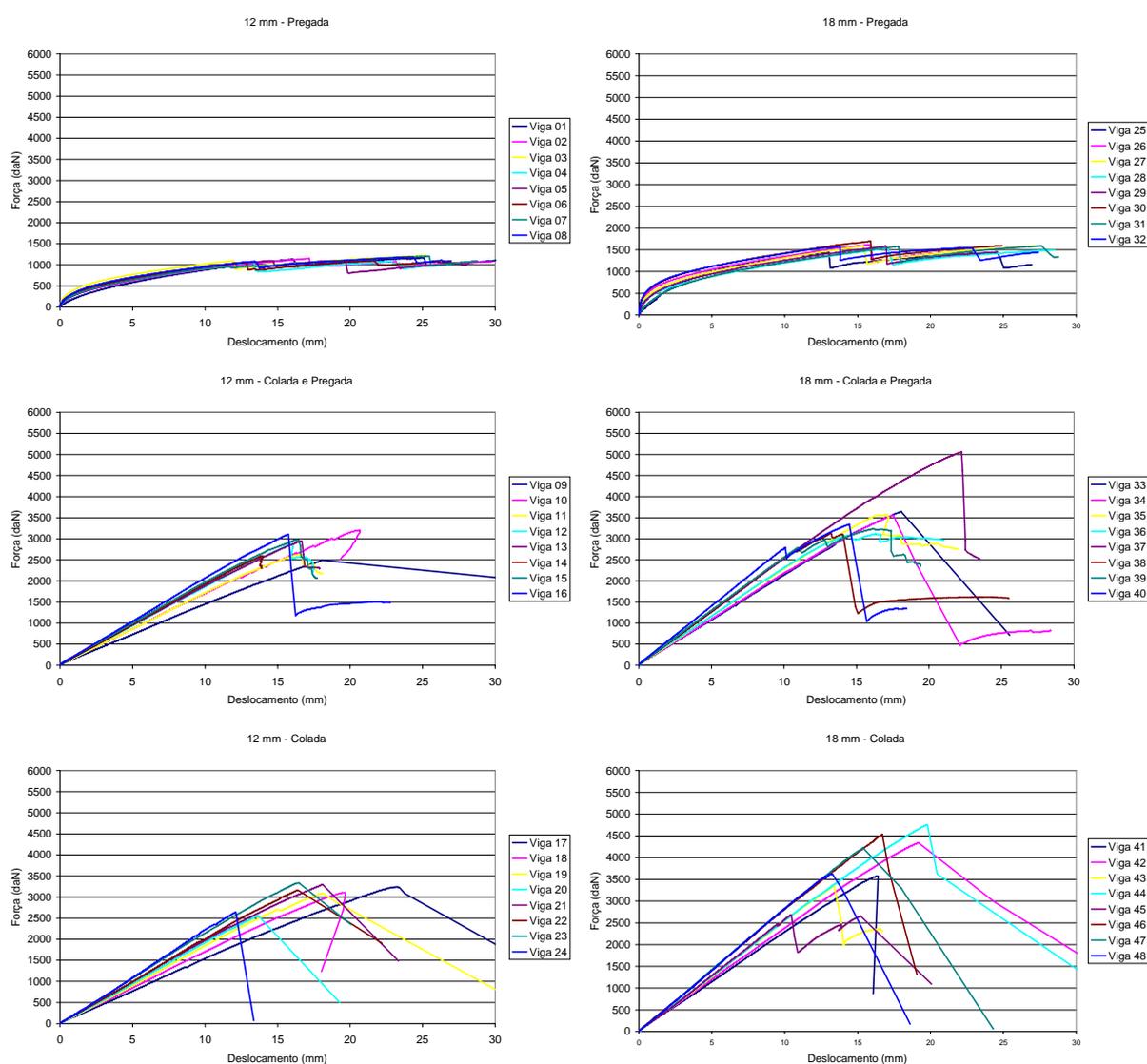


Figura 50 – Diagrama força x deslocamento das vigas ensaiadas.

7.1 Formas de ruptura das vigas

Na Figura 51 pode-se observar a forma de ruptura ocorrida nas vigas pregadas, salientando-se a ocorrência de um deslocamento relativo entre a alma em OSB e a mesa inferior em Pinus, fato este que não acontece nas vigas coladas, pois a alma e as mesas trabalham juntas. Observa-se também que a ruptura ocorre apenas no OSB, e a inclinação aproximada de 45°, o que indica a ruptura por cisalhamento da alma devido aos esforços cortantes.



Figura 51 – Ruptura típica das vigas pregadas.

Nas vigas coladas e pregadas ocorreram algumas rupturas devido ao efeito de instabilidade, modo local de placa (flambagem do banzo comprimido) já comentadas no capítulo anterior e observou-se que em algumas dessas situações a pressão exercida pelos pregos sobre a colagem foi insuficiente ao longo de toda a viga. Em outros casos, observou-se nessas vigas a ruptura simultânea do pinus e do OSB, nas regiões próximas aos aplicadores de carga, conforme Figura 52.



Figura 52 – Ruptura típica das vigas com ligação colada e pregada.

Na Figura 53 observa-se algumas rupturas ocorridas nas vigas coladas. Em alguns casos houve a ruptura do OSB e descolamento das mesas, em outros o pinus rompeu junto com o OSB e em outros houve apenas o descolamento das mesas.

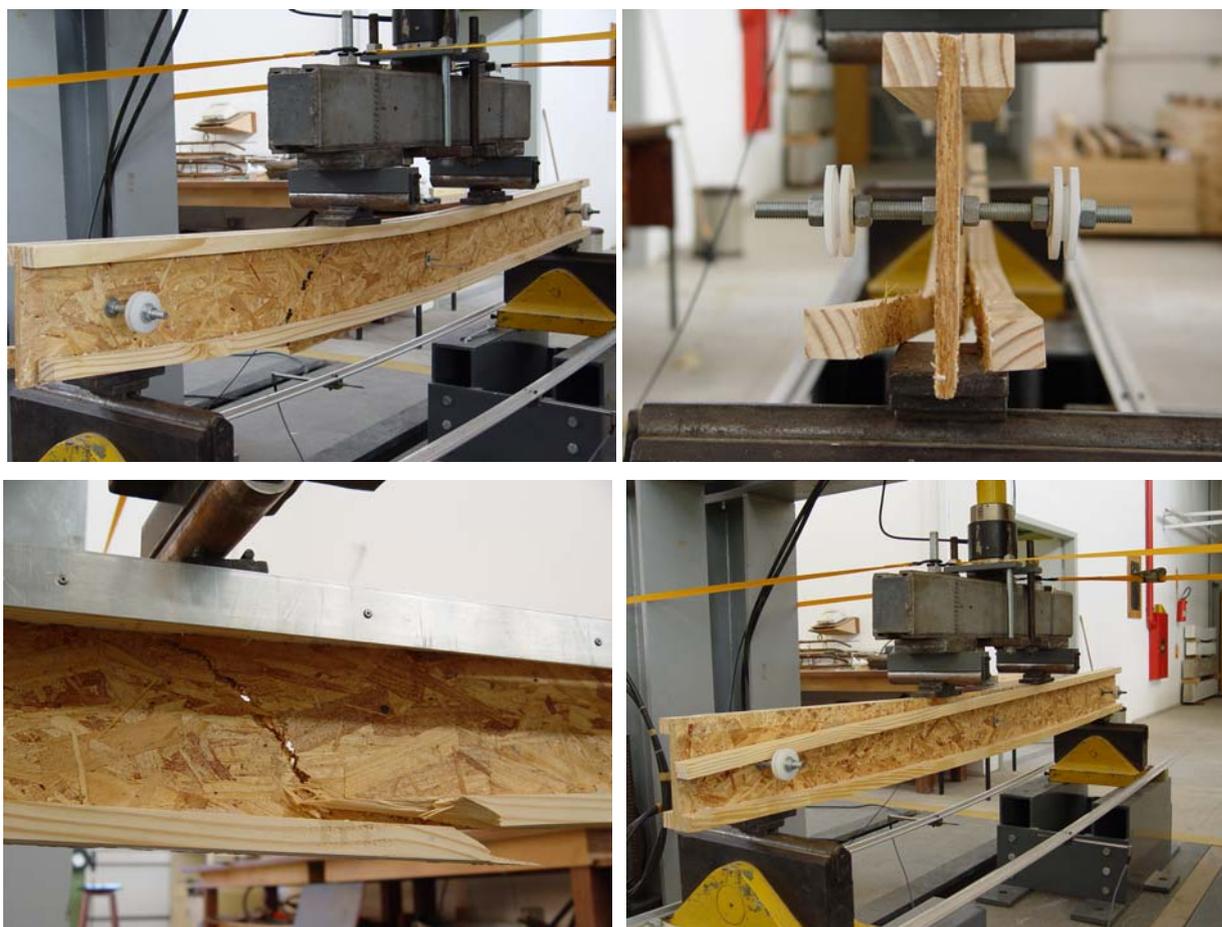


Figura 53 – Ruptura típica das vigas coladas.

7.2 Análise estatística

Na Figura 54 estão os dados referentes à força máxima encontrados no ensaio das vigas.

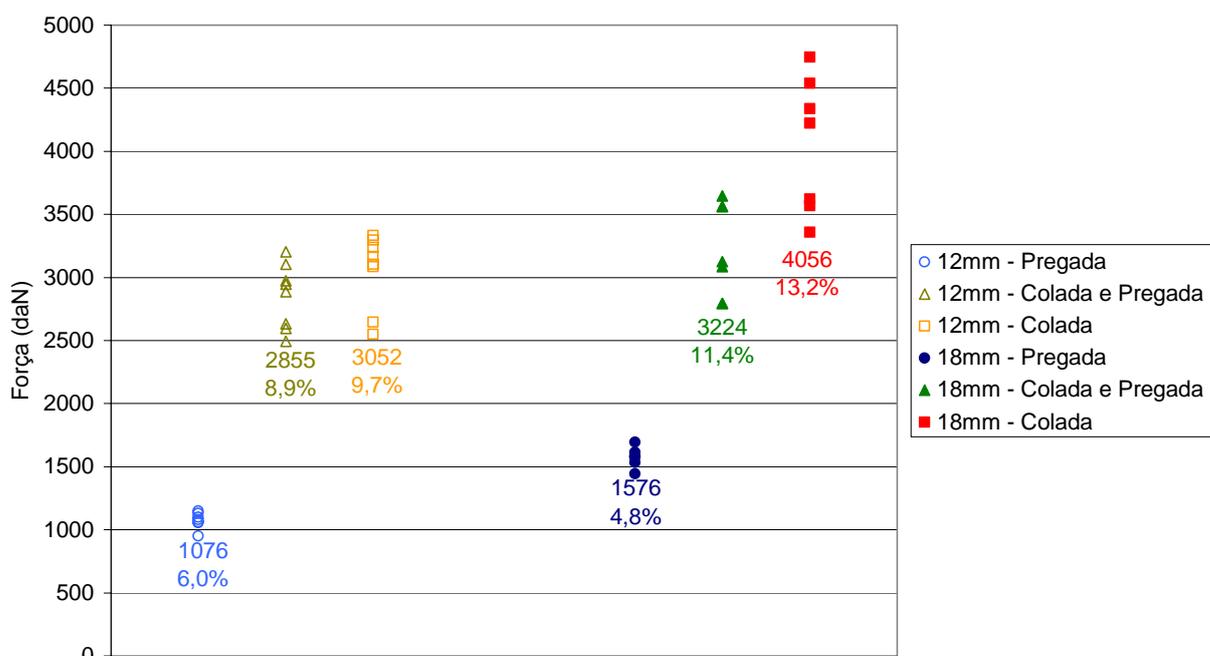


Figura 54 – Força máxima obtida no ensaio das vigas.

Na Tabela 16 está apresentada a análise de variância (Anova) com relação à força máxima para as vigas com alma de 12 mm. Observa-se que houve diferença significativa entre as médias, ao nível de 5% de significância.

Tabela 16 – Anova com relação à $F_{m\acute{a}x}$ para as vigas com alma de 12 mm

Fonte	SQ	gdl	MQ	F	Fa	Conclusão
Ligação	17328462	2	8664231	159,53	3,49	Existe diferença significativa entre as médias
Resíduo	1086208	20	54310			
Total	18414670	22				

Na Tabela 17 estão comparadas as médias de $F_{m\acute{a}x}$ para cada tratamento para as vigas com alma de 12 mm. Observa-se que as vigas com cola apresentaram desempenhos semelhantes (coluna A) enquanto as vigas “pregadas” um desempenho inferior (coluna B).

Tabela 17 – Classificação das vigas com alma de 12 mm quanto ao critério $F_{m\acute{a}x}$

Ligação	Média	Classe		
Colada	3052,28	A		
Colada e Pregada	2854,55	A		
Pregada	1075,54		B	

Na Tabela 18 está apresentada a análise de variância (Anova) com relação à força máxima para as vigas com alma de 18 mm, observa-se que houve diferença significativa entre as médias obtidas, ao nível de 5% de significância.

Tabela 18 – Anova com relação à $F_{m\acute{a}x}$ para as vigas com alma 18 mm

Fonte	SQ	gdl	MQ	F	Fa	Conclusão
Ligação	22315351	2	11157676	78,14	3,55	Existe diferença significativa entre as médias
Resíduo	2570286	18	142794			
Total	24885637	20				

Na Tabela 19 estão comparadas as médias de $F_{m\acute{a}x}$ para cada tratamento para as vigas com alma de 18 mm. Observa-se que as vigas “coladas” apresentaram um desempenho superior às vigas “coladas e pregadas” que, por sua vez, resistem mais do que as vigas “pregadas”.

Tabela 19 – Classificação das ligações com alma de 18 mm quanto ao critério $F_{m\acute{a}x}$

Ligação	Média	Classe		
Colada	4056,39	A		
Colada e Pregada	3224,26		B	
Pregada	1575,74			C

Na Figura 55 estão os dados referentes à rigidez obtidos para as vigas. Neste critério os dados das vigas pregadas foram descartados, haja vista a utilização do prolongador nos transdutores de deslocamentos. Observa-se que o desempenho das vigas “coladas” foram superiores ao desempenho das vigas “coladas e pregadas”, não existindo uma diferença significativa ao nível de 5% de significância.

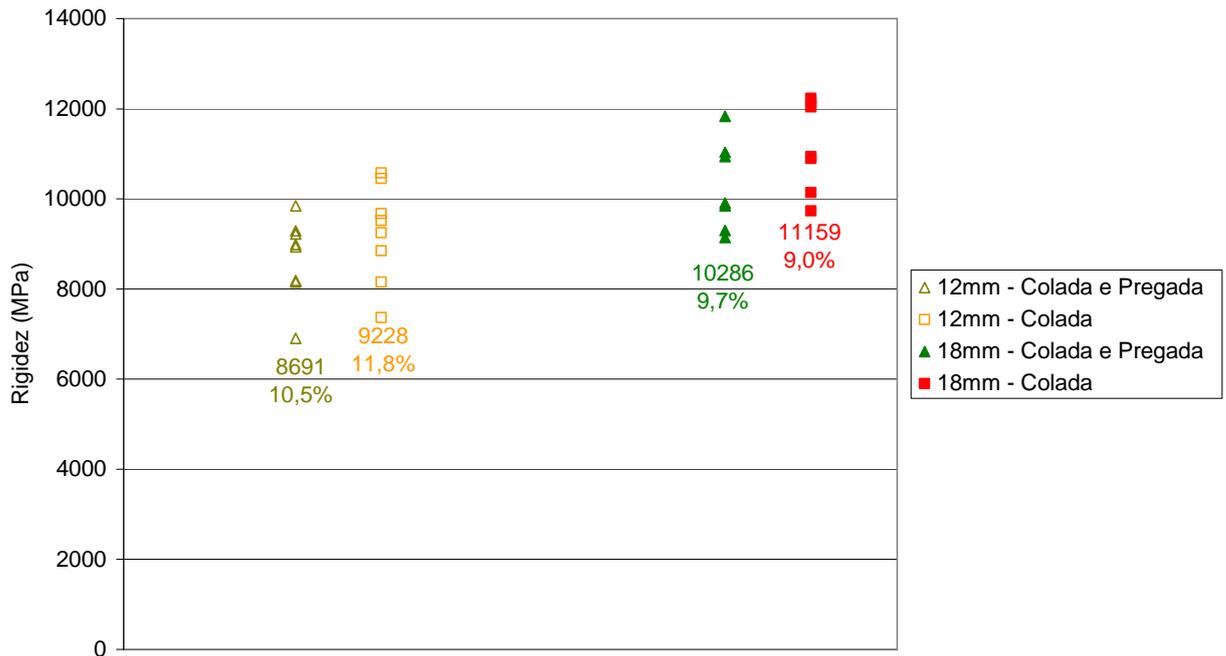


Figura 55 – Rigidez das vigas.

7.3 Comparação entre os métodos analíticos, numéricos e a análise experimental

Na Tabela 20 apresentam-se os dados de resistência (força máxima) encontrados para cada viga. As vigas 37 e 45 apresentaram resultados espúrios (assinalados em vermelho) e que foram descartados na média e na análise estatística, o mesmo ocorrendo para as vigas 03 e 32 com relação ao módulo de elasticidade, sendo descartadas também.

Tabela 20 – Força máxima para as vigas I

Ligação	Viga OSB 12mm	Ensaio	Analítico		Viga OSB 18mm	Ensaio	Analítico	
Pregada	01	1130,4	900,7	-20,3%	25	1444,4	1339,9	-7,2%
	02	1148,2	925,6	-19,4%	26	1613,8	1344,7	-16,7%
	03	1092,5	938,1	-14,1%	27	1585,4	1352,2	-14,7%
	04	1055,7	946,5	-10,4%	28	1533,2	1361,4	-11,2%
	05	1098,4	951,3	-13,4%	29	1580,6	1367,8	-13,5%
	06	1064,0	955,2	-10,2%	30	1694,4	1372,6	-19,0%
	07	951,5	959,8	0,9%	31	1578,3	1381,1	-12,5%
	08	1080,6	962,4	-10,9%	32	1577,1	1394,0	-11,6%
		Média	1075,5	943,1	-12,3%	Média	1575,7	1359,9
Colada e Pregada	09	2493,0	2003,3	-19,6%	33	3647,1	3008,0	-17,5%
	10	3202,8	2016,2	-37,0%	34	3563,0	3011,5	-15,5%
	11	2632,8	2022,4	-23,2%	35	3561,8	3015,1	-15,3%
	12	2887,6	2026,6	-29,8%	36	3086,6	3019,1	-2,2%
	13	2946,8	2028,4	-31,2%	37	5059,5	3022,6	-40,3%
	14	2596,1	2030,4	-21,8%	38	3124,6	3024,8	-3,2%
	15	2972,9	2032,4	-31,6%	39	2792,8	3028,8	8,5%
	16	3104,4	2033,6	-34,5%	40	2794,0	3035,6	8,6%
	Média	2854,6	2024,2	-29,1%	Média	3224,3	3020,4	-6,3%
Colada	17	3238,3	2005,7	-38,1%	41	3570,1	3007,9	-15,7%
	18	3105,6	2017,0	-35,1%	42	4337,9	3011,0	-30,6%
	19	3085,5	2022,3	-34,5%	43	3358,0	3014,6	-10,2%
	20	2549,9	2026,6	-20,5%	44	4746,7	3018,7	-36,4%
	21	3295,2	2028,7	-38,4%	45	2680,2	3022,7	12,8%
	22	3167,2	2030,3	-35,9%	46	4538,1	3025,2	-33,3%
	23	3331,9	2032,3	-39,0%	47	4221,8	3028,6	-28,3%
	24	2644,7	2033,6	-23,1%	48	3622,2	3035,4	-16,2%
	Média	3052,3	2024,6	-33,7%	Média	4056,4	3020,2	-25,5%

Observa-se nesta tabela a força máxima obtida no ensaio e a força máxima estimada pelo Eurocode para as vigas pregadas e pela teoria de viga e método da homogeneização da seção para as vigas coladas. Pelos cálculos analíticos a tensão crítica para a seção da viga I em estudo é a de cisalhamento, ou seja, a força apresentada é a máxima suportada pelo OSB. Para que a viga rompesse nas mesas o cálculo levou a uma força em média 2,5 vezes superior à suportada pela alma para as vigas coladas e de 5,3 vezes superior para as vigas pregadas.

As forças calculadas subestimaram a capacidade de resistência das vigas variando de -6,3% nas vigas “coladas e pregadas” com OSB de 18mm até -33,7% nas vigas “coladas” com OSB de 12 mm. Isto se deve ao fato de que no ensaio ocorre a formação de bielas de compressão, onde parte do carregamento é distribuída diretamente para os apoios, diminuindo a flexão na viga, enquanto no cálculo analítico não ocorre este efeito pelo fato dos apoios e do carregamento serem considerados sobre a linha neutra.

Nas Tabela 21 e Tabela 22 apresentam-se os dados de rigidez (módulo de elasticidade) encontrados para cada viga.

Tabela 21 – Rigidez para as vigas com OSB de 12 mm

Ligação	Viga	Ensaio	Ponderado		Modelo 2		Modelo 1	
Pregada	01		6140.1		4807.4		3820.3	
	02		6960.0		5280.1		4195.7	
	03		7345.4		5501.6		4400.1	
	04		7619.6		5650.7		4539.5	
	05		7810.9		5739.9		4608.7	
	06		7939.6		5815.4		4683.8	
	07		8108.9		5969.2		4820.2	
	08		8210.4		5945.5		4799.0	
	Média		7541.3		5601.2		4495.3	
Colada e Pregada	09	6901.8	6877.4	-0.4%	8514.3	23.4%	6095.1	-11.7%
	10	8154.4	8123.8	-0.4%	9739.1	19.4%	7041.6	-13.6%
	11	8189.2	8806.1	7.5%	10527.3	28.6%	7560.7	-7.7%
	12	8989.3	9390.5	4.5%	11050.1	22.9%	7983.6	-11.2%
	13	8935.7	9667.4	8.2%	11320.7	26.7%	8182.6	-8.4%
	14	9223.7	9996.9	8.4%	11636.4	26.2%	8416.9	-8.7%
	15	9291.0	10335.9	11.2%	11945.7	28.6%	8655.3	-6.8%
	16	9841.3	10554.2	7.2%	12133.5	23.3%	8807.2	-10.5%
	Média	8690.8	9219.0	6.1%	10858.4	24.9%	7842.9	-9.8%
Colada	17	7367.9	7034.2	-4.5%	8761.2	18.9%	6226.8	-15.5%
	18	8155.8	8151.0	-0.1%	9841.7	20.7%	7073.1	-13.3%
	19	8847.3	8801.5	-0.5%	10481.1	18.5%	7555.2	-14.6%
	20	9247.9	9387.2	1.5%	11067.2	19.7%	7982.2	-13.7%
	21	9513.8	9707.3	2.0%	11373.5	19.5%	8211.6	-13.7%
	22	9672.7	9975.0	3.1%	11588.2	19.8%	8400.2	-13.2%
	23	10450.2	10316.0	-1.3%	11936.3	14.2%	8641.5	-17.3%
	24	10571.0	10557.3	-0.1%	12141.2	14.9%	8809.6	-16.7%
	Média	9228.3	9241.2	0.1%	10898.8	18.1%	7862.5	-14.8%

Comparando-se os valores de rigidez reais com os ponderados para as vigas com OSB de 12 mm, observa-se que na média, para as vigas “coladas e pregadas” a diferença ficou em 6,1%, enquanto que para as vigas “coladas” não houve diferença.

Na análise pelo MEF ocorreu, de forma geral, duas situações. O modelo 2 que simula as condições reais de ensaio ficou mais rígido em relação ao ensaio em 24,9% para as vigas “coladas e pregadas” e em 18,1% para as vigas “coladas”, enquanto que o modelo 1, que considera as condições de apoio e carregamento como nos métodos teóricos, apresentou uma rigidez menor em -9,8% para as vigas “coladas e pregadas” e em -14,8% para as vigas “coladas”.

Os resultados de rigidez dos ensaios das vigas pregadas foram descartados devido à utilização do prolongados nos transdutores, o que mascarou os resultados dos deslocamentos.

Tabela 22 – Rigidez para as vigas com OSB de 18 mm

Ligação	Viga	Ensaio	Ponderado		Modelo Experimental		Modelo Teórico	
Pregada	25		8288.1		6192.3		4606.8	
	26		8399.6		6156.5		4586.9	
	27		8554.5		6230.4		4655.3	
	28		8756.9		6344.6		4754.3	
	29		8926.8		6409.8		4805.9	
	30		9033.4		6391.1		4801.4	
	31		9229.5		6529.4		4920.9	
	32		9561.0		6669.3		5041.2	
	Média		8741.3		6322.0		4733.1	
Colada e Pregada	33	9142.8	10174.1	11.3%	12395.9	35.6%	8829.9	-3.4%
	34	9297.8	10470.2	12.6%	12679.6	36.4%	9054.3	-2.6%
	35	9906.9	10789.7	8.9%	13008.3	31.3%	9295.5	-6.2%
	36	9844.6	11177.1	13.5%	13369.6	35.8%	9584.5	-2.6%
	37	10727.3	11522.9	7.4%	13711.1	27.8%	9841.1	-8.3%
	38	10939.9	11756.5	7.5%	13949.8	27.5%	10013.4	-8.5%
	39	11034.3	12216.7	10.7%	14359.3	30.1%	10348.6	-6.2%
40	11832.3	13153.4	11.2%	15078.5	27.4%	11003.4	-7.0%	
	Média	10285.5	11391.1	10.7%	13548.7	31.7%	9732.8	-5.4%
Colada	41	9736.2	10169.5	4.5%	12394.9	27.3%	8826.5	-9.3%
	42	10136.9	10429.0	2.9%	12651.5	24.8%	9023.5	-11.0%
	43	10897.3	10750.3	-1.3%	12935.3	18.7%	9264.5	-15.0%
	44	10940.9	11134.5	1.8%	13345.5	22.0%	9553.3	-12.7%
	45	11033.7	11533.2	4.5%	13731.6	24.5%	9849.0	-10.7%
	46	12040.8	11806.8	-1.9%	13957.4	15.9%	10048.8	-16.5%
	47	12231.0	12190.4	-0.3%	14352.1	17.3%	10330.2	-15.5%
	48	12131.9	13059.2	7.6%	15084.9	24.3%	10950.1	-9.7%
	Média	11159.3	11362.8	1.8%	13531.7	21.3%	9713.8	-13.0%

Comparando-se os valores de rigidez reais com os ponderados para as vigas “coladas e pregadas” esperava-se que fossem 10,5% mais rígidas. Para as vigas “coladas” a diferença ficou em 1,8%.

Quanto à análise pelo MEF, o modelo 2 ficou mais rígido do que o ensaio em 31,7% para as vigas “coladas e pregadas” e em 21,3% para as vigas “coladas”, enquanto o modelo 1 é apresentou uma rigidez menor em -5,4% para as vigas “coladas e pregadas” e em -13,0% para as vigas “coladas”.

7.4 Comparação entre as análises numérica (MEF) e experimental

Na Figura 56 está apresentado o comportamento inicial médio para todas as vigas ensaiadas. Observa-se que as vigas pregadas estão com uma rigidez inicial maior do que as vigas com cola. comportamento esperado, obtido pela análise de elementos finitos, pode ser visualizado na Figura 57, demonstrando que mesmo para forças pequenas a rigidez das vigas coladas é superior à da viga pregada, uma vez que a cola solidariza os deslocamentos do OSB com o pinus, enrijecendo a viga.

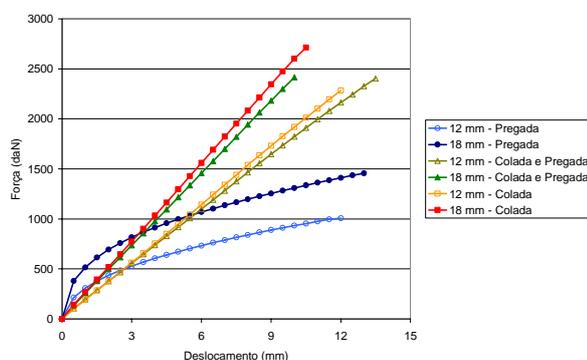


Figura 56 – Comportamento inicial médio obtido nos ensaios.

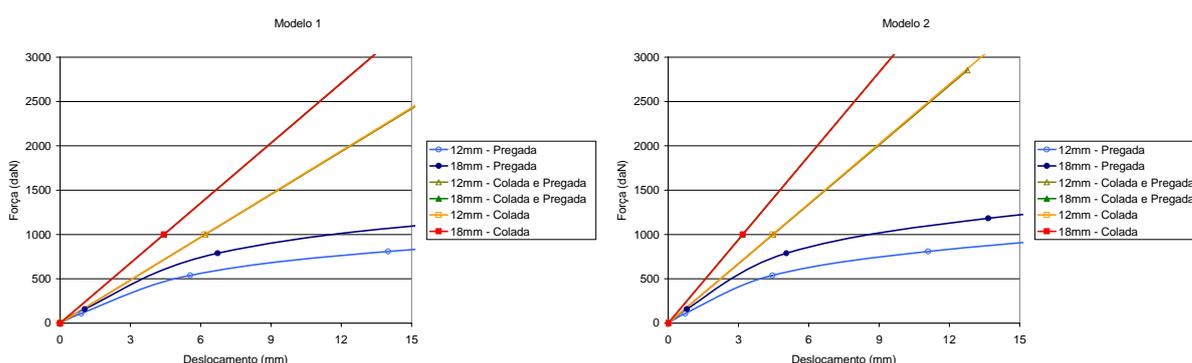


Figura 57 – Comportamento inicial médio apresentado pela análise de elementos finitos.

Sendo assim, os dados de rigidez para as vigas pregadas devem ser observados com restrição, não se devendo tomá-los como coerentes em se comparando com as demais vigas.

Na Figura 58 são comparados individualmente os comportamentos iniciais médios de força por deslocamento para cada grupo de vigas ensaiadas com relação à análise de elementos finitos com os dois modelos. Observa-se que para as vigas com cola a rigidez do ensaio está situada abaixo do modelo 2 e acima do modelo 1, enquanto nas vigas pregadas os dados do ensaio são superiores a ambos os modelos.

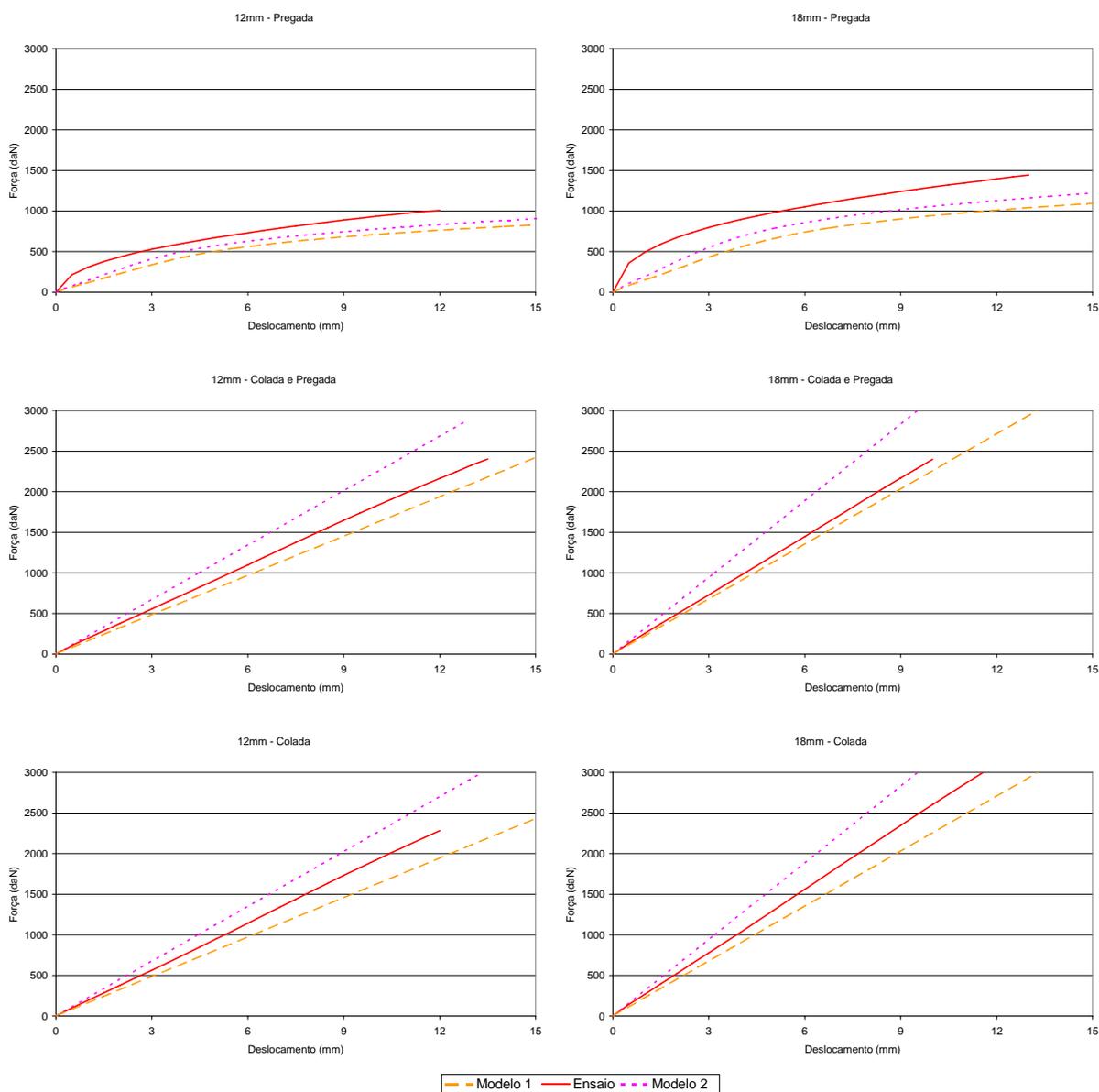


Figura 58 – Comparação entre o comportamento inicial obtido no ensaio e na modelagem.

7.5 Comparação entre os modelos de elementos finitos 1 e 2

Os dados apresentados neste item são referentes a um carregamento de 1000daN. Para as vigas com cola estes dados podem ser extrapolados para qualquer carregamento, uma vez que o comportamento das mesmas é linear, isto não pode ser feito nas vigas pregadas pois os elementos “nlinks”, que simulam a ligação pregada, transmitem para a viga um comportamento não linear. Na Figura 59 pode ser visualizado o deslocamento vertical da LN ao longo da viga obtida a partir dos dois modelos desenvolvidos.

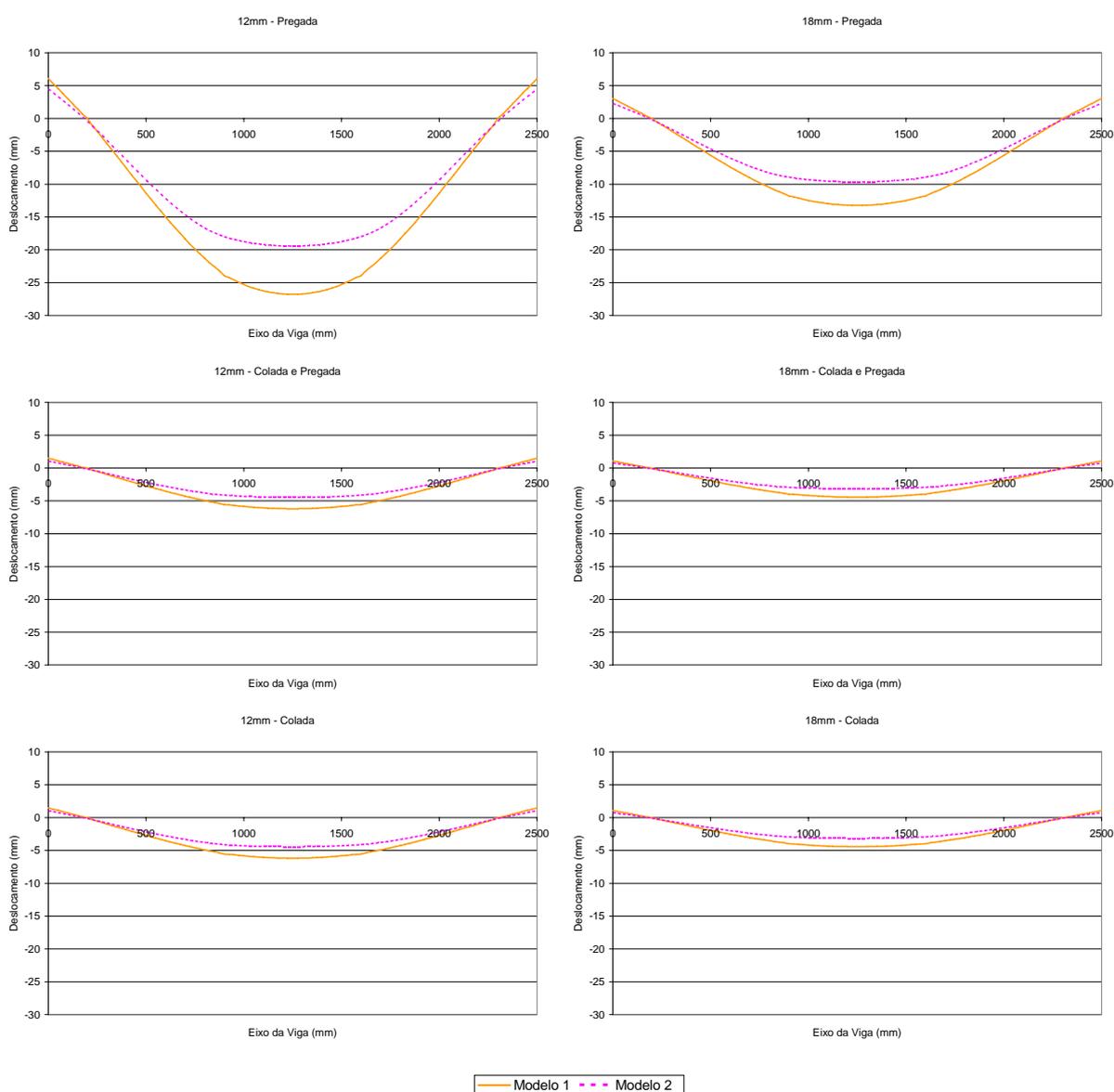


Figura 59 – Deslocamentos verticais encontrados na análise pelo MEF.

Na Tabela 23 estão apresentados os deslocamentos no meio do vão, encontrados no ensaio, na análise por elementos finitos e no cálculo analítico, para um carregamento de 1000daN. A coluna de porcentagem relaciona os deslocamentos da modelagem e do cálculo teórico, com os obtidos no ensaio.

Tabela 23 – Deslocamento no meio do vão para uma carga de 1000 daN, em mm

OSB	Ligação	Ensaio	Modelo 2		Modelo 1		Analítico	
12mm	Pregada	-11.93	-19.43	63%	-26.79	125%	-13.71	15%
	Colada e Pregada	-5.51	-4.47	-19%	-6.20	12%	-6.10	11%
	Colada	-5.34	-4.45	-17%	-6.17	16%	-6.07	14%
18mm	Pregada	-5.08	-9.67	90%	-13.24	160%	-8.96	76%
	Colada e Pregada	-4.13	-3.18	-23%	-4.43	7%	-4.32	5%
	Colada	-3.90	-3.18	-19%	-4.43	14%	-4.33	11%

Para as vigas “coladas e pregadas” e “coladas” a flecha no meio do vão, encontrada pelo *modelo 1* está bem próxima à encontrada no cálculo analítico, já a flecha encontrada pelo *modelo 2* indica que para um mesmo carregamento o deslocamento no meio do vão será menor no ensaio do que o valor calculado. Os valores encontrados no ensaio ficaram entre os fornecidos pelos modelos.

Para as vigas “pregadas” as medições efetuadas no ensaio estão influenciadas pelo prolongador utilizado nos transdutores de deslocamentos, sendo menor do que todos os outros valores. Para estas vigas, o cálculo teórico realizado utilizando-se a formulação do Eurocode não contém a parcela de deslocamento devido ao cisalhamento, esta parcela nas vigas “coladas e pregadas” e “coladas” corresponde a 13% do deslocamento total. Observa-se que os valores do cálculo teórico não condizem com os valores obtidos no modelo de elementos finitos para as vigas pregadas, isto se deve ao fato do Eurocode utilizar apenas a rigidez do ensaio da ligação para um carregamento entre 10% e 50% da carga de ruptura, enquanto que na análise por elementos finitos a curva força x deslocamento da ligação vai até a força de ruptura, levando a deslocamentos maiores.

Na Figura 60 estão apresentadas graficamente as tensões de tração e compressão, encontradas para o pinus e a tensão de cisalhamento encontrada para o OSB, através da análise de elementos finitos, para as vigas com OSB de 12 mm. Na Figura 61 estão apresentados os mesmos dados para as vigas com OSB de 18 mm. Observa-se nestas figuras que as tensões de tração e compressão no *modelo 1* são simétricas em relação à LN. No *modelo 2* observa-se que as tensões não são simétricas em relação à LN. Pode-se visualizar que as tensões na face inferior (tracionada) não diferem muito da distribuição apresentada pelo *modelo 1*, entretanto com valores reduzidos, percebe-se também que há uma pequena tensão de compressão na região dos apoios.

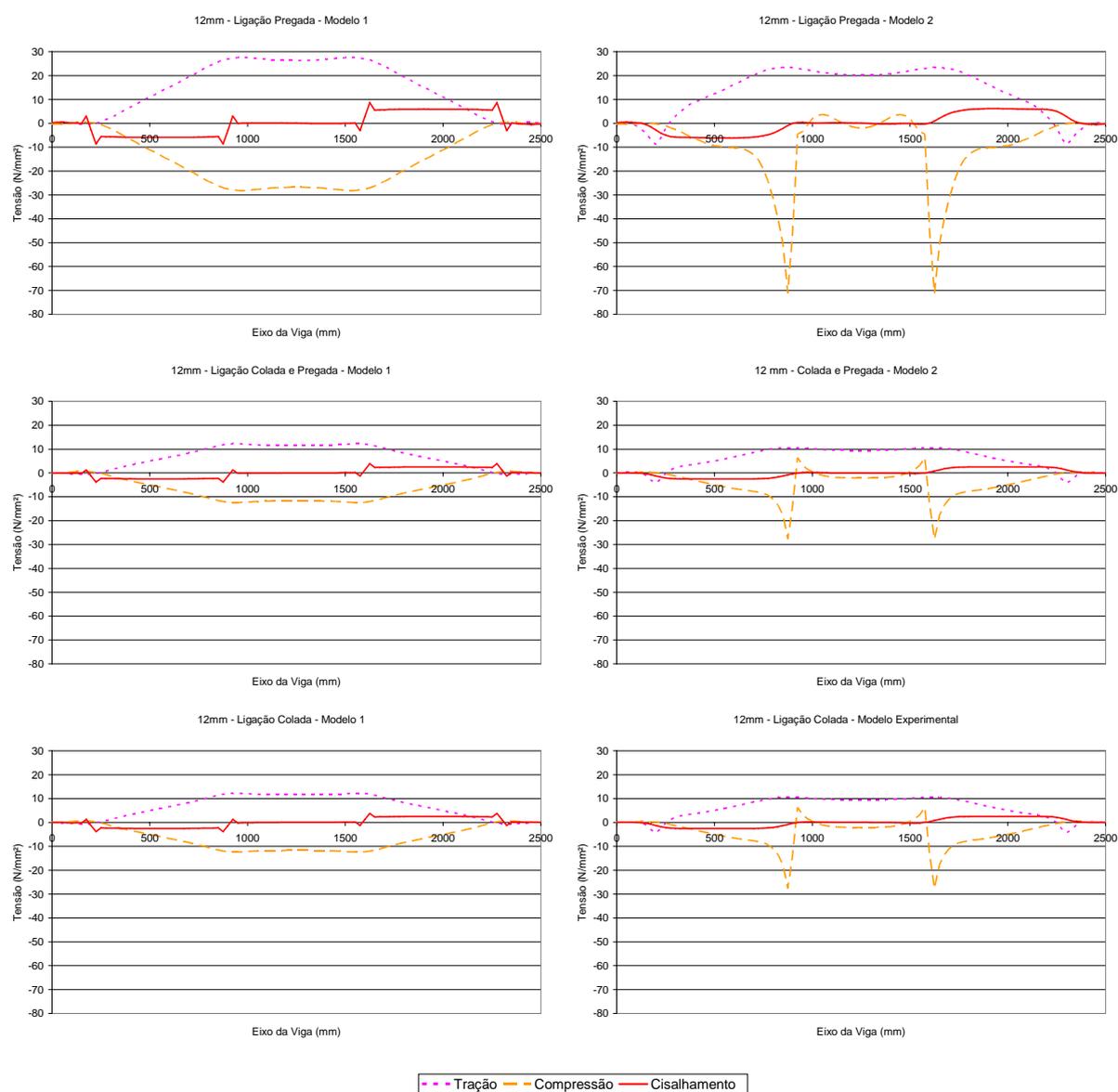


Figura 60 – Tensões obtidas na análise pelo MEF ao longo da viga com alma de 12 mm.

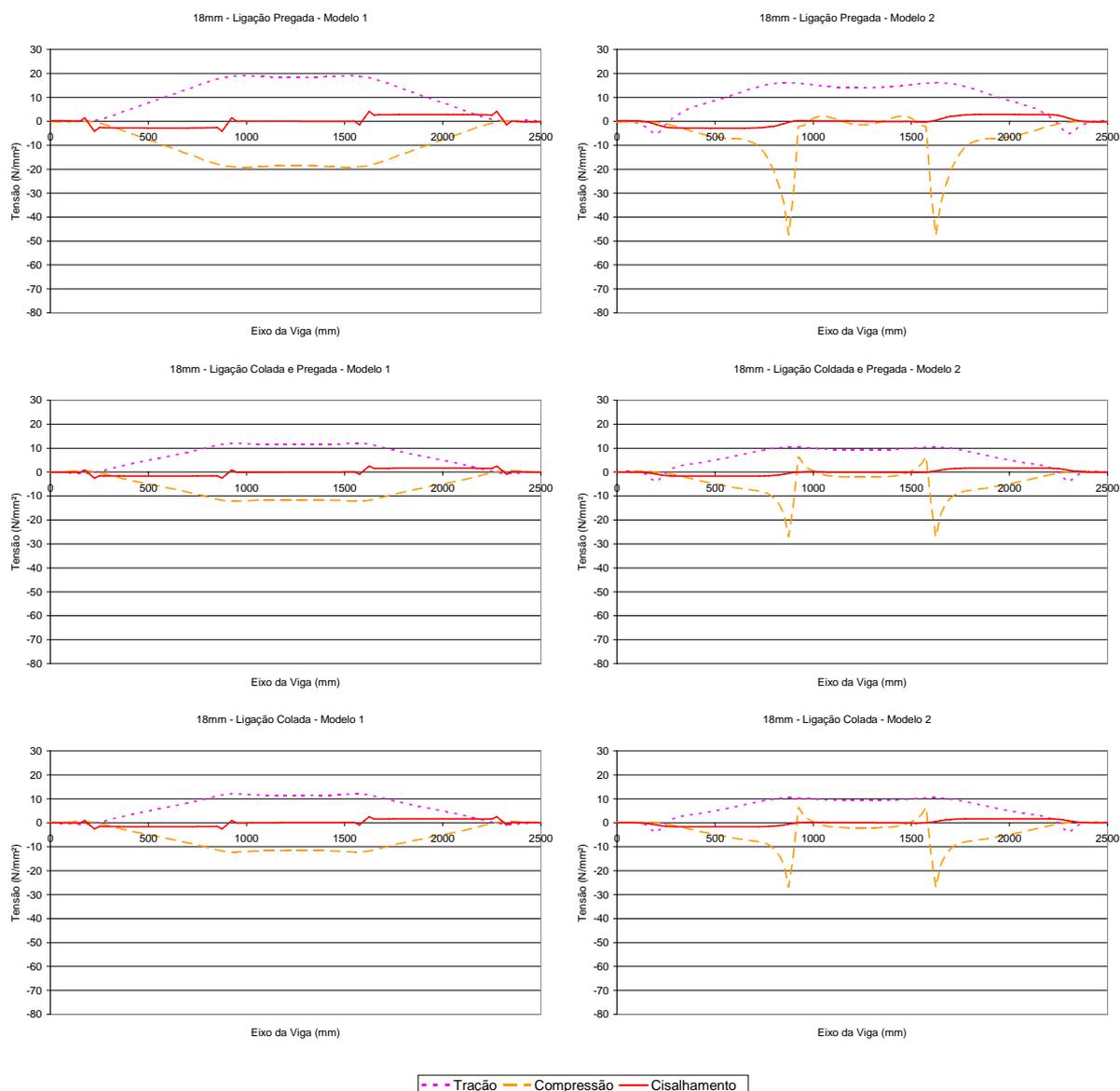


Figura 61 – Tensões obtidas na análise pelo MEF ao longo da viga com alma de 18 mm.

No *modelo 2* as tensões na face superior (comprimida) apresentam uma distribuição muito diferente da obtida pelo *modelo 1*, haja vista que nos pontos de aplicação do carregamento há uma concentração de tensões de compressão, seguido de uma inversão brusca para uma tensão de tração, retornando para tensão de compressão pequena em comparação com as tensões máximas apresentadas. Esta inversão dos esforços na face superior ocorre porque as cargas virtuais estão aplicadas no topo e por causa também da restrição nos pontos de aplicação de carga.

O conhecimento desta distribuição de tensões é fundamental na avaliação do ensaio das vigas, pois se espera que no ensaio a quatro pontos a ruptura ocorra na região central; no entanto, os pontos de aplicação da carga apresentam tensões muito superiores, sendo prováveis pontos de ruptura. Ressalta-se, entretanto, que o cutelo de aplicação de carga no ensaio não restringe completamente os deslocamentos horizontais (x), conforme admitido no modelo.

Na Tabela 24 está apresentado um quadro resumo das tensões médias para cada tipo de ligação obtidas para as vigas (conforme Figura 60 e Figura 61). As tensões de tração e compressão são referentes aos valores no meio do vão, a tensão de cisalhamento é referente aos pontos entre os apoios e os pontos de aplicação de carga. Observa-se que os valores obtidos pelo modelo 1 e pelos métodos analíticos (Eurocode para ligação pregada e Teoria de Viga e Homogeneização da Seção para as outras ligações) são coerentes para as vigas com cola.

Tabela 24 – Tensões obtidas para as vigas I

OSB	Ligação	Modelo 2			Modelo 1			Analítico		
		Tração	Comp.	Cisal.	Tração	Comp.	Cisal.	Tração	Comp.	Cisal.
12mm	Pregada	20.21	-2.03	±6,15	26.30	-26.74	±5,90	12.28	-12.51	±5,39
	Colada e Pregada	9.45	-2.11	±2,53	11.57	-11.76	±2,51	11.87	-11.69	±2,51
	Colada	9.48	-2.10	±2,53	11.62	-11.72	±2,51	11.84	-11.74	±2,51
18mm	Pregada	14.04	-1.52	±2,92	18.33	-18.49	±2,81	11.63	-11.73	±3,72
	Colada e Pregada	9.31	-2.09	±1,69	11.47	-11.58	±1,68	11.59	-11.48	±1,68
	Colada	9.31	-2.09	±1,69	11.48	-11.57	±1,68	11.58	-11.49	±1,68

No modelo 2 observa-se que os valores de tensões no meio do vão estão bem afastados dos valores máximos de compressão encontrados próximos ao ponto de aplicação das cargas, que valem $-71,20 \text{ N/mm}^2$ e $-47,59 \text{ N/mm}^2$ para as vigas pregadas com OSB de 12 mm e 18 mm, respectivamente, e, na ordem de $-27,71 \text{ N/mm}^2$ (OSB 12 mm) e $-27,08 \text{ N/mm}^2$ (OSB 18 mm) para as vigas com cola.

8 CONCLUSÕES

O estudo realizado do comportamento estrutural das vigas de madeira, com seção I, com alma em OSB e mesas em Pinus, demonstrou que a utilização dessas na construção civil é viável. A facilidade de manuseio, aliada à capacidade de resistência, confere a estas vigas uma posição de destaque em se tratando de sistemas leves.

O comportamento estrutural é diferenciado quando a união da alma e das mesas é realizada com adesivo ou não. Considerando-se que as vigas ensaiadas pesavam em média 12 kg, verificou-se que as vigas “pregadas” têm capacidade de resistir até 90 vezes o seu peso próprio, ao passo que as vigas “coladas e pregadas” e as vigas “coladas” atingiram cargas superiores a 230 vezes o seu peso.

A utilização do adesivo na confecção dessas vigas faz com que a alma e as mesas trabalhem como se fossem uma única peça, transmitindo para a viga um comportamento linear, que pode ser previsto através de métodos analíticos simplificados tais como a Teoria de Viga de Timoshenko combinada com o Método da Homogeneização da Seção.

A seção transversal utilizada favoreceu a ruptura da viga no OSB (cisalhamento da alma), o que permitiu um maior controle da resistência máxima, considerando-se que este material é industrializado e apresentou um coeficiente de variação menor do que o Pinus.

A ruptura por flambagem do banzo comprimido (mesa superior) observada no ensaio não deve ocorrer quando da utilização dessas vigas em pisos ou coberturas, uma vez que as mesmas ficam contraventadas entre si.

Como os resultados de deslocamentos das vigas “pregadas” tiveram que ser desconsiderados, não foi possível inferir sobre a metodologia utilizada pelo Eurocode, ou sobre a análise por elementos finitos utilizando elementos “nlinks” na modelagem para simular a ligação pregada. Estes dois métodos levaram a resultados diferentes.

A análise teórica pela Teoria de Viga de Timoshenko, das vigas “coladas e pregadas” e “coladas”, considera as vinculações e carregamento sobre a linha neutra. Com isto, simplifica a formulação e, em caso de dimensionamento, conduz a resultados em favor da segurança, haja vista que desconsidera o efeito de formação de bielas de compressão, que reduz a carga suportada pela viga, uma vez que parte do carregamento é transferida diretamente para os apoios.

Na análise numérica através do MEF, pode-se gerar um modelo que represente as condições de contorno do ensaio real ou da estrutura a ser dimensionada, obtendo-se informações importantes a respeito da distribuição de tensões ao longo da viga sob estas mesmas condições.

Em caso de dimensionamento de estruturas de madeira, é importante não esquecer dos coeficientes de minoração da resistência do material, bem como da majoração do carregamento, de forma a obterem-se resultados em favor da segurança. Neste trabalho, as análises foram realizadas com os valores diretos do ensaio, sem nenhum coeficiente de minoração, e a análise de elementos finitos apresentou resultados superiores aos encontrados na análise experimental.

Para consolidar o conhecimento deste tipo de estruturas, obtendo-se mais subsídios para nortear o dimensionamento, sugere-se que sejam analisados em trabalhos futuros: a influência da altura da alma no comportamento dessas vigas e a confecção das mesas em uma peça única, colada de topo com a alma através de entalhe.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190/97: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 1997.

Albuquerque, C.E.C. **Avaliação de um equipamento utilizado para a pré-secagem de partículas de madeira**. CERNE, V.7, N.1, P.69-83, 2001.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D 1761-00: Standard test methods for mechanical fasteners in wood**. Philadelphia: ASTM, 2000.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D 2719-89: Standard test methods for structural panels in shear through-the-thickness**. Philadelphia: ASTM, 1989.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D 3043-95: Standard methods of testing structural panels in flexure**. Philadelphia: ASTM, 1995.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D 4761-96: Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material**. Philadelphia: ASTM, 1996.

Bodig, J.; Jayne, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1982.

Brito, E.O.; Latorraca, J.V.F.; Tostes, A.S. **Utilização de duas espécies de madeiras provenientes de reflorestamento para fabricação de chapas de partículas**. São Carlos, SP: VII EBRAMEM, 2000.

Díaz Díaz, F.A.; Szücs, C. A. **Enfoque geral para a determinação do coeficiente de forma de seções transversais**. Uberlândia, MG: Anais VIII EBRAMEM, 2002.

Einsfeld, R.A.; Murray, D.W.; Cheng, J.J.R.; Bach, L. **Construção de unidades residenciais no sistema de estruturas leves de madeira (Light Wood Framing)**. Florianópolis, SC: VI EBRAMEM, 1998.

Einsfeld, R.A.; Murray, D.W.; Cheng, J.J.R.; Bach, L. **Manufatura e características das chapas OSB (Oriented Strand Board)**. Florianópolis, SC: VI EBRAMEM, 1998.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 5 – Design of timber structures**. Bruxelas, 1995.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 26891: Timber structures – joints made with mechanical fasteners – general principles for the determination of strength and deformation characteristics**. Bruxelas, 1991.

Guitard, D. **Mécanique du matériau bois et composites**. França: Cepadues-Editions, 1987.

Hillig, E.; Haselein, C.R.; Santini, E.J. **Propriedades mecânicas de chapas aglomeradas estruturais fabricadas com madeiras de Pinus, Eucalipto e Acácia-Negra**. Santa Maria, RS: CIÊNCIA FLORESTAL, V.12, N.1, P.59-70, 2002.

Mendes, L.M.; Albuquerque, C.E.C. de; Iwakiri, S. **Perspectivas do processo de produção de painéis OSB (Oriented Strand Board)**. São Carlos, SP: VII EBRAMEM, 2000.

Mendes, L.M.; Iwakiri, S.; Matos, J.L.M.; Keinert Jr., S.; Saldanha, L.K. **Avaliação do sistema de orientação de partículas na produção de painéis OSB**. CERNE, V.6, N.1, P.01-08, 2000.

Mendes, L.M.; Iwakiri, S.; Matos, J.L.M.; Keinert Jr., S.; Saldanha, L.K. **Pinus spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB)**. Santa Maria, RS: CIÊNCIA FLORESTAL, V.12, N.2, P.135-145, 2002.

Nascimento, M.F.; Lahr, F.A.R. **Algumas propriedades de chapas de partículas fabricadas com a espécie Angico, madeira do Nordeste do Brasil**. Uberlândia, MG: VIII EBRAMEM, 2002.

Santana, C.L.O.; Mascia, N.T. **Abordagem numérica de vigas de madeira de seção composta com alma em chapa de compensado**. São Carlos, SP: VII EBRAMEM, 2000.

Santana, C.L.O.; Mascia, N.T. **Abordagem teórica e experimental de vigas de madeira com alma em chapa de compensado**. Florianópolis, SC: VI EBRAMEM, 1998.

Stamato, G.C.; Calil Jr., C. **Ligações em Madeira Compensada**. Florianópolis, SC: VI EBRAMEM, 1998.

Stamato, G.C.; Calil Jr., C. **Dimensionamento de estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada**. São Carlos, SP: VII EBRAMEM, 2000.

Szücs, C.A.; Prada, O.J. **Pré-fabricação de componentes em madeira: “viga composta com seção I”**. São Carlos, SP: VII EBRAMEM, 2000.

Tiburcio, U.F.O.; Gonçalves, M.T.T. **Descrição dos processos produtivos de chapas de madeira composta e suas tendências tecnológicas**. Florianópolis, SC: VI EBRAMEM, 1998.