

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo do comportamento mecânico de vigas compostas e suas ligações se faz necessária, além da análise teórica, a realização de ensaios de laboratório para aferir os modelos matemáticos e obter parâmetros para serem usados em tais modelos.

Para aferir os modelos teóricos de comportamento das vigas compostas foram realizados ensaios de flexão em protótipos de elementos compostos, em escala natural, a partir de peças de madeira de dimensões comerciais, solidarizadas continuamente por pregos. Esta verificação foi feita utilizando madeira de diversas classes de resistência, de modo a constatar a validade dos modelos em estudo para as espécies nacionais.

Realizaram-se ainda testes de caracterização das ligações por pregos em corpos-de-prova de ligação para determinar a rigidez da ligação de forma a comparar com os valores obtidos da formulação teórica.

Os ensaios inerentes à caracterização das espécies de madeira empregadas na pesquisa foram conduzidos conforme o Anexo B da NBR 7190 (1997) “Projeto de estruturas de madeira”. Os valores da tensão de escoamento e tensão de ruptura do aço dos pregos foram determinados por ensaios de tração simples segundo as normas NBR 6207 (1982) “Arame de aço – Ensaio de tração – Método de ensaio” e NBR 6152 (1992) “Materiais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração – Método de ensaio”.

O programa de ensaios foi desenvolvido no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (SET/EESC/USP).

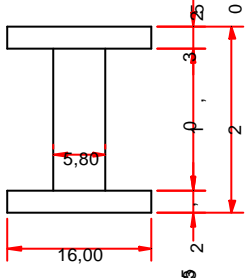
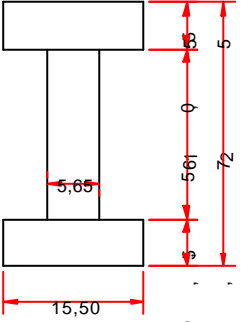
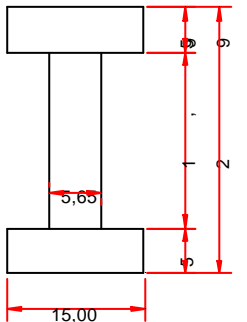
A seguir estão apresentados detalhadamente os materiais e os procedimentos adotados no programa experimental de ensaios.

3.1. Descrição dos Materiais Utilizados

Foram utilizadas três espécies de madeira, duas nativas e uma de reflorestamento. As duas espécies nativas utilizadas foram o Angelim Pedra Verdadeiro – *Dinizia excelsa* (alta densidade) e o Cedrilho – *Erismia spp* (média densidade). A espécie de reflorestamento utilizada foi o Pinus Hondurensis – *Pinus caribea var. hondurensis* (baixa densidade).

Foram construídos três protótipos de vigas compostas, com diferentes dimensões, para cada espécie de madeira, perfazendo um total de 9 vigas.

Tabela 3: Dados de projeto das vigas compostas.

Espécie de Madeira	Viga	Geometria da Seção	Ligação	Comp. (cm)	Vão ensaio (cm)	Instrumentação
Pinus Hondurensis	P1		22 x 42 C/5,0 cm	310	300	Relógios comparadores e extensômetros elétricos
	P2		22 x 48 C/5,0 cm	400	390	
	P3		22 x 48 C/2,4 cm	400	390	

Espécie de Madeira	Viga	Geometria da Seção	Ligação	Comp. (cm)	Vão ensaio (cm)	Instrumentação
Cedrilho	C1		22 x 48 C/5,0 cm	400	390	Relógios comparadores e extensômetros elétricos
	C2					Relógios comparadores
	C3					Relógios comparadores
Angelim Pedra Verdadeiro	A1		18 x 30 C/2,5 cm	380	370	Relógios comparadores e extensômetros elétricos
	A2					Relógios comparadores
	A3					Relógios comparadores

Os elementos conectores utilizados foram os pregos do fabricante GERDAU nas bitolas comerciais de 22 x 48 (5,4 x 110 mm), 22 x 42 (5,4 x 96 mm) e 18 x 30 (3,4 x 69 mm).

Em todas as vigas os pregos foram dispostos em duas linhas longitudinais em forma de zig-zag. A tabela 3 apresenta a geometria da seção transversal, o comprimento, vão para o ensaio, tipo de ligação e espécie de madeira utilizada para cada uma das 9 vigas compostas ensaiadas.

3.2. Procedimentos de Experimentação

Para auxiliar a análise precisa dos resultados, todas as peças de madeira que compõem a seção transversal composta foram previamente testadas por meio de ensaios não destrutivos

de flexão estática. Destes ensaios são obtidos o módulo de elasticidade à flexão de cada peça que está sendo empregada na viga, garantindo maior precisão da análise dos resultados.

Na seqüência, foram montadas as vigas compostas, conforme procedimentos apresentados no item 3.4.

Após a montagem, as vigas compostas foram testadas por ensaio de flexão com carregamento nos terços, leitura de flechas e deslizamento entre as peças, por meio de relógios comparadores e leitura de deformações por meio de extensômetros elétricos de resistência. Após os ciclos de carregamento para avaliação da rigidez das peças compostas, as mesmas foram conduzidas à ruptura.

Da porção de material que se conservou íntegra após a ruptura das vigas, foram extraídos os corpos de prova para os ensaios de caracterização de cada peça. Este recurso foi utilizado com o objetivo de minimizar as imprecisões que poderiam resultar de uma caracterização do lote. Todos os ensaios de caracterização da madeira para cada peça foram conduzidos conforme as indicações do Anexo B da NBR 7190/97. Também foram extraídos corpos-de-prova de ligação para avaliação da rigidez das ligações.

Finalizando o programa experimental foram conduzidos os ensaios de tração simples em pregos para a determinação das propriedades do aço empregado segundo as normas NBR 6207/82 e NBR 6152/92.

3.3. Ensaios de Flexão Estática para Caracterização

Cada peça (mesa superior, alma e mesa inferior) das vigas foi caracterizada por ensaio não destrutivo de flexão estática para a aquisição do valor do módulo de elasticidade a flexão. Esses consistem em aplicar um carregamento concentrado nos terços do vão sobre a peça bi-apoiada, medindo a flecha no meio do vão a cada novo incremento de carregamento, conforme ilustra a figura 25.

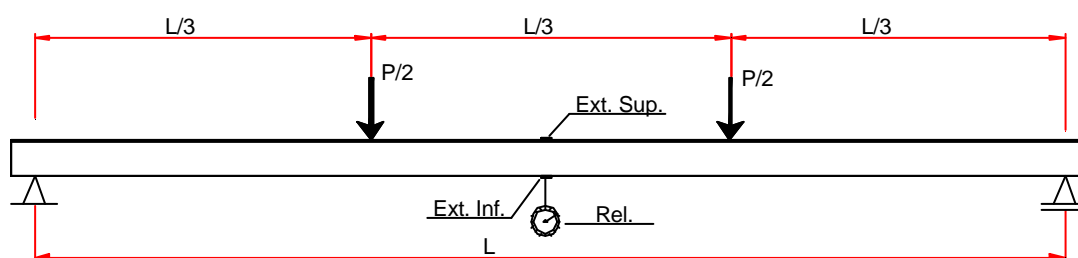


Figura 25 – Montagem do ensaio de flexão estática para caracterização das peças.

A norma brasileira NBR 7190/97, em seu Anexo B, indica que o valor do módulo de elasticidade à flexão deve ser determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento, indicado na figura 26.

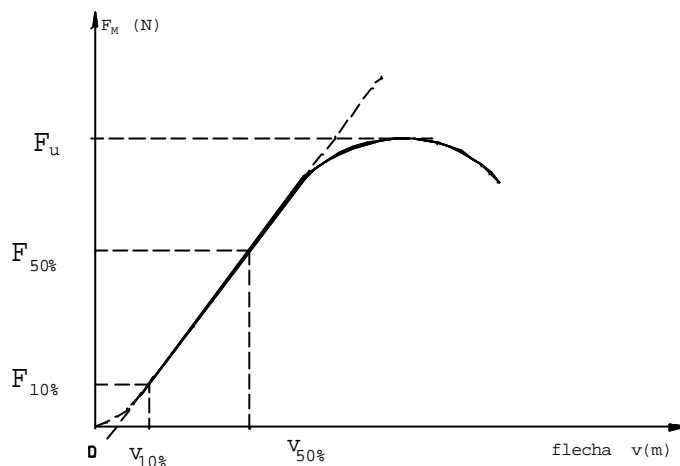


Figura 26 – Diagrama carga x flecha na flexão. Fonte NBR 7190 (1997).

Para esta finalidade, o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x deslocamento no meio do vão, no último ciclo de carregamento (figura 27), definida pelos pontos correspondentes a 10% e 50% da carga máxima de ensaio estimada por meio de um corpo de prova gêmeo.

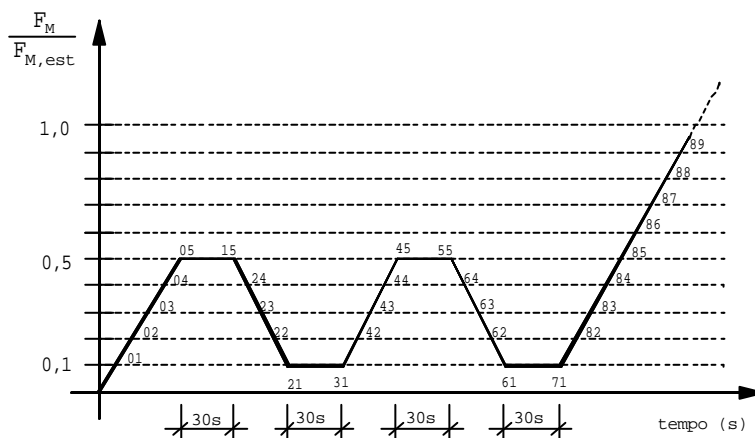


Figura 27 – Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez à flexão. Fonte NBR 7190 (1997).

Em função da impossibilidade de realização do ensaio de ruptura do corpo de prova gêmeo para cada peça ensaiada, optou-se por conduzir o carregamento até o limite de $L/200$ para as peças utilizadas para compor as almas das vigas compostas, de forma a não exceder o regime elástico do material. O vão adotado para estes ensaios foi o mesmo utilizado para os ensaios

das vigas compostas. Em alguns casos de peças utilizadas para compor as mesas das vigas compostas, o carregamento fora conduzido até o limite de flecha de $L/100$ e o vão teve de ser reduzido em razão da pequena espessura dos elementos.

A figura 28 ilustra a configuração dos ensaios de caracterização para uma peça utilizada para compor a mesa e outra peça utilizada para compor a alma de uma peça composta.



Figura 28 – Ensaio de flexão em peça de mesa (esquerda) e peça de alma (direita).

O carregamento foi aplicado por meio de cilindro hidráulico fixado em pórtico de reação, montado sobre a laje de reação. O controle de aplicação de carga foi realizado por anel dinamométrico (E.L.E. – Engineering Laboratory Equipment Limited). A medida dos deslocamentos transversais no meio do vão (flecha) foi feita com transdutor mecânico de deslocamento (relógio comparador) com sensibilidade de 0,01 mm da marca MITUTOYO posicionado na face inferior da peça.

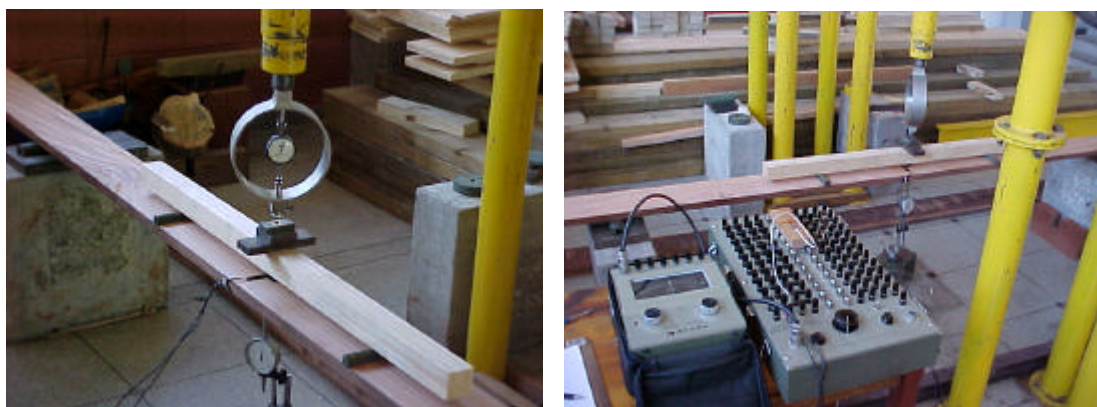


Figura 29 – Sistema de aplicação de carga e relógio comparador (esquerda); Sistema de aquisição de dados KYOWA (direita).

Algumas peças foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência da marca KYOWA do tipo KFG-10-120-C1-11. Os extensômetros foram colados um na face superior e outro na face inferior das peças, localizados no centro do vão. As leituras das deformações específicas foram feitas por intermédio de um indicador de deformações modelo KYOWA SM-60B acoplado a uma caixa comutadora para 24 pontos modelo KYOWA SS24R (figura 29).

De posse dos valores de pares de força aplicada e o correspondente deslocamento transversal no meio do vão, foram determinados os módulos de elasticidade a flexão ($E_{M, flecha}$) de vigas bi-apoiadas com cargas concentradas nos terços do vão, de acordo com a seguinte equação:

$$E_{M, flecha} = \frac{23 \cdot L^3 \cdot \Delta F}{1296 \cdot I \cdot \Delta \delta} \quad (111)$$

Onde:

L – vão

ΔF – variação da força

I – momento de inércia da peça

$\Delta \delta$ – variação da flecha

Para a determinação do módulo de elasticidade à flexão obtidos pelos extensômetros, foi utilizada a seguinte equação:

$$E_{M, ext. x} = \frac{h \cdot L \cdot \Delta F}{12 \cdot I \cdot \Delta \epsilon} \quad (112)$$

Onde:

h – altura da peça

L – vão do ensaio

ΔF – variação da força

I – momento de inércia da peça

$\Delta \epsilon$ – variação da deformação específica

A seguir são apresentados os diagramas de força x flecha e força x deformação específica de uma das peças testadas, com o propósito de ilustrar o comportamento.

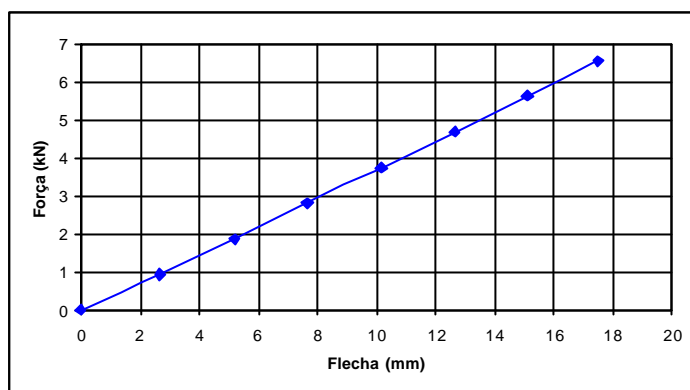


Figura 30 – Diagrama força x flecha do ensaio de flexão em uma peça (alma).

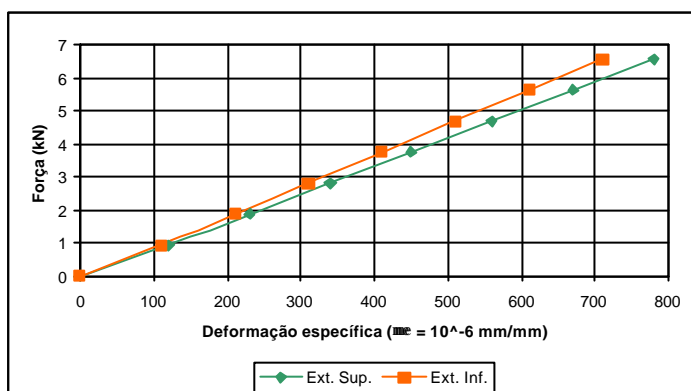


Figura 31 – Diagrama força x deformação específica (extensômetros superior e inferior) do ensaio de flexão em uma peça (alma).

Os valores dos módulos de elasticidade obtidos destes ensaios são apresentados no item 4.1 do capítulo de resultados.

3.4. Montagem das Vigas Compostas

Após os ensaios preliminares de flexão, as peças de madeira (mesa superior, alma e mesa inferior) foram posicionadas, conforme projeto, de modo a constituir as vigas compostas. As peças justapostas foram fixadas provisoriamente por grampos, enquanto ocorria a pré-furação e pregação de alguns pinos para o correto posicionamento e alinhamento das peças (figura 32).



Figura 32 – Fixação das peças de madeira.

Após a retirada dos grampos, foi realizada a montagem efetiva destes elementos estruturais, mediante pré-furação e instalação de todos os conectores ao longo das vigas (figura 33). A figura 34 ilustra uma das vigas compostas após o término da montagem.

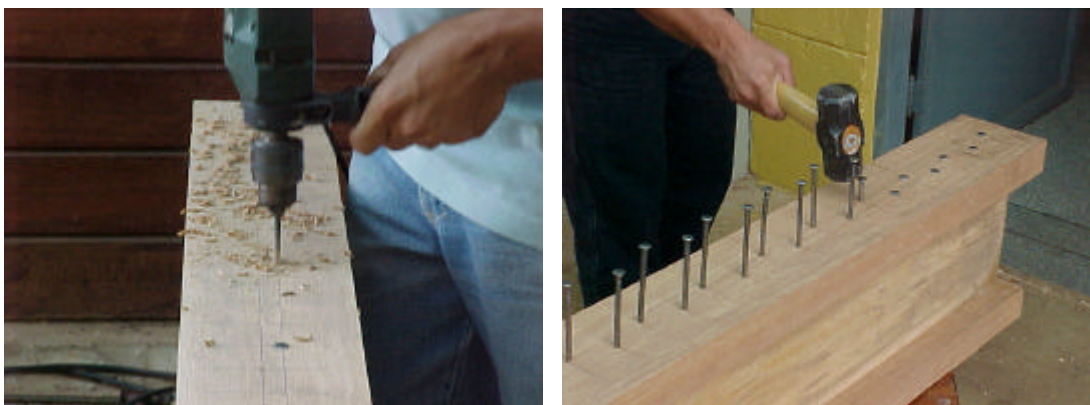


Figura 33 – Pré-furação e cravação dos pregos.

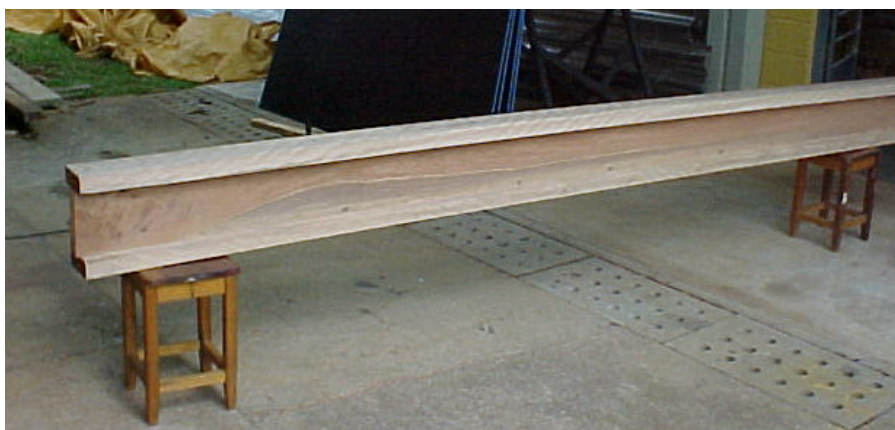


Figura 34 – Viga após o término da montagem.

Os espaçamentos e diâmetro dos pregos para cada viga são indicados na tabela 3. Para pré-furação foram utilizadas brocas com diâmetro de 5,0 mm para pregos com bitola 22 x 48 e 22 x 42, e de 3,0 mm para os pregos 18 x 30. Estes diâmetros correspondem a 0,85 do diâmetro efetivo dos pregos utilizados, aproximadamente.

3.5. Ensaio das Vigas Compostas

Os ensaios de flexão em vigas compostas de seção I simétrica, formadas por peças de seções comerciais, solidarizadas continuamente por pregos, foram conduzidos com esquema estático de viga simplesmente apoiada, com aplicação de forças concentradas e iguais, localizadas a mesma distância de suas reações, igual a $L/3$ do vão, conforme ilustra a figura 35.

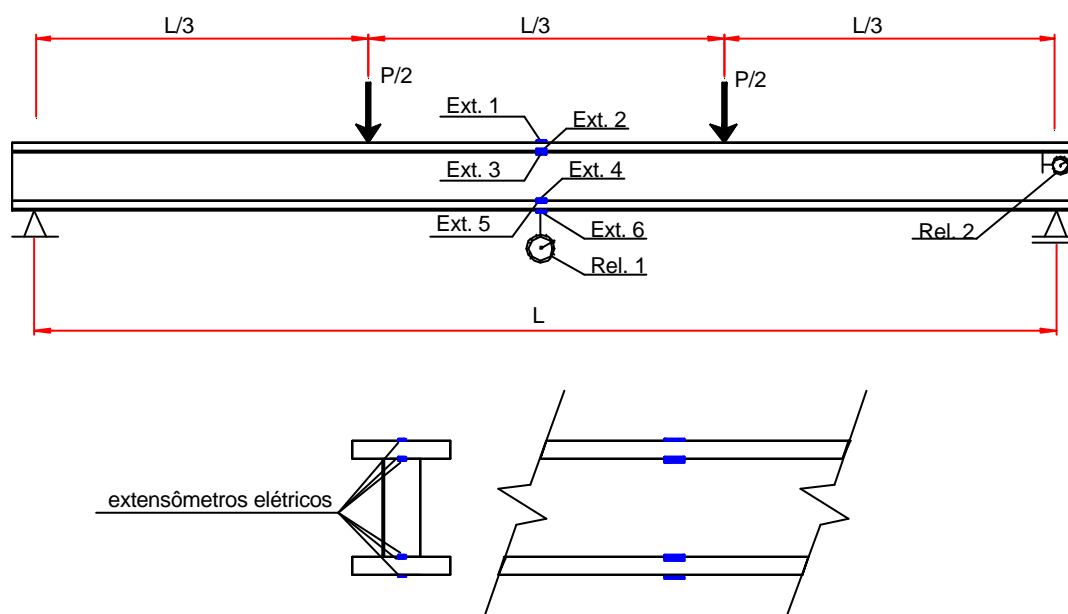


Figura 35 – Montagem do ensaio em vigas compostas.

De maneira geral, os ensaios consistem no carregamento monotônico da viga e na medida do deslocamento transversal no meio do vão. As medições dos deslocamentos foram feitas por dois relógios comparadores com precisão de 0,01 mm. Um deles foi colocado no centro do vão para as medidas de flecha das vigas. O outro foi ajustado entre a mesa superior e a alma no extremo da viga (apoio), para registrar os escorregamentos máximos entre a mesa e a alma (figura 35).



Figura 36 – Viga composta posicionada para ensaio.

Sete vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos, distribuídos nas faces superior e inferior de cada peça, como ilustrado na figura 37, perfazendo um total de seis extensômetros para cada viga. Os resultados obtidos com essa instrumentação são utilizados na avaliação da distribuição de deformações e tensões na viga, que são comparados com os valores obtidos da modelação teórica.

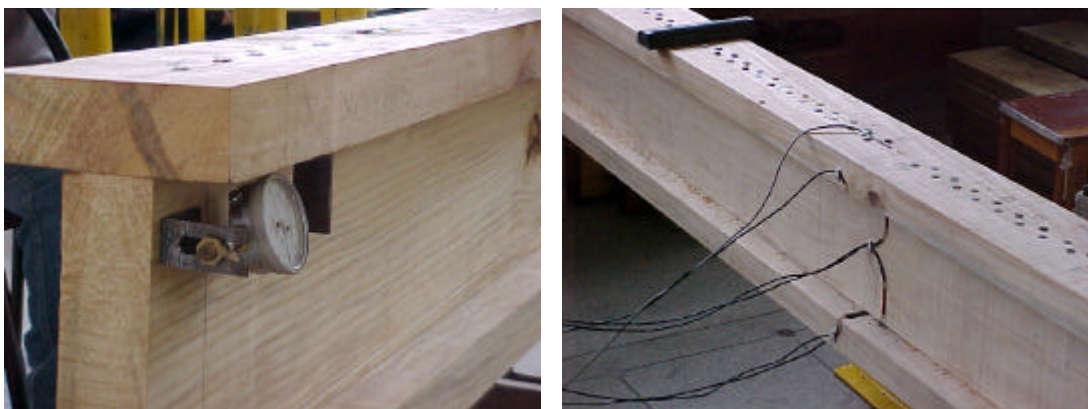


Figura 37 – Detalhe de instrumentação das vigas.

Para avaliação da rigidez à flexão foram realizados três ciclos de carregamento, tendo sido registrados os valores observados no último ciclo. Estes carregamentos foram conduzidos até o limite de flecha $L/200$ para todas as vigas, de forma a não exceder o regime elástico do material. Ao final do terceiro ciclo, após a retirada dos relógios comparadores, as vigas foram conduzidas à ruptura (figura 38).



Figura 38 – Comportamento de duas vigas compostas próximo à ruptura.

Os resultados dos ensaios em vigas compostas estão apresentados no item 4.2 do capítulo de resultados.

3.6. Ensaios de Caracterização da Madeira

Os ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas de cada peça de madeira foram realizados de acordo com as especificações do Anexo B da norma NBR 7190/97 para caracterização simplificada. Os corpos-de-prova foram extraídos da parte íntegra das vigas compostas após a ruptura.

Os ensaios considerados relevantes para análise foram:

- Umidade e densidade;
- Compressão paralela às fibras;
- Tração paralela às fibras;
- Cisalhamento.

As médias e os respectivos coeficientes de variação dos resultados obtidos nos ensaios de seis corpos-de-prova são apresentadas no item 4.3 do capítulo de resultados.

3.7. Ensaios de Ligações

Estes ensaios têm por objetivo avaliar o módulo de deslizamento K (slip modulus), por meio ensaios de ligações, para efeito de comparação com os resultados utilizados na análise

teórica. As dimensões dos corpos-de-prova foram estabelecidas de modo a representar a configuração alma/mesa/diâmetro do pino utilizada em cada viga.

Desta forma, foram utilizadas duas configurações de corpos-de-prova. O corpo-de-prova tipo 1 ilustrado na figura 39, foi utilizado na determinação do módulo de deslizamentos para as vidas P2, P3, C1, C2 e C3. Já para as vigas A1, A2, A3 e P1, foi utilizado o corpo-de-prova tipo 2 da figura 40.

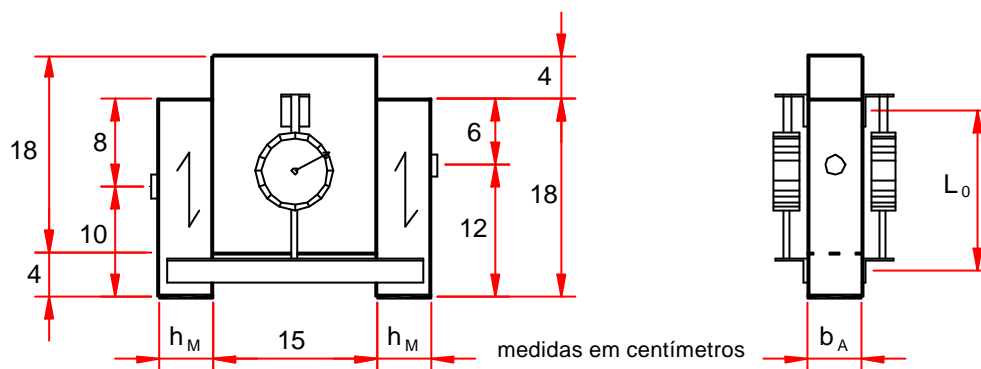


Figura 39 – Dimensões dos corpos-de-prova de ligação tipo 1.

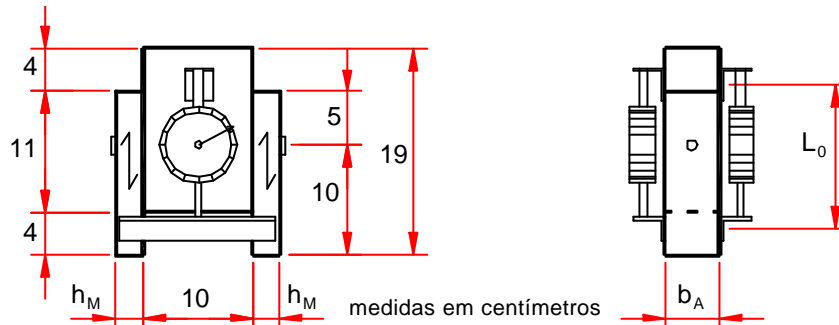


Figura 40 – Dimensão dos corpos-de-prova de ligação tipo 2.

A dimensão h_M (altura da mesa) varia, tendo dimensão nominal de 5 cm para os corpos-de-prova tipo 1, e de 2,5 cm para os corpos-de-prova tipo 2. A largura da alma (b_A) têm dimensão nominal igual a 5 cm, para os dois tipos de corpos-de-prova. Optou-se pela configuração com dois pinos metálicos, com um plano de corte em cada um, como mostrado nas figuras 39 e 40.

Para esta configuração, o valor da base de medida L_0 é 14d, segundo a recomendação da NBR 7190/97.

Os corpos-de-prova são instrumentados seguindo as recomendações do Anexo C da NBR 7190/97. Essa instrumentação consiste em dois relógios comparadores, posicionados e lados opostos do corpo-de-prova, onde uma extremidade do relógio comparador está fixada na peça central (alma) e a outra nas peças laterais (mesas). Para o cálculo do módulo de deslizamento K foi utilizado a média entre os dois valores.

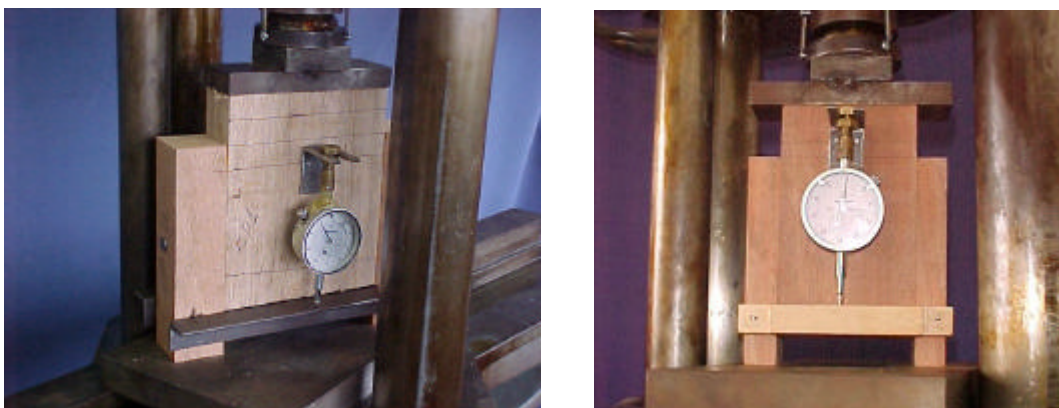


Figura 41 – Configuração do ensaio de ligação para corpo-de-prova tipo 1 e 2.

Os ensaios para a determinação do valor do módulo de deslizamento (K) das ligações foram conduzidos de três formas distintas.

Os corpos-de-prova da viga P2 foram ensaiados com carregamento monotônico crescente sem ciclo. Para estes corpos-de-prova o valor do “slip moduli” foi determinado pela inclinação da reta secante à curva força x deslocamento, definida pelos pontos ($F_{10\%}$; $\delta_{10\%}$) e ($F_{50\%}$; $\delta_{50\%}$) correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência convencional da ligação ($R_{2\%}$). A figura 42 ilustra o comportamento típico do ensaio em um corpo-de-prova utilizando este procedimento.

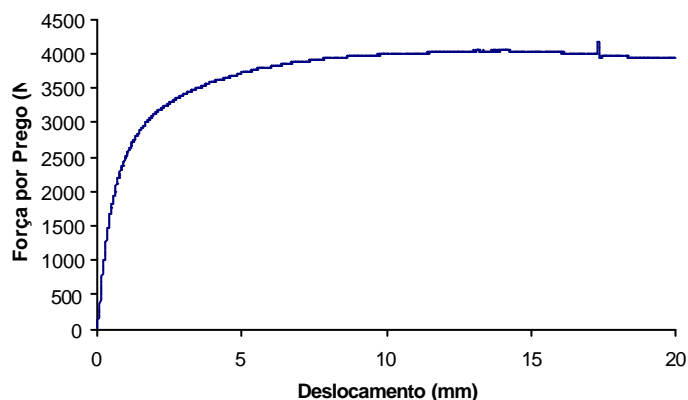


Figura 42 – Diagrama força x deslocamento do ensaio de ligação – CP3 viga P2.

Os corpos-de-prova das vigas P3, C1, C2 e C3 foram ensaiados com carregamento aplicado com dois ciclos de carga e descarga conforme figura 43. Para estes corpos-de-prova o valor do “slip modulus” foi determinado pela inclinação da reta secante à curva força x deslocamento, definida pelos pontos $(F_{10\%}; \delta_{10\%})$ e $(F_{50\%}; \delta_{50\%})$ correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência convencional da ligação ($R_{2\%}$) no último ciclo de carregamento. A figura 44 ilustra o comportamento típico do ensaio em um corpo-de-prova utilizando este procedimento.

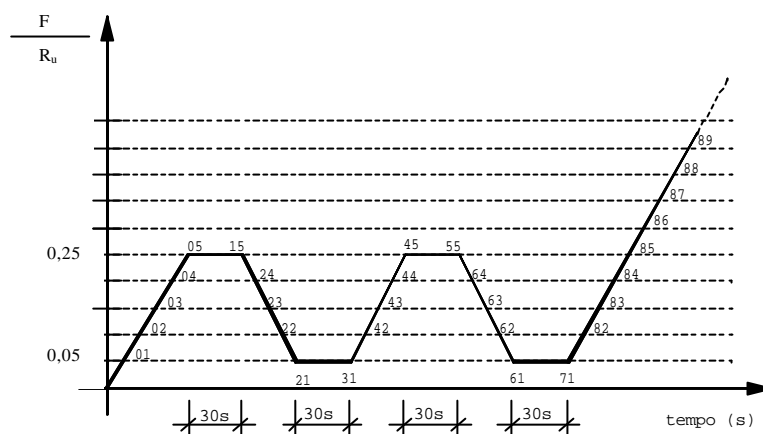


Figura 43 – Diagrama de carregamento para ensaios em corpos-de-prova de ligação das vigas P3, C1, C2 e C3. Adaptado da NBR 7190 (1997).

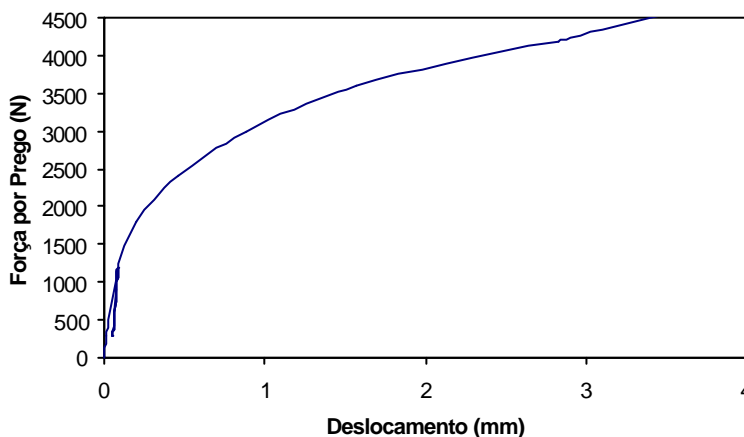


Figura 44 – Diagrama força x deslocamento do ensaio de ligação – CP3 viga C3.

Os corpos-de-prova das vigas P1, A1, A2 e A3 foram ensaiados com carregamento aplicado com dois ciclos de carga e descarga conforme figura 45. Para estes corpos-de-prova o valor do “slip modulus” foi determinado pela inclinação da reta secante à curva força x deslocamento, definida pelos pontos $(F_{10\%}; \delta_{10\%})$ e $(F_{50\%}; \delta_{50\%})$ correspondentes

respectivamente a 10% e 50% da resistência máxima da ligação (R_u) no último ciclo de carregamento. A figura 46 ilustra o comportamento típico do ensaio em um corpo-de-prova utilizando este procedimento.

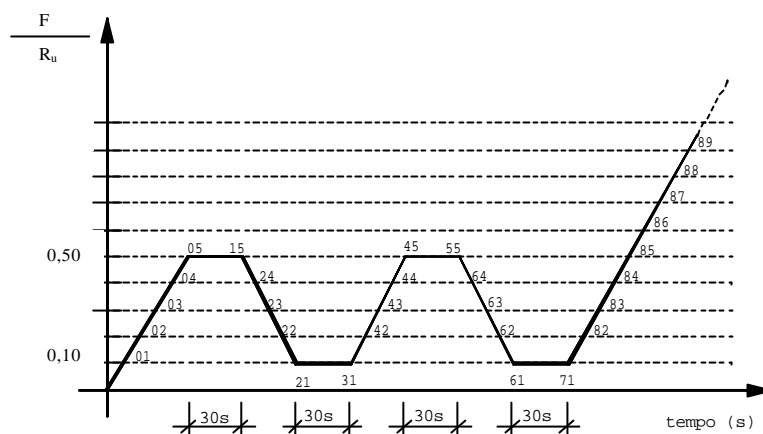


Figura 45 – Diagrama de carregamento para ensaios em corpos-de-prova de ligação das vigas P1, A1, A2 e A3. Adaptado da NBR 7190 (1997).

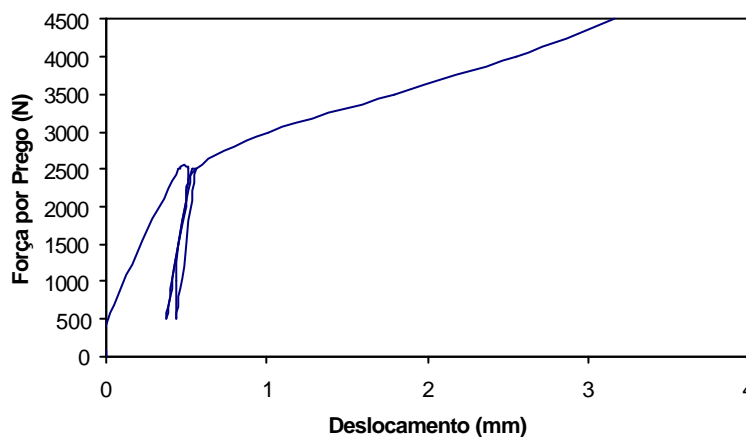


Figura 46 – Diagrama força x deslocamento do ensaio de ligação – CP3 viga A2.

O valor da resistência convencional da ligação ($R_{2\%}$) é determinado a partir do diagrama força x deformação específica da ligação definido como a força aplicada ao corpo-de-prova para uma deformação específica residual de 2‰, medida sob a base de referência L_0 (figura 47).

Os valores de módulo de deslizamento (K), resistência convencional ($R_{2\%}$) e resistência máxima da ligação (R_u) são apresentados no item 4.4 do capítulo de resultados.

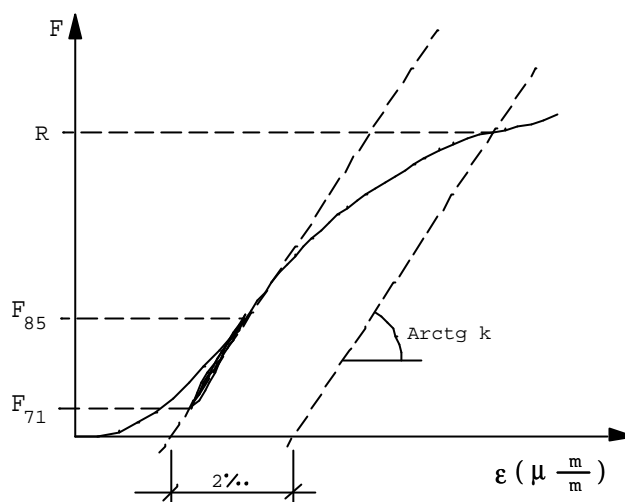


Figura 47 – Diagrama força x deformação específica do ensaio de ligação. Fonte: NBR 7190 (1997).

3.8. Ensaio dos Pregos

Os valores da tensão de escoamento e da resistência máxima à tração do aço dos pregos foram determinados por ensaios de tração simples, e realizados na Máquina Universal de Ensaio DARTEC, com capacidade de 100 kN, do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras.

O ensaio foi conduzido com carregamento monotônico crescente com taxa de incremento não superior a 10 MPa/s segundo recomendações da NBR 6152/92.

Como o material não apresenta patamar de escoamento no diagrama de tensão x deformação específica, o valor da tensão de escoamento (f_y) foi determinada como a tensão que produz uma deformação residual (não elástica) de 2‰, e o valor da resistência máxima à tração (f_t) foi determinada pelo valor da máxima tensão suportada pelo corpo-de-prova até a ruptura, conforme recomendações da NBR 6207/82.