

5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Completando o estudo do comportamento estrutural de pontes de madeira com tabuleiro multicelular protendido, foi conduzida uma análise experimental em modelo reduzido de ponte em escala 1:3. Os experimentos foram realizados com a finalidade de aferir os modelos teóricos estudados e obter parâmetros balizadores para corrigir ou ratificar as hipóteses dos modelos estudados.

O modelo ensaiado é baseado no projeto de uma ponte de madeira com tabuleiro multicelular protendido, Classe 45, a ser construída no Campus II da USP de São Carlos. O projeto elaborado pelo autor, com 12m de comprimento e 9,5m de largura, prevê duas faixas de tráfego e um passeio lateral (figuras 88 e 89). As nervuras da ponte serão formadas por vigas de Madeira Laminada Colada do gênero Pinus e o tabuleiro, por peças de madeira serrada do gênero Eucalipto.

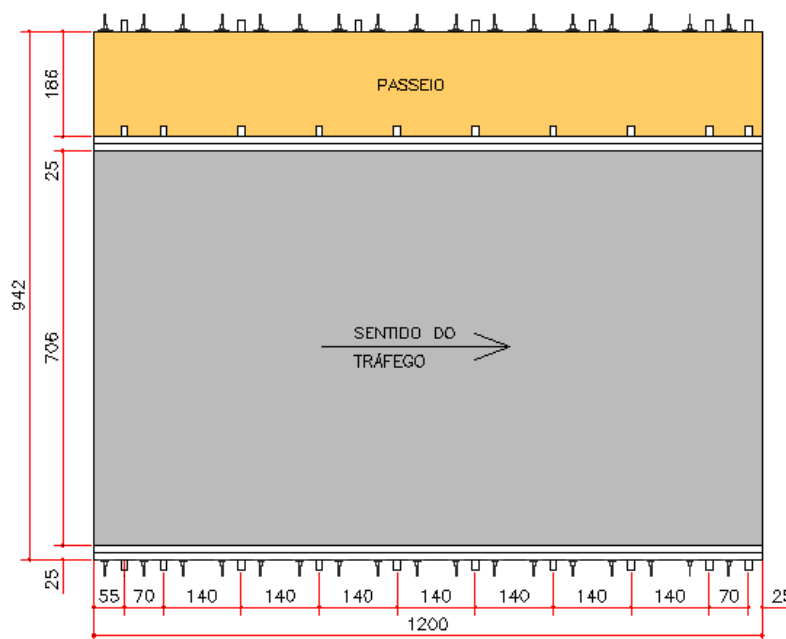


Figura 88 – Planta baixa da ponte do Campus II da USP São Carlos

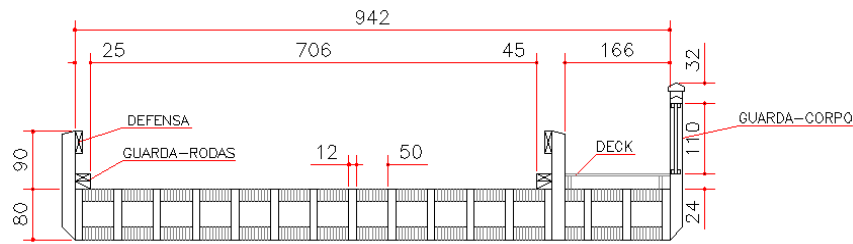


Figura 89 – Seção transversal da ponte do Campus II da USP São Carlos

O modelo reduzido ensaiado foi todo construído em madeira da espécie Cedrinho. As vigas de MLC foram reproduzidas por vigas maciças, com dimensões nominais 4 x 20 x 400cm e as lâminas de madeira do tabuleiro, por sarrafos de 1,7 x 5 x 400cm.

Como pode ser notado, nem todas as dimensões reduzidas das peças de madeira utilizadas no modelo correspondem fielmente às do projeto original. A nervura no projeto original possui 80cm de altura, que em escala 1:3 seria aproximadamente 27cm, porém esta altura foi reduzida para 20cm no modelo. Da mesma forma que a altura das peças das mesas, que no projeto original é de 20 cm, e no modelo corresponderia a aproximadamente 6,7cm, foi reduzida para 5cm. Estas alterações têm como objetivo, ampliar as respostas do modelo sujeito aos carregamentos de norma.

O modelo foi montado em duas configurações de seção transversal distintas. A primeira configuração corresponde ao projeto original (16 vigas), enquanto que a segunda foi montada com um número reduzido de vigas (12 vigas). As figuras 90 e 91 mostram o modelo reduzido e suas duas configurações.

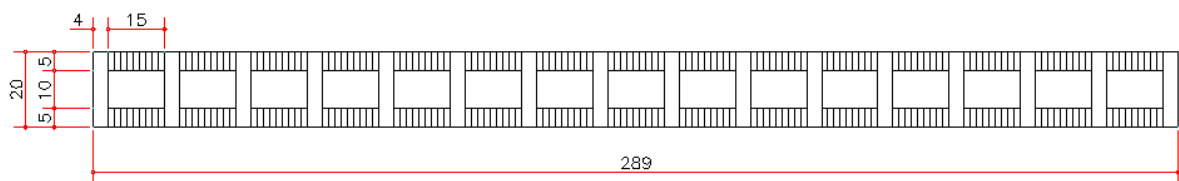


Figura 90 – Seção transversal do modelo reduzido na configuração 1 (16 nervuras)

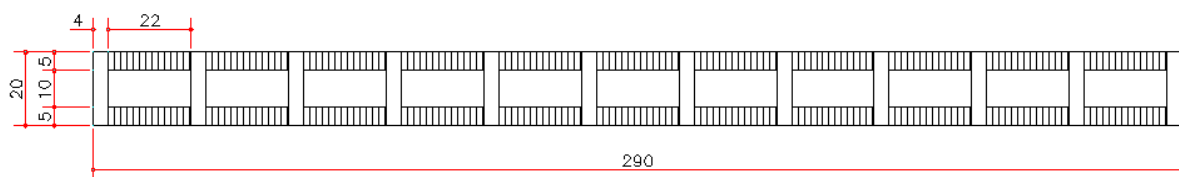


Figura 91 – Seção transversal do modelo reduzido na configuração 2 (12 nervuras)

Na fase preliminar, todas as peças de madeira já serradas nas corretas dimensões, foram preparadas para o início dos trabalhos. As peças foram furadas e entablicadas para assegurar um teor de umidade propício para a condução dos ensaios (item 5.1).

Após a fase preliminar, todas as peças de madeira utilizadas no modelo foram caracterizadas por ensaios não destrutivos de flexão estática. Desses ensaios foi obtido o módulo de elasticidade à flexão de cada peça, que serão utilizados na comparação dos resultados teóricos com os experimentais. Esses ensaios são descritos de forma detalhada no item 5.2.

Em seguida, o modelo foi montado atendendo as especificações de projeto, como espaçamento de nervuras, espaçamento de barras de protensão e nível de protensão. Foram utilizadas barras roscadas (M10) com 10 mm de diâmetro para simular as barras de protensão. O item 5.3 apresenta o procedimento de montagem do modelo com a aplicação do nível de protensão conveniente.

O item 5.4 mostra toda a instrumentação usada no modelo. Foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (strain gages) nas peças de madeira, células de carga nas barras de protensão e transdutores de deslocamento no centro do vão e nos apoios.

Cada configuração de tabuleiro foi testada para identificar o comportamento estrutural no regime linear. Para isto, o modelo foi submetido a carregamentos distribuídos e concentrados simétricos e assimétricos, variando-se o nível de protensão. Os ensaios no modelo reduzido são descritos no item 5.5.

Todo o programa experimental 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).

5.1. FASE PRELIMINAR

A princípio, todas as peças de madeira, pré-bitoladas, foram furadas uma a uma para a passagem das barras de protensão. O diâmetro dos furos é de $\frac{1}{2}$ ", e o espaçamento é de 25 cm entre eixos, conforme projeto do modelo (figura 92). A figura 93 mostra a realização dos furos nas peças de madeira.

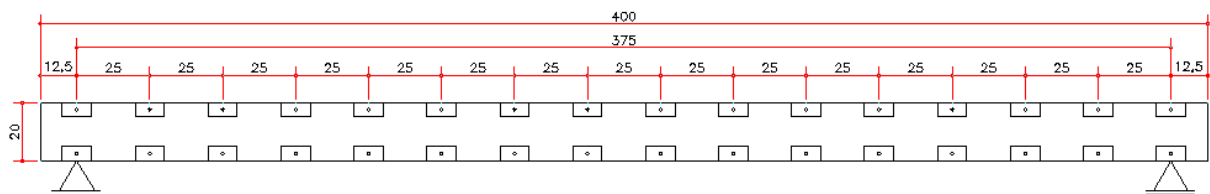


Figura 92 – Vista lateral do modelo e o espaçamento entre as barras de protensão.



Figura 93 – Furação das peças de madeira

Devidamente furadas, as peças foram entabecadas (figura 94) e, periodicamente, foram retirados corpos-de-prova para determinação do teor de umidade, seguindo os procedimentos da NBR 7190.

O controle foi feito até que o teor de umidade atingisse o equilíbrio, entre 11% e 13%, propício para a condução dos ensaios seguintes.



Figura 94 – Secagem das peças de madeira

Concluindo a fase preliminar, algumas peças foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência da marca KYOWA do tipo KFG-10-120-C1-11. Os extensômetros foram colados na face superior e inferior das peças na região central do vão (figura 95).



Figura 95 – Instalação de extensômetro elétricos

5.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Todas as peças de madeira foram caracterizadas por ensaio não destrutivo de flexão estática para a determinação do valor do módulo de elasticidade à flexão.

Para as nervuras, os ensaios consistem em aplicar o carregamento com duas forças concentradas espaçadas de 50cm no centro do vão sobre a peça bi-apoiada, medindo a flecha máxima a cada novo incremento de carregamento. Esta configuração do ensaio de flexão tem justificativa no fato de que o modelo reduzido é ensaiado como mesmo espaçamento entre as cagas concentradas.

Em algumas peças foram instalados extensômetros elétricos nas faces, superior e inferior, mensurando a deformação específica correspondente a cada incremento do carregamento. A figura 96 ilustra a configuração dos ensaios de flexão estática para as nervuras.

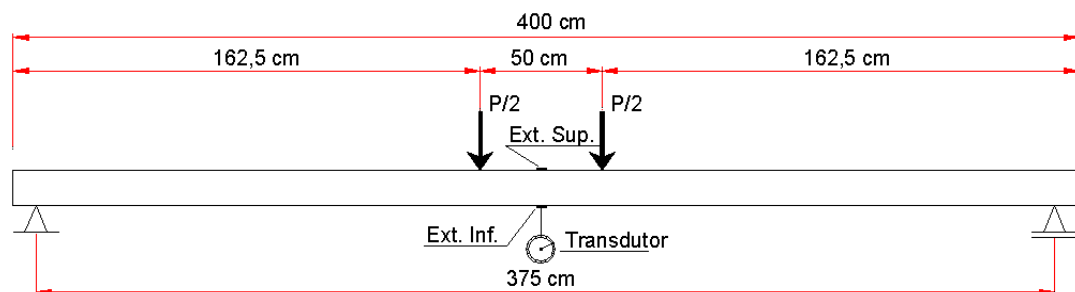


Figura 96 – Configuração do ensaio flexão estática das nervuras

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-deslocamento, indicado na figura 97.

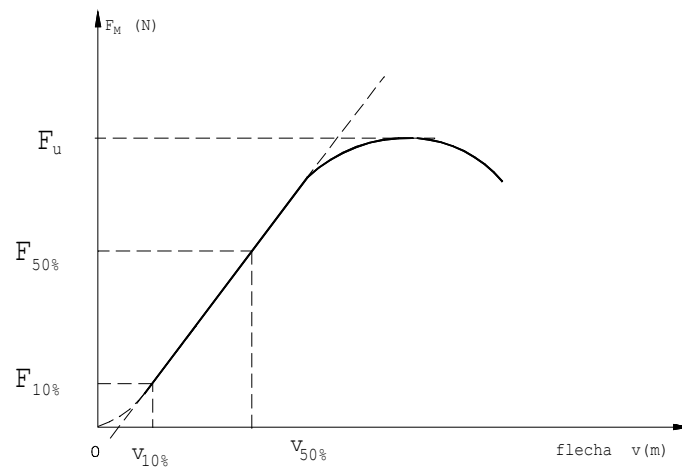


Figura 97 – Diagrama carga-flecha na flexão. Fonte NBR 7190 (1997)

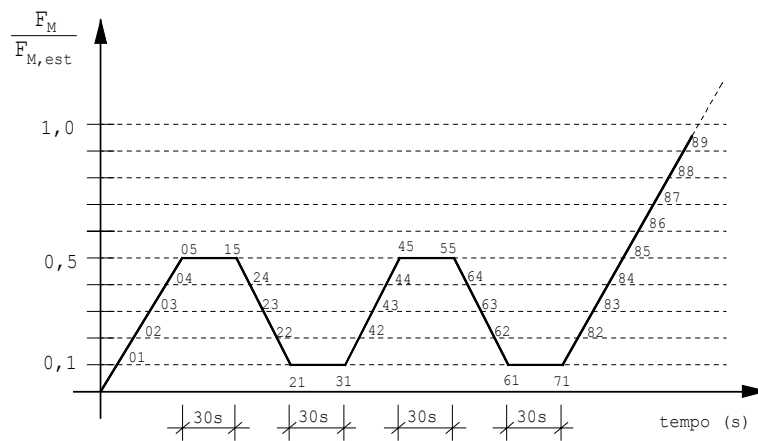


Figura 98 – Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez à flexão. Fonte NBR 7190 (1997)

Para esta finalidade, a norma brasileira indica que o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga-deslocamento no meio do vão, no último ciclo de carregamento (figura 98), definida pelos pontos correspondentes a 10% e 50% da carga máxima de ensaio, estimada por meio de um corpo de prova gêmeo.

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 $L/200$, de forma a não exceder o regime elástico do material. O vão adotado para estes ensaios foi o mesmo utilizado para os ensaios no modelo reduzido (375cm).

Já as peças das mesas (sarrafos 1,7 x 5 x 400cm) foram ensaiados à flexão estática com carregamento concentrado no centro do vão sobre a peça bi-apoiada, medindo a flecha máxima a cada novo incremento de carregamento. Os sarrafos foram ensaiados na posição

horizontal, ou seja, flexão em torno do eixo de menor inércia, com vão de 250 cm. Os sarrafos que possuíam extensômetros elétricos foram também ensaiados no eixo de maior inércia, com carregamento composto por duas forças concentradas espaçadas 50cm, e centralizadas. As figuras 99 e 100 ilustram a configuração dos ensaios de flexão estática para as peças das mesas.

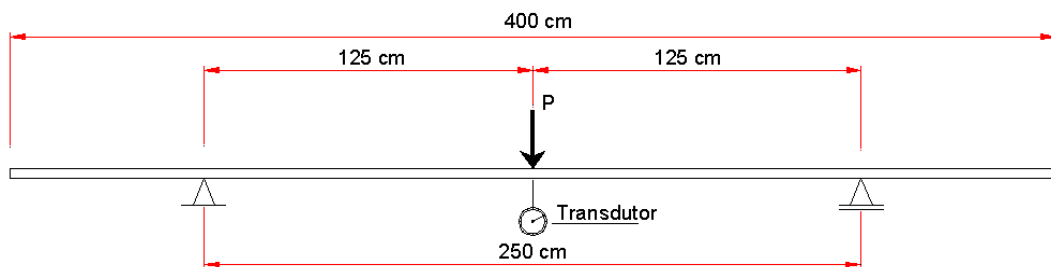


Figura 99 – Configuração do ensaio flexão estática dos sarrafos (menor inércia)

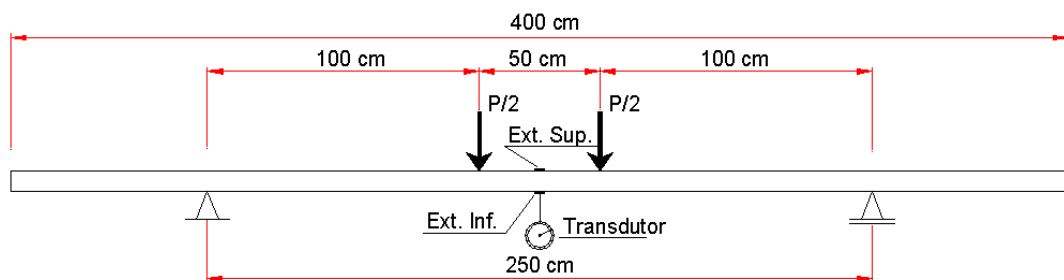


Figura 100 – Configuração do ensaio flexão estática dos sarrafos (maior inércia)

As figuras 101 e 102 mostram os ensaios de flexão estática em curso.



Figura 101 – Ensaio de flexão estática das nervuras



Figura 102 – Ensaio de flexão estática dos sarrafos (menor e maior inércia)

No caso dos ensaios com as nervuras, 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 verticais no meio do vão (flecha) foi feita com transdutor digital de deslocamento com sensibilidade de 0,01 mm e capacidade máxima de 50 mm, da marca MITUTOYO posicionado na face inferior das peças.

Para os sarrafos, o carregamento foi aplicado com discos de chumbo pré-pesados e, as leituras de flecha foram obtidas com transdutor digital, com sensibilidade de 0,01 mm.

As leituras de deformações específicas e dos deslocamentos foram registradas com o equipamento de aquisição de dados SYSTEM 5000 da Micro-Measurements com capacidade de até 20 canais.

De posse dos valores de pares de força aplicada e o correspondente deslocamento vertical no meio do vão, foram determinados os módulos de elasticidade a flexão ($E_{M, flecha}$) de vigas bi-apoiadas com cargas concentradas com 50cm de distância, de acordo com a seguinte equação:

$$E_{M, flecha} = \frac{59 \cdot L^3 \cdot \Delta F}{3000 \cdot I \cdot \Delta \delta} \quad (111)$$

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:

$$E_{M, \text{ext. x}} = \frac{h \cdot L \cdot \Delta F}{5 \cdot I \cdot \Delta \varepsilon} \quad (112)$$

Onde:

h – altura da peça

L – vão do ensaio

ΔF – variação da força

I – momento de inércia da peça

$\Delta \varepsilon$ – variação da deformação específica

Para os sarrafos, o módulo de elasticidade à flexão ($E_{M, \text{flecha}}$) foi determinado de acordo com a seguinte equação:

$$E_{M, \text{flecha}} = \frac{L^3 \cdot \Delta F}{48 \cdot I \cdot \Delta \delta}, \text{ para carga concentrada no centro} \quad (113)$$

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

$$E_{M, \text{ext. x}} = \frac{h \cdot L \cdot \Delta F}{5 \cdot I \cdot \Delta \varepsilon} \quad (114)$$

Os valores dos módulos de elasticidade obtidos destes ensaios de caracterização são apresentados no item 6.1 do capítulo de resultados.

5.3. MONTAGEM DO MODELO REDUZIDO

Após os ensaios de flexão, as madeiras devidamente secas ao ar e já com os extensômetros, foram posicionadas, conforme projeto, de modo a constituir todo o modelo.

O modelo foi montado sobre apoios contínuos, compostos por barra de aço redondo sobre viga de aço rígida. Os elementos de apoio restringiam os deslocamentos verticais para baixo e horizontais na direção transversal do tabuleiro. Os deslocamentos verticais para cima e horizontais na direção longitudinal não eram restritos.

A montagem foi iniciada com a colocação da primeira nervura sobre o apoio e a instalação das barras de protensão. Em seguida, eram colocados os sarrafos da mesa inferior e depois os

da mesa superior. Com a instalação da segunda nervura, era concluída a montagem de um módulo do tabuleiro.

Este procedimento foi repetido até que todos os módulos fossem montados, completando o tabuleiro.

A figura 103 mostra os procedimentos de montagem do tabuleiro até a sua conclusão.



Figura 103 – Montagem do tabuleiro

Com o tabuleiro completo iniciou-se a fase de protensão. As placas de ancoragem eram instaladas e as porcas foram atarraxadas com o auxílio de furadeira adaptada, com controle de velocidade (figura 104).



Figura 104 – Protensão do tabuleiro

As barras roscadas foram protendidas uma a uma, iniciando-se pelas barras do centro do vão e prosseguindo de forma simétrica até as últimas barras na região dos apoios. Este procedimento foi repetido várias vezes até que o nível de força nas barras estabilizasse. O nível foi medido por células de carga instaladas nas barras. O ajuste fino foi feito manualmente com chave.

Depois de feitos todos os ensaios necessários no modelo com a primeira configuração de seção transversal, este foi desmontado, e novamente montado com a segunda configuração. A segunda configuração foi montada seguindo os mesmos procedimentos de montagem da primeira.

5.4. INSTRUMENTAÇÃO DO MODELO REDUZIDO

A instrumentação usada na pesquisa tem como objetivo a medição de deslocamentos verticais e deformações do tabuleiro, além da força de protensão nas barras, durante a condução dos ensaios.

A instrumentação inclui, transdutores de deslocamento para medir os deslocamentos verticais no centro do vão e nos apoios, extensômetros elétricos para medir as deformações específicas nas nervuras e mesas, células de carga para monitorar a força de protensão nas barras roscadas e também para a aplicação de carga.

Todos os instrumentos foram conectados a dois sistemas eletrônicos de aquisição de dados. As células de carga eram conectadas ao indicador de deformações modelo KYOWA SM-60B acoplado a uma caixa comutadora para 24 canais modelo KYOWA SS24R, e os transdutores e extensômetros ao sistema System 5000 da Micro-Measurements com capacidade de até 20 canais, ligado a um computador para armazenamento dos dados.



Figura 105 – Sistemas de aquisição de dados

A lista de instrumentos usados nos ensaios, a quantidade e suas especificações são descritas a seguir:

- 16 Transdutores de deslocamento (KYOWA) com capacidade de 100mm e resolução de 0,01mm;
- 12 Transdutores de deslocamento (MITUTOYO) com capacidade de 50mm e resolução de 0,01mm;
- 23 Extensômetros elétricos (KYOWA KFG-10-120-C1-11) com 10mm de comprimento e 120 Ω ;
- 10 Células de carga (LaMEM) com capacidade de 1 kN;
- 1 Célula de carga (MSI) com capacidade de 25kN.

Os transdutores KYOWA foram posicionados na face inferior de cada nervura no centro do vão, 16 na primeira configuração de tabuleiro e 12 na segunda configuração. Os 6 transdutores MITUTOYO foram posicionados sobre o tabuleiro na linha dos apoios, para medir possíveis deslocamentos verticais nos apoios.

As figuras 106, 107 e 108 mostram a localização das células de carga e dos transdutores de deslocamento usados no modelo em suas duas configurações.

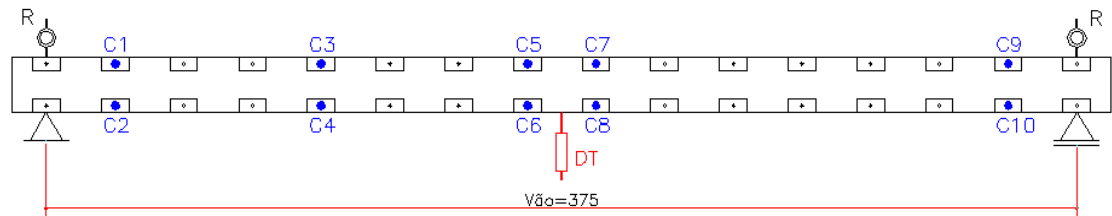


Figura 106 – Localização das células de carga nas barras de protensão para a configuração 1 e 2 (vista lateral esquerda do modelo)

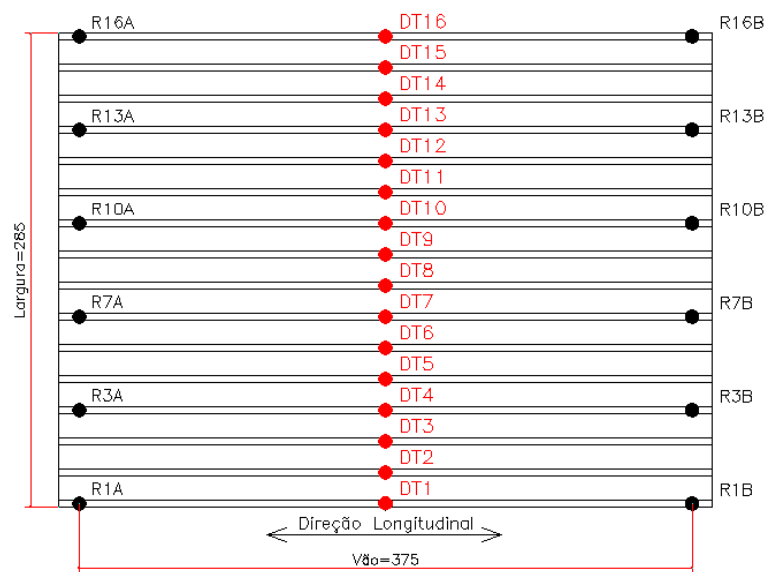


Figura 107 – Localização dos transdutores de deslocamento (planta baixa configuração 1)



Figura 108 – Localização dos transdutores de deslocamento (planta baixa configuração 2)



Figura 109 – Transdutores de deslocamento KYOWA e MITUTOYO

A figura 109 mostra os transdutores KYOWA prontos para instalação na parte inferior do tabuleiro no centro do vão e os transdutores MITUTOYO instalados nos apoios.

As vigas de madeira com os extensômetros elétricos previamente instalados foram distribuídos ao longo do tabuleiro conforme ilustram as figuras 110 e 111. Da mesma forma, foram distribuídos os sarrafos com os extensômetros. É necessário lembrar que todos os extensômetros foram instalados no centro do vão das peças.

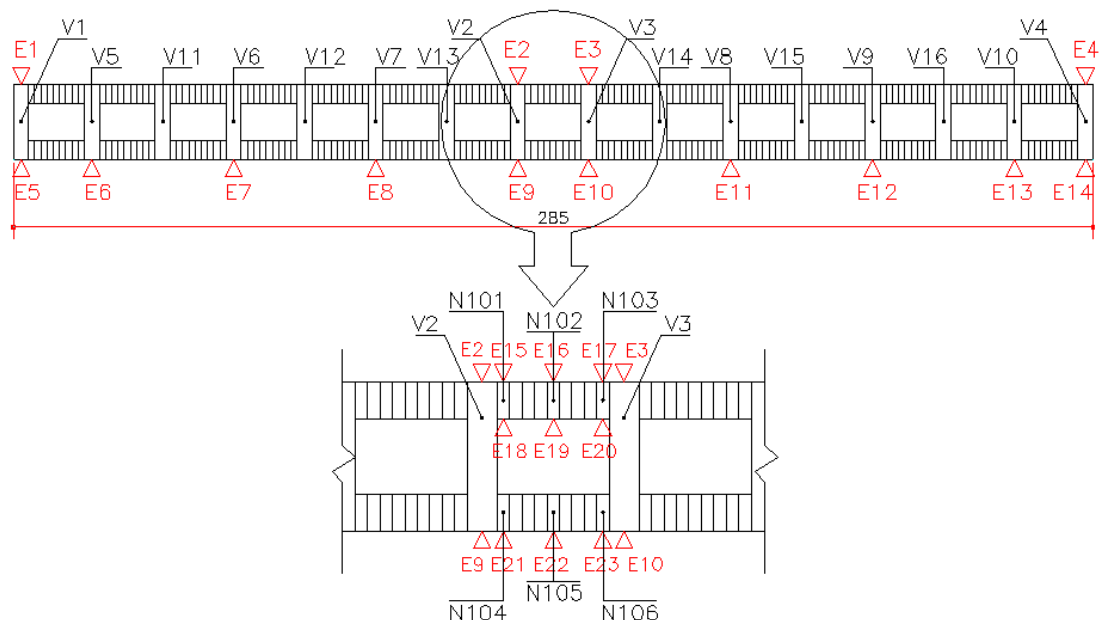


Figura 110 – Distribuição das vigas e sarrafos instrumentados ao longo do tabuleiro (vista frontal do modelo – configuração 1)

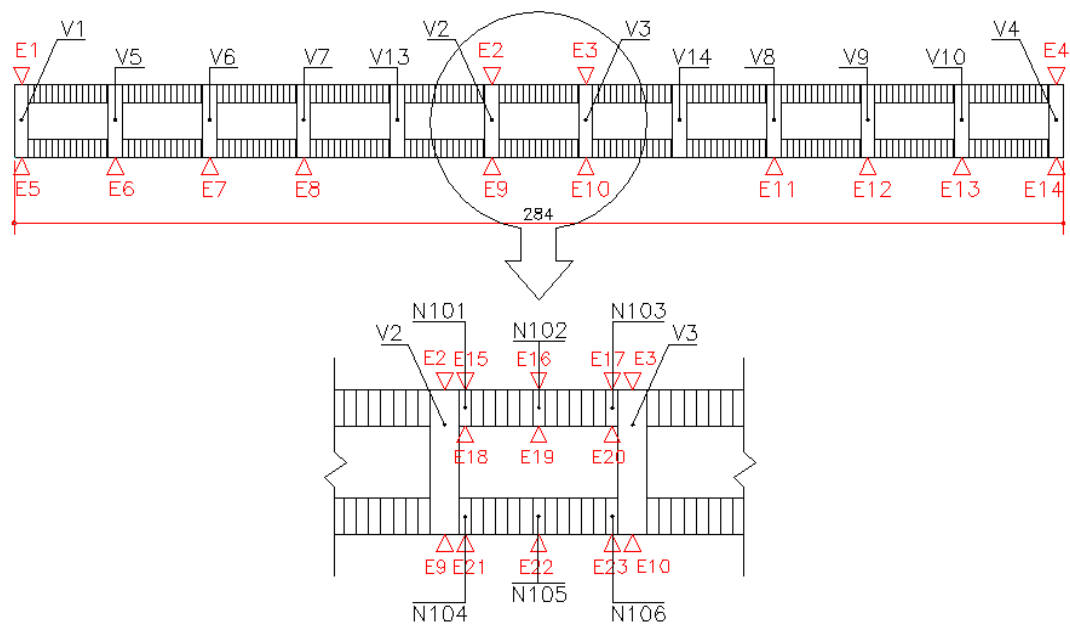


Figura 111 – Distribuição das vigas e sarrafos instrumentados ao longo do tabuleiro (vista frontal do modelo – configuração 2)

5.5. ENSAIOS DO MODELO REDUZIDO

O modelo reduzido foi ensaiado com vários arranjos de carregamentos diferentes, simétricos e assimétricos, com a finalidade de avaliar a rigidez longitudinal à flexão e também quantificar a distribuição de carga ao longo da seção transversal do tabuleiro a cada nível de protensão distinto.

Para cada um dos três níveis de protensão estudados (700 kPa, 550 kPa e 350 kPa), era realizada uma bateria de ensaios, com os vários arranjos de carregamento. Os ensaios começaram pelo nível mais alto de protensão e no final, a última bateria era feita com o modelo sem protensão. Os procedimentos de ensaios realizados na primeira configuração de tabuleiro foram repetidos para a segunda configuração.

As tabelas 31 e 32 sintetizam todos os ensaios realizados no tabuleiro com a primeira e segunda configuração. São seis diferentes arranjos de carregamento para cada nível de protensão estudado, perfazendo ao todo 24 ensaios para cada configuração de tabuleiro.

Os carregamentos distribuídos foram aplicados com dois perfis metálicos com 10cm de largura em toda a seção transversal do modelo. Os carregamentos concentrados foram aplicados com peças de madeira de alta densidade sob perfis metálicos.

As dimensões das cargas concentradas usadas no modelo eram 6,7cm de comprimento (sentido longitudinal) e 16,7cm de largura. Essas medidas correspondem às dimensões reais da área de contato das rodas do Veículo tipo Classe 45 (20 x 50cm), conforme NBR 7188.

Tabela 31 – Relação de ensaios para o modelo com a primeira configuração.

Nível de Protensão	Arranjo de Carregamento	
	Ensaio	Descrição
700 kPa	P1-700/D	Carga simétrica distribuída no tabuleiro
	P1-700/CLE	Carga assimétrica concentrada na lateral esquerda do tabuleiro
	P1-700/CQE	Carga assimétrica concentrada no quarto esquerdo do tabuleiro
	P1-700/CC	Carga simétrica concentrada no centro do tabuleiro
	P1-700/CQD	Carga assimétrica concentrada no quarto direito do tabuleiro
	P1-700/CLD	Carga assimétrica concentrada na lateral direita do tabuleiro
500 kPa	P1-550/D	Carga simétrica distribuída no tabuleiro
	P1-550/CLE	Carga assimétrica concentrada na lateral esquerda do tabuleiro
	P1-550/CQE	Carga assimétrica concentrada no quarto esquerdo do tabuleiro
	P1-550/CC	Carga simétrica concentrada no centro do tabuleiro
	P1-550/CQD	Carga assimétrica concentrada no quarto direito do tabuleiro
	P1-550/CLD	Carga assimétrica concentrada na lateral direita do tabuleiro
300 kPa	P1-350/D	Carga simétrica distribuída no tabuleiro
	P1-350/CLE	Carga assimétrica concentrada na lateral esquerda do tabuleiro
	P1-350/CQE	Carga assimétrica concentrada no quarto esquerdo do tabuleiro
	P1-350/CC	Carga simétrica concentrada no centro do tabuleiro
	P1-350/CQD	Carga assimétrica concentrada no quarto direito do tabuleiro
	P1-350/CLD	Carga assimétrica concentrada na lateral direita do tabuleiro
0 kPa	P1-0/D	Carga simétrica distribuída no tabuleiro
	P1-0/CLE	Carga assimétrica concentrada na lateral esquerda do tabuleiro
	P1-0/CQE	Carga assimétrica concentrada no quarto esquerdo do tabuleiro
	P1-0/CC	Carga simétrica concentrada no centro do tabuleiro
	P1-0/CQD	Carga assimétrica concentrada no quarto direito do tabuleiro
	P1-0/CLD	Carga assimétrica concentrada na lateral direita do tabuleiro

As regiões de aplicação de carga foram preparadas de forma a evitar possíveis desnivelamentos da superfície. A cada bateria de ensaios era colocada uma camada de aproximadamente 1,5cm de espessura de areia média devidamente nivelada.

Tabela 32 – Relação de ensaios para o modelo com a segunda configuração.

Nível de Protensão	Arranjo de Carregamento	
	Ensaio	Descrição
700 kPa	P2-700/D	Carga simétrica distribuída no tabuleiro
	P2-700/CLE	Carga assimétrica concentrada na lateral esquerda do tabuleiro
	P2-700/CQE	Carga assimétrica concentrada no quarto esquerdo do tabuleiro
	P2-700/CC	Carga simétrica concentrada no centro do tabuleiro
	P2-700/CQD	Carga assimétrica concentrada no quarto direito do tabuleiro
	P2-700/CLD	Carga assimétrica concentrada na lateral direita do tabuleiro
500 kPa	P2-550/D	Carga simétrica distribuída no tabuleiro
	P2-550/CLE	Carga assimétrica concentrada na lateral esquerda do tabuleiro
	P2-550/CQE	Carga assimétrica concentrada no quarto esquerdo do tabuleiro
	P2-550/CC	Carga simétrica concentrada no centro do tabuleiro
	P2-550/CQD	Carga assimétrica concentrada no quarto direito do tabuleiro
	P2-550/CLD	Carga assimétrica concentrada na lateral direita do tabuleiro
300 kPa	P2-350/D	Carga simétrica distribuída no tabuleiro
	P2-350/CLE	Carga assimétrica concentrada na lateral esquerda do tabuleiro
	P2-350/CQE	Carga assimétrica concentrada no quarto esquerdo do tabuleiro
	P2-350/CC	Carga simétrica concentrada no centro do tabuleiro
	P2-350/CQD	Carga assimétrica concentrada no quarto direito do tabuleiro
	P2-350/CLD	Carga assimétrica concentrada na lateral direita do tabuleiro
0 kPa	P2-0/D	Carga simétrica distribuída no tabuleiro
	P2-0/CLE	Carga assimétrica concentrada na lateral esquerda do tabuleiro
	P2-0/CQE	Carga assimétrica concentrada no quarto esquerdo do tabuleiro
	P2-0/CC	Carga simétrica concentrada no centro do tabuleiro
	P2-0/CQD	Carga assimétrica concentrada no quarto direito do tabuleiro
	P2-0/CLD	Carga assimétrica concentrada na lateral direita do tabuleiro

As figuras 112, 113, 114 e 115 ilustram a geometria e o posicionamento dos carregamentos, distribuídos e concentrados, aplicados no modelo em suas duas configurações.

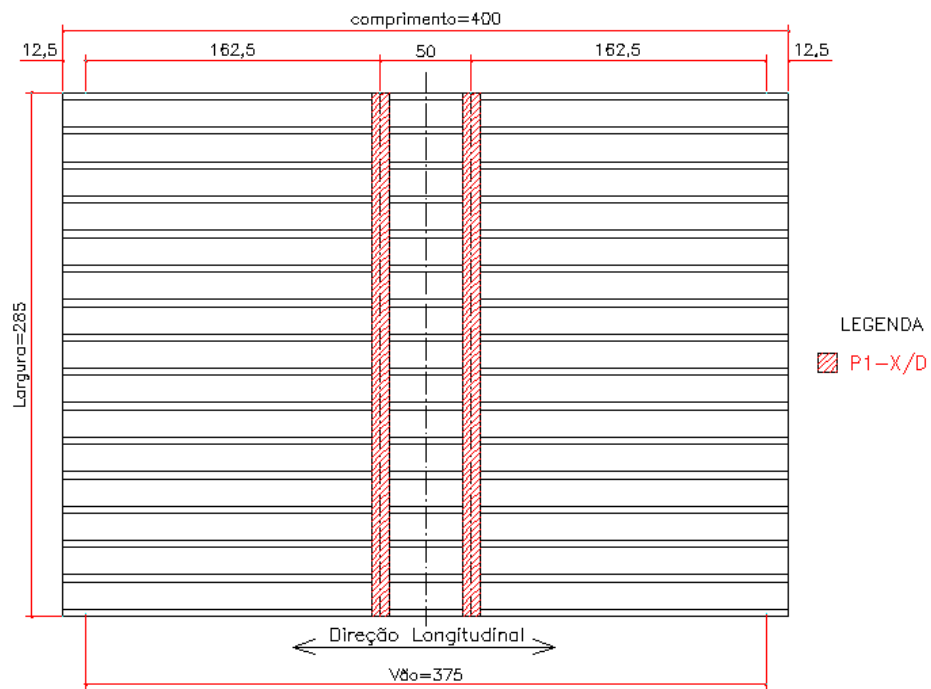


Figura 112 – Posicionamento do carregamento distribuído (configuração 1)

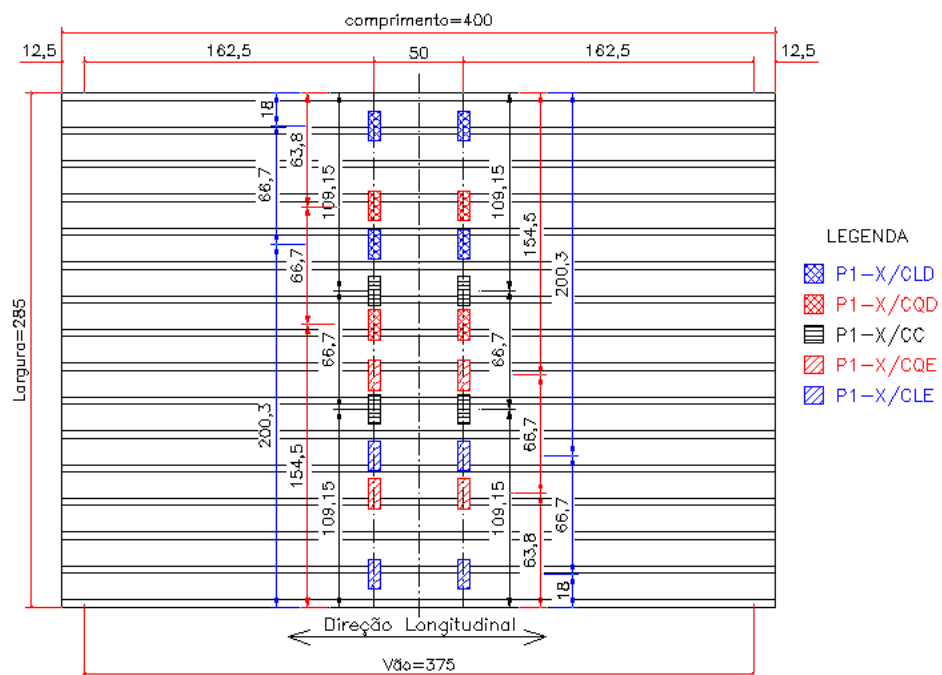


Figura 113 – Posicionamento dos carregamentos concentrados (configuração 1)

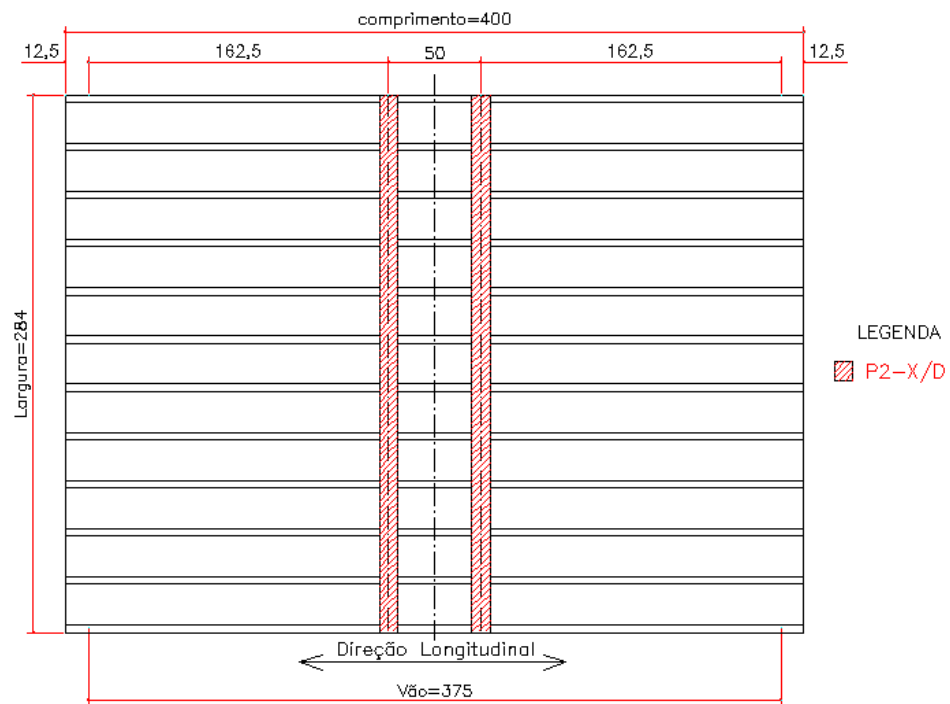


Figura 114 – Posicionamento do carregamento distribuído (configuração 2)

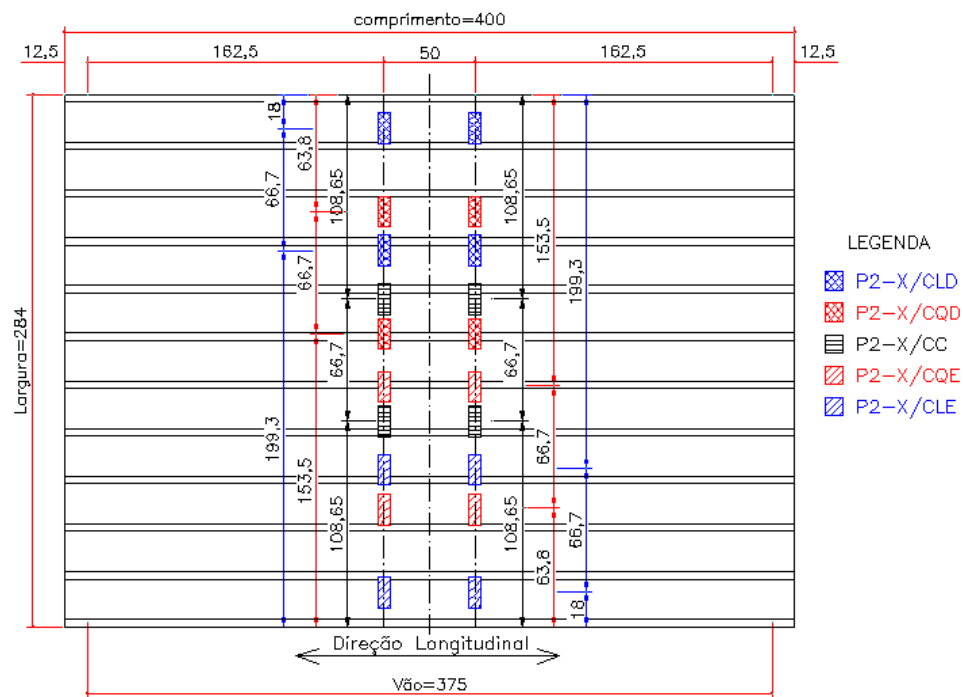


Figura 115 – Posicionamento dos carregamentos concentrados (configuração 2)

A seqüência de fotos da figura 116 ilustra os arranjos de carregamentos aplicados no modelo.

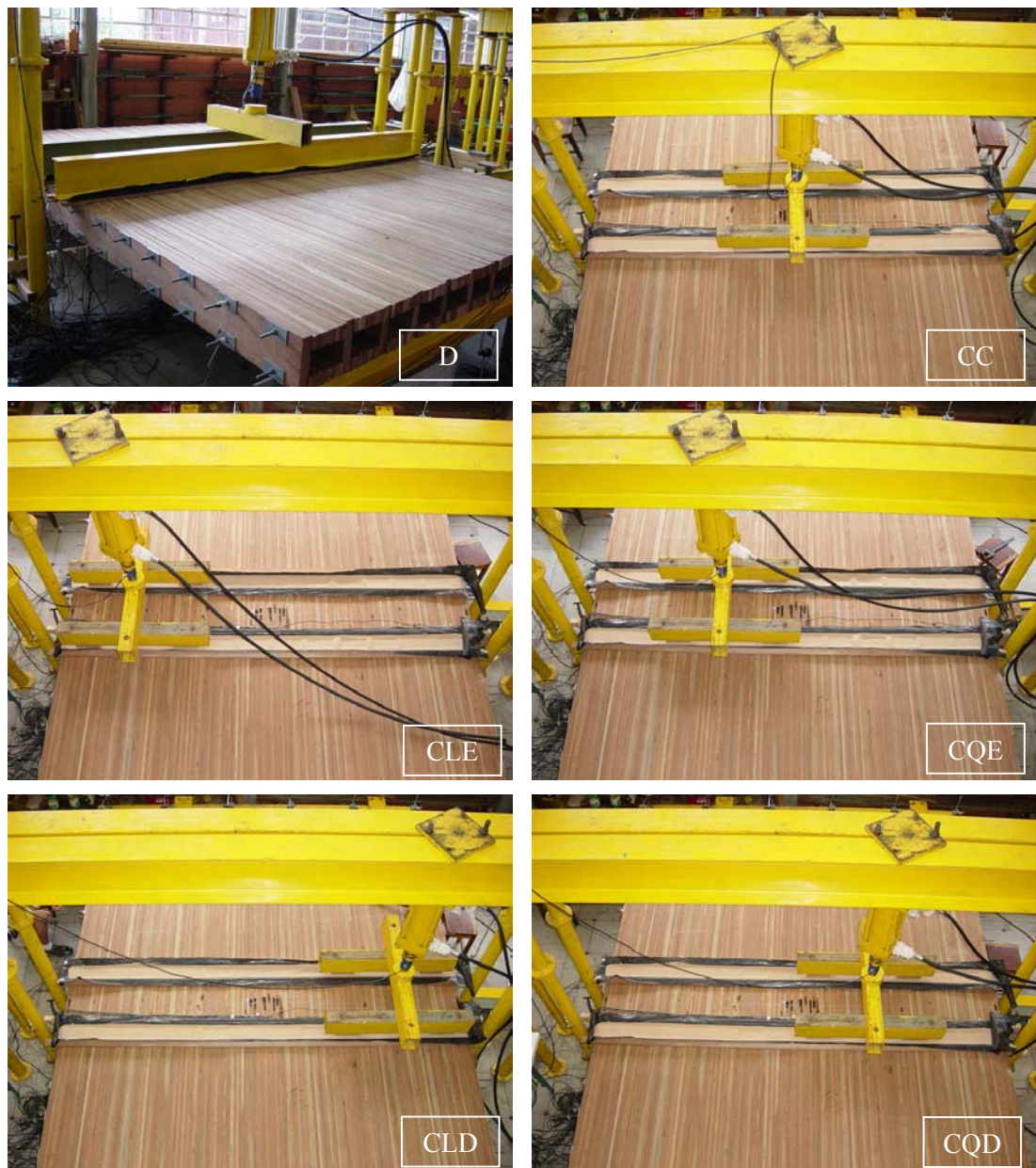


Figura 116 – Arranjos dos Carregamentos

O modelo foi ensaiado com dois ciclos de carregamento monotônico crescente, fazendo-se as leituras de dados no segundo ciclo. Os carregamentos foram conduzidos até o limite máximo de flecha de $L/200$.

Todos os resultados dos ensaios preliminares de caracterização das peças de madeira, bem como os ensaios do modelo, são devidamente apresentados no Capítulo 6.