

## Nivelamento geométrico em Ensaios estruturais de Flexão estática em Painéis compensados

Camila Zonta <sup>1</sup>  
Niarkios Luiz S. S. Graça <sup>2</sup>  
Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal <sup>3</sup>  
Prof. Dr. José Guilherme Prata <sup>4</sup>

UFPR – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas  
81531-990 Curitiba PR

<sup>1</sup> camilazonta@hotmail.com

<sup>2</sup> niarkiosnl@hotmail.com

<sup>3</sup> cnadal@ufpr.br

UFPR – Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal  
80210-170 Curitiba PR

<sup>4</sup> prata@ufpr.br

**Resumo:** Uma parceria entre o Laboratório de Instrumentação Geodésica e o Laboratório de Tecnologia da Madeira, ambos da Universidade Federal do Paraná, possibilitou o desenvolvimento deste projeto. A junção das áreas, Levantamentos Geodésicos e Tecnologia da Madeira, mostra-se um conjunto inovador na avaliação de ensaios estruturais e monitoramento de estruturas de madeira. Neste projeto, o objetivo inicial é realizar ensaios de flexão estática em painéis compensados de madeira através de uma Máquina Universal de Ensaios. Associado a este teste, será realizado o nivelamento geométrico de pontos pré-definidos nos corpos de prova. Desta forma, monitorando os deslocamentos em pontos dos painéis compensados que ainda não foram possíveis de serem mensurados com o ensaio estrutural convencional. Uma avaliação comparativa do comportamento estrutural entre os corpos de prova será desenvolvida em conjunto com uma análise das curvas de nível, a partir dos pontos monitorados em cada painel compensado de madeira.

**Palavras Chaves:** nivelamento geométrico, ensaio estrutural, monitoramento, deslocamento.

**Abstract:** The association between the Laboratory of Geodetic Instrumentation and Laboratory of Wood Technology, both of the University Federal of Paraná, enabled the development of this project. The junction of these areas, geodetic surveys and wood technology, show a set innovative in the evaluation of structural testing and monitoring of timber structures. In this project, the initial purpose is perform static bending test on plywood panels with a Universal Testing Machine. Associated with this test, will be carried out the geometric leveling of the predetermined points on the test bodies. Thus, monitoring the displacement at points of plywood that yet aren't possible to be measured with the conventional structural test. A comparative evaluation of structural behavior between of the test bodies will be developed jointly with an analysis of the level curves, starting from the monitored points in each plywood panel.

**Keywords:** geometric leveling, structural test, monitoring, displacement.

## 1 Introdução

A importância da multidisciplinaridade com aplicações de métodos em diferentes áreas da Engenharia tem crescido muito, principalmente, no âmbito da construção civil. Com a expansão dos tipos de materiais que podem ser utilizados tanto por parte dos projetistas como nas obras de engenharia, novos testes e avaliações que empregam maior rigor técnico, prescritos nas normas técnicas, foram implementados. O monitoramento de estruturas, exemplo de um destes testes, pode ser realizado tanto em laboratório como no andamento e/ou após o término de construções.

O uso da madeira, como material para construção civil, está ainda mais fortalecido em função dos tratamentos desenvolvidos, variando desde peças com pouco ou nenhum processamento, ou até, peças com vários graus de beneficiamento. O comportamento das estruturas de engenharia, sendo ela de madeira, alvenaria, dentre outras, depende do conhecimento das leis fundamentais da mecânica, das características físicas e químicas que compõe o material e dos estudos viabilizados pela resistência dos materiais. Os ensaios estruturais são realizados para verificação do desempenho dos materiais, empregando-se os métodos fornecidos pelas normas técnicas.

Entretanto, os ensaios convencionais utilizados para analisar o comportamento das estruturas de madeira visam avaliar os deslocamentos e/ou deformações, porém, não obtém resposta para todo o corpo de prova. Desta forma, utilizando-se de métodos e técnicas geodésicas será possível implantar uma avaliação em conjunto com a realizada nos ensaios consagrados da área madeireira, obtendo-se um resultado mais detalhado do comportamento do material testado.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Monitoramento Geodésico de Estruturas

O monitoramento geodésico tem mostrado, nas últimas décadas, importância significativa na análise estrutural e comportamental de estruturas de engenharia. Estas estruturas são construídas a partir de um planejamento, gerenciadas por uma visão geral e total do empreendimento. Sendo assim, necessárias atividades constantes de análise dos elementos estruturais que compõem a estrutura como um todo. Ou seja, sob a ação de forças (forças do corpo ou forças da superfície), um corpo deformável sofre alterações, gradualmente ou subitamente, em sua forma e posição (CHEN, 1983, p.15). Evidenciando então, a inclusão de técnicas e métodos geodésicos, a ponto de detectar deslocamentos na obra em andamento, ou no término da mesma.

As ações de segurança preventiva são realizadas, primeiramente, para detectar a localização do problema, ou seja, se está na própria estrutura ou se está no entorno da mesma. Após esta resposta, podem-se escolher os métodos e técnicas a serem utilizados, partindo-se da precisão necessária e do tempo disponível para execução do monitoramento.

Dentre os métodos e técnicas geodésicas utilizadas para fins de monitoramento, pode-se destacar:

- Nivelamento geométrico de precisão;
- Triangulação e Trilateração geodésica;
- Interseção e Irradiação;
- Poligonação;
- Sistema de Posicionamento Global (GPS);
- Fotogrametria;
- *Laser Scanning*.

Através da execução do monitoramento geodésico é possível detectar variações de coordenadas (bidimensional ou tridimensional) de pontos pré-definidos na estrutura em avaliação, em um período de tempo determinado. Desta forma, a avaliação final indicará se os pontos tiveram suas coordenadas alteradas, ou seja, se na estrutura ocorreu um deslocamento.

No caso do nivelamento geométrico, proposto para este trabalho, utiliza-se da diferença de cota entre dois pontos, ou seja, refere-se ao cálculo da diferença entre as leituras das miras de ré e vante. Para o monitoramento de estruturas, há necessidade de materializar referências ou marcos de controle fora da

estrutura, possibilitando assim, calcular os desníveis em diferentes épocas a partir das referências de partida e chegada materializados.

## 2.2 Ensaios Estruturais de Madeira

A determinação de propriedades físicas e mecânicas das espécies de madeira seguem os ensaios padronizados segundo a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Desta forma, são selecionadas as amostras sem defeitos para a representação nos testes, evitando-se a incerteza dos resultados obtidos em peças com defeitos. Tanto as propriedades físicas, quanto as propriedades mecânicas da madeira são influenciadas por diversos fatores, cujo conhecimento se faz necessário para a utilização do material na construção civil. Entre as características físicas da madeira podem-se destacar a anisotropia, o grau de umidade, a retração, dilatação linear e a deterioração da madeira. O grau de umidade da madeira é relevante para a determinação das propriedades mecânicas, sendo que, o lote de madeira analisado deve estar à condição padrão de umidade (PFEIL; PFEIL, 2008, p.27). Entretanto, fatores como, o tempo de duração da carga e a ocorrência de defeitos, também são significativos.

Para a caracterização completa da madeira para uso em estruturas, segundo a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), as seguintes propriedades devem ser determinadas por meio de ensaios:

- 1) Resistência à compressão paralela às fibras e normal às fibras;
- 2) Resistência à tração paralela às fibras e normal às fibras;
- 3) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;
- 4) Resistência ao embutimento (pressão de apoio em ligações com conectores) paralelo e normal às fibras;
- 5) Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade na compressão normal às fibras;
- 6) Densidade básica (massa específica definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado) e densidade aparente, calculada com a massa do corpo de prova a 12% de umidade.

Dentre os ensaios mais utilizados para avaliar a resistência dos corpos de prova encontram-se os de tração e compressão, onde, segundo Morris *et al.* (2003, p.120), a relação de carga e deformação de uma estrutura pode ser obtida por meio de diagramas que apresentam cargas e deflexões para cada elemento e para cada tipo de carregamento na estrutura.

## 3 Proposta de Metodologia

Através de uma parceria entre o Laboratório de Instrumentação Geodésica – LAIG, localizado no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, com o Laboratório de Tecnologia da Madeira, localizado no Centro de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Paraná, pôde-se integrar ambas as áreas, levantamentos geodésicos e tecnologia da madeira, para realização de uma junção de métodos e técnicas no monitoramento e avaliação estrutural de corpos de prova em ensaios estruturais de madeira.

Desta forma, busca-se inserir o nivelamento geométrico nos ensaios estruturais de madeira, permitindo a análise do deslocamento em vários pontos distribuídos ao longo do corpo de prova. Para a caracterização mecânica tradicional, ao final dos ensaios de flexão estática estrutural, tem-se apenas o deslocamento do corpo no meio do vão (flecha máxima). Pretende-se com o nivelamento geométrico, avaliar outras partes do corpo de prova que ainda não são analisadas durante os ensaios convencionais, ou seja, o nivelamento geométrico vem para complementar os ensaios estruturais e possibilitar uma análise comportamental dos movimentos verticais de cada corpo de prova através dos desníveis encontrados ao longo de cada experimento.

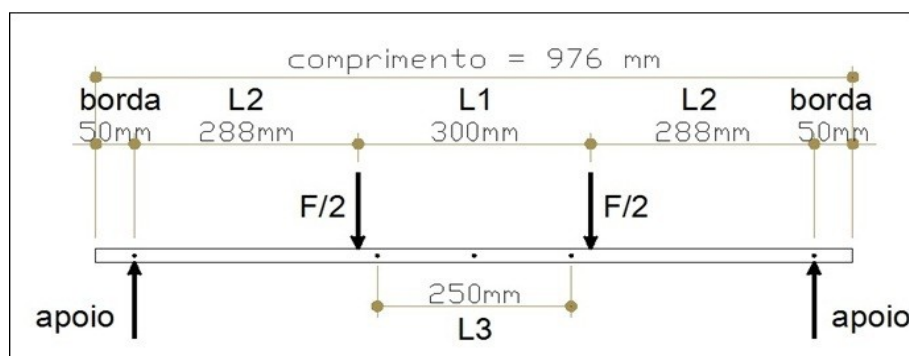
### 3.1 Métodos e Técnicas

A proposta é destinada à ensaios de flexão estática de painéis compensados realizados através de uma Máquina Universal de Ensaios, marca EMIC, com capacidade de 30.000 kgf (300 kN) (Figura 01).



**Figura 1:** Máquina Universal de Ensaio.

A partir da aplicação de uma carga axial a um corpo de prova e pela medição simultânea da carga e deslocamento a cada instante, é possível então, gerar os diagramas tensão-deslocamento para cada painel compensado. O método de ensaio será determinado pela norma EN 789/1995.



**Figura 2:** Dimensionamento do corpo de prova para ensaios de flexão estática estrutural.

Onde:

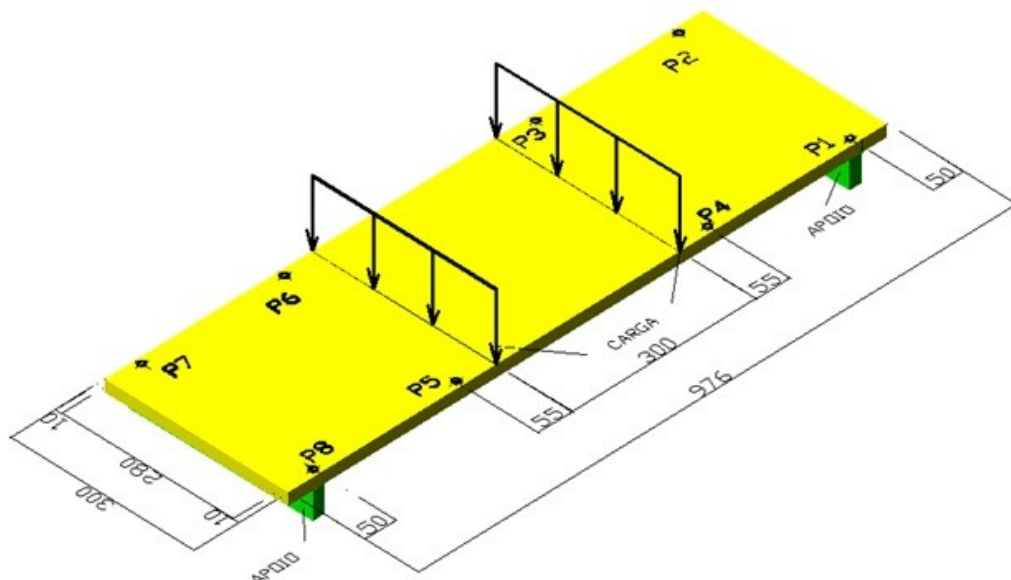
L1: distância entre as aplicações de carga;  
 L2: distância entre os apoios e a aplicação de carga;  
 L3: vão de deslocamento, e  
 F: carga aplicada

Juntamente com o ensaio estrutural será realizado o monitoramento geodésico através do nivelamento geométrico, utilizando-se o Nível Digital DNA03 - Leica (Figura 03) com precisão nominal de 0,3 mm, com auxílio da mira de invar.



**Figura 3:** Nível Digital DNA03 Leica.

Sendo que, serão determinadas duas etapas durante cada ensaio, parando-se a máquina de ensaios, e então, efetuando-se as mensurações com o nível digital. As duas etapas foram estipulados para uma avaliação do comportamento dos painéis compensados ao longo do teste.



**Figura 4:** Definição dos pontos a serem monitorados no corpo de prova.

Devido ao espaço disponível para apoiar a mira de ínvar no corpo de prova, em função da estrutura da máquina de ensaios, foram definidos alguns pontos que possibilitassem a realização do nivelamento geométrico. Na Figura 4, é possível visualizar os pontos distribuídos ao longo do painel compensado, os quais serão monitorados durante o ensaio conforme a numeração distribuída. A partir da marcação desses pontos, torna-se possível iniciar o nivelamento geométrico apoiando-se a mira de ínvar em cada ponto.

**1ª Fase: Ensaio Estrutural e Monitoramento Geodésico:**

- a) Preparação do corpo de prova: forma e tamanho padronizados;
- b) Início dos ensaios de flexão estática com a Máquina Universal de Ensaios;
- c) Determinação das duas etapas para realização do Nivelamento Geométrico;
- d) Determinação de um ponto/marco de referência para início do nivelamento;
- e) Mensuração com o Nível Digital;
- f) Continuação do ensaio de flexão estática;
- g) Ruptura do corpo de prova.

**2ª Fase: Análise do Dados:**

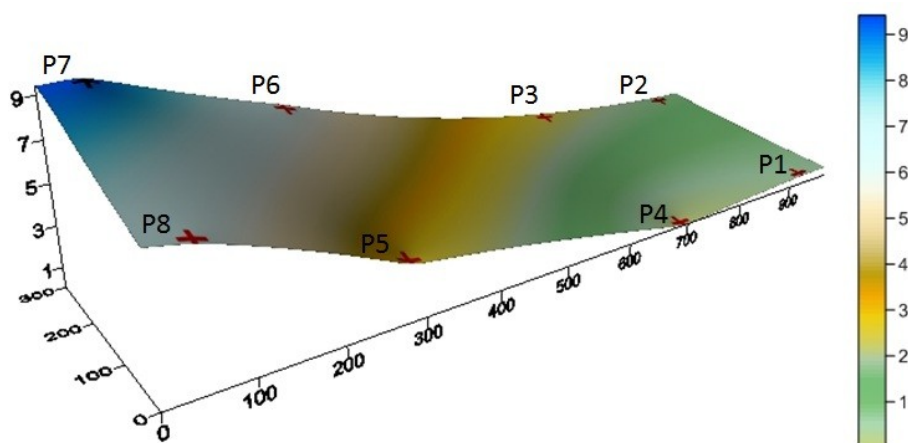
- a) Avaliação dos resultados obtidos com a máquina de ensaios;
- b) Início dos cálculos do Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura para cada corpo de prova segundo a EN 789 (CEN, 1995);
- c) Análise dos dados brutos obtidos com o nivelamento geométrico;
- d) Cálculo das cotas para cada ponto monitorado;
- e) Avaliação de curvas de nível desenvolvidas para cada corpo de prova;
- f) Avaliação do comportamento dos movimentos verticais para cada corpo de prova.

## 4 Resultados Preliminares

Realizou-se o ensaio estrutural de flexão estática para 01 (um) corpo de prova. A partir das coordenadas adotadas e as cotas medidas por nivelamento geométrico nos pontos monitorados, tornou-se possível a modelagem tridimensional e a obtenção de curvas de nível para o painel compensado, testado em 03 (três) fases do ensaio:

**1) Corpo de prova estático (antes de iniciar o ensaio estrutural):**

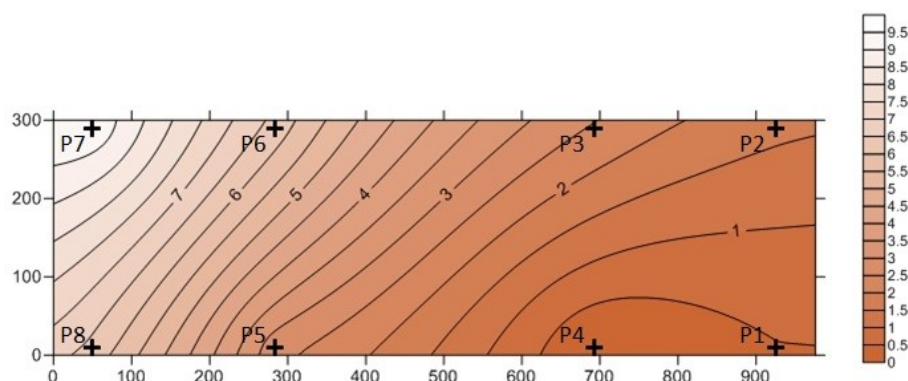
Adotou-se como ponto de referência para a realização do nivelamento geométrico o ponto P1, com cota inicial de 0,482 mm. Na Figura 05, apresenta-se a modelagem tridimensional do corpo de prova não submetido à aplicação de carga. Nota-se, no entanto, que o painel apresenta pequenos defeitos no que diz respeito a sua planura e sua colocação perfeitamente horizontal na máquina de ensaios.



**Figura 5:** Modelagem tridimensional do corpo de prova em estado estático.  
\*desníveis em milímetros.



Observa-se na Figura 06, o mesmo modelo apresentado anteriormente na forma de isocurvas de nível, onde evidenciam-se os pequenos deslocamentos superficiais do corpo de prova.

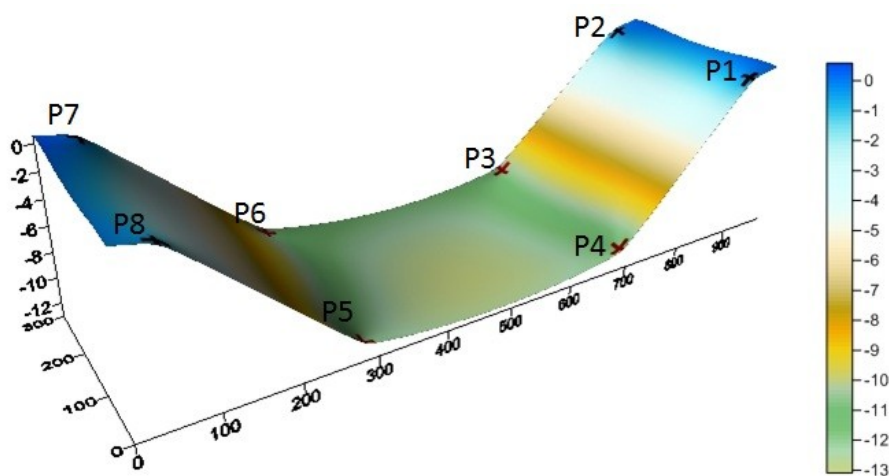


**Figura 6:** Curvas de nível do corpo de prova em estado estático.  
\*desníveis em milímetros.

As medidas efetuadas permitem mostrar que há um desnível milimétrico entre os lados simétricos do corpo de prova. Os pontos P5, P6, P7 e P8 (lado esquerdo do corpo de prova) encontram-se mais elevados do que os pontos P1, P2, P3 e P4 (lado direito do corpo de prova). O ponto 07, em relação ao seu ponto simétrico (ponto 02), apresenta um desnível de aproximadamente 7,794 mm, o maior desnível apresentado no corpo de prova no estado estático. Podem-se observar no Quadro 01 os desníveis dos demais pontos monitorados.

PONTOS MONITORADOS	DESNÍVEL
P1 – P8	5,893 mm
P2 – P7	7,794 mm
P3 – P6	3,851 mm
P4 – P5	2,702 mm

**Quadro 1:** Desnível entre os pontos simétricos monitorados.

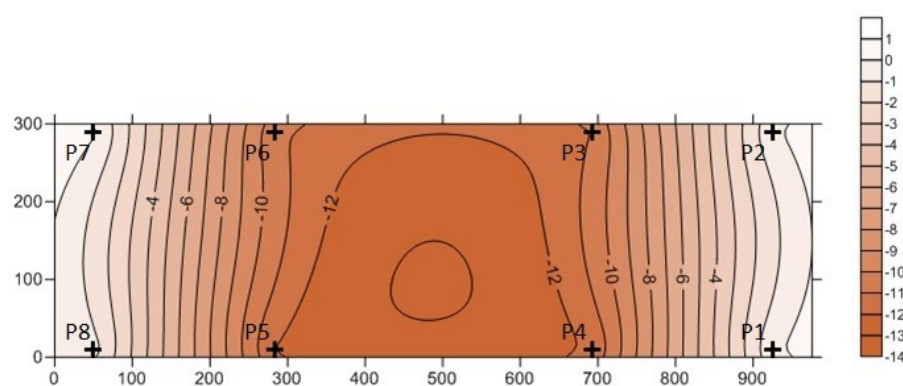


**Figura 7:** Modelagem tridimensional do corpo de prova na primeira paralisação da máquina de ensaios.  
\*deslocamentos em milímetros.

2) Segunda Fase, demonstrada pelo instante determinado para paralisação da máquina de ensaios (aproximadamente 1,5 mm de deslocamento no meio do vão central):

Os deslocamentos obtidos nesta fase podem ser observados na Figura 07, sendo que, considerou-se todo o deslocamento vertical para baixo negativo. Desta forma, observa-se que o corpo de prova apresenta deslocamentos ao longo do ensaio, sendo o maior deslocamento próximo à carga aplicada e apresentando menores deslocamentos em direção aos apoios. Já o ponto 07, nesta primeira paralisação da máquina de ensaios, teve seu deslocamento positivo, ou seja, o corpo de prova nesta extremidade elevou-se em relação à posição estática. Assim, apresentando no ponto 07 (extremidade esquerda) um empenamento do painel compensado no início do ensaio (estado estático).

A Figura 08 mostra os isodeslocamentos do painel compensado quando submetido ao primeiro carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no Quadro 02.



**Figura 8:** Curvas de nível de iguais deslocamentos do corpo de prova na primeira paralisação da máquina de ensaios. ( \*deslocamentos em milímetros )

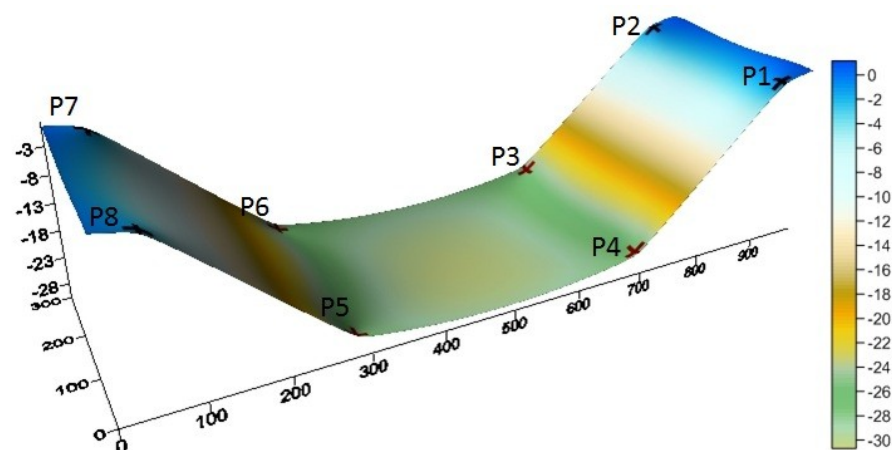
PONTOS MONITORADOS	DESLOCAMENTO (mm)
01	-0,178
02	-0,162
03	-10,952
04	-11,798
05	-12,006
06	-10,690
07	0,137
08	-0,670

**Quadro 2:** Deslocamento dos pontos monitorados na primeira paralisação da máquina de ensaios.

3) Terceira Fase, correspondente ao segundo instante determinado para paralisação da máquina de ensaios (aproximadamente 3,5 mm de deslocamento no meio do vão central):

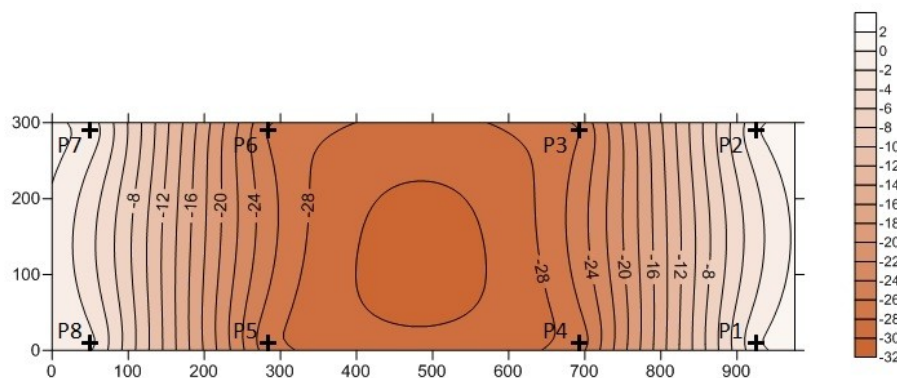
Na Figura 09, obtiveram-se os deslocamentos do corpo de prova, comparando-se os desníveis obtidos nesta fase com aqueles obtidos quando da fase sem carga. Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando ao longo do ensaio. Já os pontos situados nas extremidades do corpo, tiveram variações em ambos os lados do painel compensado. Os pontos P1 e P2 acabaram por regredir no deslocamento, enquanto os pontos P7 e P8 tiveram maior deslocamento em relação à primeira paralisação da máquina de ensaios.





**Figura 9:** Modelagem tridimensional do corpo de prova na segunda paralisação da máquina de ensaios.  
\*deslocamentos em milímetros.

Na Figura 10, torna-se possível visualizar os isodeslocamentos do painel compensado quando submetido ao segundo carregamento. Os dados utilizados nesta modelagem encontram-se no Quadro 03.



**Figura 10:** Curvas de nível do corpo de prova na segunda paralisação da máquina de ensaios.  
\*deslocamentos em milímetros.

PONTOS MONITORADOS	DESLOCAMENTO (mm)
01	-0,175
02	-0,083
03	-26,104
04	-27,212
05	-27,522
06	-26,252
07	-0,577
08	-1,323

**Quadro 3:** Deslocamento dos pontos monitorados na segunda paralisação da máquina de ensaios.

A avaliação do comportamento tridimensional, ilustradas anteriormente, evidencia a importância do monitoramento ao longo dos ensaios, visto que, mostra claramente como o corpo de prova reage durante o experimento. Apesar de esperar-se das equações da mecânica que as extremidades do painel apresentassem um comportamento linear, observa-se que, durante o ensaio o corpo de prova busca uma adaptação na distribuição das cargas. Este comportamento, até então, não mensurado nos ensaios tradicionais da área madeireira, trouxe novas possibilidades de avaliações ao corpo de prova durante o experimento.

Pretende-se, desta forma, a realização de outros ensaios, possibilitando uma avaliação comparativa do comportamento estrutural vertical entre os corpos de prova, ou seja, se as unidades do lote do experimento estão se comportando da mesma maneira.

Entretanto, com este experimento constatou-se que a proposta apresentada neste trabalho produziu resultados condizentes com o esperado, a ponto de ser mais um método de verificação para ensaios estruturais de madeira.

## 5 Referências Bibliográficas

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

**CHEN, Y. Q.:** *Analysis of deformation surveys*. A generalized method. 262 f. Thesis (Ph.D) - Department of Surveying Engineering Technical, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1983.

**EN 789:1995.:** *European Committee For Standardization: Estruturas de Madeira – Métodos de Teste – Determinação das propriedades mecânicas de painéis derivados de madeira*, Brussels, 1995.

**MORRIS, D. H. et al.:** *Mecânica dos Materiais*. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1999.

**PFEIL, W.; PFEIL, M.:** *Estruturas de Madeira*. 6. ed., rev. e ampl., [reimpr.], Rio de Janeiro: LTC, 2008.