

# MONITORAMENTO GEODÉSICO TRIDIMENSIONAL EM ENSAIOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

*Three-dimensional geodetic monitoring on structural testing of wood*

CAMILA ZONTA<sup>1</sup>  
CARLOS AURÉLIO NADAL<sup>1</sup>  
JOSÉ GUILHERME PRATA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas  
Centro Politécnico – Jardim das Américas  
CEP:81531-990 Curitiba-PR

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná  
Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal  
Centro de Ciências Florestais e da Madeira – Jardim Botânico  
80210-170 Curitiba-PR  
camilazonta@hotmail.com; cnadal@ufpr.br; 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. Optou-se em inserir métodos geodésicos, aplicáveis ao monitoramento de estruturas, em ensaios estruturais de madeira. Realizaram-se ensaios de flexão estática em painéis compensados de madeira, com uso de uma Máquina Universal de Ensaios, aplicando-se juntamente o monitoramento de deslocamentos de pontos de interesse através do método de irradiação tridimensional. Ao final do ensaio estrutural foram analisadas e comparadas as flechas de deslocamento (deformação na componente vertical) dos corpos de prova obtidas pela máquina de ensaios e pelo monitoramento geodésico. Como também, observou-se o comportamento tridimensional dos corpos de prova no decorrer dos ensaios. Desta forma, testando técnicas e método geodésico como uma nova proposta de verificação de deslocamentos em ensaios estruturais de madeira. Estatisticamente comprovou-se que os valores dos deslocamentos centrais dos painéis – flechas máximas – obtidos pelo monitoramento geodésico foram iguais

aos resultados da máquina universal de ensaios. Confirmando assim, que o método proposto e as técnicas geodésicas testadas, podem também, ser aplicadas em laboratório em ensaios estruturais de madeira.

**Palavras-chave:** Monitoramento Geodésico; Ensaio de Flexão Estática; Painel Compensado; Flecha de Deslocamento.

### ABSTRACT

The association between the Laboratory of Geodetic Instrumentation and the Laboratory of Wood Technology, both from the Federal University of Paraná, enabled the development of this project. It was decided to insert geodetic methods, applicable to monitoring structures, in testing structural timber. Static bending tests were done on plywood panels, using a Universal Testing Machine, the geodetic predefined monitoring points on the specimen were applied by the method of three-dimensional irradiation. At the end of the structural test the maximum deflection (deformation of the vertical component) of the specimen obtained by Universal Testing Machine and the geodetic monitoring was analysed and compared. Also, three-tridimensional behavior of the specimen during the tests was observed. Thus, testing technique and geodetic method as a new proposal for a verification of displacements for testing structural timber were used. Statistically it was shown that the values for the displacements central – maximum deflections –obtained for the geodetic monitoring were the same as the results of the machine. It was confirmed that, the proposed method and the geodetic techniques tested, may also, be applied in laboratory tests on structural wood.

**Keywords:** Geodetic Monitoring; Static Bending Test; Plywood Panel; Maximum Deflection.

## 1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de estruturas tem se mostrado, nas últimas décadas, como uma das etapas indispensáveis ao desenvolvimento de uma obra de engenharia. Tanto por questões de verificação e validação de parâmetros e constantes utilizadas nos cálculos de dimensionamento da obra, como em questões de segurança, de aprimoramentos, melhoras no dimensionamento e custos.

O aprimoramento da Construção Civil tem permitido uma maior liberdade na concepção de formas geométricas envolvidas, além de buscar soluções por aplicações destas estruturas e a combinação de diferentes materiais. Assim é possível a execução de estruturas adaptando-as aos espaços disponíveis, mantendo-se os parâmetros de resistência, melhorando a qualidade dos produtos e diminuindo desperdícios de materiais durante execução da obra.

Com o desenvolvimento da indústria madeireira, paralelamente ao da construção civil, tem aumentado o interesse e a importância de aplicações de técnicas e métodos geodésicos para complementar a fase investigativa e de monitoramento dos projetos de engenharia.

Utilizando-se de métodos geodésicos aplicáveis ao monitoramento de estruturas, método das irradiações tridimensionais, com utilização de Estações Totais desenvolveu-se este trabalho. Optou-se por realizar ensaios de flexão estática em painéis compensados de madeira, no sentido paralelo às fibras de lâmina de capa dos painéis, com uso de uma Máquina Universal de Ensaios, juntamente com monitoramento de deslocamentos de pontos de interesse utilizando o método geodésico de irradiações tridimensionais.

Compararam-se em cada ensaio os resultados apresentados pela Máquina Universal de Ensaios com os deslocamentos obtidos através do monitoramento geodésico. Evidenciou-se que o método proposto pode ser utilizado como método de verificação para ensaios estruturais de madeira. Além disso, o método geodésico aplicado trouxe como subproduto a análise do comportamento tridimensional de partes dos corpos de prova, que não eram analisadas durante os ensaios convencionais na área madeireira.

## **2. MONITORAMENTO GEODÉSICO DE ESTRUTURAS**

No monitoramento geodésico, tanto para o acompanhamento de estruturas de engenharia, movimentos do solo, dentre outros, duas redes são distinguidas, para Chrzanowski, apud Chen (1983, p. 07), são elas:

- Rede absoluta, em que alguns pontos são, ou foram assumidos, fora do objeto deformável, servindo como pontos de referência para a determinação de deslocamentos absolutos dos pontos do objeto;
- Rede relativa, em que todos os pontos levantados são assumidos que estão localizados no objeto deformável.

O princípio básico de um trabalho de monitoramento geodésico é detectar variações de coordenadas (bidimensionais e/ou tridimensionais) de pontos pré-definidos em um período de tempo determinado. No caso da avaliação em laboratório, há necessidade de aplicar cargas na estrutura monitorada e determinar os intervalos para a obtenção de coordenadas de pontos previamente escolhidos. Tanto em laboratório quanto em situações reais, os resultados obtidos pelos métodos geodésicos indicarão se os pontos tiveram suas coordenadas alteradas, ou seja, se ocorreram deslocamentos.

Escolheu-se o método de irradiação tridimensional para aplicação neste trabalho por ser de execução rápida, e principalmente, pelas condições de laboratório. Sendo que, o espaço livre para execução do ensaio era exíguo, permitindo a instalação de um único equipamento (estação total) em local definido.

## **3. ENSAIOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA**

Normalmente, os ensaios estruturais para determinações de propriedades físicas e mecânicas da madeira são realizados conforme as normas específicas para o destino (país) do produto final. Em se tratando de painéis compensados multilaminados, o Brasil apresenta maior exportação do que o consumo interno. Grande parte da produção é enviada para o mercado europeu, sendo atestada sua

qualidade baseado em critérios estabelecidos pela norma europeia CEN (*European Committee For Standardization*).

Os painéis de madeira podem ser definidos produtos de elementos de madeira obtidos a partir da redução da madeira sólida e reconstituídos através de ligação adesiva (IWAKIRI, 2005). Tanto as propriedades físicas, quanto as propriedades mecânicas da madeira são influenciadas por diversos fatores, cujo conhecimento se faz necessário para a utilização deste material na construção civil. Entre as características físicas da madeira podem-se destacar a anisotropia, o teor de umidade, a retração, dilatação linear e a deterioração da madeira (PFEIL W.; PFEIL M., 2008, p.27). Entretanto, fatores que influem nas características mecânicas da madeira como, o tempo de duração da carga e a ocorrência de defeitos, também são significativos.

Dentre os ensaios mais utilizados para avaliar a resistência dos corpos de prova encontram-se os de tração e compressão. Estes corpos de prova do material são preparados com forma e tamanho padronizados. Utilizando-se uma Máquina Universal de Ensaio, para a aplicação de uma carga axial ao corpo de prova e pela medição simultânea de carga aplicada e deformação medida a cada instante, é possível a análise estrutural deste corpo de prova por meio de diagramas tensão-deformação.

Para a caracterização mecânica tradicional, ao final dos ensaios de flexão estática estrutural, tem-se a deformação da linha elástica no meio do vão de medição da deformação, ou seja, a flecha máxima do corpo de prova. No caso de uma viga, a linha elástica corresponde à curvatura (inicialmente retilínea) do eixo longitudinal que passa pelo centroide de cada área da seção transversal da viga. Segundo Assan (2010, p. 361) a deflexão, também chamada de flecha, remete a deformação na componente vertical; as normas técnicas especificam os valores máximos que podem alcançar, em função das formas geométricas dos diversos elementos estruturais.

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Através de uma parceria interna na UFPR - Universidade Federal do Paraná entre o Laboratório de Instrumentação Geodésica – LAIG, localizado no Centro Politécnico, com o Laboratório de Tecnologia da Madeira - LTM, localizado no Centro de Ciências Florestais e da Madeira, desenvolveu-se uma metodologia para inserir o monitoramento geodésico, através do método de irradiação tridimensional em ensaios de flexão estática em painéis multilaminados.

Optou-se em realizar ensaios destrutivos e não destrutivos de painéis multilaminados com uso da Máquina Universal de Ensaio, incorporando juntamente um monitoramento do deslocamento dos mesmos com auxílio das irradiações tridimensionais.

As escolhas do ensaio estrutural e do corpo de prova seguiram critérios de normas técnicas utilizadas no LTM, já a escolha do método geodésico foi efetivada

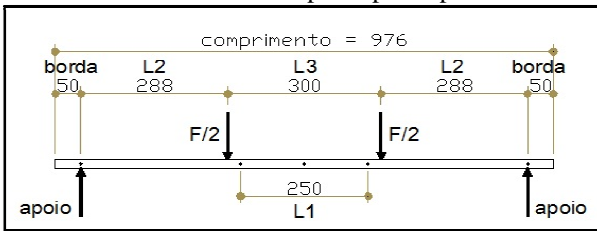
de forma que a realização das irradiações tridimensionais fosse executada em um intervalo de tempo que não comprometesse o ensaio estrutural.

Na metodologia e nos resultados apresentados a seguir, atribui-se o termo “deformação” às mensurações efetuadas pelo extensômetro, considerando as distorções apresentadas pelo corpo de prova devido à aplicação de carga, e “deslocamento”, para as mensurações efetuadas pela estação total.

#### 4.1 Ensaio de Flexão Estática

Realizou-se o ensaio estrutural de flexão estática seguindo a norma europeia EN 789 (CEN, 2004) em painéis compensados do gênero *Pinus spp.*, de 18 mm de espessura nominal, compostos de 5 camadas coladas com adesivo fenólico (fenol formaldeído) indicado para uso externo. Os corpos de prova foram produzidos com dimensões de 300 mm de largura e 976 mm de comprimento, testados segundo a norma supracitada. O posicionamento de cada corpo de prova na máquina de ensaios segue os padrões ilustrados na Figura (1).

Figura 1 - Dimensionamento do corpo de prova para o ensaio estrutural.



\*Dimensionamento em milímetros.

Onde:

- $L1$ : Vão de medição da deformação e/ou deslocamento (mm);
- $L2$ : Distância entre os apoios e a aplicação de carga (mm);
- $L3$ : Distância entre os pontos de aplicações de carga (mm), e
- $F$ : Força/carga aplicada (N).

Utilizou-se de uma Máquina Universal de Ensaios marca EMIC, com capacidade de 30.000 kgf (300 kN), o qual fornece informações de carga aplicada e suas respectivas deformações a uma velocidade constante. Efetuou-se o registro da carga através de uma célula de carga e, para o registro da deformação do corpo de prova, utilizou-se um extensômetro (precisão de  $\pm 0,001$  mm) fixado no corpo de prova com auxílio de um *yoke* de 250 mm ( $L1$ ). Sendo que, este consiste numa haste metálica horizontal apoiada nas extremidades, onde fixa-se o extensômetro para aquisição de dados onde são registradas as leituras de deformações verticais.



Os pontos P1, P5, P6, P8 (localizados sob os apoios da máquina de ensaios) e P7 do corpo de prova foram monitorados para avaliar o comportamento tridimensional dos painéis a cada ensaio. Os pontos P2, P3 e P4, localizados no vão central de medição da deformação e/ou deslocamento ( $L_1$ ) foram determinados para a verificação da flecha, possibilitando a comparação com os resultados obtidos através da máquina de ensaios. Assim, todos os pontos pré-determinados foram monitorados durante o ensaio para analisar o comportamento dos corpos de prova, entretanto, somente os pontos centrais (P2, P3 e P4) foram utilizados para comparação entre os métodos.

Realizaram-se as irradiações dos oito pontos monitorados em três Fases:

- Primeira Fase: corpo de prova sem carga (estático);
- Segunda Fase: corpo de prova na primeira paralisação da máquina de ensaios (deformação registrada pela máquina de ensaios de aproximadamente 1,5 mm); e
- Terceira Fase: corpo de prova na segunda paralisação da máquina de ensaios (deformação registrada pela máquina de ensaios de aproximadamente 3,5 mm).

Com os dados mensurados com a estação total, pôde-se efetuar o cálculo tridimensional para as coordenadas dos pontos monitorados. A partir destas coordenadas, para cada ponto monitorado, transportou-se o sistema de referência para o próprio corpo de prova, realizando-se este procedimento em todos os ensaios. Isto porque, no monitoramento de estruturas, o sistema de coordenadas utilizado para observar os deslocamentos não deve estar no instrumento, e sim, na própria estrutura (NADAL, 2000, p. 19).

Após a obtenção das coordenadas de cada ponto para cada corpo de prova em todas as fases, efetuou-se o cálculo da distância espacial entre os pontos em cada fase, relacionando a Primeira Fase (corpo de prova estático) com a Segunda Fase (primeira paralisação da máquina de ensaios) e a Primeira Fase (corpo de prova estático) com a Terceira Fase (segunda paralisação da máquina de ensaios). Assim, pôde-se avaliar através do método de irradiação o deslocamento em cada fase para cada corpo de prova testado.

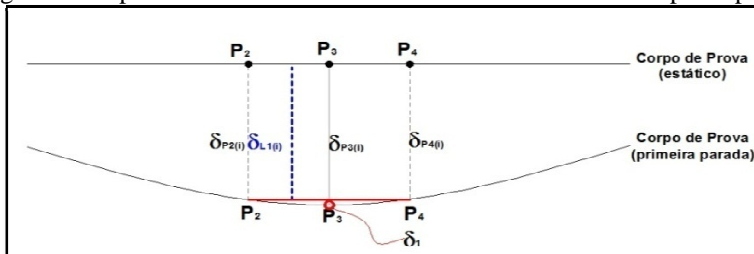
### 4.3 Comparação dos Métodos

Ao final do ensaio estrutural a máquina de ensaios fornece a deformação da linha elástica no meio do vão central (ponto P3), ou seja, a flecha máxima do corpo de prova. No método de irradiação, não ocorre desta forma, a flecha máxima não é obtida de modo direto. O método monitora os pontos situados no vão central, no caso, os pontos P2, P3 e P4, fornecendo suas coordenadas tridimensionais. Com os deslocamentos destes três pontos (diferença das coordenadas obtidas na segunda e terceira fase em relação à primeira fase) após análises preliminares, obtém-se a flecha máxima com o método de irradiação, para posteriormente, comparar com o

outro método. Executou-se o seguinte procedimento com os deslocamentos mensurados com a estação total:

1º) Cálculo do deslocamento do corpo de prova no vão central ( $L1$ ) na primeira parada da máquina de ensaios (Segunda Fase) (Figura 4):

Figura 4 - Aspecto do deslocamento inicial no vão central do corpo de prova.



$$\delta_{L1(i)} = \frac{\delta_{P2(i)} + \delta_{P4(i)}}{2} \quad (1)$$

Onde:

$\delta_{L1(i)}$ : Deslocamento inicial (primeira parada) no vão central;

$\delta_{P2(i)}$ : Deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P2, e

$\delta_{P4(i)}$ : Deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P4.

2º) Cálculo do deslocamento da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios (Figura 4):

$$\delta_1 = \delta_{P3(i)} - \delta_{L1(i)} \quad (2)$$

Onde:

$\delta_1$ : Deslocamento da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios;

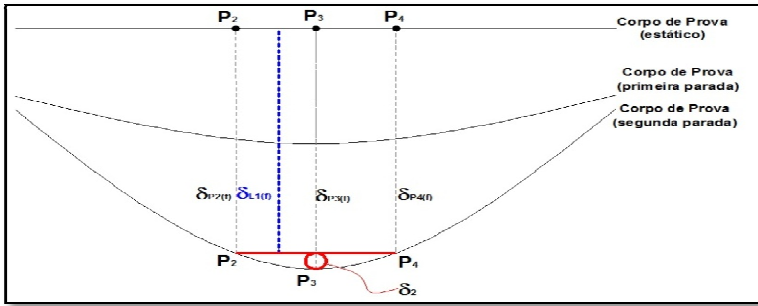
$\delta_{P3(i)}$ : Deslocamento inicial (primeira parada) no ponto P3;

$\delta_{L1(i)}$ : Deslocamento inicial (primeira parada) no vão central.

Para a segunda paralisação da máquina de ensaios (Terceira Fase) efetuaram-se os mesmos cálculos, utilizando-se as Equações (1) e (2). Desta forma, obtendo-se o deslocamento do corpo de prova no vão central ( $\delta_{L1(f)}$ ), como também, o deslocamento da linha elástica para a segunda paralisação da máquina de ensaios ( $\delta_2$ ) (Figura 5).



Figura 5 - Aspecto do deslocamento da linha elástica na segunda parada da máquina de ensaios.



3º) Obtenção da Flecha Máxima (deslocamento total da linha elástica no ponto P3):

$$f_1 = \delta_2 - \delta_1 \quad (3)$$

Onde:

$f_1$ : Flecha Máxima ou deslocamento no ponto P3, mensurado com a estação total (método de irradiação);

$\delta_1$ : Deslocamento da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios,

$\delta_2$ : Deslocamento da linha elástica na segunda parada da máquina de ensaios.

Para obtenção da flecha obtida com as mensurações através do extensômetro, procedeu-se da seguinte maneira:

$$f_E = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad (4)$$

Onde:

$f_E$ : Flecha Máxima ou deformação no vão central mensurado com o extensômetro;

$\varepsilon_1$ : Deformação da linha elástica na primeira parada da máquina de ensaios, e

$\varepsilon_2$ : Deformação da linha elástica na segunda parada da máquina de ensaios.

Com os resultados das flechas, calculados para os corpos de prova, em ambos os métodos, pôde-se então, compará-los e, desta forma, avaliar o método de irradiação como uma nova proposta para verificação de ensaios estruturais de madeira.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo as características técnicas da máquina de ensaios utilizada, para a medição da força através de células de carga intercambiáveis, tem-se a Classe 1,

segundo a Norma NM ISO7500-1, fornecida com Certificado de Calibração da Rede Brasileira de Calibração. Desta forma, a precisão de medição da força é superior a 1% do valor lido, e a resolução do sensor óptico da medição de deformação de aproximadamente  $\pm 0,01$  mm.

Dentre os sete corpos de prova testados, os quais os resultados detalhados podem ser analisados em ZONTA (2012), a seguir, nos quadros 1 e 2, são apresentados os resultados gerais para todos os corpos de prova e um corpo de prova, escolhido aleatoriamente, para análise completa e ilustração tridimensional dos resultados.

Quadro 1 - Resultados do ensaio estrutural de acordo com a máquina de ensaios para um corpo de prova.

| Fases     | Força (N) | Força <sub>máx</sub> (N) | Deformação (mm) | Flecha (mm) |
|-----------|-----------|--------------------------|-----------------|-------------|
| 1ª Parada | 1274      | 4421                     | 1,51            | 1,99        |
| 2ª Parada | 3012      |                          | 3,50            |             |

Como se pode observar, no Quadro (1) encontram-se os resultados da força para cada fase de paralisação da máquina de ensaios e a força máxima aplicada ao corpo de prova, conforme dados fornecidos pela máquina de ensaios. Encontram-se ainda as deformações fornecidas pelo extensômetro em ambas as fases e o resultado da flecha máxima obtida.

Quadro 2 - Resultados do ensaio estrutural de acordo com o método de irradiação para um corpo de prova.

| Pontos | $\delta$<br>(1ª Parada) | $\delta$<br>(2ª Parada) | $\delta_{LI(i)}$ | $\delta_{LI(f)}$ | $\delta_1$ | $\delta_2$ | $f$  |
|--------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------|------------|------|
| P2     | 17,93                   | 41,46                   | 17,83            | 40,85            | 1,55       | 3,52       | 1,97 |
| P3     | 19,38                   | 44,37                   |                  |                  |            |            |      |
| P4     | 17,73                   | 40,25                   |                  |                  |            |            |      |

\*Resultados em milímetros.

No Quadro (2), constam os deslocamentos obtidos com o monitoramento geodésico: deslocamento ( $\delta$ ) dos três pontos localizados no vão central (P2, P3 e P4) do corpo de prova para cada fase, o deslocamento no vão na primeira parada ( $\delta_{LI(i)}$ ) e na segunda parada ( $\delta_{LI(f)}$ ), o deslocamento da linha elástica para cada fase ( $\delta_1, \delta_2$ ) e a flecha máxima ( $f$ ).

A partir dos resultados fornecidos pela máquina de ensaios (Quadro 1) e os calculados (Quadro 2), através das mensurações geodésicas, pode-se então, comparar os métodos através da flecha máxima.

### 5.1 Comparação dos Resultados

Segundo a nota técnica PRP-108 (APA, 2001) (*The Engineered Wood Association*), a flecha máxima admissível para o painel compensado em uso, sujeito aos esforços de flexão estática, deve apresentar resultado menor ou igual à seguinte relação:

$$f_{adm} \leq \frac{L}{360} \quad (5)$$

Onde:

$f_{adm}$ : Flecha máxima admissível, e

$L$ : Comprimento do vão do corpo de prova testado.

Como todos os corpos de prova testados possuem dimensões iguais, o vão considerado para a realização do cálculo da Equação (5) foi de 876 mm. Desta forma, a flecha máxima admissível para os corpos de prova testados podem atingir um valor máximo de 2,43 mm.

No Quadro (3) observa-se a comparação entre os resultados das flechas, suas respectivas diferenças e a relação (porcentagem) com a flecha admissível calculada para todos os corpos de prova testados.

Quadro 3 - Resultados do ensaio estrutural de acordo com o método de irradiação.

| Corpo de prova | Flecha ( $f$ ) (mm) |                      |           |                       |
|----------------|---------------------|----------------------|-----------|-----------------------|
|                | Ensaio de flexão    | Método de irradiação | Diferença | Flecha admissível (%) |
| 1              | 2,00                | 1,97                 | 0,03      | 1,18                  |
| 2              | 2,00                | 1,97                 | 0,03      | 1,10                  |
| 3              | 1,99                | 1,94                 | 0,05      | 1,99                  |
| 4              | 1,99                | 1,94                 | 0,05      | 1,88                  |
| 5              | 1,99                | 2,00                 | 0,01      | 0,33                  |
| 6              | 1,97                | 2,04                 | 0,08      | 3,10                  |
| 7              | 1,98                | 2,01                 | 0,03      | 1,37                  |
| $\bar{x}$      | 1,99                | 1,98                 | 0,04      | 1,56                  |
| $\sigma$       | 0,01                | 0,04                 | 0,02      | 0,87                  |

Avaliando-se os resultados apresentados no Quadro (3), nota-se que, as diferenças entre as flechas apresentaram uma média de 0,04 mm. Ou seja, esse valor médio pode diferir numa média de 1,56% no resultado da flecha admissível para o tipo de corpo de prova testado.

Desta forma, aplicou-se o teste estatístico  $t$  de *Student* para verificar se os valores das flechas obtidas com o método de irradiação são coerentes com as obtidas com o ensaio de flexão estática, a partir das seguintes relações:

Se  $-\frac{t_{\alpha}}{2} \leq t_{CAL} \leq \frac{t_{\alpha}}{2}$ , não se rejeita a hipótese  $H_0$ .

Se  $t_{CAL} > \frac{t_{\alpha}}{2}$  ou  $t_{CAL} < -\frac{t_{\alpha}}{2}$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$ .

Sendo assim, para um nível de significância 0,01 para 12 graus de liberdade, tem-se o valor tabelado de 3,0545. Desta forma, para a situação analisada, tem-se um valor calculado de  $t$  de 0,0891. Comparando-se o valor de  $t$  obtido com o valor tabelado, observa-se que o valor calculado está dentro do intervalo esperado, ou seja, a hipótese  $H_0$  deve ser aceita. Assim, o método de irradiação apresenta uma metodologia que pode ser desenvolvida para obter a flecha de deslocamento para o tipo de produto em uso, visto que, os resultados são condizentes com o método de flexão estática.

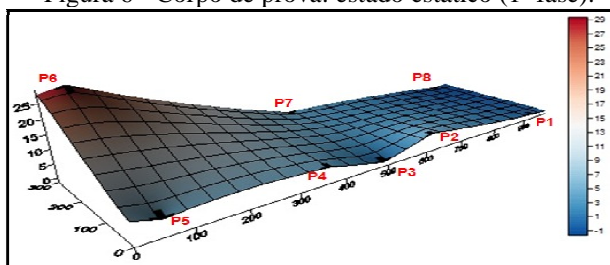
## 5.2 Comportamento Tridimensional do Corpo de Prova

Para analisar o comportamento tridimensional de um corpo de prova utilizou-se o método de krigagem através do *software Surfer 9*, inserindo os deslocamentos de cada ponto monitorado pelo método de irradiação em cada fase.

Consideraram-se todos os deslocamentos verticais negativos, para melhor visualização e interpretação dos resultados do comportamento do corpo de prova nas Figuras apresentadas a seguir.

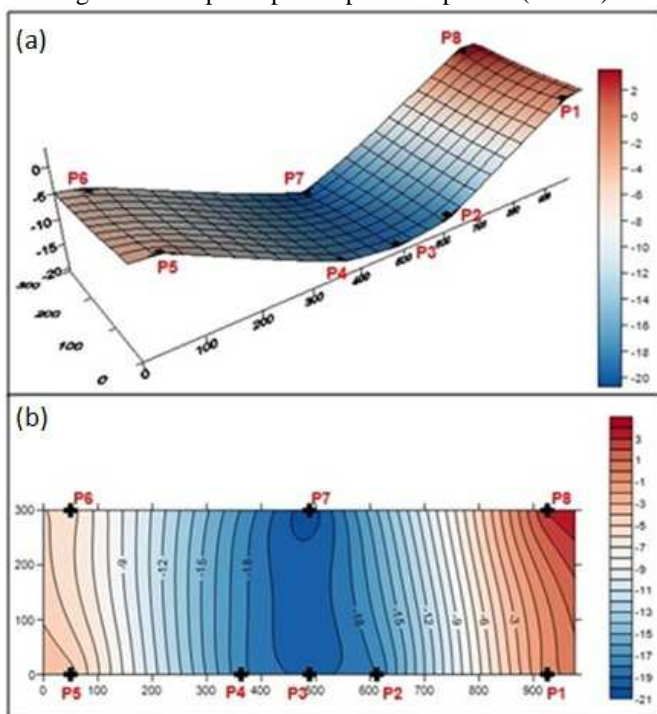
A Figura (6) apresenta a modelagem tridimensional do corpo de prova não submetido à aplicação de carga (primeira fase). Nota-se que o painel não se apresentou perfeitamente horizontal no início do ensaio. Observa-se que os pontos P5 e P6 (lado esquerdo do painel) possuem uma diferença de aproximadamente 25,39 mm. Já os pontos simétricos, pontos P1 e P8 (lado direito do painel), apresentam uma diferença de apenas 1,64 mm. Importante salientar que o vão central do corpo de prova: pontos P2, P3 e P4 (pontos utilizados para o cálculo de deslocamento), encontram-se desnivelados. Do ponto P2 para o P3 tem-se um desnível de aproximadamente de 5,27 mm, e do ponto P3 para o P4, aproximadamente 4,39 mm.

Figura 6 - Corpo de prova: estado estático (1ª fase).



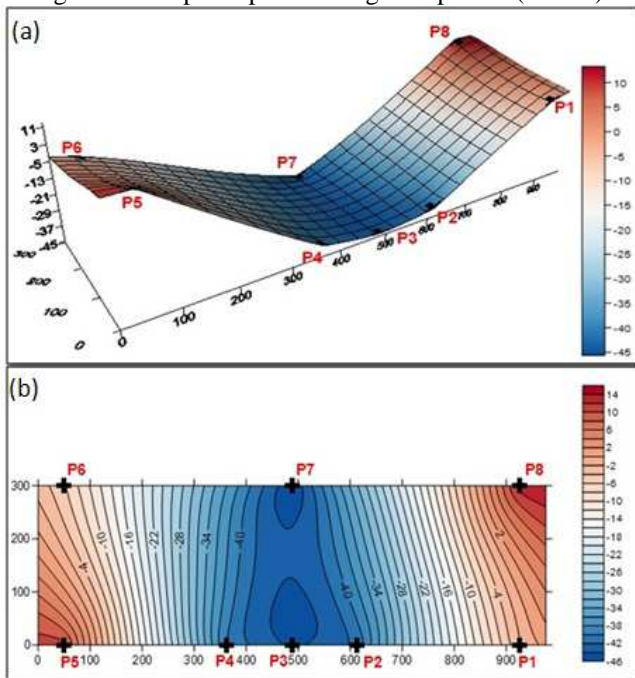
Observa-se na segunda fase (Figura 7), que o corpo de prova apresentou maior deslocamento próximo à carga aplicada (pontos P2, P3, P4 e P7) e menores deslocamentos em direção aos apoios (pontos P1, P5, P6 e P8). Além disso, o ponto P8 teve deslocamento vertical para cima de aproximadamente 3,19 mm. Os maiores deslocamentos observados foram de -20,71 mm para o ponto P7 e -19,38 mm para o ponto P3 (pontos simétricos no painel). A Figura (7b) mostra os isodeslocamentos do painel multilaminado quando submetido ao primeiro carregamento.

Figura 7 - Corpo de prova: primeira parada (2<sup>o</sup> fase).



Os deslocamentos observados na terceira fase (Figura 8) foram obtidos comparando-se com o corpo de prova na primeira fase (estático). Os pontos situados mais ao centro do corpo de prova continuaram deslocando em maior proporção do que os pontos situados nas extremidades do painel. O ponto P5 e o ponto P8 continuaram tendo deslocamentos verticais para cima, neste caso, de aproximadamente 10,53 mm e 13,02 mm, respectivamente. O ponto P1 apresentou menor deslocamento, aproximadamente -2,06 mm. Observa-se na Figura (8b), o mesmo modelo apresentado na forma de isodeslocamentos, onde evidenciam-se os deslocamentos superficiais do corpo de prova.

Figura 8 - Corpo de prova 1: segunda parada (3º fase).



No Quadro (4) são apresentados os dados utilizados na modelagem tridimensional do corpo de prova.

Quadro 4 - Deslocamento dos pontos monitorados na segunda e na terceira fase.

| Pontos | Deslocamento (mm) |               |
|--------|-------------------|---------------|
|        | Segunda Fase      | Terceira Fase |
| P1     | -0,47             | -2,06         |
| P2     | -17,93            | -41,46        |
| P3     | -19,38            | -44,38        |
| P4     | -17,73            | -40,26        |
| P5     | -3,58             | 10,53         |
| P6     | -5,58             | -5,76         |
| P7     | -20,71            | -45,69        |
| P8     | 3,19              | 13,02         |

Nota-se que os pontos simétricos, como por exemplo, os pontos P5 e P6, não apresentaram o mesmo comportamento ao longo do ensaio. Já os pontos situados no

vão de medição, mesmo sendo simétricos, seguem a deformação semelhante até a ruptura pela aplicação de carga constante.

## 6. CONCLUSÕES

A análise entre os resultados do método de irradiação e do ensaio de flexão estática pôde ser realizada comparando-se as flechas obtidas em ambos os métodos. Assim, notou-se que, as diferenças entre as flechas para os métodos não foram significativas, a ponto de interferir numa média de 1,56% no resultado da flecha admissível para o tipo de corpo de prova testado.

Na avaliação estatística realizada, comprovou-se que as flechas obtidas em ambos os métodos não diferem. Desta forma, não interferindo nos resultados de resistência dos corpos de prova, mostrando-se assim, viável o método de irradiação para aplicação no monitoramento de estruturas com uso do material estudado.

A avaliação do comportamento tridimensional evidenciou a importância do monitoramento ao longo dos ensaios, visto que, mostra claramente como o corpo de prova reage durante o ensaio. Notou-se que os corpos de provas testados apresentaram, na primeira fase (estático), defeitos no que diz respeito a sua planura e sua colocação, perfeitamente horizontal, na máquina de ensaios. Porém, observou-se que, durante as fases seguintes (primeira e segunda paralisação da máquina de ensaios) os corpos de prova buscam 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 os ensaios.

Do ponto de vista econômico é factível a utilização da estação total, tendo em vista seu baixo custo em relação aos custos dos outros equipamentos utilizados no laboratório. Porém, com advento dos instrumentos robotizados, esta metodologia proposta será implementada pela rapidez das medições e melhora das precisões obtidas.

Desta forma, pôde-se confirmar que o método de irradiação tridimensional apresenta-se como uma nova proposta de verificação de deslocamentos para ensaios estruturais de madeira, incorporando ainda uma análise tridimensional do comportamento de cada corpo de prova durante o ensaio estrutural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSAN, A. E. *Resistência dos materiais*. Campinas, São Paulo: Editora Unicamp, 2010. v. 1.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM ISO 7500-1: materiais metálicos – calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial*. Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão – calibração do sistema de medição de força. Rio de Janeiro, 2004.
- 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.

- CHEN, Y. Q.; CHRZANOWSKI, A. An overview of the physical interpretation of deformation measurements. In: Deformation Measurements Workshop. MIT, Cambridge, 1986.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. *EN 789: estruturas de madeira – métodos de teste – determinação das propriedades mecânicas de painéis derivados de madeira*. Brussels, 2004.
- IWAKIRI, S. *Painéis de madeira reconstituída*. FUPEF, Curitiba, 2005. 247 p.
- NADAL, C. A. *Método da interseção óptica tridimensional aplicado à engenharia de precisão*. 116f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- NEVES, R. V. *Processamento e análise de levantamentos geodésicos aplicado ao monitoramento de estruturas civis*. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de madeira*. 6. ed., rev. e ampl., [reimpr.], Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- SECORD, J. M. *Development of the automatic data management and the analysis of integrated deformation measurements*. 237 f. Ph.D. dissertation - Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1995.
- THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION - APA. *Technical note: load span tables for APA structural use panels*. 2001.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Structural deformation surveying*. Department of the Army, Washington, DC, 2002
- ZONTA, Camila. *Monitoramento geodésico tridimensional aplicado em ensaios estruturais de painéis compensados de madeira*. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

(Recebido em maio de 2013. Aceito em outubro de 2013).