



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Campus Experimental de Itapeva

**MURILO NEGRELI**

**AVALIAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO  
DE ELEMENTOS DE MLC NA FLEXÃO**

Itapeva - SP  
2016

**MURILO NEGRELI**

**AVALIAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO  
DE ELEMENTOS DE MLC NA FLEXÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Experimental de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Itapeva - SP  
2016

Negreli, Murilo.  
N385a Avaliação numérico-experimental do comportamento de elementos de MCL na flexão / Murilo Negreli. -- Itapeva, SP, 2016. 63 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, 2016  
Orientador: Júlio César Molina  
Banca examinadora: Alexandre Jorge Duarte de Souza, Daniel Villas Bôas  
Bibliografia

1. Madeira laminada – Testes. 2. Modelagem matemática. 3. Flexão (Engenharia civil). I. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva. II. Título.

CDD 624.184

Dedico este trabalho a minha prima Giseli Aparecida Braz de Lima por ser meu maior exemplo na vida acadêmica e a maior incentivadora de minha graduação. Foi minha minha inspiração, professora, parceira e irmã. Me cobrou quando necessário e ajudou quando precisei, todos os momentos bons e ruins em minha faculdade, eu pensei em você. Hoje se estivesse entre nós, você leria e participaria deste trabalho, por isso dedico este como forma de agradecimento e de toda saudade que sinto de você.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por tudo. Aos meus familiares que forneceram suporte emocional e financeiro, em especial ao meu pai Laércio Negreli, minha mãe Maria Luiza de Lima Negreli e irmão Laércio Negreli Junior. Agradeço também a minha namorada Larissa Fernanda Piovam que me ajudou ao longo de minha graduação em tudo que podia, com paciência e dedicação. Aos meus amigos, que são os melhores, a todos os colegas da 10ª turma, a todos os parceiros das repúblicas Kebra Kabaça e Moto Serra. Aos membros do Centro Acadêmico CAENGIM, Empresa Júnior PROMAD e Cursinho CUCA FRESCA dos anos de 2013 e 2014. A todos os funcionários, principalmente os que trabalham nos laboratórios e me auxiliaram neste trabalho. Meus agradecimentos aos professores, que tanto foram importantes para meu aprendizado e formação, em especial aos meus orientadores ao longo de minha graduação Ricardo Marques Barreiros, Carlos Alberto Oliveira de Matos e Julio Cesar Molina. Finalizo com meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma me ajudaram. Obrigado!

“But it ain't about how hard you hit. It's about how hard you can get hit and keep moving forward.”

(Rocky Balboa)

## RESUMO

A Madeira Laminada Colada (MLC) é um derivado estrutural da madeira muito amplo que pode ser destinado para muitos usos, como por exemplo: vigas, pilares, cruzetas, revestimentos, dormentes, decks, entre outras utilizações. Apesar de ser uma técnica antiga a Madeira Laminada Colada é uma técnica renovável e que polui muito pouco em comparação com concreto e metais, ainda tem a grande vantagem de armazenar CO<sub>2</sub> com florestas plantadas. A norma ABNT NBR 7190 / 2013 (em fase de aprovação) possui requisitos e teste para a MLC, no entanto não possui o teste na flexão, a simulação numérica é um dos métodos que podem ser testados para identificar a capacidade dos materiais. Elaborou-se corpos de prova de Madeira Laminada Colada para análise experimental com *Pinus sp* de densidade entre 0,40 – 0,75g/cm<sup>3</sup> e teor umidade (T.U.) inferior a 18%, o adesivo utilizado foi o Poliuretano bicomponente (Imperveg – Poliuretano vegetal), para o processo de prensagem usou-se de grampos, apertados com torquímetro para a obtenção da pressão de 1,2MPa descritos em norma que permaneceu por 24h, de acordo com prescrição do fabricante do adesivo. O processo de caracterização foi feito em uma máquina de ensaios mecânicos EMIC DL30000N, com capacidade de 3000 kgf. Na modelagem numérica computacional utilizou-se do software ANSYS, versão 11.0, que agrega o Método dos Elementos Finitos (MEF), para a discretização das peças de madeira utilizou-se do elemento *solid45*. O modelo numérico computacional proposto seguiu um modelo ortotrópico de acordo com os critérios de Hill (1950), as propriedades de cada lâmina foram baseadas no ensaio não destrutivo feito no Sonelastic (ensaio não destrutivo). A simulação numérica foi capaz de representar o comportamento da viga, os resultados foram comprovados por meio de uma análise estatística. Também foi expresso as tensões internas na viga, apresentando as lâminas mais solicitadas e o comportamento das ações ao longo dos eixos X, Y e Z.

**Palavras-chave:** Madeira Laminada Colada. Modelagem matemática. Flexão.

## ABSTRACT

Glued Laminated Timber is a structural very broad wood derivative can be designed for many uses, such as: beams, pillars, cross arms, coats, ties, decks, among other uses. Despite being an old technique to Glued laminated timber is a renewable technique and very little pollution compared to concrete and metal still has the great advantage of consuming CO<sub>2</sub> planted forests. The ABNT NBR 7190/2013 standard has requirements and test for MLC, however lacks the bending test, the simulation is one of methods that can be tested for the ability to identify the material. We developed specimens of Glued laminated timber for experimental analysis with *Pinus sp* density between 0.40 - 0.75 g / cm<sup>3</sup> and moisture content (TU) less than 18%, the adhesive used was the two-component polyurethane (Imperveg - Polyurethane vegetable) for the pressing process used to clamps, tightened with a torque wrench to obtain the pressure 1,2MPa described in standard which remained for 24 hours according to the prescription adhesive manufacturer. The characterization process was done in a mechanical testing machine EMIC DL30000N, with capacity of 3000 kgf. Computational numerical modeling was used ANSYS software, version 11.0, which aggregates the Finite Element Method (FEM) for the discretization of the wood we used the element solid45. The proposed computational numerical model followed an orthotropic model according to the criteria of Hill (1950), the properties of each slide were based on non-destructive testing done in Sonelastic (nondestructive testing). The numerical simulation was able to represent the behavior of the beam, the results were confirmed by a statistical analysis. It was also expressed the internal stresses in the beam, with the most requested blades and the behavior of action along the axes X, Y and Z.

**Keywords:** Glued Laminated Timber. Mathematical modeling. Flexion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura em MLC do Shopping Iguatemi - Fortaleza.....	17
Figura 2 - Croqui de uma peça de MLC .....	18
Figura 3 - Esquema de criação de um modelo numérico com o MEF .....	22
Figura 4 - Área de florestas plantadas (em milhões de hectares) e localização das florestas no Brasil, respectivamente .....	25
Figura 5 - Classificação visual e mecânica das lâminas, respectivamente.....	29
Figura 6 - Processo de prensagem das lamelas com adesivo.....	30
Figura 7 - Corpo de prova rompido em ensaio mecânico na EMIC DL30000N .....	30
Figura 8 - Saídas das tensões de elemento finito solid45.....	31
Figura 9 - Modelo do corpo de prova de MLC.....	32
Figura 10 - Modelo do corpo de prova com vinculações e local de carga aplicada...	32
Figura 11 – Gráfico comparativo modelo Experimental x Numérico do corpo de prova (CPO).....	40
Figura 12 – Gráfico comparativo modelo Experimental x Numérico do corpo de prova (CP1) .....	40
Figura 13 – Gráfico comparativo modelo Experimental x Numérico do corpo de prova (CP2) .....	41
Figura 14 – Gráfico comparativo modelo Experimental x Numérico do corpo de prova (CP3) .....	41
Figura 15 – Comparação das flechas obtidas no experimental e numérico.....	42
Figura 16 – Tensões internas ao longo do eixo Z (em kN/cm <sup>2</sup> ).....	43
Figura 17 – Tensões internas ao longo do eixo X (em kN/cm <sup>2</sup> ).....	44
Figura 18 – Tensões internas ao longo do eixo Y (em kN/cm <sup>2</sup> ).....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros adotados para as propriedades plásticas e elásticas do corpo de prova (CP0) .....	36
Tabela 2 - Parâmetros adotados para as propriedades plásticas e elásticas do corpo de prova (CP1) .....	37
Tabela 3 - Parâmetros adotados para as propriedades plásticas e elásticas do corpo de prova (CP2) .....	38
Tabela 4 - Parâmetros adotados para as propriedades plásticas e elásticas do corpo de prova (CP3) .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
MLC	Madeira Laminada Colada
DIN	Deutsches Institut für Normung
MEF	Método dos Elementos Finitos
EUA	Estados Unidos da América
CCA	Arseniato de Cobre Cromatado
CCB	Borato de Cobre Cromatado
NBR	Normas Brasileiras
CE	Ceará
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEC	Método dos Elementos de Contorno
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSA	Canadian Standards Association
AITC	American Institute Of Timber Construction
TU	Teor de Umidade

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_x$	módulo de elasticidade na direção tangencial
$E_y$	módulo de elasticidade na direção radial
$E_z$	módulo de elasticidade na direção longitudinal (compressão)
$\nu_{xy}$	coeficiente de Poison no plano xy
$\nu_{yz}$	coeficiente de Poison no plano yz
$\nu_{xz}$	coeficiente de Poison no plano xz
$G_{xy}$	módulo de elasticidade transversal no plano xy
$G_{yz}$	módulo de elasticidade transversal no plano yz
$G_{xz}$	módulo de elasticidade transversal no plano xz
$\sigma_x$	tensão de plastificação (tração e compressão) na direção x
$\sigma_y$	tensão de plastificação (tração e compressão) na direção y
$\sigma_z$	tensão de plastificação (tração e compressão) na direção z
$E_{Tx}$	módulo tangente (tração e compressão) na direção x
$E_{Ty}$	módulo tangente (tração e compressão) na direção y
$E_{Tz}$	módulo tangente (tração e compressão) na direção z
$\tau_{xy}$	tensão cisalhante de plastificação na direção xy
$\tau_{yz}$	tensão cisalhante de plastificação na direção yz
$\tau_{xz}$	tensão cisalhante de plastificação na direção xz
$G_{Txy}$	módulo tangente de corte no plano xy
$G_{Tyz}$	módulo tangente de corte no plano yz
$G_{Txz}$	módulo tangente de corte no plano xz

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	15
<b>2.1 Objetivos Gerais</b> .....	15
<b>2.1 Objetivos Específicos</b> .....	15
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
<b>3.1 Histórico da Madeira Laminada Colada</b> .....	16
<b>3.2 Madeira Laminada Colada (MLC)</b> .....	17
<b>3.3 Modelos numéricos computacionais</b> .....	19
<b>3.4 Método dos Elementos Finitos (MEF)</b> .....	20
<b>3.5 Critérios de Hill</b> .....	22
<b>3.6 Espécies Utilizadas para produção de MLC</b> .....	23
<b>3.7 Tratamentos preservativos</b> .....	25
<b>3.8 Caracterização da madeira</b> .....	26
<b>3.9 Ensaio para Madeira Laminada Colada</b> .....	27
<b>3.10 Adesivos para peças de MLC</b> .....	27
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
<b>4.1 Ensaio experimental</b> .....	28
<b>4.2 Simulação numérica</b> .....	31
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	40
<b>5.1 Comparação dos resultados</b> .....	40
<b>5.2 Análise de tensões internas</b> .....	43
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	45
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	46
<b>APÊNDICE A – Programação utilizada para a Viga 0</b> .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

A caracterização mecânica da madeira tem a finalidade de tornar a espécie conhecida para utilização em projetos estruturais, assim a norma de estruturas fornece metodologia necessária para os testes de flexão, compressão normal e paralela, tração normal e paralela, cisalhamento, fendilhamento e dureza. A normalização estabelece classes de madeira para melhor padronização. Entretanto, os procedimentos recomendados pela norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190 / 2013 (em fase de aprovação) por meio do método de ensaios para elementos de MLC, tratam das características que compõem o elemento estrutural de MLC. Além disso, os ensaios envolvendo elementos estruturais de MLC em escala real demandam custos relativamente altos. Dentro deste contexto, a modelagem numérica computacional apresenta-se como uma alternativa para a realização destes testes, apresentando um baixo custo e menor tempo para avaliação do comportamento estrutural do elemento de MLC em questão.

A Madeira Laminada Colada (MLC), ou Glued Laminated Timber é um derivado estrutural da madeira que consiste em lamelas (tábuas) coladas paralelamente, afim de proporcionar uma peça com maior diversidade de uso. A MLC é um produto muito amplo que pode ser destinado para muitos usos, como por exemplo: vigas, pilares, cruzetas, revestimentos, dormentes, decks, entre outras utilizações.

Na América do Norte e Europa a Madeira Laminada Colada é produto antigo e muito utilizado. Entretanto, no Brasil, é um produto razoavelmente novo e sua utilização vem crescendo, porque além de ter muitas vantagens, sobre tudo a madeira solida é um produto elaborado com uma resistência muitas vezes maior que a madeira bruta. Essa maior resistência é resultado de um processo de classificação mecânica e visual das lamelas, cujos defeitos que diminuem a resistência do elemento são retirados e o resultado é um produto mais homogêneo.

O maior uso da MLC está nos projetos estruturais, os quais podem admitir uma infinidade de tamanhos, seções e formas. Essas características fazem com que a Madeira Laminada Colada vença grandes vãos.

A MLC ainda possui uma boa resistência em relação ao seu peso, e logo necessita de menos gastos com fundação. Entretanto, os processos de produção da Madeira Laminada Colada como corte, encaixe, colagem, prensagem e acabamento fazem com que o preço da técnica seja elevado em comparação com elementos maciços de madeira ou treliças.

Apesar de ser uma técnica antiga a Madeira Laminada Colada é uma técnica renovável que polui muito pouco em comparação com concreto e metais, ainda tem a grande vantagem de armazenar CO<sub>2</sub> em florestas plantadas.

A madeira é um material em destaque, devido à grande procura de materiais sustentáveis para a construção civil que vem aumentando ao longo dos anos. A MLC com todas as suas vantagens, possui forte tendência à se tornar um material usual nas construções do Brasil, assim como é em outros países.

O presente trabalho teve como finalidade analisar por meio da simulação numérica, o comportamento estrutural de elementos de MLC padronizados segundo a norma ABNT NBR 7190 /1997.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

Avaliar por meio da simulação numérica realizada no software ANSYS, versão 11.0 o comportamento estrutural de elementos de MLC na flexão, elaborados segundo recomendações da ABNT NBR 7190 /1997.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Caracterização da madeira a ser utilizada nos ensaios experimentais com elementos de MLC;
- Ensaios experimentais em elementos de MLC padronizados segundo a ABNT NBR 7190 /1997;
- Construção do modelo numérico no ANSYS;
- Comparação entre os resultados numéricos e experimentais.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Histórico da Madeira Laminada Colada

Segundo Fiorelli (2005) a Madeira Laminada Colada (MLC) surgiu em Wienar na Alemanha no século passado com Otto Frederich Hetzer que obteve a primeira patente deste material, iniciando a utilização desta técnica em outros países da Europa, com o nome até então de “Estruturas Hetzer”. As primeiras utilizações destinavam-se para estruturas internas, com a evolução dos adesivos a prova d’água a MLC passou a ser utilizada em diversos seguimentos estruturais e emigrou para os Estados Unidos da América, sendo Max Hanisch o responsável por trazer a técnica para o continente americano. O ginásio para a Pesthtigo High School em Wisconsin, foi a primeira utilização da MLC nos EUA em 1934. Após estudos de confiabilidade da técnica e a divulgação de normas técnicas, houve um verdadeiro surto de construções Hetzer dos norte americanos que patentearam também as formas curvas da MLC em 1960.

De acordo com Calil Neto (2011) a Madeira Laminada Colada consiste na união de duas técnicas antigas que são a colagem unida e a técnica da laminação. Consiste da reconstituição das madeira a partir de lamelas (tábuas), está técnica pode ser empregada como elemento estrutural devido as colas de alta resistência que fazem não ocorrer deslizamentos entre as partes.

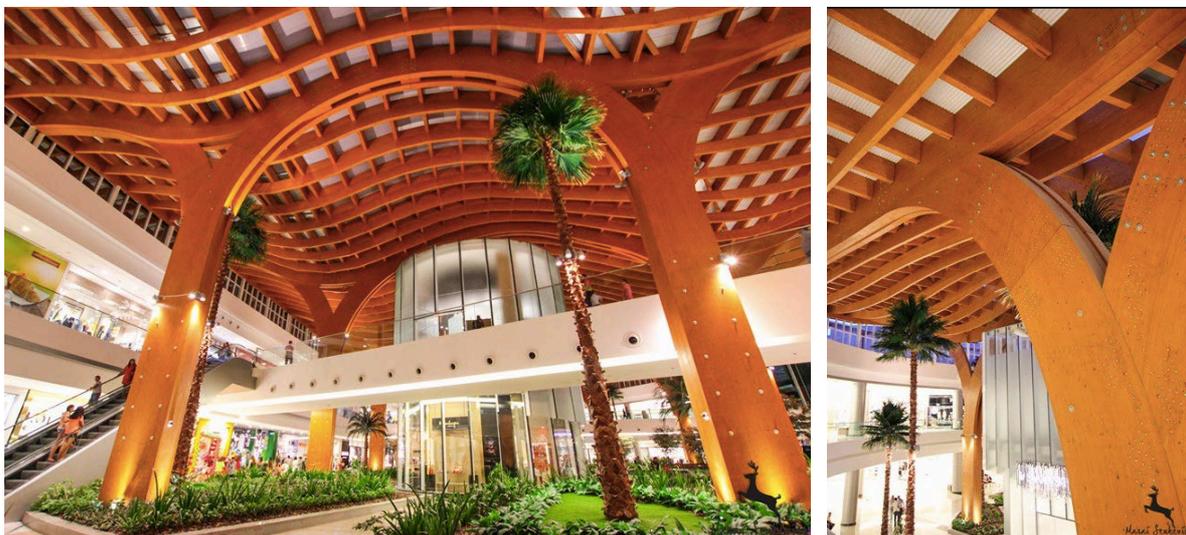
SELBO & FREAS (1954), definiram o termo "Glued Laminated Timber" (madeira laminada colada) para peças estruturais, formadas a partir de pedaços menores de madeira, na forma linear ou encurvada, com as lamelas (tábuas) de todas as laminações essencialmente paralelas ao comprimento do elemento.

No Brasil, a MLC vem sendo muito estudado e aprimorado, sendo que os primeiros estudos vieram com Simioni (1978) que estudou a viabilidade técnica da confecção de vigas laminadas com madeira juvenil de *Pinus elliottii*.

Engelm, Chahud e Rocco Lahr (1983) avaliaram a viabilidade de arcos de madeira laminada para estruturas principais de pontes. Contudo, a Industria brasileira de MLC está iniciando e conta com poucas empresas localizadas no estado de Goiás, São Paulo e Rio Grande do Sul. Porém, o mercado está em

ascensão e conta com a maior construção da técnica observada no Shopping Iguatemi, Fortaleza – CE do projetista Engenheiro Alan Dias (Figura 1).

Figura 1 – Estrutura em MLC do Shopping Iguatemi - Fortaleza



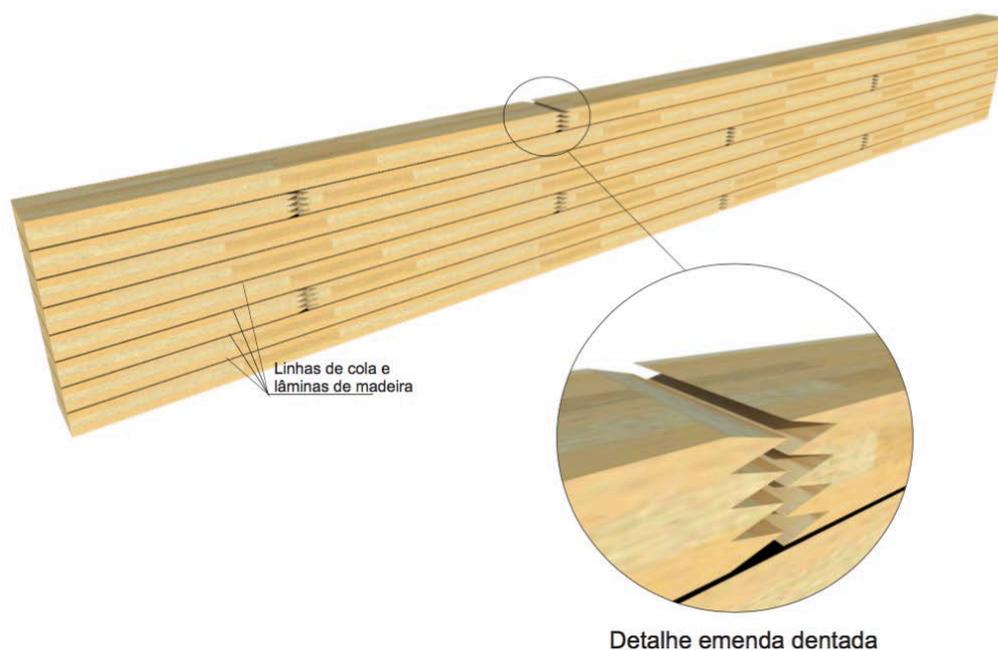
Fonte: Carpinteria, 2016

### 3.2 Madeira Laminda Colada (MLC)

O uso racional da madeira, bem como a dificuldade para encontrar seções e espécies com as características e propriedades desejadas para o uso estrutural, continua proporcionando a busca por técnicas alternativas. Segundo Miotto (2009) a Madeira Laminada Colada (MLC), como exemplo de produto estrutural derivado da madeira, se adequa aos padrões atuais de construção, embora esta seja uma das mais antigas técnicas de produtos processados da matéria prima madeira.

De acordo com a Norma DIN (2001) a Madeira Laminada Colada é obtida a partir de um conjunto de lamelas ligadas essencialmente com as fibras paralelas, para a produção de um conjunto maciço. A foto a seguir apresenta um croqui de uma viga de MLC:

Figura 2 – Croqui de uma peça de MLC



Fonte: Adaptado de Fiorelli, 2005

SELBO & FREAS (1954) listam as vantagens da MLC:

- Facilidade de fabricar grandes elementos estruturais e arcos laminados que fornecem edifícios com grandes vãos livres;
- Excelentes efeitos arquitetônicos, com grande variedade de formas;
- Liberdade de retirada de lâminas que poderiam afetar negativamente a estrutura para não contemplar a peça de MLC;
- Fortalecer a madeira laminada colada, visto que as lamelas (tábuas) podem ser preparadas e tratadas para condições severas;
- Possível uso de lâminas selecionadas para regiões com maiores esforços e com menos qualidade para regiões menos solicitadas, sem afetar adversamente a integridade estrutural do membro.

Entretanto, Miotto (2009) ressalta que a transformação da madeira em lâminas com etapas de secagem, colagem e acabamentos finais resulta em um custo final maior que a madeira serrada, devido aos equipamentos, adesivos e mão de obra especializada.

### 3.3 Modelos numéricos computacionais

As simulações numéricas estão se tornando essenciais em todas as áreas da engenharia. Em grande parte dos processos de desenvolvimento de novos produtos, uma redução considerável de custo, tempo e recursos consumidos em ensaios e testes experimentais pode ser obtida com a utilização de simulações numéricas. Isso significa que o produto completo deve ser modelado e seu comportamento simulado (MEMO, 2009).

Segundo Molina (2008) a simulação numérica permite a análise detalhada dos aspectos de interesse. Além disso, a modelagem permite examinar fatores que não podem ser observados claramente em ensaios experimentais.

De acordo com Memo (2009) a simulação numérica não considera apenas estruturas complicadas, mas também uma combinação de diferentes fenômenos físicos e escalas. Portanto, mesmo com o impressionante poder computacional disponível atualmente, ainda é uma tarefa desafiadora desenvolver e implementar rápidos métodos numéricos, capazes de resolver problemas multi-físicos e de multi-escala com um alto grau de confiança e precisão.

Calil Junior e Molina (2009) afirmam que os modelos numéricos computacionais aplicados à madeira são poucos e em sua maioria simplórios, sem consideração de critérios de resistência, ruptura ou falha dos materiais. Grande parte desses modelos restringem o comportamento das estruturas a limites linearmente elásticos ao invés de considerar os verdadeiros critérios de ruptura para os materiais obtendo, dessa forma, respostas muito conservadoras. Então, pode-se afirmar que as estruturas possuem a capacidade de resistir esforços maiores aos propostos em projeto. Entretanto, as tensões e deformações geradas pelas solicitações externas frequentemente excedem os limites elásticos dos materiais e, portanto, a resposta estrutural dos materiais não deve ser estudada como linearmente elástica. Os resultados obtidos por uma análise linear são válidos à medida que as deformações plásticas são pequenas e, por outro lado, para solicitações com valores últimos, tem-se a falha dos materiais.

Os métodos numéricos mais conhecidos e aplicados nas modelagens de sistemas de engenharia são: Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método

dos Elementos Finitos (MEF). Esses métodos são baseados na discretização do domínio do problema. Atualmente um terceiro procedimento chamado de Método dos Elementos de Contorno (MEC), que modela somente pela discretização do contorno do problema (MEMO, 2009).

### **3.4 Método dos Elementos Finitos (MEF)**

Segundo Casas (2016) a origem do Método dos Elementos Finitos foi em análises de estruturas propostas nos séculos XVIII e XIX, sendo que seu princípio atual resulta coexistência da mecânica, matemática, análise numérica e computação. Em 1795 Gauss propôs o uso de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos, onde se tem uma função que se deseja determinar de forma aproximada, e o processo numérico se encarrega de encontrar alguns parâmetros que ajustem a função de aproximação à solução do problema. Como restrição a este procedimento, existe o problema de se definir uma função apropriada. Durante o século XIX os problemas básicos de mecânica dos sólidos foram equacionados por matemáticos, sendo porém que soluções analíticas eram possíveis apenas para casos específicos, exigindo um grande número de simplificações.

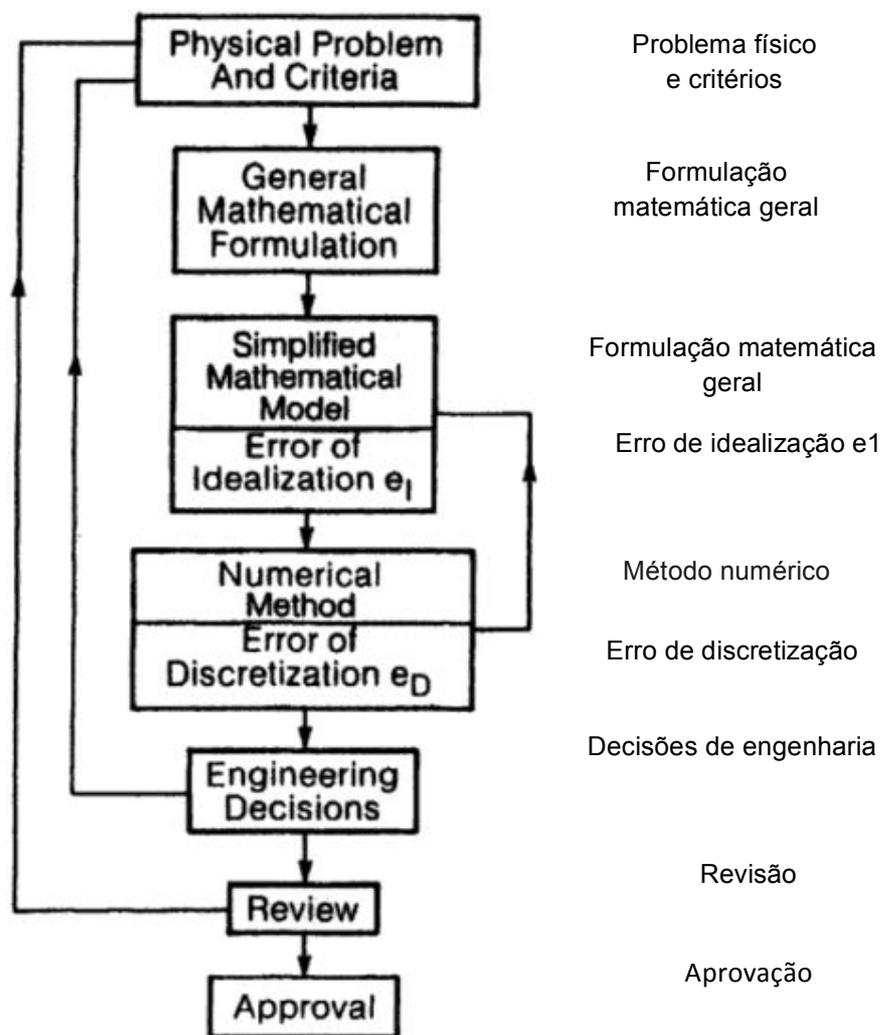
De acordo com as pesquisas científicas de Bernoulli, Lagrange e Stevin, que elaboraram estudos com base no Princípio dos Trabalhos Virtuais, ainda no século XVIII, tornava-se possível a análise de estruturas hiperestáticas, desde que se enfrentasse a aritmética trabalhosa requerida. Em 1943 o matemático Courant modificou a ideia inicial de Gauss, propondo que não se tentasse utilizar uma única função para aproximar a solução em toda a região de interesse, mas que se partisse para funções válidas apenas em uma pequena parte do domínio. Em 1956 Turner, Clough, Martin e Topp, trabalhando no projeto de aeronaves para a empresa Boeing, propuseram, com base em um método já consolidado de análise estrutural conhecido como análise matricial, que se modelasse painéis de aeronaves a partir de pequenos triângulos, capazes de cobrir toda a superfície de cada peça. O comportamento em cada elemento triangular seria descrito matematicamente, aproximado localmente, e o comportamento global obtido a partir da

compatibilização dos diversos elementos. A partir do estudo do que ocorre no nível local, consegue-se descrever aproximadamente o comportamento global, tomando-se como base um raciocínio de base mecânica (CASAS, 2016).

Segundo Tankut, Zor e Tankut (2014) o Método dos Elementos Finitos (MEF) é a técnica de discretização dominante na mecânica estrutural. O conceito básico na interpretação física do MEF é a subdivisão do modelo matemático em componentes desmembrados (não sobrepostos) de geometria simples chamados "elementos finitos". A resposta de cada elemento é expressa em termos de um número finito de graus de liberdade caracterizado como o valor de uma função desconhecida ou funções, a um conjunto de pontos nodais. A resposta do modelo matemático é então considerada para ser aproximada pelo modelo discreto obtida por meio da ligação ou a montagem do conjunto de todos os elementos. O conceito de desconexão da montagem ocorre naturalmente quando se examina muitos sistemas naturais e artificiais. Por exemplo, é fácil de visualizar um motor, ponte, edifício, avião, ou esqueleto como fabricado a partir de componentes mais simples. Além disso, o MEF tornou-se uma ferramenta poderosa para a solução numérica de uma grande variedade de problemas de engenharia. As aplicações variam de deformação e tensão análise dos automóveis, aviões, construção e estruturas de pontes para análise do campo de fluxo de calor, fluxo de fluido, fluxo magnético, infiltrações e outros problemas de fluxo.

Szabo e Babusca (1991) propuseram um esquema para criação de um modelo numérico para resolução de um problema com o método dos elementos finitos em seu livro *Finite Element Analysis*. Neste caso, a primeira etapa é o problema físico encontrado e seus respectivos critérios, e em seguida a formulação matemática, sendo que, após a formulação matemática, faz-se o modelo matemático simplificado e o método numérico, ambos testados, caso ocorra possíveis erros, necessitam ser reelaborados. Por fim, toma-se as conclusões sobre o modelo, revisa-se e finaliza-se com a solução do problema. A figura 3 exemplifica o esquema:

Figura 3 – Esquema de criação de um modelo numérico com o MEF



Fonte: Adaptado de Szabo e Babusca, 1991

### 3.5 Critérios de Hill

Hill (1950) definiu a "Teoria da plasticidade" em seu livro "The mathematical theory of plasticity", sendo este um nome dado ao estudo matemático da tensão e deformação em sólidos plasticamente deformados, especialmente metais. Trata-se de métodos de cálculo de tensão e deformação nos sólidos elasticamente deformados, e não, de uma interpretação literal. Assim, sugere uma explicação física de elasticidade. A relação de propriedades elásticas e plásticas dos metais com uma estrutura cristalina e forças de coesão pertencente ao assunto, neste caso foi chamada de "física de metal".

A teoria da plasticidade leva à certo ponto de observação experimental do comportamento macroscópico de um sólido em estado de deformação. A tarefa da teoria é dupla: construir relações explícitas entre deformação e tensão concordando com as observações estreitas e universalmente sempre que necessário, para desenvolver técnicas matemáticas afim de calcular as distribuições não uniformes, com corpos permanentemente distorcidos de qualquer forma (HILL, 1950).

Para Mendonça (2005), Hill considerou os critérios de Von Mises para execução da “Teoria da plasticidade”, mas, no entanto o modelo de Von Mises foi construído para simular um material isotrópico e Hill o modificou para incluir efeitos de anisotropia.

O critério de Hill é definido matematicamente, como:

$$F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j = 1$$

Escrita em forma matricial, com  $i, j = 1$  a  $6$ , em que:  $F_{ij}$  é um parâmetro de resistência determinado por meio de ensaios uniaxiais de tração, compressão e cisalhamento;  $\sigma_i$  e  $\sigma_j$  representam as tensões nas direções principais  $i$  e  $j$ , em que:  $i, j = 1$  a  $3$  para tensões normais; e para as de cisalhamento, os planos correspondentes 12, 23 e 31 ou simplesmente  $i, j = 4$  a  $6$  (MASCIA; SIMONI, 2012).

### **3.6 Espécies Utilizadas para produção de MLC**

Existe a possibilidade da colagem de quase todas as espécies de madeira na fabricação da MLC. Entretanto algumas espécies possuem características físicas e químicas que exigem o emprego de colas especiais ou a modificação das colas normalmente comercializadas para o uso em madeiras. Logo, as espécies que compõem as peças de Madeira Laminada Colada costumam ser de coníferas e utiliza-se algumas folhosas (CARPINTERIA, 2016).

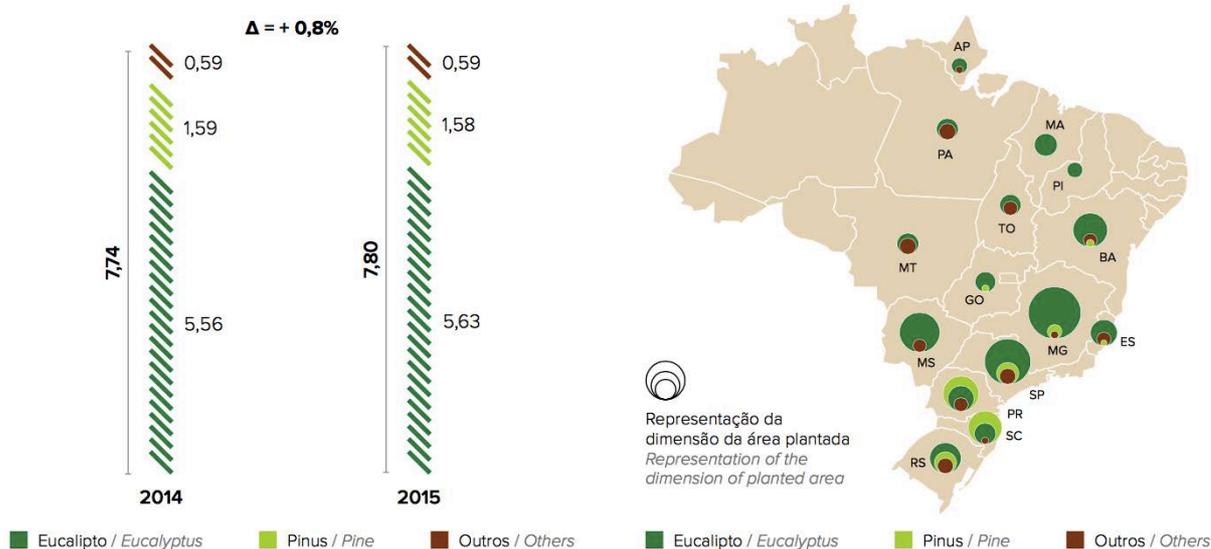
A norma DIN EN 386 (2002) estabelece que devem ser utilizadas apenas espécies ou uma mistura de espécies comprovadas sua adequação para a produção de MLC. Também cita as espécies utilizadas/ adequadas na maioria dos países

européus: Whitewood Europeia (*Picea abies*, *Abies alba*); Redwood Europeia (*Pinus sylvestris*); Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*). Além disso, as seguintes espécies: (ocidental) Hemlock (*Tsuga heterophylla*), curso Pine e pinheiro negro da Áustria (*Pinus nigra*); Larch (*Larix decidua*); Maritime Pine (*Pinus pinaster*); Poplar (*robusta Populus*, *Populus alba*); Radiata Pine (*Pinus radiata*); Sitka abeto (*Picea sitchensis*); cedro vermelho ocidental (*Thuja plicata*), têm sido utilizadas para a produção de Madeira Laminada Colada.

A norma ABNT NBR 7190 / 2013 estabelece métodos de cálculo e de ensaios para utilização de apenas uma espécie nas peças de MLC. No Brasil, como forma de otimização e também pela grande oferta, utiliza-se em sua maioria os gêneros de Pinus e Eucaliptos: Simioni (1978) estudou a viabilidade técnica da confecção de vigas laminadas com madeira juvenil de *Pinus elliottii*. Zangiácomo (2003) estudou a viabilidade do emprego das seguintes espécies nativas: Envira Branca (*Xylopia sp*), Cambará (*Moquinia polymorpha*), Castanheira (*Bertholetia excelsa*) e Cedrinho (*Erismia sp*). Miotto (2009) em seu trabalho intitulado Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro optou no uso do híbrido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* – comercializada com o nome de *Lyptus*. Calil Neto (2011) estudou o controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativos e testou o Pinus, *Eucalyptus grandis*, Lyptus, Teca e Paricá.

O Pinus é uma das espécies mais utilizadas nas empresas brasileiras de produção de Madeira Laminada Colada. De acordo com o relatório do Iba (2016), com dados referentes ao ano 2015, o Brasil tem uma área plantada de Pinus de 1,58 milhões de hectares, situadas nas regiões sul e sudeste.

Figura 4 – Área de florestas plantadas (em milhões de hectares) e localização das florestas no Brasil, respectivamente



Fonte: Ibá, 2015

### 3.7 Tratamentos preservativos

A norma canadense AITC 109 (2007), que contém informações técnicas para conservação com preservativos da Madeira Laminada Colada, trata de estruturas de madeira devidamente concebidas localizadas onde existe a possibilidade de deterioração, ataque de insetos, ou ataque de brocas. A madeira utilizada deve ser o cerne de uma espécie naturalmente durável ou tratamentos em autoclave com um conservante aprovado para garantir durabilidade.

Os tratamentos preservativos utilizados em peças de MLC são para evitar o ataque de agentes xilófagos e fungos, sendo recomendada a utilização de CCA (Arseniato de Cobre Cromatado) e CCB (Borato de Cobre Cromatado). A aplicação do produto é realizada com pressão em autoclave, para impregnação do produto (FIORELLI, 2005).

Os métodos com maior eficiência comprovada são os que utilizam de vácuo e pressão, principalmente o que preenche o lumen da fibra da madeira, chamado de

“célula cheia” ou Bethell. A eficiência deste método mostra-se devido a maior retenção do agente preservante na madeira (Déon, 1978).

Além dos tratamentos sobre pressão e vácuo com CCA e CCB, os fabricantes de Madeira Lamina Colada costumam pintar a seção transversal com tintas emborrachadoras, para proteção contra insetos no plano onde é mais propício a este ataque. Fornecem também a pintura com stain e vernizes, dependendo do uso da peça fabricada, sendo que este acabamento superficial também pode adotar qualquer cor e tonalidade, de acordo com o desejo do cliente.

### **3.8 Caracterização da madeira**

Na classificação da madeira pela técnica de excitação por impulso (Sonelastic), o amortecimento e módulos de elasticidade são determinados a partir do som emitido pelo corpo de prova de madeira ao sofrer um pequeno impacto. Este som, ou resposta acústica, é composto pelas frequências naturais de vibração do corpo que são proporcionais aos módulos elásticos e sua amplitude decai de acordo com o amortecimento do material (SONELASTIC, 2016).

O software Sonelastic pode ser utilizado para diversos materiais, como: compósitos, madeiras, abrasivos, rebolos, cimentícios, metais e cerâmicos, sendo que o mesmo está de acordo com as normas ASTM E1876, ASTM C1259 e ASTM C215. O cálculo é realizado por meio das dimensões dos materiais, geometria e massa do corpo de prova. Após o conhecimento desses fatores facilmente mensuráveis, a resposta acústica é capturada e calcula-se os módulos elásticos.

Na caracterização mecânica destrutiva são utilizadas células de carga, com aplicação de ciclos de carregamentos, mede-se a distorção da peça com relógios comparadores e as deformações específicas com extensômetros. Para determinação da rigidez, a resistência da madeira deve ser estimada, pelo ensaio destrutivo de um corpo de prova selecionado. Após este conhecimento, o diagrama do ciclo de carregamentos é composto por dois carregamento de 50% da carga final estimada e o último ciclo até a ruptura da peça. Como resultado tem-se a força máxima de ruptura e variação dimensional da peça ao longo da aplicação da força,

com uma taxa de 10 MPa/min, medida com os relógios comparadores (ABNT NBR 7190 / 1997).

### **3.9 Ensaios para Madeira Laminada Colada**

A Norma brasileira ABNT NBR 7190 / 2013 (Projeto de Estruturas de Madeira), apresenta um anexo com métodos de ensaios de elementos estruturais de MLC. Este indica os ensaios como requisitos da união dentada: resistência a tração paralela às fibras, ciclo de delaminação para adesivos de uso interior e exterior, resistência ao cisalhamento nas linhas de cola e medição da quantidade de adesivo espalhado.

Além desta norma existem outras normas, no entanto estrangeiras que indicam métodos e requisitos de qualidade da MLC, são elas:

- Norma canadense: CSA 0177-2006 (atualizada 2011) - Qualification Code for Manufacturers of Structural Glued-Laminated Timber;
- Norma estadunidense: AITC A190.1-2007 - American National Standard, Structural Glued Laminated Timber (2002 version available also.);
- Norma europeia: EN 386-2001 - Glued laminated timber. Performance requirements and minimum production requirements;
- Norma chilena NCh2148.cR 2010 - (Atualizada 2013) - Madera laminada encolada estructural - Requisitos, métodos de muestreo e inspección.

### **3.10 Adesivos para peças de MLC**

A norma ABNT NBR 7190 / 2013 estabelece que devem ser utilizados adesivos certificados pelos seguintes órgãos internacionais: American Lumber Standard Committee (ALSC) - FCBA INSTITUT TECHNOLOGIQUE, DIBt Deutsches Institut Fur Bautechnik, Otto-Graf Institut (MPA) of the University of Stuttgart, JAIA Japan Adhesive Industry Association, JIS Japan Industrial Standard, JAI-9 Indústria de Adesivos do Japão, JAS Japanese Agricultural Standard e por laboratórios brasileiros competentes. O adesivo deve possuir a classificação de

utilização de uso interno e externo.

O Poliuretano é um dos adesivos utilizados na união de lâminas da Madeira Laminada Colada, para a colagem o adesivo requer a umidade contida na madeira e são necessários 200g/m<sup>2</sup> do substrato. O processo de fixação ocorre após a prensagem, quando a água contida na madeira reage com uma parte do isocianato liberando dióxido de carbono, formando a amina, RAPIDAMENTE a amina reage com outro grupo isocianato, formando uma estrutura reticulada como nos sistemas bicomponentes (CALIL NETO, 2011).

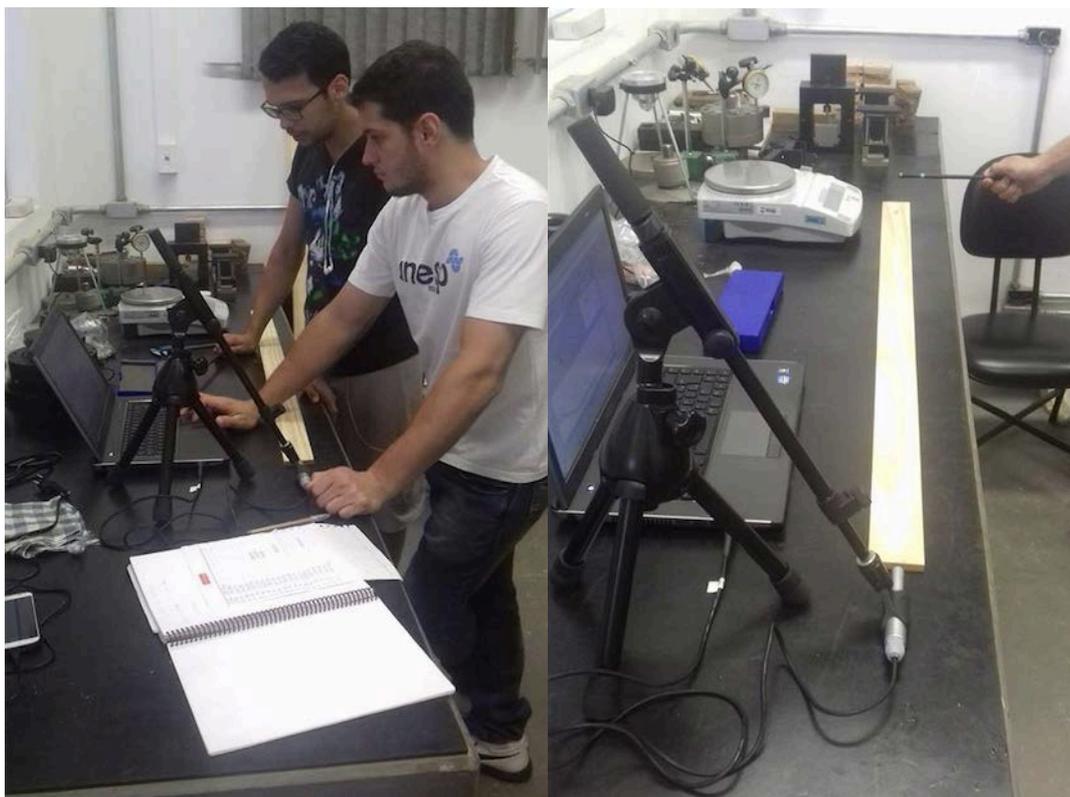
O resorcinol-formaldeído é um adesivo de cura a frio, devendo utilizar catalisador, é aplicado em peças de madeira laminada colada, construções navais, aviação e outros. Os adesivos a base de resorcinol são normalmente capazes de suportar condições severas de exposições, incluindo calor e umidade, e a rigidez da linha da cola é amplamente determinada pela habilidade da madeira em resistir a condições de exposições (TELES, 2009).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Ensaio experimental**

Para o ensaio experimental de flexão dos elementos de MLC usinou-se tábuas de *Pinus sp* para chegar em laminas de 1X5X115cm. Essas laminas foram classificadas visualmente, com nós e grãos inferiores a 1/4 da seção transversal e 1/6 de sua largura final, inclinação das fibras inferior a 6° e rachaduras menores que 30cm no sentido longitudinal segundo ABNT NBR 7190 / 2013 (Projeto de Estruturas de Madeira) e também classificadas quanto ao módulo de elasticidade, utilizando do método não destrutivo do Sonelastic, que classifica as laminas em função da frequência natural de vibrações obtidas pela técnica de excitação por impulso. A escolha das dimensões das laminas levou em consideração o corpo de prova do ensaio mecânico de flexão, estabelecido pela norma, assim com cinco laminas tem-se um corpo de prova idêntico ao estabelecido pela mesma.

Figura 5 – Classificação visual e mecânica das lâminas, respectivamente.



Fonte: Autor

Para a produção da Madeira Laminada Colada, o projeto de revisão da norma de estruturas de madeira estabelece uma densidade entre  $0,40 - 0,75\text{g/cm}^3$  e teor umidade (T.U.) inferior a 18%, as lâminas atendiam esses critérios com T.U. de 16% e densidade de  $0,52\text{g/cm}^3$ , obtidos a partir dos testes de propriedades físicas estabelecidos pela mesma.

O adesivo estrutural utilizado foi o Poliuretano bicomponente (Imperveg – Poliuretano vegetal), exige uma relação de componentes 1:1,142, respectivamente, componente A e B, e também uma gramatura de  $200\text{g/m}^2$ . Assim utilizou-se 11,5g por linha de cola, que aplicou-se em uma face.

Para o processo de prensagem usou-se grampos, apertados com torquímetro para a obtenção da pressão de 1,2MPa descritos em norma que permaneceu por 24h, de acordo com prescrição do fabricante do adesivo. Após o processo de prensagem as peças passaram pelo processo de aplainamento para exatidão da seção  $5\times 5\text{cm}$  e retirada de adesivo excedente. Segue imagem do processo de prensagem:

Figura 6 – Processo de prensagem das lamelas com adesivo.



Fonte: Autor

Com os corpos de prova prontos iniciou-se o processo de análises das propriedades mecânicas. O processo de caracterização foi realizado em uma máquina de ensaios mecânicos EMIC DL30000N, com capacidade de 3000 kgf, acionamento eletromecânico, faixa de velocidade entre 0,02 – 1000 mm/min e controlada por meio de um microcomputador. Respeitou-se a velocidade pela norma de 10 MPa/min, e após a determinação da resistência estimada, os corpos de prova sofreram carregamentos em três ciclos de 10% e 50% da resistência obtida, e um terceiro até a ruptura para um vão de 105cm. O equipamento utilizado forneceu os gráficos de carregamento por tempo.

Figura 7 –Corpo de prova rompido em ensaio mecânico na EMIC DL30000N.



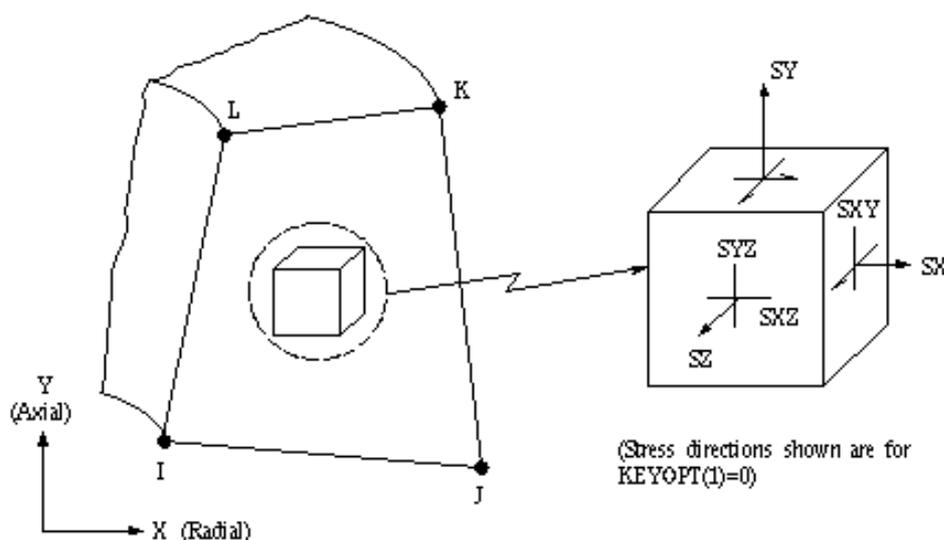
Fonte: Autor

## 4.2 Simulação numérica

Na modelagem numérica computacional utilizou-se do software ANSYS, versão 11.0, que agrega o Método dos Elementos Finitos (MEF), para a simulação de uma peça com comprimento de 105cm e seção de 5x5cm, a peça ensaiada foi composta por cinco lâminas de 1cm de espessura. A escolha pelo ANSYS se deve ao fato pelo referido software permitir a análise dos modelos em regime de não linearidade física e também geométrica.

Para a discretização das peças de madeira utilizou-se do elemento *solid45*. O *solid45* é usado para a modelagem tridimensional de estruturas sólidas, definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó com instruções nodais x, y, e z. O elemento considera plasticidade, fluência, endurecimento, tensões, grande deflexão e grandes deformações.

Figura 8 –Saídas das tensões de elemento finito *solid45*



Fonte: Documentação ANSYS

Com a definição do *solid45* criou-se então cada lâmina com espessura de 1cm (eixo y), largura de 5cm (eixo x) e comprimento de 105cm (eixo z), pois no ensaio experimental utilizou-se 105cm de vão. Criou-se também as malhas com as propriedades do material.

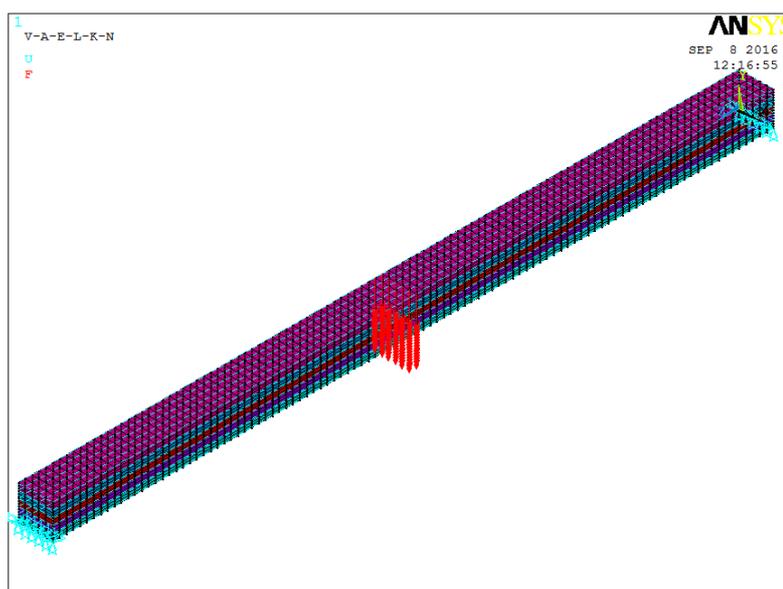
Figura 9 – Modelo do corpo de prova de MLC



Fonte: Autor

Posteriormente a criação do corpo de prova, aplicou-se as vinculações e carga aplicada. As vinculações com impedimento de translação nos eixos X e Y, nas duas extremidade da viga, mantendo um vão de 105cm, como estabelecido no ensaio experimental. Também aplicou-se uma carga no meio do vão, no sentido negativo de Z, distribuindo-a em 12 nós, para evitar o esmagamento na face superior da viga.

Figura 10 – Modelo do corpo de prova com vinculações e local de carga aplicada



Fonte: Autor

O modelo numérico computacional proposto seguiu um modelo ortotrópico de

acordo com os critérios de Hill (1950). No entanto, modificado por Flores, Rioseco e Matamal (2007), que explicam que o critério de fluência de Hill (1950) modificado considera uma regra de fluxo associada a um tipo de endurecimento de trabalho, junto com as diferenças das tensões nas direções principais do material. O esforço equivalente se define como:

$$\sigma_e = \frac{1}{3} \{\sigma\}^T [M] \{\sigma\} - \frac{1}{3} \{\sigma\}^T \{L\} \quad (1)$$

Onde  $\{\sigma\}$  representa o vetor de tensões,  $[M]$  uma matriz que descreve a variação do esforço de fluência e  $\{L\}$  a diferença entre as tensões de fluência para a tração e compressão. O  $\{L\}$  pode derivar-se da translação da superfície de fluência  $\{\alpha\}$ . Quando  $\sigma_e$  é igual a um, o parâmetro do material ( $K$ ) assume que começa a fluência. Deste modo, o critério de fluência ( $F$ ), pode ser estabelecido (FLORES, RIOSECO e MATAMAL, 2007):

$$3F = \{\sigma\}^T [M] \{\sigma\} - \{\sigma\}^T \{L\} - K = 0 \quad (2)$$

Flores, Rioseco e Matamal (2007) explicam que assume-se que o material tem três planos ortogonais de simetria, o comportamento plástico pode ser caracterizado pelo modelo de tensão-deformação nas três diferentes direções de coordenadas do elemento e seu correspondente cisalhamento:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & 0 & 0 & 0 \\ M_{12} & M_{22} & M_{23} & 0 & 0 & 0 \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Em que:

$$M_{jj} = \frac{K}{\sigma_{+j}\sigma_{-j}}, \quad j = 1 \text{ to } 6 \quad (4)$$

Onde  $\sigma_{+j}$  e  $\sigma_{-j}$  representam as tensões de fluência de compressão e tração na direção  $j$  ( $j = x, y, z, xy, yz, xz$ ).  $K = \sigma_{+x} \cdot \sigma_{-x}$  se define considerando  $M_{11} = 1$ . O vetor  $\{L\}$  toma a forma:

$$\{L\} = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (5)$$

Assim, os valores de  $L_j$  se definem como:

$$L_j = M_{jj} (\sigma_{+j} - \sigma_{-j}), \quad j = 1 \text{ to } 3 \quad (6)$$

Assumindo o volume constante durante processo de deformação plástica:

$$\begin{aligned} M_{11} + M_{12} + M_{13} &= 0 \\ M_{12} + M_{22} + M_{23} &= 0 \\ M_{13} + M_{23} + M_{33} &= 0 \\ L_1 + L_2 + L_3 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

As propriedades de cada lâmina foram baseadas no ensaio não destrutivo feito no Sonelastic, onde o software fornecia o módulo de elasticidade de cada lâmina e coeficiente de Poisson. Mediu-se também a densidade média da madeira de *Pinus sp.* conforme ABNT NBR 7190 / 1997, chegando em um valor de  $0,7 \text{ g/cm}^3$ , utilizado na programação junto com os seguintes parâmetros:

- Propriedades elásticas da madeira definidas para o modelo numérico:

$E_x$  = módulo de elasticidade na direção tangencial;

$E_y$  = módulo de elasticidade na direção radial;

$E_z$  = módulo de elasticidade na direção longitudinal (compressão);

$\nu_{xy}$  = coeficiente de Poisson no plano  $xy$ ;

$\nu_{yz}$  = coeficiente de Poisson no plano  $yz$ ;

$\nu_{xz}$  = coeficiente de Poisson no plano xz;

$G_{xy}$  = módulo de elasticidade transversal no plano xy;

$G_{yz}$  = módulo de elasticidade transversal no plano yz;

$G_{xz}$  = módulo de elasticidade transversal no plano xz;

- Propriedades plásticas da madeira:

$\sigma_x$  = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção x;

$\sigma_y$  = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção y;

$\sigma_z$  = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção z;

$E_{Tx}$  = módulo tangente (tração e compressão) na direção x;

$E_{Ty}$  = módulo tangente (tração e compressão) na direção y;

$E_{Tz}$  = módulo tangente (tração e compressão) na direção z;

$\tau_{xy}$  = tensão cisalhante de plastificação na direção xy;

$\tau_{yz}$  = tensão cisalhante de plastificação na direção yz;

$\tau_{xz}$  = tensão cisalhante de plastificação na direção xz;

$G_{Txy}$  = módulo tangente de corte no plano xy;

$G_{Tyz}$  = módulo tangente de corte no plano yz;

$G_{Txz}$  = módulo tangente de corte no plano xz;

Chegou-se nos seguintes parâmetros para quatro vigas ensaiadas:

	<b>lâmina 1</b>	<b>lâmina 2</b>	<b>lâmina 3</b>	<b>lâmina 4</b>	<b>lâmina 5</b>	<b>Unidade</b>
<b>Ex</b>	92,00	71,30	97,50	57,30	62,00	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ey</b>	92,00	71,30	97,50	57,30	62,00	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ez</b>	920,00	713,00	975,00	573,00	620,00	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gxz</b>	46,00	35,65	45,83	26,93	29,14	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gyz</b>	46,00	35,65	48,75	28,65	31,00	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gxy</b>	46,00	35,65	4,88	2,87	3,10	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Vxz</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Vyz</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Vxy</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Gtxz</b>	1,94	1,51	2,06	1,21	1,31	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gtyz</b>	1,94	1,51	2,06	1,21	1,31	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Grxy</b>	0,0019	0,0015	0,0021	0,0012	0,0013	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Et<sub>x</sub></b>	0,41	0,32	0,43	0,26	0,28	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Et<sub>y</sub></b>	27,06	20,97	28,68	16,85	18,24	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Et<sub>z</sub></b>	0,41	0,32	0,43	0,26	0,28	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>σ<sub>x</sub></b>	3,56	2,76	3,78	2,22	2,40	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>σ<sub>y</sub></b>	0,77	0,59	0,81	0,48	0,52	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>σ<sub>z</sub></b>	0,77	0,59	0,81	0,48	0,52	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>τ<sub>xz</sub></b>	1,78	1,38	1,89	1,11	1,20	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>τ<sub>yz</sub></b>	0,19	0,15	0,21	0,12	0,13	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>τ<sub>xy</sub></b>	1,78	1,38	1,89	1,11	1,20	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>

Tabela 2 – Parâmetros adotados para as propriedades plásticas e elásticas do corpo de prova (CP1)

	<b>lâmina 1</b>	<b>lâmina 2</b>	<b>lâmina 3</b>	<b>lâmina 4</b>	<b>lâmina 5</b>	<b>Unidade</b>
<b>Ex</b>	90,10	71,30	67,50	71,20	97,50	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ey</b>	90,10	71,30	67,50	71,20	97,50	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ez</b>	901,00	713,00	675,00	712,00	975,00	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gxz</b>	45,05	35,65	33,75	35,60	48,75	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gyz</b>	45,05	35,65	33,75	35,60	48,75	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gxy</b>	45,05	35,65	33,75	35,60	48,75	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Vxz</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Vyz</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Vxy</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Gtxz</b>	1,90	1,51	1,43	1,50	2,06	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gtyz</b>	1,90	1,51	1,43	1,50	2,06	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Grxy</b>	0,0019	0,0015	0,0014	0,0015	0,0021	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Etx</b>	0,40	0,32	0,30	0,32	0,43	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ety</b>	26,50	20,97	19,85	20,94	28,68	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Etz</b>	0,40	0,32	0,30	0,32	0,43	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\sigma_x</math></b>	3,49	2,76	2,61	2,76	3,78	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	0,75	0,59	0,56	0,59	0,81	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\sigma_z</math></b>	0,75	0,59	0,56	0,59	0,81	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\tau_{xz}</math></b>	1,74	1,38	1,31	1,38	1,89	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\tau_{yz}</math></b>	0,19	0,15	0,14	0,15	0,21	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\tau_{xy}</math></b>	1,74	1,38	1,31	1,38	1,89	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>

Tabela 3 – Parâmetros adotados para as propriedades plásticas e elásticas do corpo de prova (CP2)

	<b>lâmina 1</b>	<b>lâmina 2</b>	<b>lâmina 3</b>	<b>lâmina 4</b>	<b>lâmina 5</b>	<b>Unidade</b>
<b>Ex</b>	96,80	73,90	57,30	88,00	97,20	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ey</b>	96,80	73,90	57,30	88,00	97,20	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ez</b>	968,00	739,00	573,00	880,00	972,00	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gxz</b>	48,40	36,95	28,65	44,00	48,60	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gyz</b>	48,40	36,95	28,65	44,00	48,60	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gxy</b>	48,40	36,95	28,65	44,00	48,60	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Vxz</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Vyz</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Vxy</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Gtxz</b>	2,05	1,56	1,21	1,86	2,05	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gtyz</b>	2,05	1,56	1,21	1,86	2,05	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Grxy</b>	0,0020	0,0016	0,0012	0,0019	0,0021	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Etz</b>	0,43	0,33	0,26	0,39	0,43	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ety</b>	28,47	21,74	16,85	25,88	28,59	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Etz</b>	0,43	0,33	0,26	0,39	0,43	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>σx</b>	3,75	2,86	2,22	3,41	3,76	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>σy</b>	0,81	0,62	0,48	0,73	0,81	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>σz</b>	0,81	0,62	0,48	0,73	0,81	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>τxz</b>	1,87	1,43	1,11	1,70	1,88	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>τyz</b>	0,20	0,16	0,12	0,19	0,21	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>τxy</b>	1,87	1,43	1,11	1,70	1,88	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>

Tabela 4 – Parâmetros adotados para as propriedades plásticas e elásticas do corpo de prova (CP3)

	<b>lâmina 1</b>	<b>lâmina 2</b>	<b>lâmina 3</b>	<b>lâmina 4</b>	<b>lâmina 5</b>	<b>Unidade</b>
<b>Ex</b>	92,00	83,40	57,30	88,00	97,20	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ey</b>	92,00	83,40	57,30	88,00	97,20	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ez</b>	920,00	834,00	573,00	880,00	972,00	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gxz</b>	46,00	41,70	28,65	44,00	48,60	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gyz</b>	46,00	41,70	28,65	44,00	48,60	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gxy</b>	46,00	41,70	28,65	44,00	48,60	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Vxz</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Vyz</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Vxy</b>	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	-
<b>Gtxz</b>	1,94	1,76	1,21	1,86	2,05	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Gtyz</b>	1,94	1,76	1,21	1,86	2,05	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Grxy</b>	0,0019	0,0018	0,0012	0,0019	0,0021	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Etz</b>	0,41	0,37	0,26	0,39	0,43	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Ety</b>	27,06	24,53	16,85	25,88	28,59	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>Etz</b>	0,41	0,37	0,26	0,39	0,43	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\sigma_x</math></b>	3,56	3,23	2,22	3,41	3,76	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	0,77	0,69	0,48	0,73	0,81	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\sigma_z</math></b>	0,77	0,69	0,48	0,73	0,81	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\tau_{xz}</math></b>	1,78	1,62	1,11	1,70	1,88	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\tau_{yz}</math></b>	0,19	0,18	0,12	0,19	0,21	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>
<b><math>\tau_{xy}</math></b>	1,78	1,62	1,11	1,70	1,88	<b>kN/cm<sup>2</sup></b>

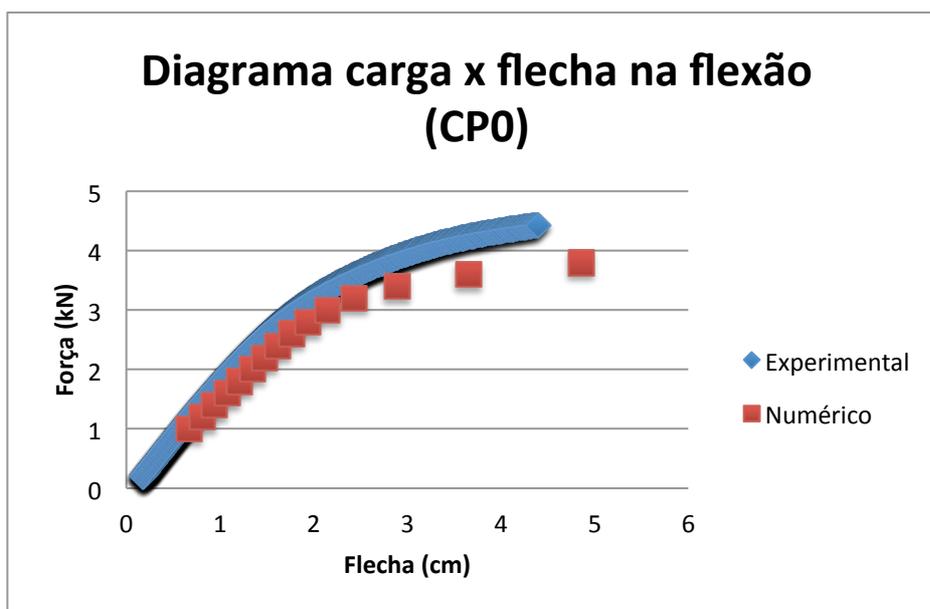
Foi considerado a não linearidade geométrica da peça e os carregamentos foram incrementados utilizando de um recurso do ANSYS denominado “*Automatic Time Stepping*”. Segundo a Documentação do ANSYS, o recurso citado reduz o valor do incremento quando a previsão do número de iterações ultrapassa o limite estabelecido, caso se obtenha incrementos de deformações plásticas maiores que 15%, ou ainda, deslocamentos excessivos o modelo é admitido com inconsistente e considera-se falha da peça (ruptura).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Comparação dos resultados

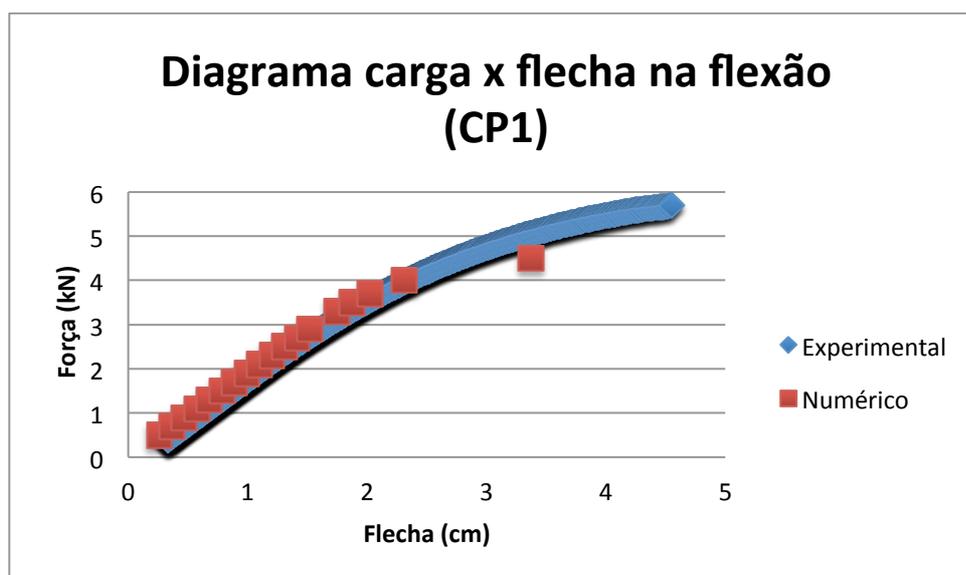
Para melhor visualização dos resultados obtidos, plotou-se um diagrama Força (kN) x flecha (cm), onde as curvas numérica e experimental de cada viga podem ser comparadas:

Figura 11 – Gráfico comparativo modelo Experimental x Numérico do corpo de prova (CPO)



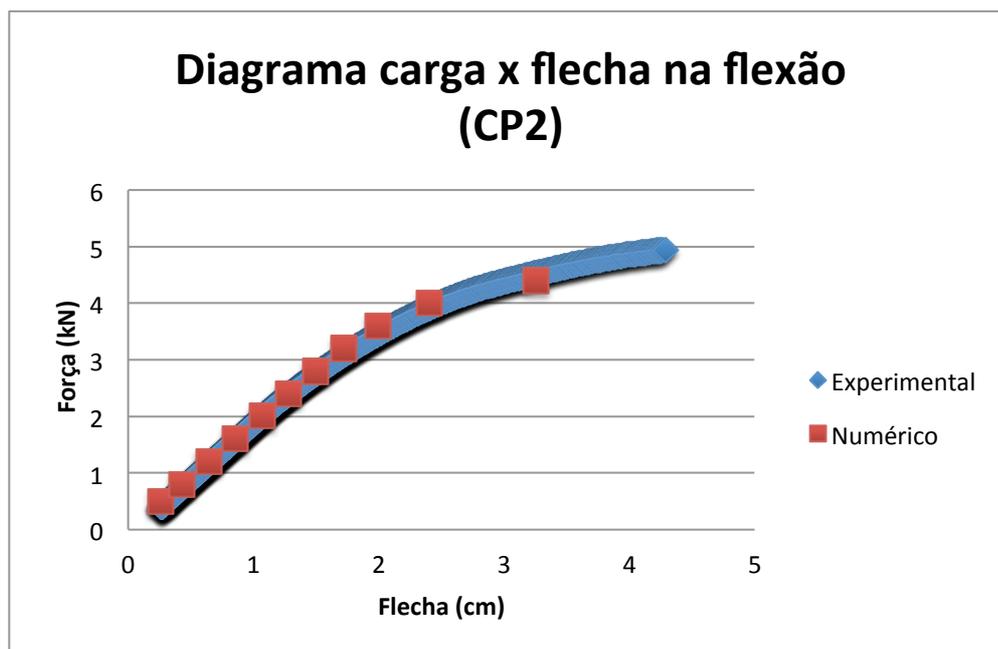
Fonte: Autor

Figura 12 – Gráfico comparativo modelo Experimental x Numérico do corpo de prova (CP1)



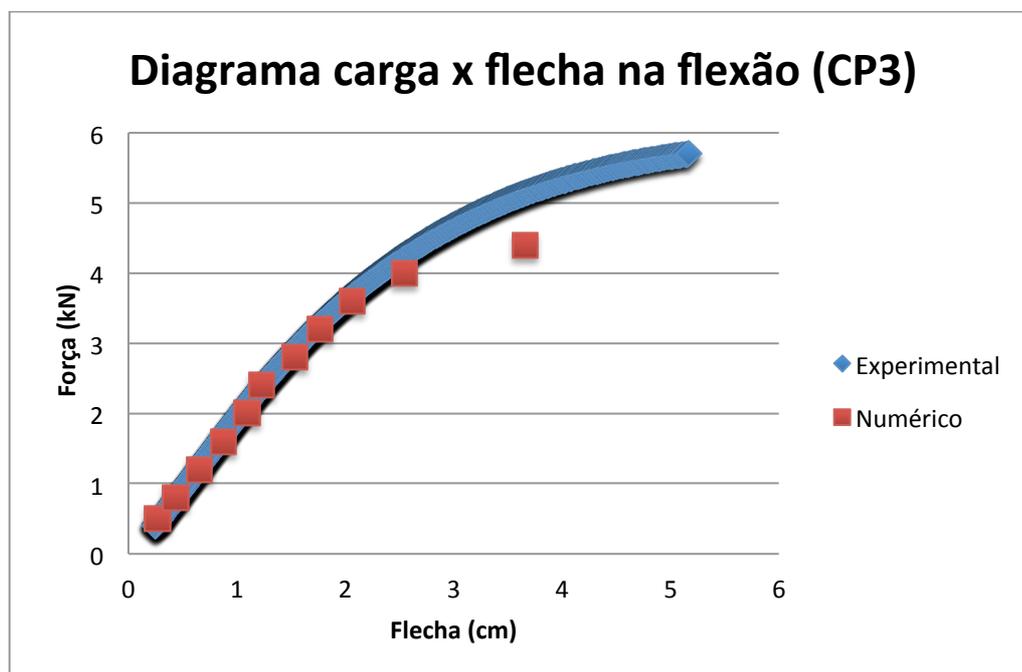
Fonte: Autor

Figura 13 – Gráfico comparativo modelo Experimental x Numérico do corpo de prova (CP2)



Fonte: Autor

Figura 14 – Gráfico comparativo modelo Experimental x Numérico do corpo de prova (CP3)

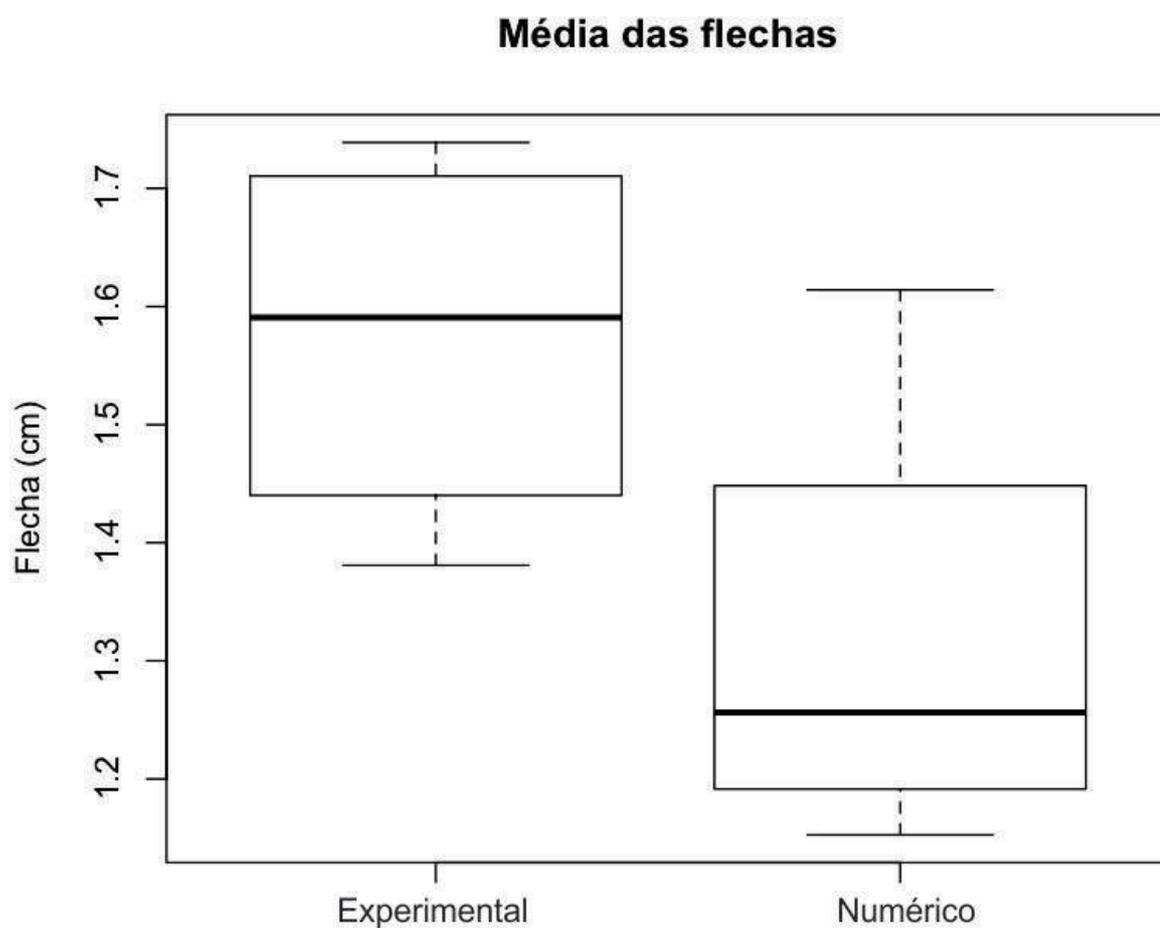


Fonte: Autor

Para comparação dos resultados utilizou-se do software R Statistical, primeiramente o teste de Shapiro-Wilk, para testar a normalidade dos resultados,

onde encontrou-se que os resultados pertencem à distribuição normal. Posteriormente, testou-se a homogeneidade das variâncias da curva experimental e numérica, confirmando que são homocedásticas. Por fim, realizou-se o Teste de T Student com nível de 95% de significância, que determina se há diferença entre as médias das flechas da viga rompida e o modelo proposto, o teste realizado foi do tipo bilateral e pareado, pois os dados do modelo numérico foram retirados do experimental. Acusando que não há diferença entre as médias com um p-value de 0,2506, ou seja, a modelagem numérica foi capaz de descrever o modelo real.

Figura 15 – Comparação das flechas obtidas no experimental e numérico

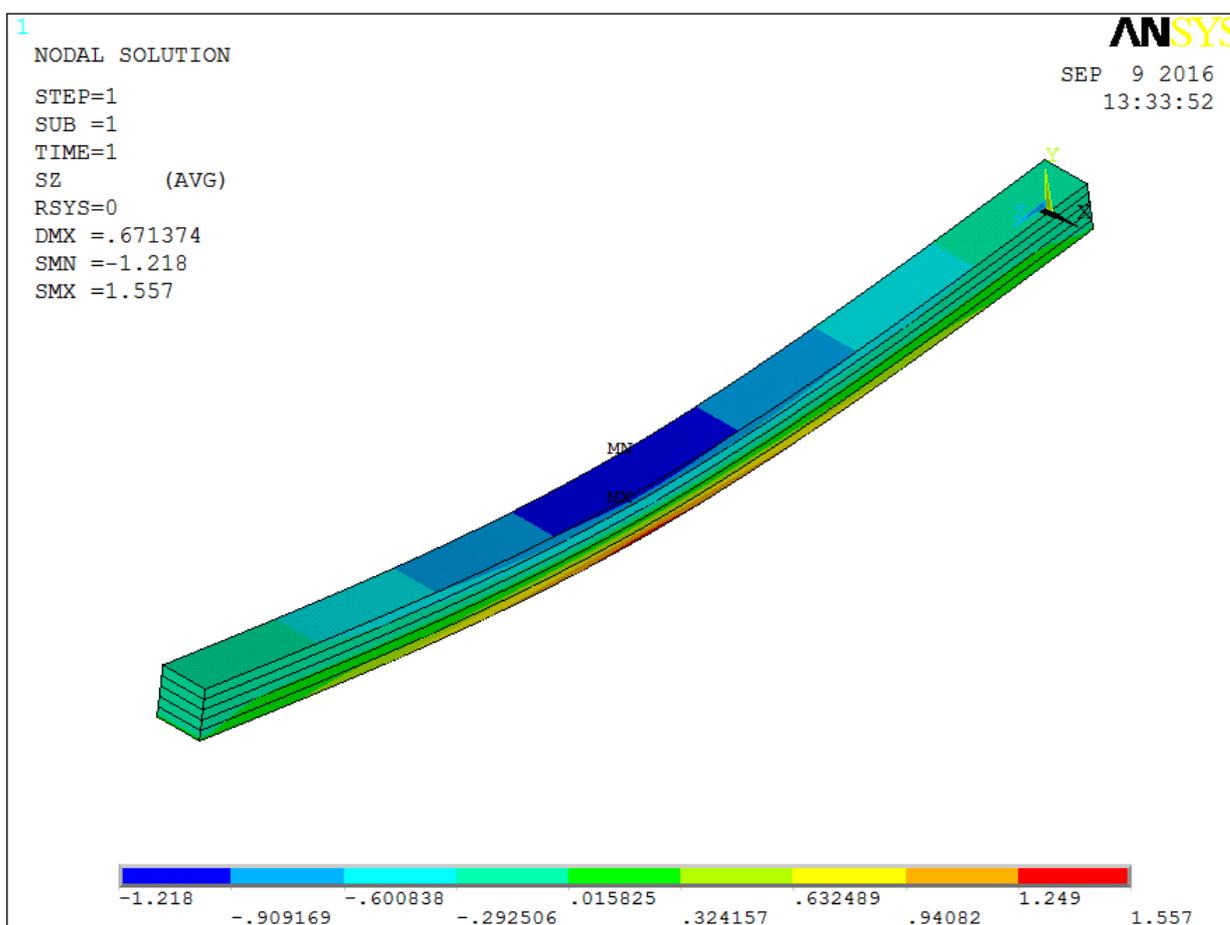


Fonte: Autor

## 5.2 Análise de tensões internas

A análise de tensões internas permitiu visualizar o comportamento das tensões por toda a peça com o critério de Von Misses. A imagem a seguir mostra as tensões ao longo do eixo Z:

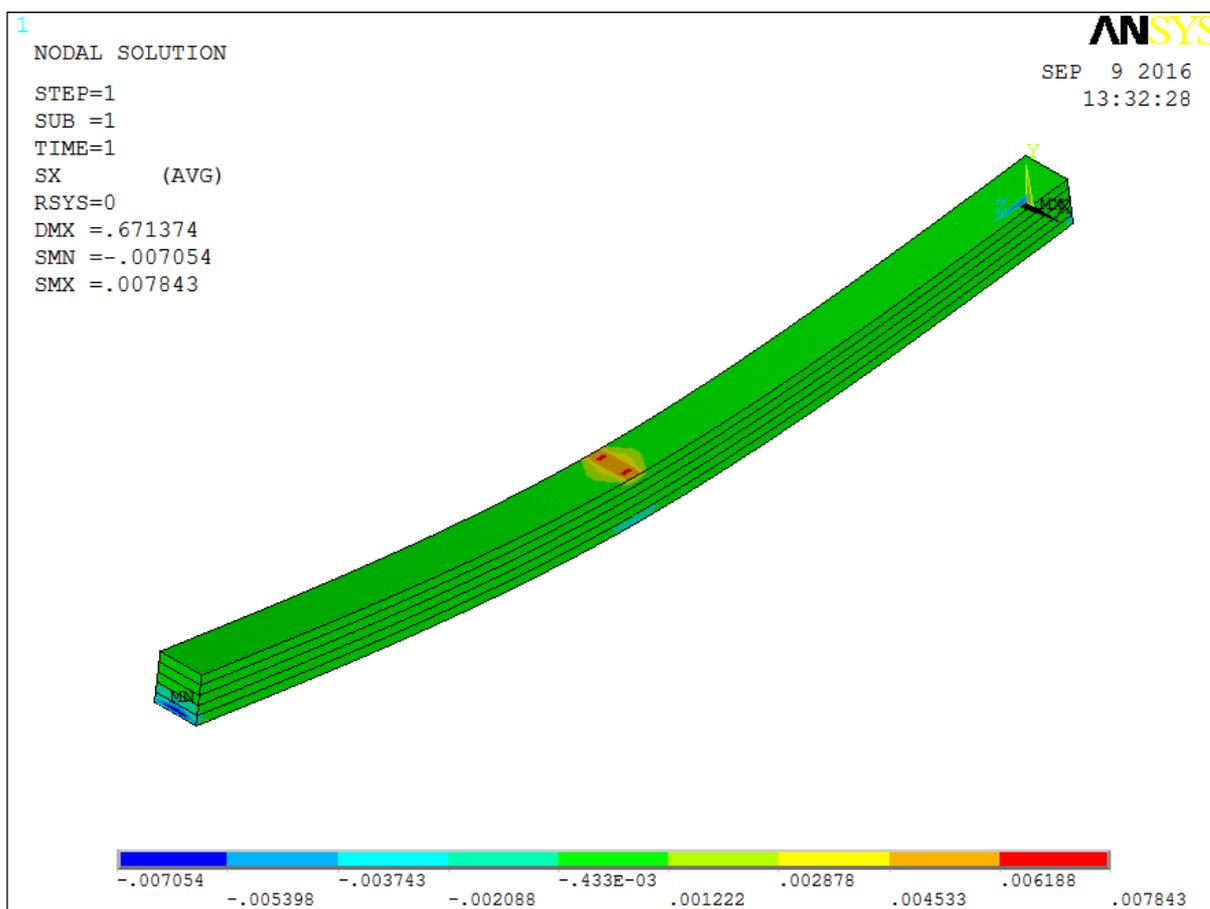
Figura 16 – Tensões internas ao longo do eixo Z (em kN/cm<sup>2</sup>)



Fonte: Autor

Observando o comportamento das tensões internas, onde as cores frias representam a compressão e cores quentes a tração, percebe-se que o local de aplicação de carga é onde mais sofre com a compressão (centro da viga), já a tração tem seu ponto de maior concentração no centro da peça, no entanto em seu inferior. Essa análise de tensões explica o fato da escolha da melhores lâminas estarem nessas regiões.

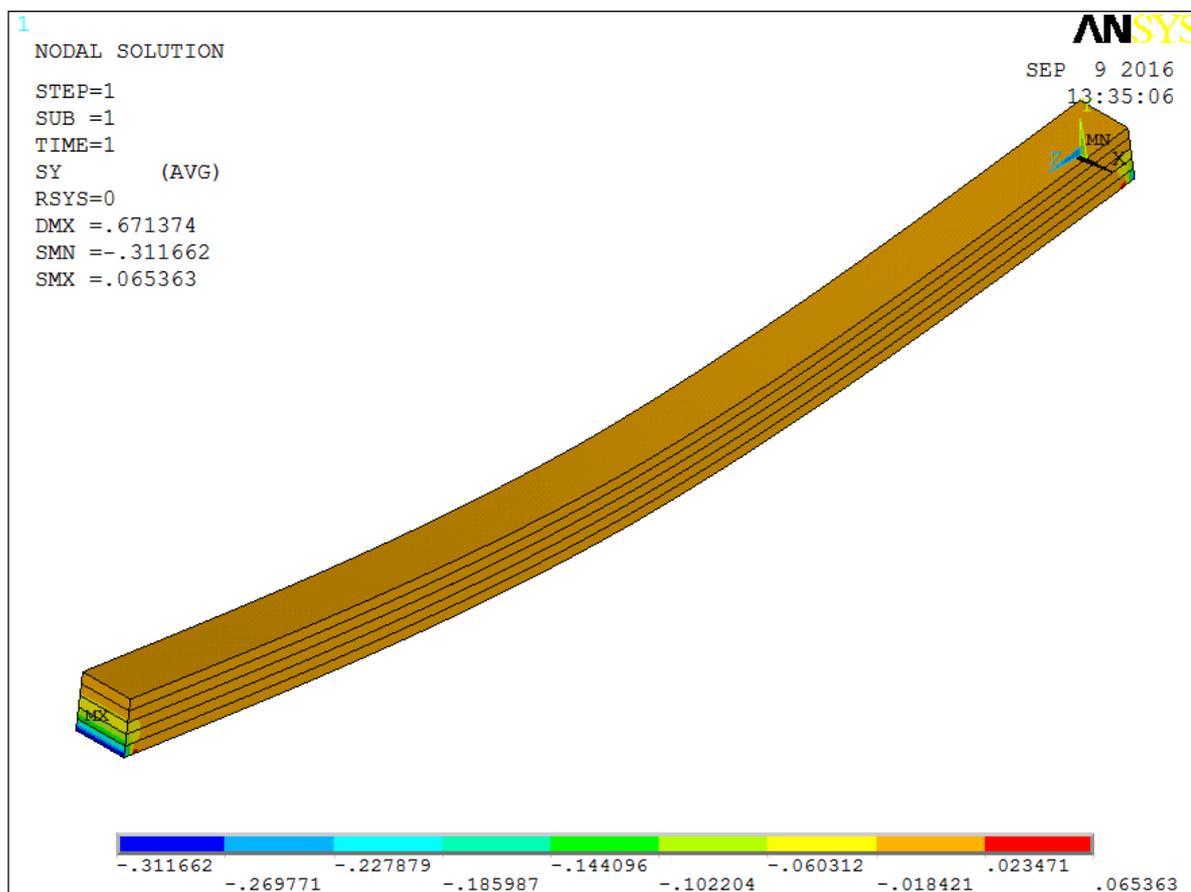
A imagem a seguir mostra as tensões ao longo do eixo X:

Figura 17 – Tensões internas ao longo do eixo X (em kN/cm<sup>2</sup>)

Fonte: Autor

Nesta figura percebe-se com maior facilidade o esmagamento na lâmina superior, causado onde a força se aplica. Este comportamento que acontece no ensaio experimental também, evidencia a qualidade do modelo e mostra a importância da lâmina com melhores propriedades estar localizada no topo, pois além de sofrer a maior compressão, também ocorre o esmagamento, diferentemente da parte inferior.

A próxima análise trata-se do comportamento das tensões ao longo do eixo Y:

Figura 18 – Tensões internas ao longo do eixo Y (em kN/cm<sup>2</sup>)

Fonte: Autor

Observando a imagem anterior percebe-se uma compressão acentuada na parte inferior da peça, em suas extremidades, causada pelos apoios da viga. Apoios estes que provocam uma força contrária a aplicação central, proporcional a mesma, pois a peça está estática.

## 6. CONCLUSÃO

A simulação numérica foi capaz de representar o comportamento da viga de Madeira Laminada Colada da espécie de *Pinus sp*, os resultados foram comprovados por meio de uma análise estatística. O modelo também foi capaz de prever a o comportamento elásticos e o início do comportamento plástico.

Também foi expresso as tensões internas na viga, apresentando as lâminas mais solicitadas nas extremidades da viga, onde a lâmina superior sofreu maior solicitação devido ao esforço de esmagamento, esta análise foi possível pois o software fornecia diagramas com as ações ao longo dos eixos X, Y e Z.

## 7. REFERÊNCIAS

AITC A190.1-2007 - **American National Standard, Structural Glued Laminated Timber** (2002 version available also).

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION , AITC 109:2007 – **Standard for Preservative Treatment of Structural Glued Laminated Timber.**

ANSYS versão 11.0 Documentation. ANSYS, Inc.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7190:1997 – **Projeto de Estruturas de Madeira.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7190:2013 – **Projeto de Estruturas de Madeira.**

ASTM E1876 - 09 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration

ASTM C1259 - 08e1 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration

ASTM C1548 - 02(2007) Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio of Refractory Materials by Impulse Excitation of Vibration

CALIL JUNIOR, Carlito; MOLINA, Julio Cesar. ESTRATÉGIA PARA MODELAGEM

NUMÉRICA DE SISTEMAS MISTOS CONSIDERANDO DIFERENTES MODELOS DE RUPTURA PARA OS MATERIAIS. **Revista Chilena de Ingeniería**, São Carlos, v. 17, n. 2, p.256-266, fev. 2009.

CALIL NETO, Carlito. **Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de Qualidade em Combinações Espécie-Adesivo-Tratamento-Preservativo**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CARPINTERIA. **A MADEIRA LAMINADA COLADA**. Disponível em: <[http://www.carpinteria.com.br/?page\\_id=1610](http://www.carpinteria.com.br/?page_id=1610)>. Acesso em: 01 set. 2016.

CARPINTERIA. **Shopping Fortaleza / Fotos**. Disponível em: <<http://www.carpinteria.com.br/?gallery=finalizado>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

CASAS, Estevam Barbosa de Las. **O Método dos Elementos Finitos**. Disponível em: <<http://cadtec.dees.ufmg.br/NucleoEAD/Forum/Arquivos/cap3.PDF>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

CHAHUD, E.; ROCCO LAHR, F. A. **Estudo de viabilidade de arcos de madeira lamina para estruturas principais de pontes**. São Carlos, 1983. Relatório de Iniciação Científica nº 1 a 4 apresentads ao LaMEM/ EESC/ USP.

CSA 0177-2006 (atualizada 2011) - **Qualification Code for Manufacturers of Structural Glued-Laminated Timber**.

DÉON, G. Manuel de préservation des bois en climat tropicaux. Nogent-Sur-Marne France: CTFT 1978. 111 p.

EN 386-2001 - **Glued laminated timber. Performance requirements and minimum production requirements**.

EUROPEAN STANDARD. **GLUED LAMITED TIMBER: EN 386**: Performance requirements and minimum production requirements. Berlin: Deutsche Norm, 2001.

FLORES, E. S.; RIOSECO, C. A.; MATAMAL, A. V. (2007). Calibración del modelo

de Hill modificado para el Pino Radiata cileno en conexiones de cizalle doble sometidas a compresión paralela. In: II JORNADAS CHILENAS DE ESTRUCTURAS DE MADERA, 2007, Santiago, Chile, 12 a 15 de Novembro.

FIORELLI, Juliano. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN EN 386**: Glued laminated timber Performance requirements and minimum production requirements. Berlin, 2002.

HILL, R. (1950). **The mathematical theory of plasticity**. V.1. London : Oxford University Press.

IBÁ. **Relatório Ibá 2016**. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2016\\_.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2016.

MASCIA, Nilson Tadeu; SIMONI, Renan Andréo. ANÁLISE DE CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA APLICADOS À MADEIRA. In: XV EBRAMEM – ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS EM MADEIRA, 13., 2012, Vitória. **Anais...** . Vitória: Ibramem, 2012. p. 1 - 10.

MENDONÇA, P. T. **Materiais Compostos e Estruturas – Sanduiche, Projeto e Análise**, 2005. p.632.

**MEMO**. Rio de Janeiro: Uff, v. 6, 2009. Disponível em: <<http://www.revistamemo.com.br/engenharia/simulacoes-computacionais-em-engenharia/>>. Acesso em: 19 ago. 2016.

MIOTTO, José Luiz. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

NCh2148.cR 2010 - (Atualizada 2013) - **Madera laminada encolada estructural - Requisitos, métodos de muestreo e inspección.**

SELBO, M. L.; FREAS, A. D. (1954). **Fabrication and Design of Glued Laminated Wood Structural Members.** USDA-FS-FPL, Washington, DC., 1954, 220p.

SIMIONI, A. **Sobre a viabilidade técnica da confecção de vigas laminadas com madeira juvenil de *Pinus elliottii* Engelm.** Curitiba, 1978. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná.

SONELASTIC. **Impulse Excitation Technique.** Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/sonelastic.html>>. Acesso em: 25 out. 2016.

SZABO, Barna; BABUSCA, Ivo. **Finite Element Analysis.** New York, Chichester, Brisbane, Toronto e Singapore: Wiley, 1991.

TANKUT, Nurgul; ZOR, Mustafa; TANKUT, Ali Naci. Finite Element Analysis of Wood Materials. **Drvna Industrija: Scientific journal of wood technology**, Zangreb, Croacia, v. 65, n. 2, p.159-171, abr. 2014.

TELES, Ricardo Faustino. **PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA PRODUZIDAS COM LOURO VERMELHO (*Sextonia rubra*).** 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4279/1/2009\\_RicardoFaustinoTeles.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4279/1/2009_RicardoFaustinoTeles.pdf)>. Acesso em: 01 nov. 2011.

ZANGIÁCOMO, André Luiz. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de Madeira Laminada Colada.** 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Usp, São Carlos, 2003.

## APÊNDICE A – Programação utilizada para a Viga 0

```

FINISH
/CLEAR
|*****|
MODELO 01: VIGA DE MADEIRA LAMINADA COLADA - Pinus sp
|*****|
! PROGRAMA UTILIZADO: ANSYS - VERSÃO 11.0
! MALHA GERADA NO PRPRIO ANSYS
! SIMULAÇÃO DE VIGA COMPLETA
! Seção transversal: b = 5 cm h = 5 cm e L = 105 cm
! Total de 5 lâminas (Espessura de cada uma das lâminas = 1 cm)
! Simulação de ensaio estático da viga
|*****|
! Dimensões em (cm)
! Forças aplicadas em (KN)
|*****|
! Parâmetros auxiliares:
! Material 01: Madeira (solid 45) - Isotrópico- Lamina 01 (superior)
! Material 02: Madeira (solid 45) - Isotrópico- Lamina 02
! Material 03: Madeira (solid 45) - Isotrópico- Lamina 03
! Material 04: Madeira (solid 45) - Isotrópico- Lamina 04
! Material 05: Madeira (solid 45) - Isotrópico- Lamina 05 (inferior)
|*****|
! Indicação de diferentes cores para os elementos
|*****|
/CONFIG,NRES,10000
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT
|*****|
! OPÇÕES GERAIS
|*****|

ALLSEL,ALL
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT
|*****|
! Pré-Processamento da estrutura:
|*****|
/CONFIG,NPROC,2 !PARA USAR OS 2 PROCESSADORES
|*****|
! Dados de entrada do material para cada uma das lâminas:
|*****|
! Lâmina 1 (superior) - (Pinus sp) (E=920 kN/cm^2)
|*****|
! Definindo do elemento solid45:
|*****|
/PREP7
ET,1,SOLID45

```

```

!*****!
! Criando a "Real Constant 1" para o elemento 1 (solid45) - (Não aceita real constant)
!*****!
R,1
!*****!
! Propriedades elásticas da madeira
!*****!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,92
MPDATA,EY,1,,92
MPDATA,EZ,1,,920
MPDATA,PRXY,1,,0.024
MPDATA,PRYZ,1,,0.024
MPDATA,PRXZ,1,,0.024
MPDATA,GXY,1,,46
MPDATA,GYZ,1,,46
MPDATA,GXZ,1,,46

!*****!
! Densidade
!*****!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,0.7E-005
!*****!
!Valores de entrada para o critério de Hill
!*****!
TBDE,ANIS,1
TB,ANIS,1,,0
TBMODIF,1,1,0.76
TBMODIF,1,2,0.76
TBMODIF,1,3,3.56
TBMODIF,2,1,0.41
TBMODIF,2,2,0.41
TBMODIF,2,3,27.06
TBMODIF,3,1,0.76
TBMODIF,3,2,0.76
TBMODIF,3,3,3.56
TBMODIF,4,1,0.41
TBMODIF,4,2,0.41
TBMODIF,4,3,27.06
TBMODIF,5,1,1.78
TBMODIF,5,2,1.78
TBMODIF,5,3,0.19
TBMODIF,6,1,1.94
TBMODIF,6,2,1.94
TBMODIF,6,3,0.00194

! Lâmina 2 - (Pinus sp) (E=713 kN/cm^2)
!*****!
! Definindo do elemento solid45:

```

```

|*****|
/PREP7
ET,2,SOLID45
|*****|
! Criando a "Real Constant 2 para o elemento 2 (solid45) - (Não aceita real constant)
|*****|
R,2
|*****|
! Propriedades elásticas da madeira
|*****|
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,71
MPDATA,EY,2,,71
MPDATA,EZ,2,,713
MPDATA,PRXY,2,,0.024
MPDATA,PRYZ,2,,0.024
MPDATA,PRXZ,2,,0.024
MPDATA,GXY,2,,35.65
MPDATA,GYZ,2,,35.65
MPDATA,GXZ,2,,35.65
|*****|
! Densidade
|*****|
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,0.7E-005
|*****|
!Valores de entrada para o critério de Hill
|*****|
TBDE,ANIS,2
TB,ANIS,2,,0
TBMODIF,1,1,0.59
TBMODIF,1,2,0.59
TBMODIF,1,3,2.76
TBMODIF,2,1,0.32
TBMODIF,2,2,0.32
TBMODIF,2,3,20.97
TBMODIF,3,1,0.59
TBMODIF,3,2,0.59
TBMODIF,3,3,2.76
TBMODIF,4,1,0.32
TBMODIF,4,2,0.32
TBMODIF,4,3,20.97
TBMODIF,5,1,1.38
TBMODIF,5,2,1.38
TBMODIF,5,3,0.15
TBMODIF,6,1,1.51
TBMODIF,6,2,1.51
TBMODIF,6,3,0.00151

! Lâmina 3- (Pinus sp) (E=975 kN/cm^2)

```

```

|*****|
! Definindo elemento solid45:
|*****|
/PREP7
ET,3,SOLID45
|*****|
! Criando a "Real Constant 3 para o elemento 3 (solid45) - (Não aceita real constant)
|*****|
R,3
|*****|
! Propriedades elásticas da madeira
|*****|
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,97
MPDATA,EY,3,,97
MPDATA,EZ,3,,975
MPDATA,PRXY,3,,0.024
MPDATA,PRYZ,3,,0.024
MPDATA,PRXZ,3,,0.024
MPDATA,GXY,3,,48.75
MPDATA,GYZ,3,,48.75
MPDATA,GXZ,3,,48.75
|*****|
! Densidade
|*****|
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,3,,0.7E-005
|*****|
!Valores de entrada para o critério de Hill
|*****|
TBDE,ANIS,3
TB,ANIS,3,,0
TBMODIF,1,1,0.81
TBMODIF,1,2,0.81
TBMODIF,1,3,3.77
TBMODIF,2,1,0.43
TBMODIF,2,2,0.43
TBMODIF,2,3,28.68
TBMODIF,3,1,0.81
TBMODIF,3,2,0.81
TBMODIF,3,3,3.77
TBMODIF,4,1,0.43
TBMODIF,4,2,0.43
TBMODIF,4,3,28.68
TBMODIF,5,1,1.89
TBMODIF,5,2,1.89
TBMODIF,5,3,0.21
TBMODIF,6,1,2.06
TBMODIF,6,2,2.06
TBMODIF,6,3,0.00206

```

```

! Lâmina 4 (superior) - (Pinus sp) (E=573 kN/cm^2)
|*****|
! Definindo elemento solid45:
|*****|
/PREP7
ET,4,SOLID45
|*****|
! Criando a "Real Constant 4 para o elemento 4 (solid45) - (Não aceita real constant)
|*****|
R,4
|*****|
! Propriedades elásticas da madeira
|*****|
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,57
MPDATA,EY,4,,57
MPDATA,EZ,4,,573
MPDATA,PRXY,4,,0.024
MPDATA,PRYZ,4,,0.024
MPDATA,PRXZ,4,,0.024
MPDATA,GXY,4,,28.65
MPDATA,GYZ,4,,28.65
MPDATA,GXZ,4,,28.65
|*****|
! Densidade
|*****|
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,4,,0.7E-005
|*****|
Valores de entrada para o critério de Hill
|*****|
TBDE,ANIS,4
TB,ANIS,4,,0
TBMODIF,1,1,0.48
TBMODIF,1,2,0.48
TBMODIF,1,3,2.22
TBMODIF,2,1,0.26
TBMODIF,2,2,0.26
TBMODIF,2,3,16.85
TBMODIF,3,1,0.48
TBMODIF,3,2,0.48
TBMODIF,3,3,2.22
TBMODIF,4,1,0.26
TBMODIF,4,2,0.26
TBMODIF,4,3,16.85
TBMODIF,5,1,1.11
TBMODIF,5,2,1.11
TBMODIF,5,3,0.12
TBMODIF,6,1,1.21

```

TBMODIF,6,2,1.21  
 TBMODIF,6,3,0.00121

! Lâmina 5 - (Pinus sp) (E=620 kN/cm<sup>2</sup>)

!\*\*\*\*\*!

! Definindo elemento solid45:

!\*\*\*\*\*!

/PREP7

ET,5,SOLID45

!\*\*\*\*\*!

! Criando a "Real Constant 5 para o elemento 5 (solid45) - (Nπo aceita real constant)

!\*\*\*\*\*!

R,5

!\*\*\*\*\*!

! Propriedades elásticas da madeira

!\*\*\*\*\*!

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,5,,62

MPDATA,EY,5,,62

MPDATA,EZ,5,,620

MPDATA,PRXY,5,,0.024

MPDATA,PRYZ,5,,0.024

MPDATA,PRXZ,5,,0.024

MPDATA,GXY,5,,31

MPDATA,GYZ,5,,31

MPDATA,GXZ,5,,31

!\*\*\*\*\*!

! Densidade

!\*\*\*\*\*!

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,DENS,5,,0.7E-005

!\*\*\*\*\*!

!Valores de entrada para o critério de Hill

!\*\*\*\*\*!

TBDE,ANIS,5

TB,ANIS,5,,0

TBMODIF,1,1,0.52

TBMODIF,1,2,0.52

TBMODIF,1,3,2.4

TBMODIF,2,1,0.28

TBMODIF,2,2,0.28

TBMODIF,2,3,18.24

TBMODIF,3,1,0.52

TBMODIF,3,2,0.52

TBMODIF,3,3,2.4

TBMODIF,4,1,0.28

TBMODIF,4,2,0.28

TBMODIF,4,3,18.24

TBMODIF,5,1,1.2

TBMODIF,5,2,1.2

```

TBMODIF,5,3,0.13
TBMODIF,6,1,1.31
TBMODIF,6,2,1.31
TBMODIF,6,3,0.00131
!*****!
! Construção e discretização da malha de elementos finitos
!*****!
! LÂMINA 01
!*****!
! Criação do bloco 01 - Lamina 01 (inferior) - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (0<y<1cm)
!*****!
BLOCK,0,5,0,1,0,105,
!*****!
! Atribuindo o material 1 ao volume criado para formar a lâmina 1
!*****!
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!*****!
! Dividindo a malha da lâmina 1 e transformando em volume
!*****!
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,2
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,1, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,11
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , , ,1
!*
/UI,MESH,OFF
CM,_Y,VOLU

```

```

VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
|*****|
! LÂMINA 02
|*****|
! Criação do bloco 02 - Lamina 02 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (1<y<2cm)
|*****|
BLOCK,0,5,1,2,0,105,
|*****|
! Atribuindo o material 02 ao volume criado para formar a lâmina 02
|*****|
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
|*****|
! Dividindo a malha da lâmina 2 e transformando em volume
|*****|
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,14
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,15
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,1, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,23
CM,_Y,LINE

```

```

LSEL, , , P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , ,1
!*
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , 2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE, _Y
CMDELE, _Y1
CMDELE, _Y2
!*
!*****!
! LÂMINA 03
!*****!
! Criação do bloco 02 - Lamina 03 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (2<y<3cm)
!*****!
BLOCK,0,5,2,3,0,105,
!*****!
! Atribuindo o material 03 ao volume criado para formar a lâmina 03
!*****!
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
TYPE, 3
MAT, 3
REAL, 3
ESYS, 0
SECNUM,
!*****!
! Dividindo a malha da lâmina 3 e transformando em volume
!*****!
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,35
CM,_Y,LINE
LSEL, , , P51X

```

```

CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,26
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,27
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,2, , , , ,1
!*
!*
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
!*****!
! LÂMINA 04
!*****!
! Criação do bloco 04 - Lamina 04 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (3<y<4cm)
!*****!
BLOCK,0,5,3,4,0,105,
!*****!
! Atribuindo o material 04 ao volume criado para formar a lâmina 03

```

```

|*****|
TYPE, 4
MAT, 4
REAL, 4
ESYS, 0
SECNUM,
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,9
FITEM,5,35
FITEM,5,47
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,47
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,38
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,39
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,2, , , ,1
!*
!*
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 4
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'

```

```

CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
!*****!
! LÂMINA 05
!*****!
! Criação do bloco 05 - Lamina 05 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (4<y<5cm)
!*****!
BLOCK,0,5,4,5,0,105,
!*****!
! Atribuindo o material 04 ao volume criado para formar a lâmina 03
!*****!
TYPE, 5
MAT, 5
REAL, 5
ESYS, 0
SECNUM,
!*****!
! Dividindo a malha da lâmina 5 e transformando em volume
!*****!
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,59
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,,105,,,,,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,50
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,,5,,,,,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,51
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y

```

```

!*
LESIZE,_Y1, , ,2, , , , ,1
!*
!*
/VIEW,1, , ,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 5
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
!*****!
!Definir merge no volume para que as lâminas tenham seus nós unidos
!*****!
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , , low
!*****!
! Vinculo dos apoios
!*****!
!Seleção dos nós das extremidades (z=105) - Impedimento das translações nos eixos x, y
!*****!
FLST,2,6,1,ORDE,4
FITEM,2,2
FITEM,2,10
FITEM,2,13
FITEM,2,-16
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY, , , ,

FLST,2,6,1,ORDE,2
FITEM,2,25
FITEM,2,-30
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY,UZ, , ,
!*****!

```

! Seleção dos nós da face superior e aplicando do carregamento correspondente na direção y

!\*\*\*\*\*!

! Carregamento no meio do vão ( $F = -1 \text{ kN/número de nós}$ ):  $F = -1/12 \text{ n} \leq s = 0,083 \text{ kN/n} \leq$

!\*\*\*\*\*!

Pontos de aplicação das cargas:  $z = 52,0 \text{ cm}$  e  $z = 53,0$  - faixa 1 (meio da peça)

!\*\*\*\*\*!

! Faixa 1 ( $52 < z < 53$ ):  $F = -1 \text{ kN}/12 \text{ n} \leq s = 0,083 \text{ kN/n} \leq$

!\*\*\*\*\*!

nselect,all

nselect,s,loc,z,52-0.001,53+0.001

nplot

\*GET,nn2,NODE,0,COUNT

NPLOT,ALL

F,ALL,Fy,-(CARGA APLICADA EM kN)/nn2,,,,,

ALLSEL,ALL

!\*\*\*\*\*! !Mostra

a viga com os carregamentos aplicados

!\*\*\*\*\*!

allsel,all

gplot

!

!\*\*\*\*\*!

! Resolver modelo

!\*\*\*\*\*!

FINISH

/SOL

!\*

ANTYPE,0

/STATUS,SOLU

SOLVE

FINISH