

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”**

**Determinação da carga crítica de instabilidade lateral no regime
linear elástico, em vigas de madeira laminada colada (MLC)**

Celso Antonio Abrantes

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção
em: Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2012**

Celso Antonio Abrantes
Engenheiro Civil

Determinação da carga crítica de instabilidade lateral no regime linear elástico, em vigas de madeira laminada colada (MLC)

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador
Prof Dr. **JOSÉ NIVALDO GARCIA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Abrantes, Celso Antonio

Determinação da carga crítica de instabilidade lateral no regime linear elástico, em vigas de madeira laminada colada (MLC) / Celso Antonio Abrantes.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.
219 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Adesivo 2. Flambagem 3. Laminados 4. Madeira 5. Vigas I. Título

CDD 674.835
A161d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

A minha esposa, Thais, a mulher com quem um dia ganhei o mundo e aos meus filhos Marcus Vinicius e Caio Augusto, pelo amor que se renova e acredita ser possível.

AGRADECIMENTOS

Fácil, porém difícil tarefa listar e não esquecer alguém, porém trata-se da mais nobre e humana atitude, agradecer, ser grato quando concretizamos sonhos, atingimos metas, sobrevivemos e nos mantemos “sãos” diante das adversidades que a vida nos coloca.

Agradeço a todos que não só nesta atividade, mas ao longo da vida, têm me presenteado com sua presença, companhia, amizade, carinho, incentivo e de uma forma específica, com relação à elaboração desta tese, às pessoas, profissionais e instituições que tornaram possível a elaboração da mesma:

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo, aos seus funcionários e profissionais administrativos e acadêmicos, em especial:

Ao Prof. Dr. José Nivaldo Garcia, meu orientador, por aceitar e me propor o desafio da pesquisa, do estudo constante, da busca incessante pelo novo, pelo desconhecido, pela informação, por ter compartilhado seu conhecimento e juntos aprendermos um pouco mais a cada dia de estudo e dedicação;

Ao Prof. Dr. Francides Gomes da Silva Junior, professor da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo, por me receber nesta universidade, inicialmente, como meu orientador, viabilizando assim meu ingresso neste curso de Doutorado;

Ao Prof. Dr. Carlos Tadeu dos Santos, professor de estatística da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo, por transmitir e consolidar conceitos estatísticos, sem os quais qualquer pesquisa e sua conclusão ficaria prejudicada em sua análise final;

À Catarina Germuts, secretária do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo, pela amizade e apoio;

À Eliana Maria Garcia e Silvia Maria Zinsly, que contribuíram revisando a padronização, formatação e diagramação desta tese, assegurando a qualidade final e normalização desta tese;

À Cláudia de Lima Nogueira, pesquisadora e doutoranda do Curso de Pós Graduação do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo, por sua amizade, troca de experiências e compartilhar conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Nilson Franco, que foi meu orientador de mestrado, no Instituto de Pesquisas Tecnológico de São Paulo - IPT, por ter se disponibilizado em doar seu conhecimento, seu tempo, sua amizade, incentivo e apoio;

À Universidade Presbiteriana Mackenzie, à Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, instituição da qual tenho o privilégio de ser membro docente, que viabilizou os ensaios através de seus laboratórios de simulações e ensaios físicos, a todos os seus funcionários e profissionais administrativos, laboratoristas e acadêmicos, em especial:

Ao Prof. Dr. Marcel Mendes, à Prof^a Dra. Leila Miranda Figueiredo, à Prof^a Dra. Roxana Maria Martinez Orrego, Prof. Msc Alcides Ferreira da Silva, à Prof^a Msc Carla Silva Campos, ao prof. Dr. João Virgílio Merigui, Prof. Dr. Roque Theóphilo Jr., Prof. Especialista Aiello Giuseppe Antonio Neto, todos docentes da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, pelo companheirismo, solidariedade, incentivo e confiança;

Ao Prof. Dr. Alfonso Pappalardo Junior, da Escola de Engenharia Mackenzie, pelo incentivo, apoio e contribuição na elaboração do modelo computacional com utilização de elementos finitos;

Ao Prof. Mestre Affonso Sérgio Fambrini, pela amizade, pela confiança e credibilidade, permitindo-me iniciar na carreira acadêmica, inicialmente como monitor, para posteriormente dividir com ele a cadeira de cálculo como professor ;

Ao Prof. Mestre Simão Prizskulnik, pelo incentivo e por viabilizar o uso dos Laboratórios de Materiais e de Ensaios de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie;

Aos Técnicos de Laboratório José Carlos Sobrinho, José Maria da Silva, Lázaro de Castro e Ailton Pereira de Souza pela amizade, colaboração, dedicação e planejamento, no sentido de viabilizar os ensaios de Laboratório;

Ao Eng^o José Alberto Correa Gonçalves Filho, proprietário da CG – Sistemas Construtivos pela dedicação, amizade e pronto atendimento na confecção das vigas empregadas nesta tese;

Ao Prof. Dr. Luiz de Oliveira Xavier, professor e ex-diretor da Escola de Engenharia da Faculdade de Tecnologia e Ciências Exatas da Universidade São Judas Tadeu , pelo incentivo e voto de confiança.

E de uma forma muito carinhosa agradeço à minha família, esposa, filhos, mãe, pai (in memoriam), sogra, sogro (in memoriam) cunhadas, sobrinha, amigos, que além de acreditar também souberam entender a ausência involuntária, os momentos roubados, as conversas postergadas, o silêncio, muitas vezes imposto pela necessidade da dedicação a esta tese.

Certamente me esqueci de muitos, impossível não acontecer, então que melhor forma de um contemplar mais amplo do que agradecer pela “vida”...

“Se um dia tiver que escolher entre o mundo e o amor ...
Lembre-se. Se escolher o mundo ficará sem o amor,
mas se escolher o amor, com ele você conquistará o mundo.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO	15
ABSTRACT	17
LISTA DE FIGURAS	19
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	23
LISTA DE TABELAS	27
LISTA DE GRÁFICOS.....	29
LISTA DE QUADROS	31
LISTA DE ABREVIATURAS.....	33
LISTA DE SÍMBOLOS	35
SISTEMAS DE UNIDADES	45
1 INTRODUÇÃO.....	47
1.1 Objetivos.....	48
1.1.1 Objetivo geral	48
1.1.2 Objetivo específico	48
1.2 Justificativa.....	48
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	49
2.1 Madeira Laminada Colada	49
2.1.1 Generalidades	49
2.1.2 Histórico	51
2.1.3 Vantagens	51
2.1.4 Fabricação - Etapas.....	53
2.1.4.1 Secagem das tábuas brutas	53
2.1.4.2 Classificação e seleção das peças de madeira para fabricação da MLC:	54
2.1.4.3 Execução das emendas de uma lâmina:	55
2.1.4.4 Colagem das lâminas.....	56
2.1.4.5 Acabamentos	57
2.2 Adesivos	58
2.2.1 Elementos envolvidos no processo de colagem da madeira.....	59
2.2.2 Classificação dos Adesivos	60
2.2.2.1 Termoplásticos	60
2.2.2.2 Termofixos ou Termorrígidos	60
2.2.3 Tipos de adesivos	61

2.2.3.1	Naturais.....	61
2.2.3.2	Animal	61
2.2.3.3	Vegetal.....	62
2.2.3.4	Resinas sintéticas	62
2.2.3.4.1	Fenol-formaldeído (PH).....	62
2.2.3.4.2	Resorcinol formaldeído (RF)	62
2.2.3.4.3	Uréia-formaldeído.....	63
2.2.3.4.4	Melamina formaldeído (MF)	63
2.2.3.4.5	Acetato de polivinila (PVA). (Cola Branca).....	63
2.2.3.4.6	Cola de poliuretano	63
2.2.3.4.7	Contato (borracha sintética e natural).....	63
2.2.3.4.8	Hot Melts - acetato de vinilo etileno (EVA).....	66
2.2.3.4.9	Resinas epóxi	67
2.2.3.4.10	Wonderbond –.....	68
2.2.3.4.11	Poliuretano de Óleo de Mamona.....	68
2.2.3.4.12	Purbond	68
2.2.4	Adesivos para a colagem de madeira com fins estruturais	68
2.3	Emendas.....	71
2.3.1	Tipos de Emendas	71
2.3.1.1	Emendas de topo.....	71
2.3.1.2	Emendas biseladas	71
2.3.1.3	Emendas finger joint (dentadas)	72
2.4	Instabilidade Lateral ou Flambagem Lateral com Torção (F.L.T.)	73
2.4.1	Deslocamentos oriundos de Instabilidade Lateral	73
2.4.2	Origem da flambagem lateral com torção (F.L.T.).....	74
2.4.3	Travamentos laterais para impedir o aparecimento da F.L.T.	75
2.4.3.1	Travamento Lateral Contínuo:.....	75
2.4.3.2	Travamentos Laterais Isolados	76
2.5	Dimensionamento à Flexão Simples Reta, Cisalhamento e Flecha, segundo a NBR 7190/97	77
2.5.1	Generalidades.....	77
2.5.2	Dimensionamento a Flexão Simples Reta em Estados Limites Últimos.....	77
2.5.2.1	A necessidade do emprego de um vão teórico nas vigas de madeira	77
2.5.2.2	Determinação do vão teórico	78

2.5.2.3	Máxima distância entre travamentos laterais isolados ($L1 \max$)	78
2.5.2.4	Condições de segurança a momento fletor em estados limites últimos	79
2.5.2.5	Tensões atuantes a flexão	79
2.5.2.6	Vigas com $L1 \leq L1 \max$	80
2.5.2.7	Vigas com $L1 > L1 \max$	80
2.5.3	Condições de segurança a cisalhamento longitudinal em vigas em estados limites últimos	80
2.5.4	Condições de segurança em estados limites de utilização	81
2.5.4.1	Estados limites de utilização aplicáveis às estruturas de madeira:	81
2.5.4.2	Critério de verificação de segurança:	81
2.5.4.3	Verificação das flechas nas vigas de madeira	82
2.6	Cargas Críticas de Instabilidade Lateral de vigas de acordo com a teoria da elasticidade (Timoshenko)	82
2.6.1	Generalidades	82
2.6.2	Cargas Críticas de Flambagem nas Vigas	83
2.7	Elementos finitos	86
2.7.1	Generalidades	86
2.7.2	Comparação entre os métodos analíticos clássicos e o método dos elementos finitos	87
2.7.3	Conceito Intuitivo do método dos elementos finitos	88
2.7.4	Simulações empregando o método dos elementos finitos	90
2.7.5	Princípio de cálculo e interligação entre elementos finitos	92
2.7.6	Tipos de elementos finitos	94
2.7.7	Função de Interpolação	95
2.7.7.1	Função polinomial	95
2.7.7.2	Coeficientes Binomiais:	96
2.7.7.3	Casos particulares:	96
2.7.7.4	Binomiais Complementares:	97
2.7.7.5	Triângulo de Pascal / Tartaglia:	97
2.7.7.6	Desenvolvimento de $(a + b)^n$	98
2.7.7.7	Teorema Binomial ou teorema de Newton	98
2.7.7.8	Função N de Interpolação empregada no programa ANSYS	98
2.7.8	Equações empregadas no método dos elementos finitos	99
2.7.9	Equações de compatibilidade	101

2.7.10	Equações constitutivas	101
2.7.11	Energias envolvidas	104
2.7.11.1	Energia de deformação	104
2.7.11.2	Energia potencial	105
2.7.12	Matriz de rigidez	105
3	METODOLOGIA	107
3.1	Fase I.....	107
3.1.1	Determinação das dimensões dos corpos de prova (vigas em escala natural).....	107
3.1.2	Desenvolvimento do Modelo Computacional.....	108
3.2	Fase II - Confecção das vigas em Madeira Laminada Colada (MLC);	112
3.3	Fase III – Preparação para o ensaio destrutivo	113
3.3.1	Desenvolvimento e fabricação de peças complementares específicas para a reprodução das condições de contorno pretendidas.....	113
3.3.2	Cutelo móvel: (Traquitana).....	113
3.3.3	Garfos de apoios adaptados a parafusos existentes na prensa	116
3.4	Fase IV: ensaios destrutivos:	118
3.4.1	Ensaio 1: Compressão paralela às fibras.....	118
3.4.2	Ensaio 2: Instabilidade lateral e Ruptura de vigas em escala natural.	118
3.4.3	Ensaio 3.....	121
3.4.4	Ensaio 4.....	122
3.5	Modelos numéricos e computacionais.....	122
3.6	Análise estatística:	122
4	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	123
4.1	Ensaio de compressão paralela às fibras em corpos de prova de madeira maciça usada na fabricação das lâminas da MLC utilizada no ensaio.....	123
4.1.1	Teoria empregada.....	123
4.1.2	Resultados de ensaios de compressão paralela às fibras em corpos de prova de madeira maciça (5 x 5 x 15)cm.....	124
4.1.3	Quadro Resumo do Cálculo das Tensões de Ruptura e Módulos de Elasticidade....	126
4.2	Ensaio de flexão em vigas na escala natural	127
4.2.1	Primeiro ensaio:	127
4.2.2	Segundo ensaio:	128
4.2.3	Resultados de Ensaio de Flexão em vigas com L= 300 cm	130

4.2.4	Cálculo dos Módulos de Elasticidade das Vigas de MLC a partir dos Resultados obtidos nos Ensaios de Laboratório.....	136
4.3	Ensaios de flexão em lâminas retiradas dos trechos intactos das vigas rompidas.....	137
4.3.1	Teoria Empregada.....	137
4.3.2	Deformações e Cargas de ruptura em Lâminas de Madeira Maciça retiradas dos trechos intactos das Vigas de MLC ensaiadas.....	138
4.3.3	Cálculo dos Módulos de Elasticidade das Lâminas das Vigas de MLC a partir dos Resultados obtidos nos Ensaios de Laboratório	141
4.4	Ensaios de cisalhamento em madeira maciça e em lâminas de cola, de corpos de prova retirados dos trechos intactos das vigas rompidas.....	142
4.4.1	Procedimentos	142
4.4.2	Cálculo das Tensões de Cisalhamento no Plano de cola Paralelo às Fibras, em Corpos de Prova retirados das Lâminas das Vigas.....	144
5	MODELOS NUMÉRICOS E COMPUTACIONAIS	145
5.1	Modelo de dimensionamento da NBR 7190/97 para vigas de seção maciça fletidas em torno do eixo de maior inércia.....	145
5.1.1	Generalidades	145
5.2	Modelo de Dimensionamento da Teoria da Elasticidade para Vigas de Seção Maciça Fletidas em Torno Do Eixo De Maior Inércia.....	150
5.2.1	Generalidades	150
5.2.2	Simulações :.....	150
5.2.2.1	Primeira simulação: dois travamentos contra a instabilidade lateral	150
5.2.2.2	Segunda simulação: três travamentos contra a instabilidade lateral	151
5.3	Modelo de dimensionamento por elementos finitos através do programa Ansys.....	154
5.3.1	Generalidades	154
5.4	Descrição do Modelo em Elementos Finitos Empregados neste Modelo	155
5.4.1	Condições de contorno utilizadas no Modelo em elementos finitos	157
5.4.2	Resultados do Processamento do Modelo em Elementos Finitos no ANSYS	157
6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	200
6.1	Generalidades	200
7	CONCLUSÕES.....	215
7.1	Comentários.....	215
7.1.1	Em relação à revisão bibliográfica	215
7.1.2	Em relação aos modelos de cálculo empregados, a partir da análise estatística,	215

7.2 Sugestão para complementação deste trabalho.....	216
REFERÊNCIAS.....	217

RESUMO

Determinação da carga crítica de instabilidade lateral no regime linear elástico, em vigas de madeira laminada colada (MLC)

O crescente aumento do uso de madeira laminada colada (MLC) em peças estruturais exige dos meios acadêmicos a pesquisa e desenvolvimento de teorias e rotinas de cálculo, que proporcionem suporte teórico para projetos estruturais que empreguem tal material. Nesta pesquisa foi desenvolvido em laboratório de modelos estruturais, um programa para o cálculo estrutural de vigas de madeira laminada colada (MLC), por meio do método dos elementos finitos para material ortotrópico e material isotrópico. Foram rompidas, em uma prensa universal, vigas de Madeira Laminada Colada (MLC), em escala natural, com e sem emendas nas lâminas, com a finalidade de comparação dos resultados assim obtidos, com os obtidos em modelos de cálculo existentes para vigas maciças de material isotrópico, como o método de cálculo da NBR 7190/97 e o método de cálculo da Teoria da Elasticidade (Timoshenko). Tais resultados também foram comparados com os resultados obtidos pelo método dos Elementos Finitos para materiais isotrópicos e ortotrópicos, acima citados. Para comparação entre as propriedades da madeira maciça e da madeira laminada colada, foram retirados corpos de prova das partes intactas das vigas sacrificadas, para realização de ensaios de cisalhamento na linha de cola e nas lâminas coladas, bem como corpos de prova para ensaios de flexão nas lâminas maciças das vigas de MLC. Para obtenção da tensão de ruptura a compressão paralela às fibras e do módulo de elasticidade, foram rompidos corpos de prova de 5cm x 5 cm x 15 cm. A comparação e análise dos resultados obtidos pelos procedimentos acima, levou à conclusão de que a madeira laminada colada (MLC), quando fabricada com cola estrutural, comporta-se como madeira maciça. Também foi possível observar que os modelos de cálculo empregando elementos finitos, ortotrópicos ou isotrópicos, reproduzem o comportamento de uma viga de madeira laminada colada. O modelo de cálculo da NBR 7190/97, pode ser empregado, mas apresenta resultados conservadores, a favor da segurança. Assim como o modelo de cálculo da Teoria da Elasticidade não deve ser empregado sem adaptação à madeira, pois apresentou resultados muito discrepantes. Os módulos de elasticidade da madeira maciça obtidos por ensaios de flexão e a partir do ensaio de compressão paralela às fibra, não representa o módulo de elasticidade representativo de uma viga de MLC. Da mesma forma a existência ou não de emendas nas lâminas, não altera os resultados.

Palavras-chave: Madeira Laminada Colada; Vigas em madeira laminada-colada; Lâminas; Flambagem; Adesivo

ABSTRACT

Determination of critical load of lateral instability in the linear elastic regime, on glued laminated wood beams

The increasing use of glued laminated timber in structural parts requires academic research and development of theories and calculation routines that provide theoretical support for structural designs employing such material. In this research was developed in the laboratory of structural models, a program for calculating structural glued laminated timber beams by the finite element method for orthotropic material and isotropic material. Were disrupted in a press universal beam of glued laminated wood in full scale with and without splices blades, for the purpose of comparison of the results thus obtained with those obtained in calculation models exist for solid beams material isotropic, as the method of calculating the NBR 7190/97 and the calculation method of the theory of elasticity (Timoshenko). These results were also compared with results obtained by the method of finite elements for isotropic and orthotropic materials, mentioned above. To compare the properties of solid wood and glued laminated timber, specimens were removed from intact parts of the broken beams for testing shear line glue and glued the layers, as well as specimens for bending tests blades massive beam. To obtain the tensile strength parallel to the compression of the fibers and elastic modulus were broken specimens with the dimensions 5 cm x 5 cm x 15 cm. The comparison and analysis of the results obtained by the above procedure led to the conclusion that the glued laminated wood when manufactured with structural adhesive, behaves as solid wood. It was also noted that the model calculations using finite elements, both isotropic and orthotropic represent the behavior of a beam of glued laminated wood. The calculation model of the NBR 7190/97, can be employed, but has conservative results, in favor of security. As the calculation model of the theory of elasticity should not be used without adjustment to the wood, because it showed very discrepant results. The modulus of elasticity of solid wood obtained by bending tests from test and compression parallel to the fiber, it is not the representative elastic modulus of a beam of glued laminated wood. Likewise, the presence or absence of amendments in the layers, does not change the results.

Keywords: Glued laminated timber; Glued laminated wood beams; laminate; Buckling; Adhesive

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação esquemática de uma peça de MLC	49
Figura 2 -	Tipos de emendas utilizadas em MLC.....	71
Figura 3 -	Perfis das emendas dentadas.....	72
Figura 4 -	Parâmetros geométricos da emenda dentada	72
Figura 5-	Instabilidade lateral ou flambagem lateral com torção (FLT)	73
Figura 6 –	Tensões atuantes, instabilidade lateral e travamento lateral esquemático de uma viga de madeira	74
Figura 7 -	Esquema do travamento lateral da região comprimida de uma viga de madeira.....	75
Figura 8 -	Travamento lateral contínuo da fibra comprimida de uma viga de madeira, através de piso de madeira parafusado.....	75
Figura 9 -	Travamento lateral contínuo da mesa comprimida de uma viga metálica, através de laje maciça com conectores	76
Figura 10 -	Travamento lateral isolado da mesa comprimida de uma viga de madeira, através de vigas de madeira secundárias pregadas ou parafusadas.....	76
Figura 11 -	Travamento lateral isolado da fibra comprimida de uma viga metálica, através de vigas metálicas secundárias	76
Figura 12 -	Vão teórico e vão real, em função do esmagamento do aparelho de apoio pela rotação de apoio da viga.....	77
Figura 13 -	Vãos da viga sobre os aparelhos de apoio e seção transversal	78
Figura 14 -	Esquema ilustrativo de seção transversal sujeita a flexão	79
Figura 15 -	Seção transversal de uma viga	80
Figura 16-	(a)Vista superior da curvaturas dos eixos defletidos de uma viga; (b)Vista lateral e (c)Seção transversal sofrendo instabilidade lateral	83
Figura 17 -	Curvaturas dos eixos defletidos de uma viga bi-apoiada, com carga no centróide, contraventada apenas nos apoios	84
Figura 18 -	Excentricidades de aplicação da carga P	84
Figura 19 -	Travamento na seção central.....	85
Figura 20 -	Conjunto contínuo de pontos com soluções calculadas pelos métodos analíticos clássicos	87
Figura 21 -	Conjunto de pontos discretos com soluções calculadas pelo método dos elementos finitos	87

Figura 22 -	Interpretação geométrica da integral $\int_a^b f(x) dx$	88
Figura 23 -	A área aproximada como soma de áreas de retângulos.....	89
Figura 24 -	Exemplos de aplicações de elementos finitos em estruturas lineares, bi-dimensionais e tri-dimensionais.....	90
Figura 25 -	Partes de uma estrutura a serem modelados através de elementos finitos	91
Figura 26 -	Idealização de sistemas discretos para a aplicação de elementos finitos	91
Figura 27 -	Peça sujeita a ações externas subdividida em elementos finitos, detalhe de um elemento finito e sua interação com os adjacentes.....	92
Figura 28 -	Viga em balanço modelada com elementos finitos.....	93
Figura 29 -	Curvas de isovalores de tensões numa viga em balanço, modelada por intermédio de elementos finitos.	93
Figura 30 -	Tipos de elementos finitos.....	94
Figura 31 -	Resgate da continuidade entre pontos discretos.....	95
Figura 32 -	Triângulo de Pascal.....	97
Figura 33 -	Valores dos coeficientes do Triângulo de Pascal.....	97
Figura 34 -	Expansão Polinomial em problemas bidimensionais (equações de superfície).....	99
Figura 35 -	Expansão polinomial em problemas tridimensionais, família tetraédrica.....	99
Figura 36 -	Componentes do vetor deslocamento \vec{U}_2 (após deformação).....	100
Figura 37 -	Distorção no plano xOy.....	101
Figura 38 -	Estado triplo de tensões.....	101
Figura 39 -	Estado duplo de tensões.....	102
Figura 40 -	Energia de deformação Ω por unidade de volume.....	104
Figura 41 -	Deslocamento U provocado por uma força externa F.....	105
Figura 42 -	Esquema de perfil U virado com a boca para baixo, apoiado sobre o rolete e recebendo a viga de madeira.....	116
Figura 43 -	Diagrama Tensão x Deformação da madeira.....	123
Figura 44 -	Retirada de corpos de prova de cisalhamento, de trechos intactos de vigas rompidas.....	142
Figura 45 -	Retirada de corpos de prova de cisalhamento, de trechos intactos de vigas rompidas Corpo de prova a cisalhamento na face colada, paralela às fibras.....	142
Figura 46 -	Excentricidade “a” do ponto de aplicação da carga.....	150
Figura 47 -	Esquema de simulação de carga no programa ANSYS.....	154

Figura 48 - Referencial	154
Figura 49 - Excentricidade “a” de aplicação da carga	154
Figura 50 - Obtenção dos resultados do Modelo Computacional.....	154
Figura 51 - Geometria do Elemento SOLID45.....	155
Figura 52 - Geometria do Elemento COMBIN39	155
Figura 53 - Tipos de Elementos Finitos e propriedades físicas empregadas nos modelos numéricos de vigas laminadas coladas.....	156
Figura 54 - Curvas Força x Deflexão para os elementos de interface	156
Figura 55 - Condições de contorno empregadas no modelo matemático.....	157

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 - Hall de entrada do Parlamento Europeu em Strasburgo	50
Ilustração 2- Complexo aquático Solemar em Bad Dürkheim – Alemanha.....	50
Ilustração 3 - Ponte-Peatonal-em-Zapallar Chile.....	50
Ilustração 4 - Pinus de reflorestamento remanescente de abate, plantado em terreno da empresa CG Sistemas Construtivos, localizado no Município de Suzano – SP	53
Ilustração 5 - Eucalipto verde recém desdobrado do tronco, aguardando para entrar na estufa de secagem no interior da fábrica. Ao fundo plantação de eucaliptos;	54
Ilustração 6 - Madeira de Pinus seca em estufa no interior da fábrica, a espera para retirada dos trechos com imperfeições.....	54
Ilustração 7 - Lâmina de Pinus sendo cortada para a retirada de um nó. Os pedaços remanescentes serão emendados para formar uma nova lâmina	55
Ilustração 8 - Trechos com defeitos retirados das lâminas de madeira.....	55
Ilustração 9 - Finger joint sendo laminado na extremidade de um pedaço de eucalipto	56
Ilustração 10 - Aplicação de cola (adesivo) na emenda, finger joint, pronto para prensagem	56
Ilustração 11 -As duas faces da emenda (finger joint), sendo prensadas uma contra a outra	56
Ilustração 12 -Lâminas de Eucalipto formadas por vários pedaços colados entre si.....	56
Ilustração 13 -Lâminas com cola para montar as vigas.....	56
Ilustração 14 - Prensa para fabricação das vigas.....	57
Ilustração 15 - Prensa com quatro vigas sendo executadas simultaneamente	57
Ilustração 16 - Máquina para execução de acabamento (plaina e lixa)	57
Ilustração 17 - acabamento com remoção de rebarbas através de serragem e lixamento.....	57
Ilustração 18 - Vigas em MLC, lixadas, prontas para o utilização	57
Ilustração 19 - Estação St. Moritz (Suíça 2001), composta por vigas laminadas coladas com 1C PUR	69
Ilustração 20 - Penetração dos adesivos PUR no lúmen celular da madeira	70
Ilustração 21 - Vigas recém chegadas ao Laboratório de Ensaios de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie	112

Ilustração 22 - Cutelo móvel (Traquitana) em fabricação	114
Ilustração 23 - Rolamento da traquitana instalado no seu eixo	114
Ilustração 24 - A "traquitana" pronta, sem o dispositivo de retenção lateral, instalada sobre a viga a ser ensaiada	114
Ilustração 25 - Detalhe do rolete móvel lateral e do cutelo fixo circular no sentido longitudinal da viga	114
Ilustração 26 - Vista frontal da traquitana e respectiva braçadeira, sem dispositivo de retenção lateral, sendo instalada abaixo da célula de carga na viga a ser ensaiada com $L_1=300$ cm.....	115
Ilustração 27 - Vista lateral da "traquitana" e respectiva braçadeira, sem dispositivo de retenção lateral, sendo instalada abaixo da célula de carga na viga a ser ensaiada com $L_1=300$ cm.....	115
Ilustração 28 - A traquitana com a respectiva braçadeira, instalada na viga a ser ensaiada com $L_1=150$ cm, recebendo o dispositivo de retenção lateral ("perfil cartola) abaixo da célula de carga	116
Ilustração 29 - Vista frontal do garfo de apoio: Observar parafusos nas extremidades adaptados aos existentes na maquina de ensaio	117
Ilustração 30 - Conjunto garfo móvel e respectiva mão francesa; perfil U de boca para baixo sobe o rolete da prensa	117
Ilustração 31 - Garfo totalmente solicitado, impedindo a torção da viga. Observar a deformação da viga por torção em relação ao cordão esticado.....	118
Ilustração 32 - Vista Global do garfo	118
Ilustração 33 - Momento do inicio da instabilidade lateral, com tendência de giro anti-horário no apoio.....	119
Ilustração 34 - Viga sujeita a instabilidade lateral. Detalhe da seção central torcida e seções dos apoios não.....	119
Ilustração 35 - Vista da viga durante ensaio de instabilidade lateral, apresentando torção na seção central	120
Ilustração 36 - Vista da seção central da viga com ($L_1=150$ cm), com marca de ruptura por compressão na porção superior, junto a marca do cutelo, e ruptura frágil por tração na porção inferior.....	121
Ilustração 37 - Trechos de lâminas retirados das partes intactas das vigas sem emendas nas lâminas	121
Ilustração 38 - Viga com três metros de vão sendo ensaiada na prensa.....	127

Ilustração 39 - Cutelo com rolamento lateral para permitir a instabilidade.....	128
Ilustração 40 - Primeiro ensaio: viga carregada em processo de instabilidade.....	128
Ilustração 41 - Dispositivo adaptado ao cutelo, para impedir deslocamento lateral.....	128
Ilustração 42 - Segundo ensaio: viga rompida sem sofrer instabilidade.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparação entre adesivos PUR & PVA.....	70
Tabela 2 -	Coefficiente de Correção β_m para $\gamma_f=1,4$ e $\beta_E=4$	78
Tabela 3 -	Coefficientes de Poisson de hardwoods, adotados para o eucalipto	109
Tabela 4 -	Cargas Críticas e Deformações - Corpos de Prova CP 01, CP 02, CP 03 e CP 04.....	124
Tabela 5 -	Cargas Críticas e Deformações Corpos de Prova CP 05, CP 06, CP 07 e CP 08.....	124
Tabela 6 -	Cargas Críticas e Deformações Corpos de Prova CP 09, CP 10 e CP 11	125
Tabela 7 -	Cargas Críticas e Deformações Resultados Corpos de Prova CP 12, CP 13. 125	
Tabela 8 -	Valores das Tensões de Ruptura e Módulos de Elasticidade Paralelos às Fibras dos CP 01 ao CP 13	126
Tabela 9 -	Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas).....	130
Tabela 10 -	Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas).....	131
Tabela 11 -	Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas).....	132
Tabela 12 -	Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas).....	133
Tabela 13 -	Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas).....	134
Tabela 14 -	Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas).....	135
Tabela 15 -	Resultado dos Módulos de Elasticidade das Vigas de MLC a partir dos Resultados obtidos nos Ensaio de Laboratório.....	136
Tabela 16 -	Valores de Carga de Ruptura e Deformações em Corpos de Prova de Flexão, de Lâminas de Madeira retiradas das Vigas Ensaeadas – CP 601 a CP 608.....	138
Tabela 17 -	Valores de Carga e Deformações em Corpos de Prova de Flexão, de Lâminas de Madeira retiradas das Vigas Ensaeadas – CP 501 a CP 508.....	139
Tabela 18 -	Valores de Carga e Deformações em Corpos de Prova de Flexão, de Lâminas de Madeira retiradas das Vigas Ensaeadas – CP 401 a CP 408.....	140
Tabela 19 -	Resultados dos Módulos de Elasticidade das Lâminas das Vigas de MLC a partir dos Resultados obtidos nos Ensaio de Laboratório	141
Tabela 20 -	Valores das Tensões de Cisalhamento no Plano de cola Paralelo às Fibras, em Corpos de Prova retirados das Lâminas das Vigas	144

Tabela 21 - Cargas Críticas pela NBR 7190/97, para $L_1 = 300\text{cm}$ (Distância entre travamentos Laterais).....	146
Tabela 22 - Cargas Críticas pela NBR 7190/97, para $L_1 = 150\text{cm}$ (Distância entre travamentos Laterais)	148
Tabela 23 - Cargas Críticas de Flambagem Lateral pela Teoria da Elasticidade (Timoshenko) – para $L_1 = 300\text{ cm}$	152
Tabela 24 - Cargas Críticas de Flambagem Lateral pela Teoria da Elasticidade (Timoshenko) – para $L_1 = 150\text{ cm}$	153
Tabela 25 - Considerações sobre o adotado nos ensaios	201

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	V-608—ISOTROPICO -grafico-UZ	158
Gráfico 2 -	V-607—ISOTROPICO - grafico-UZ	159
Gráfico 3 -	V-605—ISOTROPICO -grafico-UZ	161
Gráfico 4 -	V-604—ISOTROPICO -grafico-UZ	162
Gráfico 5 -	V-603—ISOTROPICO -grafico-UZ	163
Gráfico 6 -	V-602—ISOTROPICO graficoUZ	164
Gráfico 7 -	V-601—ISOTROPICO - grafico- UZ	165
Gráfico 8 -	V-508—ISOTROPICO -grafico-UZ	166
Gráfico 9 -	V-507—ISOTROPICO -grafico-UZ	167
Gráfico 10 -	V-505—ISOTROPICO -grafico-UZ	169
Gráfico 11 -	V-503—ISOTROPICO -grafico-UZ	171
Gráfico 12 -	V-502—ISOTROPICO -grafico-UZ	172
Gráfico 13 -	V-403--ISOTROPICO-grafico-UZ	177
Gráfico 14 -	V-401—ISOTROPICO grafico-UZ	178
Gráfico 15 -	V-608—ORTOTROPICO grafico-UZ	179
Gráfico 16 -	V-607—ORTOTROPICO grafico-UZ	180
Gráfico 17 -	V-606—ORTOTROPICO grafico-UZ	181
Gráfico 18 -	V-605—ORTOTROPICO grafico-UZ	182
Gráfico 19 -	V-604—ORTOTROPICO grafico-UZ	183
Gráfico 20 -	V-603—ORTOTROPICO grafico-UZ	184
Gráfico 21 -	V-602—ORTOTROPICO grafico-UZ	185
Gráfico 22 -	V-601—ORTOTROPICO grafico-UZ	186
Gráfico 23 -	V-508—ORTOTROPICO grafico-UZ	187
Gráfico 24 -	V-507—ORTOTROPICO grafico-UZ	188
Gráfico 25 -	V-506—ORTOTROPICO grafico-UZ	189
Gráfico 26 -	V-505—ORTOTROPICO grafico-UZ	190
Gráfico 27 -	V-503—ORTOTROPICO grafico-UZ	192
Gráfico 28 -	V-502—ORTOTROPICO grafico-UZ	193
Gráfico 29 -	V-501—ORTOTROPICO grafico-UZ	194
Gráfico 30 -	V-407—ORTOTROPICO grafico-UZ	195
Gráfico 31 -	V-405—ORTOTROPICO grafico-UZ	197

Gráfico 32 - **V-403—ORTOTROPICO grafico-UZ**198
Gráfico 33 - **V-401—ORTOTROPICO grafico-UZ**199

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-	Resposta ANSYS -Viga com ruptura por compressão na borda superior (ver escala de cores).....	110
Quadro 2 -	Resposta ANSYS: viga com instabilidade lateral, vista lateral para $L_1 = 300$ cm.	110
Quadro 3-	Quadro resposta ANSYS: viga com instabilidade lateral para $L_1 = 300$ cm, vista superior.....	111
Quadro 4-	Quadro resposta ANSYS: viga com instabilidade lateral para $L_1 = 150$ cm, vista lateral.....	111
Quadro 5 -	Comparativo Ruptura por Cisalhamento na Cola x Ruptura por Cisalhamento na Madeira	202
Quadro 6 -	Comparativo Módulo de Elasticidade - VIGA MLC x VIGA MACIÇA.....	203
Quadro 7 -	Comparativo Módulo de Elasticidade - VIGA MLC x VIGA MACIÇA - sem emendas nas lâminas	204
Quadro 8 -	Comparativo Módulo de Elasticidade - Viga MLC - com emenda x sem emenda	205
Quadro 9 -	Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - VIGA MLC com emenda x VIGA MLC sem emenda.....	206
Quadro 10 -	Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - Ensaio Destrutivo x Modelo da NBR 7190/97	207
Quadro 11 -	Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - Ensaio Destrutivo x Modelo da teoria da Elasticidade.....	208
Quadro 12 -	Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - Ensaio Destrutivo x Modelo dos Elementos Finitos Ortotrópico.....	209
Quadro 13 -	Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - Ensaio Destrutivo x Modelo dos Elementos Finitos Isotrópico	210
Quadro 14 -	Comparativo Modelo Elementos Finitos - Isotrópico x Ortotrópico	211
Quadro 15 -	Resumo para Comparativo das cargas Críticas de Flambagem pelo Método Destrutivo e pelos Métodos Matemáticos.....	212
Quadro 16 -	Teste ANOVA para comparação entre os resultados de Cargas Críticas obtidos entre Ensaio Destrutivo x Modelo NBR 7190/97 x Modelo da Teoria da Elasticidade x Modelo de Elementos Finitos Ortotrópico x Modelo Elementos Finitos Isotrópico.....	213

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSYS	Programa para cálculo estrutural baseado em elementos finitos
CE	Com emendas
CP	Corpo de prova
CG	Centro de gravidade
DP	Densidade de probabilidade
EVA	Acetato de vinilo etileno
FLT	Flambagem Lateral com Torção.
HP	Hewlett Packard
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
MF	Melanina formaldeído
MKS	Sistema de unidades (metro, kilograma-força, segundo)
MLC	Madeira laminada colada
NB	Norma Brasileira
NBR	Norma Brasileira Registrada
OSB	Oriented Strand Board .
PB5	Padronização Brasileira 5
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
PVA	Acetato de polivinila
RF	Resorcinol-formaldeído
SE	Sem emendas
SI	– Sistema Internacional
STRESS	– Antigo programa de cálculo estrutural
PH	Fenol-formoldeído
Lcc	Líquido da casca da castanha de caju
EVA	Acetato de vinil etileno
EPI	
PUR	Poliuretano reativo

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras minúsculas romanas

- a distância livre entre peças de coluna múltipla; profundidade do encaixe; flecha; distância extremo de integração; número natural.
- a_1 Distância entre eixos de peças de colunas múltiplas.
- arctg arco tangente.
- b Largura da seção retangular; largura de uma mesa em T, duplo T ou caixão; extremo de integração; número natural.
- b_e Largura efetiva da mesa comprimida de uma viga.
- c Compressão; constante de integração; excentricidade; extremo de integração.
- cm Centímetro.
- cm^2 Centímetro quadrado.
- cm^3 Centímetro cúbico.
- cos Cosseno
- d de cálculo; diâmetro; diâmetro do eixo de pino, parafuso ou prego, diferencial.
- d' Diâmetro do furo para parafuso.
- e Embutimento; excentricidade de carga referida ao centro de gravidade da seção.
- e_1 Excentricidade de primeira ordem.
- e_a Excentricidade acidental.
- e_c Excentricidade suplementar de primeira ordem, devida a fluência da madeira.
- e_i Excentricidade inicial.
- f Tensão resistente média.
- f_{c0} Tensão resistente média à compressão paralela às fibras.
- f_{c0K} Tensão resistente característica à compressão paralela às fibras.
- f'_{c0} Tensão resistente média à compressão paralela às fibras, com flambagem.
- f_{c90} Tensão resistente média à compressão normal às fibras.
- f_{c90K} Tensão resistente característica à compressão normal às fibras.
- f_d Tensão resistente de projeto.
- f_K Tensão resistente característica.
- f_M Tensão resistente média à tração, medida no ensaio de flexão de peça retangular admitindo diagrama linear de tensões.
- f Função; tensão.
- f_m Tensão média

f_t	Tensão resistente média à tração, determinada no ensaio de tração simples.
f_{t0}	Tensão resistente média à tração paralela às fibras.
f_{t0K}	Tensão resistente característica à tração paralela às fibras.
f_{t90}	Tensão resistente média à tração normal às fibras.
f_{t90}	Tensão resistente característica à tração normal às fibras.
f_{el}	Tensão limite de elasticidade ou proporcionalidade do material.
$f_{U\%}$	Tensão resistente média, na porcentagem U de umidade de equilíbrio da madeira.
f_{v0}	Tensão resistente média a cisalhamento paralelo às fibras.
f_{v0}	Tensão resistente característica a cisalhamento paralelo às fibras.
f_W	Tensão resistente genérica da madeira.
f_{WK}	Tensão resistente característica genérica da madeira.
f_{Wm}	Tensão resistente média genérica da madeira.
f_{12}	Tensão resistente média, nas condições padrão de umidade ($U_{eq}=12\%$).
g	Carga permanente uniformemente distribuída; aceleração da gravidade.
h	Altura total da seção retangular de uma seção.
h'	Menor altura da seção transversal de uma viga com entalhe.
h_1	Altura da peça individual componente de haste múltipla.
h_f	Espessura da mesa (flange) de uma viga T.
i	Raio de giração; número da ação permanente considerada.
\tilde{i}	Versor direção do eixo Ox.
i_1	Raio de giração da peça individual.
inf	Inferior.
j	Número da ação variável considerada.
\tilde{j}	Versor direção do eixo Oy
k	Característico; coeficiente.
\tilde{k}	Versor direção do eixo Oz.
kg	kilograma.
kgf	kilograma-força.
K_{mod}	Coefficiente de modificação de resistência;
l	Comprimento; vão teórico; distância entre pontos de apoio lateral de vigas.
l'	Vão livre de uma viga.
l_0	Distância horizontal entre os centros dos apoios de uma viga.
l_1	Comprimento livre de uma peça individual componente de haste múltipla.

l_f	Comprimento de flambagem de uma haste.
l_n	Logarítmo neperiano.
m	Médio; metro; número máximo de ações permanentes; número de espaços entre espaçadores de uma coluna composta.
m^2	Metro quadrado.
m^3	Metro cúbico.
mod	Modificado
n	Número de corpos de prova ensaiados; número máximo de ações variáveis, modos superiores de flambagem.
p	Carga distribuída.
pol	Polegada
q	Carga variável.
r	Raio; raio de curvatura; reta.
sen	seno
sup	Superior
t	Tempo; tração; espessura.
tg	Tangente
u	Deslocamento lateral; deslocamento nodal; flecha; abcissa no sistema local de elementos finitos.
v	Cisalhamento; deflexão lateral da coluna, solução geral da equação diferencial deslocamento nodal.
\bar{x}	Média.
x	Coordenada (abcissa); eixo; valor da solicitação ou da resistência; distância do centro do apoio a uma seção da viga.
x, y,z	Coordenadas.
x_G, y_G	Coordenadas do centro de gravidade.
y	Eixo; coordenada (ordenada); função.
y_{sup}	Distância da borda superior à linha neutra.
y_{c1}	Distância da borda comprimida à linha neutra.
y_{t2}	Distância da borda tracionada à linha neutra.
y_{inf}	Distância da borda inferior à linha neutra.
z	Eixo; coordenada (cota), braço de alavanca interno de uma viga.

Letras maiúsculas romanas

- A** Área
- A_{liq} Área líquida da seção transversal.
- A_W Área bruta da seção transversal.
- B** Base ortonormal ; matriz
- B^T Matriz transposta
- C** Classe de resistência da madeira; coluna.
- C** Matriz usada no método dos elementos finitos que relaciona módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson.
- C^{iso} Matriz das características isotrópicas usada nos elementos finitos.
- C^{orto} Matriz das características ortotrópicas usada nos elementos finitos.
- C^{-1} Matriz inversa da matriz **C**.
- $^{\circ}C$ Grau Celsius.
- D** Matriz constitutiva usada no método dos elementos finitos, inversa de **C**.
- E** Módulo de elasticidade; valor médio.
- E_c Módulo de elasticidade médio determinado em ensaios de compressão paralela às fibras.
- E_{c0} Módulo de elasticidade médio determinado em ensaios de compressão paralela às fibras.
- E_{c0ef} Módulo de elasticidade efetivo determinado em ensaios de compressão paralela às fibras.
- E_{c90} Módulo de elasticidade médio determinado em ensaios de compressão perpendicular às fibras.
- E_{c90ef} Módulo de elasticidade efetivo determinado em ensaios de compressão perpendicular às fibras.
- E_L Módulo de elasticidade na direção longitudinal.
- E_m Valor médio do módulo de elasticidade, determinado no ensaio de compressão paralela às fibras.
- E_M Módulo de elasticidade aparente determinado no ensaio de flexão.
- E_R Módulo de elasticidade na direção radial.
- E_T Módulo de elasticidade na direção tangencial.
- $E_{U\%}$ Módulo de elasticidade a U% de umidade de equilíbrio da madeira.
- E_{12} Módulo de elasticidade nas condições padrão de umidade (12% de umidade de equilíbrio da madeira)

F	Força.
F	Vetor carregamento
Fd	Combinação de ações de cálculo.
F _E	Carga crítica.
F _k	Valor característico da ação.
F _x	Força na direção do eixo x.
F _y	Força na direção do eixo y.
F _z	Força na direção do eixo z.
G	Ação permanente; módulo de elasticidade transversal.
G _{LR}	Módulo de elasticidade transversal na direção longitudinal-radial.
G _{LT}	Módulo de elasticidade transversal na direção longitudinal-tangencial.
G _{RT}	Módulo de elasticidade transversal na direção radial-tangencial.
I	Momento de inércia da seção.
I _x	Momento de inércia da seção, em relação ao eixo x-x.
I _y	Momento de inércia da seção, em relação ao eixo y-y.
I _{xef}	Momento de inércia efetivo da seção, em relação ao eixo x-x.
I _{yef}	Momento de inércia efetivo da seção, em relação ao eixo y-y.
I _ξ	Momento de inércia em relação ao eixo ξ.
I _η	Momento de inércia em relação ao eixo η.
J	Momento de inércia.
K	Característico; parâmetro de flambagem.
K	Matriz de rigidez.
K _M	Coefficiente de correção
K _{mod}	Coefficiente de modificação
K _x	Parâmetro de flambagem em relação ao plano x-x.
K _y	Parâmetro de flambagem em relação ao plano y-y.
L	Direção longitudinal; comprimento; comprimento efetivo da barra comprimida medido entre dois pontos contraventados; vão teórico de uma viga.
L ₀	Comprimento teórico de referência
L ₁	Distância entre travamentos laterais.
LN	Linha neutra.
L _{1max}	Distância máxima entre travamentos laterais, a partir da qual ocorre flambagem .
M	Momento fletor; mega.
MPa	Mega Pascal.

$(M_0)_{cr}$	Momento crítico de flambagem lateral.
M_d	Momento fletor de cálculo.
M_s	Momento estático.
M_ξ	Momento fletor em torno do eixo ξ .
M_η	Momento fletor em torno do eixo η .
M_T	Momento de torção.
N	Função de interpolação; força axial de compressão
N_e	Carga crítica de flambagem por flexão.
N_{ex}	Carga crítica de flambagem por flexão, em torno do eixo x .
N_{ey}	Carga crítica de flambagem por flexão, em torno do eixo y .
O	Origem do sistema coordenado.
P	Carga axial de compressão; Carga concentrada perpendicular ao eixo de uma viga; ponto.
P_{cr}	Carga concentrada crítica de flambagem lateral.
P_{rup}	Carga de ruptura a compressão.
Q	Ação variável.
R	Resistência; direção radial; razão.
R_d	Valor de cálculo da resistência.
R_m	Valor médio da resistência.
R_n	Valor nominal da resistência.
S	Solicitação.
S_d	Valor de cálculo da solicitação.
S_m	Valor médio da solicitação.
S_n	Valor nominal da solicitação.
T	Direção tangencial; esforço de tração.
U	Umidade; flecha; deformação; deslocamento nodal.
\mathbf{U}	Vetor deslocamento; matriz.
\mathbf{U}^T	Matriz transposta.
U_{amb}	Umidade ambiente.
U_{ef}	Flecha efetiva.
U_G	Flecha devida a carga permanente.
U_Q	Flecha devida a carga variável.
U_0	Contra flecha.
U_1	Ponto discreto

U_2	Ponto discreto
U_3	Ponto discreto
U_{eq}	Umidade de equilíbrio da madeira.
V	Força cortante.
V_x	Coefficiente de variação.
W	Módulo resistente elástico; madeira.
W_x	Módulo resistente elástico em relação ao eixo x-x.
W_{xc}	Módulo resistente elástico em relação ao eixo x-x, referente a região comprimida da seção.
W_c	Módulo resistente elástico em relação ao eixo x-x, referente a região comprimida da seção.
W_{xt}	Módulo resistente elástico em relação ao eixo x-x, referente a região tracionada da seção.
W_t	Módulo resistente elástico em relação ao eixo x-x, referente a região tracionada da seção.
W_y	Módulo resistente elástico em relação ao eixo y-y.
X	Característica mecânica genérica.
X_d	Característica mecânica genérica de cálculo.
X_{inf}	Valor inferior da característica mecânica genérica, na curva de Gauss.
X_K	Valor característico da característica mecânica genérica..
X_m	Valor médio da característica mecânica genérica, na curva de Gauss.
X_{sup}	Valor superior da característica mecânica genérica, na curva de Gauss.

Letras minúsculas gregas

α	Ângulo; coeficiente; direção das fibras da madeira; coeficiente de dilatação linear; plano de flambagem genérico; fator de equivalência.
β	Ângulo; coeficiente; coeficiente de segurança ou índice de segurança; razão; fator de equivalência.
β_m	Coefficiente de correção.
β_E	Coefficiente de correção.
∂	Derivada parcial direcional.
γ	Coefficiente de segurança; distorção.
γ_f	Coefficiente de ponderação das ações .

γ_g	Coefficiente de ponderação das ações permanentes.
γ_m	Coefficiente de ponderação das resistências dos materiais.
γ_q	Coefficiente de ponderação das ações variáveis.
γ_s	Coefficiente de minoração da resistência do aço.
γ_w	Coefficiente de ponderação da resistência da madeira, em estados limites.
γ_{xz}	Distorção no plano xz.
γ_{xy}	Distorção no plano xy.
γ_{yz}	Distorção no plano yz.
δ	Coefficiente de variação para resistência a solicitações normais.
ε	Deformação normal específica.
$\boldsymbol{\varepsilon}^T$	Matriz transposta.; matriz tensor de deformação.
ε_x	Deformação específica na direção do eixo x.
ε_y	Deformação específica na direção do eixo y.
ε_z	Deformação específica na direção do eixo z.
ε_L	Deformação específica na direção longitudinal.
ε_R	Deformação específica na direção radial.
ε_T	Deformação específica na direção tangencial.
ε_{LR}	Deformação específica na direção longitudinal-radial.
ε_{LT}	Deformação específica na direção longitudinal-tangencial.
ε_{RT}	Deformação específica na direção radial-tangencial.
θ	Rotação; ângulo; coeficiente de segurança da resistência nominal.
λ	Índice de esbeltez.
λ_x	Índice de esbeltez em relação ao eixo x-x.
λ_y	Índice de esbeltez em relação ao eixo y-y.
μ	Média de uma população.
η	Ordenada no sistema coordenado local.
ν	Coefficiente de Poisson.
ρ	Massa específica (densidade).
ρ_{ap}	Massa específica aparente.
ρ_{bas}	Densidade básica.
$\bar{\sigma}$	Tensão admissível.
σ	Tensão normal.

σ_x	Desvio padrão de uma população; tensão na direção do eixo x.
σ_y	Tensão na direção do eixo y.
σ_n	Tensão nominal atuante, devida a solitação nominal S_n .
σ_x^2	Variância.
σ_{cr}	Tensão crítica de compressão correspondente a instabilidade lateral.
σ^T	Matriz tensor de tensões.
σ_L	Tensão na direção longitudinal.
σ_R	Tensão na direção radial.
σ_T	Tensão na direção tangencial.
σ_{LR}	Tensão na direção longitudinal-radial.
σ_{LT}	Tensão na direção longitudinal-tangencial.
σ_{RT}	Tensão na direção radial-tangencial.
$\sigma_{c1,d}$	Tensão atuante de compressão de cálculo.
$\sigma_{t2,d}$	Tensão atuante de tração de cálculo.
$\bar{\sigma}_{c1,d}$	Tensão admissível de compressão de cálculo.
τ	Tensão tangencial.
τ_d	Tensão atuante tangencial de cálculo.
τ_{xy}	Tensão tangencial no plano xy.
τ_{yz}	Tensão tangencial no plano yz.
τ_{zx}	Tensão tangencial no plano zx.
φ	Ângulo de rotação.
ϕ	Coefficiente de segurança das resistências nominais; coeficiente de fluência; deformação angular.
ψ	Ângulo de inclinação do trecho elástico no diagrama tensão x deformação; coeficiente de combinação.
ψ_1	Fator de combinação e utilização
ψ_2	Fator de combinação e utilização
ψ_3	Fator de combinação e utilização
ξ	Abcissa no sistema coordenado local.
ζ	Cota no sistema coordenado local.

Letras maiúsculas gregas

Δ Diferença; acréscimo, deslocamento.

Π Energia potencial.

Σ Soma.

Ω Energia de deformação.

$\mathbf{\Omega}$ Matriz.

SISTEMAS DE UNIDADES

O sistema de unidades que a comunidade técnica brasileira habituou-se a usar nos projetos, é o MKS (metro, kilograma-força, segundo). Até hoje emprega-se bibliografia, tabelas, itens de compra de materiais, ordens de grandeza para efeito de comparação nesse sistema.

Por força de acordos internacionais o S.I., “Sistema Internacional de Unidades”, substituiu o sistema MKS, diferindo deste pela unidade de força que é o N (Newton), gerando as seguintes equivalências:

$$1 \text{ kgf} = 9,8 \text{ N} \cong 10 \text{ N}$$

$$1 \text{ N} = 0,102 \text{ kgf}$$

$$1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N} \cong 100 \text{ kgf} = 0,1 \text{ tf}$$

$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ MN} / \text{m}^2 = 1 \text{ N} / \text{mm}^2 = 0,1 \text{ kN} / \text{m}^2 \cong 10 \text{ kgf} / \text{cm}^2 \cong 100 \text{ tf} / \text{m}^2$$

$$J = \text{N} \cdot \text{m} = \text{joule}$$

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais, com o aumento do consumo de madeira e redução das áreas de florestas, em função de desmatamento quer autorizado ou clandestino, torna-se necessário a pesquisa e o desenvolvimento de produtos de madeira alternativos à madeira serrada. É o caso da madeira laminada colada (MLC), confeccionadas a partir de lâminas ou pequenas peças de madeira de reflorestamento, certificadas, que ligadas por meio de um adesivo, formam elementos com as mais variadas formas e dimensões.

Em função do crescimento do número de produtos colados de todos os tipos e materiais, bem como da responsabilidade das colas nas suas ligações, as indústrias químicas desenvolveram colas de alta resistência e insolúveis na água, o que tornou as ligações coladas, outrora ponto frágil nesses produtos, em itens de grande confiabilidade.

Assim, a alta qualidade das colas disponíveis no mercado, associada à facilidade de obtenção de madeiras de reflorestamento certificadas, proporciona a fabricação de madeiras laminadas coladas sem causar impactos ambientais e de excelente qualidade, as quais começam a substituir as madeiras serradas no uso estrutural.

Esta tese sobre peças fletidas de madeira laminada colada (MLC), correlaciona-se a outros estudos desse material, realizados na última década, tais como: peças fletidas, tracionadas, comprimidas, cisalhamento nas almas das vigas, desempenho das juntas coladas, colunas em seção caixão, etc, bem como com alguns estudos de grandes estruturas com esse material, como é o caso de projetos de pontes para estradas vicinais.

Em contrapartida, o aumento do emprego de tais produtos com finalidades estruturais, pegou de surpresa o meio técnico, que se viu desprovido de informações e rotinas de cálculo para o dimensionamento estrutural de peças de madeira laminada colada. A inexistência de norma brasileira específica e poucas publicações sobre o tema ocasiona uma grande lacuna entre os escritórios de projeto e os fabricantes de produtos de madeira laminada colada.

No item referências bibliográficas, ao final desta Pesquisa, encontram-se algumas publicações que abordam o tema madeira laminada colada (MLC) e método dos elementos finitos.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa visa munir o meio técnico de teorias para dimensionamento, a flexão, de peças estruturais de madeira laminada colada (MLC).

1.1.1 Objetivo geral

Estabelecer parâmetros para dimensionamento de vigas de madeira laminada colada (MLC).

1.1.2 Objetivo específico

Determinar a carga crítica de instabilidade lateral no regime linear elástico, em vigas de madeira laminada colada (MLC), composta de lâminas dispostas na horizontal, com emendas dentadas (finger joints) distribuídas aleatoriamente ao longo do comprimento.

1.2 Justificativa

O lançamento no mercado de novos produtos em madeira laminada colada (MLC), destinados ao uso estrutural, por falta de opção, leva as empresas pioneiras no seu emprego a adotar técnicas de dimensionamento consagradas para outros produtos que os precederam ou para outros produtos de características similares. Tal prática assemelha-se a “tentativa e erro”, por desconsiderar as particularidades do novo produto.

Com o passar do tempo, após diversas correções empíricas e ajustes nos modelos de cálculo adotados em função de deformações excessivas ou até pelo colapso de peças e/ou componentes estruturais, leva a crer que as tais empresas pioneiras aparentemente detêm o conhecimento do emprego do novo produto.

Em determinado momento, por interesses econômicos do tipo boa aceitação do produto no mercado, participação em concorrências públicas, etc, ocorreram investimentos em pesquisas científicas, que estabeleceram critérios de dimensionamento próprios e nortearam a elaboração de normas técnicas específicas, popularizando assim o dimensionamento e o consumo da MLC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Madeira Laminada Colada

2.1.1 Generalidades

A madeira laminada colada (MLC) é um produto confeccionado a partir de lâminas ou pequenas peças de madeira de reflorestamento, nativas ou exóticas, certificadas, que são ligadas por meio de um adesivo, colas de elevada resistência e durabilidade, formando elementos com as mais variadas formas e dimensões, com todas as vantagens, assim como desvantagens, da madeira maciça.

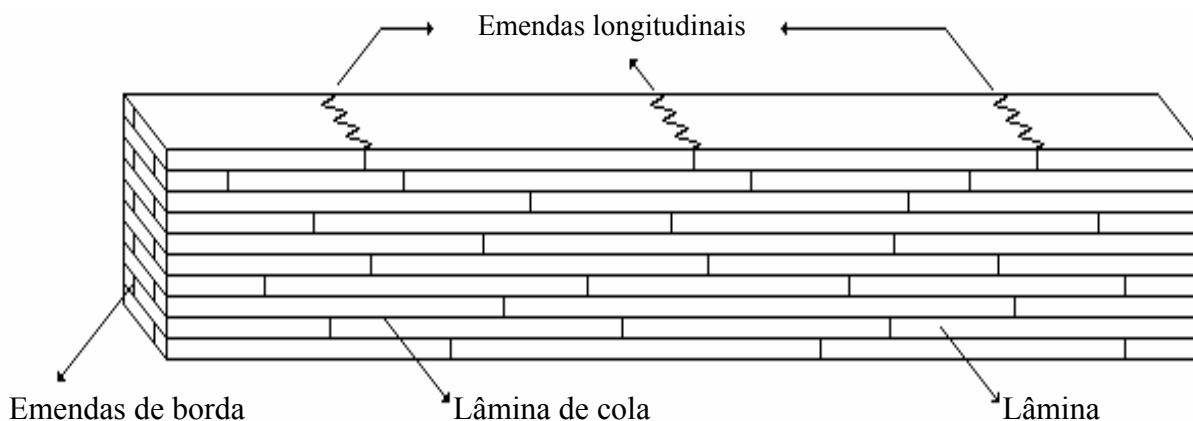


Figura 1 - Representação esquemática de uma peça de MLC

Fonte: Alcebiades Negrão Macedo e Carlito Calil Junior (Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo), 1999

Por ser um material obtido através de processo de fabricação que envolve alta tecnologia, permite antes da colagem, controle e seleção criteriosa das peças de madeira utilizadas para produzir os elementos de MLC.

Possibilita obtenção de elementos com características superiores aos que se obteriam com uma peça maciça de madeira de igual secção, além de mais homogêneos.

É também possível com a técnica da madeira laminada colada fabricar elementos de grandes dimensões e formas muito diferenciadas e específicas, valorizando a plástica visual e beleza de elementos estruturais, que se evidenciam nos projetos arquitetônicos onde são utilizados.



Ilustração 1 - Hall de entrada do Parlamento Europeu em Strasburgo
Fonte: <http://madeiraestrutural.wordpress.com/2010/03/17/ponte-pedonal-em-zapallar/>



Ilustração 2- Complexo aquático Solemar em Bad Dür rheim – Alemanha
Fonte: <http://madeiraestrutural.wordpress.com/2010/03/17/ponte-pedonal-em-zapallar/>



Ilustração 3 - Ponte-Peatonal-em-Zapallar Chile
Fonte: <http://madeiraestrutural.wordpress.com/2010/03/17/ponte-pedonal-em-zapallar/>

2.1.2 Histórico

A primeira utilização da MLC noticiada refere-se a construção de um auditório em Basel, Suíça, em 1893. A técnica de colagem de lâminas ficou conhecida inicialmente como Hertzner System, devido a patente obtida por Otto Karl Frederick Hertzner, em Wiemar, Alemanha. Somente após a Segunda Guerra Mundial, com o desenvolvimento dos adesivos sintéticos à prova de água a MLC ganhou espaço também nas estruturas sujeitas às intempéries, especialmente em pontes e passarelas.

Segundo Moody et al. (1999), a introdução da MLC, nos Estados Unidos da América, ocorreu em um edifício erguido em 1934 no Forest Products Laboratory, em Wisconsin. Com o avanço das pesquisas, que provaram a confiabilidade do material, em 1963, várias indústrias deram início à sua produção ocorrendo então a primeira iniciativa para se produzir a primeira norma norte-americana objetivando disciplinar o processo de fabricação da madeira laminada colada (MLC). (**José Luiz Miotto¹ e Antonio Alves Dias** – Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto – 2009).

Durante os anos 90, como consequência do desenvolvimento do mercado exportador e maior oferta e disponibilidade de madeira laminada colada (MLC), iniciou-se a exportação para outros países da Europa e Ásia, onde a MLC é mais usual.

2.1.3 Vantagens

Possui todas as vantagens da madeira maciça e ainda, em face ao controle tecnológico em sua fabricação, permite eliminar os defeitos que possam vir a comprometer tanto do aspecto estrutural como visual, garantindo excelente resultado final em suas aplicações.

Em contrapartida às inúmeras vantagens, cabe ressaltar que se trata de um produto cujo custo final supera o da madeira serrada, considerando-se que além da transformação da madeira em lâminas, sua secagem, colagem e acabamentos finais, sua produção exige equipamentos especiais, adesivos e mão-de-obra especializada, além de requerer um rigoroso controle tecnológico de todas as fases do processo produtivo, assegurando a alta qualidade do produto acabado. No entanto há que se considerar a relação custo-benefício, a especificidade de cada projeto, além das vantagens relacionadas, para subsidiar-se a escolha pela MLC ou qualquer outro material.

Principais vantagens da MLC (Madeira Laminada Colada):

- Excelentes características mecânicas em relação à sua baixa densidade;
- Permite cobrir grandes vãos sem apoio intermediário;
- A madeira laminada colada é um material final mais homogêneo, em face do controle de defeitos naturais na escolha das partes que irão compor o produto final, possibilitando uma distribuição aleatória dos defeitos residuais no interior do mesmo.

Em Falk e Colling (1995) é ressaltado que a colagem das lâminas resulta em vigas de MLC com maior resistência do que as lâminas avaliadas individualmente. Quando coladas em uma viga de MLC, os nós e outras regiões de baixa rigidez das lâminas são reforçados pelas lâminas adjacentes, em pelo menos um lado, fornecendo caminhos alternativos para as tensões fluírem em torno dos defeitos. Quando combinado com o efeito da dispersão, esse fenômeno é denominado de efeito de laminação.

- As secções de peças, não ficam limitadas às dimensões e geometria do tronco das árvores mas aos processos de fabricação e mecanismos de transporte;
- Possibilidade de obter peças curvas e as mais diversas formas geométricas, permitindo maior flexibilidade aos projetistas, engenheiros e arquitetos;
- Redução de rachaduras, comuns em peças com grandes dimensões;
- Aspecto e qualidade de acabamento e estético muito superior ao da madeira maciça;
- Material vem pré-fabricado, resultando em agilidade na execução, redução de custos e menor tempo de montagem;
- Possibilita montagem e desmontagem com reaproveitamento, reduzindo desperdícios;
- As estruturas em MLC são mais leves em relação a outros materiais, resultando em economia nas fundações;
- Uso em construções sujeitas a alto risco de incêndio, pois embora seja inflamável, possui alta resistência mecânica (comportamento previsível durante um incêndio).

2.1.4 Fabricação - Etapas

Para uso na fabricação de peças estruturais, a madeira utilizada deve ser de baixa ou média densidade, como nos exemplos abaixo:

- Eucalipto e Pinus para o uso em ambientes protegidos das intempéries;
- Cedro para o uso em ambientes sujeitos a agressão de intempéries e presença de agentes químicos e corrosivos.



Ilustração 4 - Pinus de reflorestamento remanescente de abate, plantado em terreno da empresa CG Sistemas Construtivos, localizado no Município de Suzano – SP

Fonte: Arquivo pessoal

2.1.4.1 Secagem das tábuas brutas

Após o abate das árvores, as toras são desdobradas e a madeira serrada passa por um processo de secagem, para reduzir a sua umidade. O melhor método é empilhar as peças serradas, empregando separadores para permitir a passagem do ar entre elas. Essas pilhas, separadas entre si, devem ser feitas em galpão coberto para evitar a água da chuva e aberto nas laterais para permitir a ventilação. Dependendo da espécie é um processo demorado, que pode levar até 3 (três) anos e portanto anti-econômico.

Existem processos de secagem artificiais (em estufa) mais rápidos que eliminam o custo do estoque, porém não apresentam a mesma eficiência do processo natural. A secagem provoca deformações nas peças serradas, mais ou menos acentuadas, dependendo da posição que as mesmas ocupavam no tronco.



Ilustração 5 - Eucalipto verde recém desdobrado do tronco, aguardando para entrar na estufa de secagem no interior da fábrica. Ao fundo plantação de eucaliptos;
Local: Terreno da sede da empresa CG Sistemas Construtivos - Suzano – SP
Fonte: Arquivo pessoal



Ilustração 6 - Madeira de Pinus seca em estufa no interior da fábrica, a espera para retirada dos trechos com imperfeições
Local: Terreno da sede da empresa CG Sistemas Construtivos - Suzano – SP
Fonte: Arquivo pessoal

2.1.4.2 Classificação e seleção das peças de madeira para fabricação da MLC:

A madeira é desdobrada em lâminas com dimensões ligeiramente superiores às de projeto, para que possa receber acabamento até as dimensões desejadas. Cada lâmina contém todos os defeitos do seu tronco de origem, tais como nós, fendas, gretas ou ventas, abaulamento, fibras reversas, esmoada ou quina morta, furos de larvas, bolor e apodrecimento.

A presença desses defeitos afeta a qualidade e o desempenho das madeiras serradas. No caso das madeiras laminadas coladas, tais defeitos são visualmente detectados e a região da lâmina onde se localizam é eliminada da mesma por meio de cortes de serra perpendiculares ao seu eixo.

Dessa forma, uma lâmina fica reduzida a uma série de pedaços menores quase totalmente isentos de defeitos, que serão colados entre si para a formação de uma nova lâmina.



Ilustração 7 - Lâmina de Pinus sendo cortada para a retirada de um nó. Os pedaços remanescentes serão emendados para formar uma nova lâmina

Ao fundo, no canto superior direito, lâminas a espera para a retirada de imperfeições.

Local: Sede da Fabrica da CG Sistemas Construtivos, Suzano – SP

Fonte: Arquivo pessoal



Ilustração 8 - Trechos com defeitos retirados das lâminas de madeira.

Local: Sede da Fabrica da CG Sistemas Construtivos, Suzano – SP

Fonte: Arquivo pessoal

2.1.4.3 Execução das emendas de uma lâmina:

Os trechos de lâminas selecionados e isentos de defeitos têm suas extremidades usinadas mecanicamente, neste caso emenda tipo dentada (finger-joint). Tais extremidades são emendadas sucessivamente entre si, na direção do comprimento da viga através de cola sob pressão, até atingir o comprimento de projeto de uma lâmina.

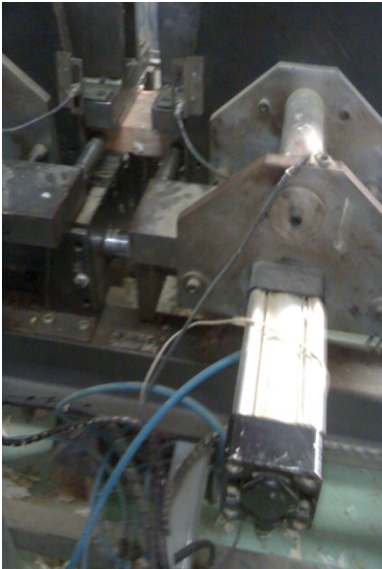


Ilustração 9 - Finger joint sendo laminado na extremidade de um pedaço de eucalipto



Ilustração 10 - Aplicação de cola (adesivo) na emenda, finger joint, pronto para prensagem

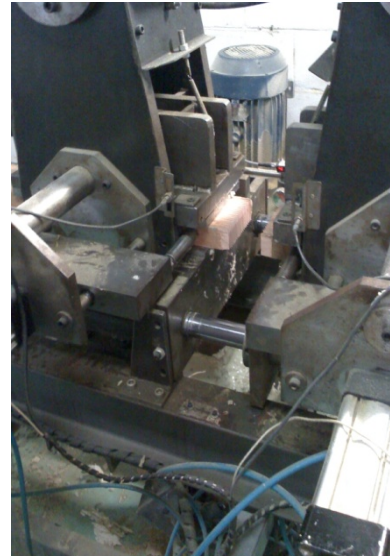


Ilustração 11 - As duas faces da emenda (finger joint), sendo prensadas uma contra a outra

Local: Fábrica da CG Sistemas Construtivos, localizado no Município de Suzano – São Paulo.
Fonte: Arquivo pessoal

2.1.4.4 Colagem das lâminas



Ilustração 12 - Lâminas de Eucalipto formadas por vários pedaços colados entre si



Ilustração 13 - Lâminas com cola para montar as viga

Local: Fábrica da CG Sistemas Construtivos, localizado no Município de Suzano – São Paulo
Fonte: Arquivo pessoal

As lâminas por sua vez são coladas umas sobre as outras e permanecem por várias horas sob pressão em prensas, compondo a altura da viga em conformidade com as características geométricas do projeto (forma reta ou curva).



Ilustração 14 - Prensa para fabricação das vigas



Ilustração 15 - Prensa com quatro vigas sendo executadas simultaneamente

Local: Fabrica da CG Sistemas Construtivos, localizado no Município de Suzano – SP
 Fonte: Arquivo pessoal

2.1.4.5 Acabamentos

Após o processo de colagem a viga é plainada, lixada para remover o excesso de adesivo que naturalmente escorre durante a prensagem e também para remover qualquer irregularidade entre os lados das lâminas adjacentes. Em seguida, são feitos os cortes finais, são executados os furos necessários para as ligações, são adicionados conectores e aplicados os acabamentos, quando especificados em projeto, e para proteção final, a peça é impregnada com líquidos imunizantes ou vernizes.



Ilustração 16 - Máquina para execução de acabamento (plaina e lixa)



Ilustração 17 - acabamento com remoção de rebarbas através de serragem e lixamento



Ilustração 18 - Vigas em MLC, lixadas, prontas para o utilização

Local: Fabrica da CG Sistemas Construtivos, Município de Suzano – S P.
 Fonte: Arquivo pessoal

2.2 Adesivos

Adesivo é toda substância com propriedades de aderir algo fortemente a um substrato igual ou diferente, formando uma ligação superficial forte e duradoura.

A colagem de dois substratos é aparentemente um processo simples, mas que exige cuidado não só com o adesivo, mas principalmente com a matéria-prima *madeira*, considerando-se principalmente que suas propriedades físicas, químicas e mecânicas nunca serão as mesmas do adesivo utilizado. No entanto, para que as peças em MLC (Madeira Laminada Colada) tenham um bom desempenho, além do rígido controle de qualidade na fabricação da mesma, é essencial a escolha de um adesivo que possua características de boa resistência mecânica, que ofereçam uma união resistente, estável e durável, não esquecendo que estas se relacionam diretamente com as propriedades da própria madeira, bem como a sua resistência à ação das intempéries.

O estudo de adesivos está intimamente correlacionado a qualidade na fabricação de peças de madeira laminada colada (MLC). O conhecimento das especificações técnicas, características físicas, mecânicas, dos adesivos, propicia a adequada escolha em função do uso das peças em MLC, com um custo acessível, de forma a tornar esse material mais viável e competitivo quando comparado com outros atualmente utilizados.

Em função do crescimento do número de produtos colados de todos os tipos e materiais, bem como da responsabilidade das colas nas suas ligações, as indústrias químicas desenvolveram colas de alta resistência e insolúveis na água, o que tornou as ligações coladas, antes considerado o ponto frágil nesses produtos, em itens de grande confiabilidade.

Assim, o uso de adesivos para colagem de peças de madeira, possibilitou a fabricação de produtos compostos de madeira para as mais variadas aplicações (IWAKIRI, 2005). A alta qualidade das colas disponíveis no mercado, associada à facilidade de obtenção de madeiras de reflorestamento certificadas, proporciona a fabricação de madeiras laminadas coladas sem causar impactos ambientais e de excelente qualidade, as quais começam a substituir as madeiras serradas no uso estrutural, além de viabilizar peças com vãos, e elementos de grandes dimensões e formas muito diferenciadas e específicas, o que com a madeira maciça seria praticamente impossível.

Outro fator a se considerar é o crescente aumento do uso de madeira laminada colada (MLC) em peças estruturais e painéis compensados, e ainda que o adesivo é o fator mais importante para a boa qualidade e desempenho estrutural dessas peças .

2.2.1 Elementos envolvidos no processo de colagem da madeira

A colagem da madeira envolve três elementos importantes:

- Adesivo,
- Adesão e
- Aderência.

Adesivo é toda substância com propriedades de aderir algo fortemente a um substrato igual ou diferente, formando uma ligação superficial forte e duradoura. (Adesivos – REMADE Revista da Madeira – março/2005)

A colagem de dois substratos exige cuidado não só com o adesivo, mas principalmente com a matéria-prima *madeira*, que nunca apresentará as mesmas condições de propriedades físicas, químicas e mecânicas. (Controle da qualidade na colagem de painéis de madeira – REMADE – Revista da Madeira – março/2005)

O adesivo tem papel fundamental no adequado e bom desempenho das peças em Madeira Laminada Colada. Características de boa resistência mecânica, são essenciais para que ofereçam uma união resistente, estável e durável, não esquecendo que estas se relacionam diretamente com as propriedades da própria madeira.

Para uma boa colagem são necessários dois requisitos básicos:

- O adesivo deve ter um excelente poder de cobertura; o adesivo e o aderente devem ter um bom contato.
- O adesivo deve ser capaz de montar e formar uma alta resistência de coesão na linha de colagem

Aderentes são os materiais sólidos capazes de se ligarem através dos adesivos.

Adesão é o fenômeno mais importante do processo da colagem. Pode ser entendido como a interação entre duas superfícies, causada por um forte campo de “forças atrativas” provenientes dos constituintes de cada superfície. Quando não é possível separar duas peças de madeira coladas, é porque há uma adesão adequada. Aderência é a resistência oferecida quando se pretende separar dois materiais colados. Pode ser medida através de testes de laboratório.

Uma gota de adesivo assume formato diferente para cada material em que é aplicado. Isso ocorre devido ao modo como o volume da gota de adesivo se acomoda. Esse formato depende apenas da afinidade entre o adesivo e a superfície do material em que ele foi depositado. Um exemplo são as gotas de água que sobre uma superfície de vidro não se

espalham. O mesmo ocorre com as gotas de adesivo sobre uma madeira contaminada por óleo: também não se espalham. (Fonte: Revista da Madeira - edição nº115 – Julho de 2008)

Esses exemplos permitem entender que o formato das gotas dos líquidos é diferente para cada material. Na aplicação de um adesivo sobre a madeira, o ideal é o adesivo romper a forma de gota, para que ele se espalhe pela madeira e, dessa forma, molhar a madeira, o que tecnicamente se denomina umectação. Para uma perfeita umectação, a madeira deve estar com rugosidade adequada para que o adesivo possa ser espalhado uniformemente. Os adesivos usados para a colagem da madeira são formulados a partir de um grupo químico denominado polímeros. Para exemplificar o vasto mundo dos polímeros, é só observar os equipamentos, vasilhas e sistemas usados na colagem da madeira. Existe muito material plástico nesses exemplos. O termo polímero é muito confundido com plástico. O que precisa ser entendido é que a denominação “plástico” define um grupo de polímeros cujo comportamento é ser maleável e sofrer transformação mediante o calor, assumindo comportamento plástico e moldável. Alguns polímeros têm esse comportamento. Assim se explica por que certos adesivos sofrem alterações com o calor e outros, não. Portanto, para entender os tipos de adesivos usados na colagem da madeira, é necessário antes entender que todos os adesivos sintéticos são derivados de polímeros. (Fonte: Revista da Madeira - edição nº115 – Julho de 2008).

2.2.2 Classificação dos Adesivos

De maneira geral, os adesivos são classificados pela maneira de aplicação e secagem (cura), pela composição química e pelo custo. Existem duas principais classes de adesivos: termoplásticos e termofixos.

2.2.2.1 Termoplásticos

A cura ocorre por resfriamento ou a perda de solvente, no entanto quando submetido a aquecimento ou aplicação de solvente na linha de cola “amolece” novamente, ou seja a reação de cura é reversível. (Ex: PVA)

2.2.2.2 Termofixos ou Termorrígidos

Solidificam-se através de uma reação química a qual é irreversível. E o adesivo adquire resistência à água, à umidade e ao calor. (Ex.: Fenólico, Uréico, Resorcínico).

2.2.3 Tipos de adesivos

As colas têm sido utilizadas para uma grande diversidade de aplicações, sendo que até o início deste século as principais matérias-primas utilizadas eram de origem animal ou vegetal.

Atualmente uma grande variedade de cola é produzida industrialmente a partir de substâncias sintéticas, com a finalidade de se obter propriedades adequadas aos novos materiais, como polímeros, cerâmicas especiais e novas ligas metálicas.

2.2.3.1 Naturais

As colas naturais ainda são recomendadas para aplicações consideradas não especiais, como para colar papéis ou peças de madeira na construção de pequenos objetos de uso doméstico.

2.2.3.2 Animal

Feito de peles, cascos e ossos de animais. Disponível, mais provavelmente, em pequenos grânulos. É essencial para o trabalho de restauração, folheados e outras aplicações onde a compatibilidade com os artefatos originais é necessária. Amplamente utilizados na indústria de instrumentos musicais. É apenas para uso interno e tem abertura de enchimento elevada. São pouco utilizados, embora de baixo custo, tem a desvantagem de absorver umidade e assim, desenvolver fungos que se alimentam dela.

- Cola de peixe é feita de vísceras de peixe e peles. Bom para pequenos reparos. Não recomendado para obras estruturais.

- Caseína tem um grande poder de adesão e pode ser facilmente preparada. Fabricada a partir de azedos, é a principal proteína presente no leite (aproximadamente 3% em massa) e é bastante solúvel em água por se apresentar na forma de um sal de cálcio, que é seco, triturado e transformado em um pó. Estas colas são fornecidas sob forma de pó, bastando acrescentar água em volume igual à quantidade de pó. A massa obtida deve descansar 20 a 30 minutos a fim de se ter uma boa fluidez e viscosidade. Trata-se de técnicas de colagem a frio.

Uso em Marcenaria e carpintaria. Pode manchar algumas madeiras e é particularmente propensa a escurecer. É indicada apenas para uso interno na fabricação de painéis de madeira.

- Albumina - Soro do sangue

2.2.3.3 Vegetal

Extração e/ou liquefação de produtos agrícolas e resíduos florestais (líquido da casca da castanha de caju (LCC), madeira liquefeita). Amido (batata e trigo), Proteínas de soja, Tanino: Casca da árvore

2.2.3.4 Resinas sintéticas

2.2.3.4.1 Fenol-formaldeído (PH)

Um dos mais conhecidos é o CASCOPHEN RS, adesivo líquido sintético, à base de resorcinol-formol, em solução aquosa/alcoólica. Apresenta dois componentes, sendo um a resina (CASCOPHEN RS) e o outro o endurecedor (Preparado Endurecedor FM). Os dois componentes, depois de misturados, resultam numa “cola” de alto desempenho, à prova d’água (fria ou fervente), resistente a diversos solventes orgânicos, fungos e às intempéries.

2.2.3.4.2 Resorcinol formaldeído (RF)

Adesivo de elevado custo, é usado na fabricação do compensado naval, colagem de silos, casas pré-fabricadas, carrocerias de caminhão e indústria aeronáutica. A característica principal desse grupo de adesivos é que podem sofrer processo de cura em temperatura ambiente para alguns tipos ou em faixas de temperatura de até 200°C. A condição do uso ou não da temperatura é uma característica própria de cada adesivo. Outra característica é que pode ser adicionada, em alguns casos, farinha de trigo, para melhorar as propriedades do adesivo. Durante a colagem dos adesivos termorrígidos ocorre a evaporação do solvente, além de ocorrer uma modificação química, formando um sistema tecnicamente chamado de reticulação. Nele as moléculas se ligam, formando ramificações, tramando-se umas às outras, tornando a colagem de alto desempenho, com boa resistência à temperatura e à umidade. São indicados para a colagem de móveis de exterior e para uso estrutural.

O adesivo à base de resina resorcinol, apesar de garantir uma boa ligação com elevadas resistência mecânica e resistência à ação do intemperismo, apresenta um fator desfavorável, seu alto custo, chegando a representar cerca de 30% do custo total da madeira laminada colada. Por ter uma linha de cola muito escura não é indicado para trabalhos decorativos .

2.2.3.4.3 Uréia-formaldeído

Conhecido popularmente sob o nome comercial "Cascaquite". Obtido a temperatura ambiente normal, é relativamente barato e facilmente disponível. Apropriado para laminação, fabricação de folheados, quando pressionado, resulta grande ou boa adesão. Ele é pré-misturado a uma pasta lisa com água fria em um recipiente não-metálico.

2.2.3.4.4 Melamina formaldeído (MF)

Um adesivo caro, mais usado geralmente como um aditivo. Utilizado na produção de laminados decorativos de plástico rígido, popularmente conhecido como "fórmica".

2.2.3.4.5 Acetato de polivinila (PVA). (Cola Branca)

Uma emulsão com alta aderência. Pode ser usado em todas as madeiras. É um adesivo de uso geral, bom apenas para uso interno.

2.2.3.4.6 Cola de poliuretano

Adesivo com múltiplas aplicações, metal, plástico, cerâmica porosa e outros materiais não porosos. Impermeável.

2.2.3.4.7 Contato (borracha sintética e natural)

Um adesivo obtido através da borracha sintética, fornecido pronto para uso, cuja base química é o cloropreno em mistura com solventes orgânicos, e aí está a razão do seu forte odor. Hoje, em razão de exigências ambientais, essa cola se apresenta formulada com solvente à base de água, sendo um adesivo ecológico e com desempenho semelhante aos formulados com solventes orgânicos.

Os adesivos de contato são de secagem longa, devido à reação com seus elementos, formando cadeias de moléculas (vulcanização). As condições de temperatura, tempo e pressão são indispensáveis para que a reação se complete. Outra característica deste adesivo é que a colagem só ocorre quando se coloca em contato adesivo com adesivo. Essa é também uma de suas vantagens, pois a adesão só ocorre quando as peças entram em contato entre si, explica-se o nome "adesivo de contato".

Utilizado para colagem de laminados plásticos, revestimento de folhas e outros tecidos, para madeira ou outros materiais. É aplicado a ambas as superfícies com uma espátula dentada e deixada para secar ao toque. As duas superfícies são, então, cuidadosamente reunidas sob pressão para remover as bolhas de ar. Adesão é obtida imediatamente após o contato, assim a precisão é essencial. Existem alguns adesivos de contato disponíveis que fornecem quantidade limitada de ajuste. Deve ser usado em uma oficina bem ventilada, sem luzes porque os vapores são inflamáveis e tóxicos. Somente para uso interno.

Características do adesivo de contato:

- **Viscosidade:** varia conforme o método de aplicação. Assim, com aplicação por spray, a viscosidade é mais baixa;
- **Teor de sólidos:** varia com menor teor de sólidos para aplicação em spray e maior, para aplicação com espátula ou pincel;
- **Tempo aberto:** varia conforme o tipo de adesivo, podendo ser de segundos a perto de uma hora, conforme a temperatura ambiente;
- **Resistência ao calor:** após completada a reação de cura, a colagem apresenta boa resistência ao calor;
- **Poder adesivo:** Ocorre o aumento da adesão com o tempo, sendo melhor após alguns dias. Na colagem de lâminas de madeira e laminados plásticos, devem ser tomados alguns cuidados conforme especificação do adesivo;
- **Distribuição da cola:** quando distribuída irregularmente, pode ocorrer o aparecimento de bolhas embaixo das lâminas, pois, na parte com maior quantidade de cola, há muita liberação de solvente, empurrando a lâmina e restando um espaço vazio entre o substrato e a lâmina. Devido à baixa espessura da lâmina, há um desnível entre lâmina e madeira, e assim surge uma espécie de colchão de ar, onde não há contato entre os elementos a colar, podendo ocorrer o defeito das bolhas no momento da colagem ou até alguns dias após a colagem;
- **Umidade da madeira ou da lâmina:** as bolhas podem surgir em virtude da diferença de umidade entre o substrato e a lâmina. Geralmente devido à baixa espessura, as lâminas tendem a ganhar e perder umidade mais rapidamente, conforme o substrato e o ambiente em que se encontram. Devido à sua maior

espessura, demoram mais para se equilibrarem com a umidade do ambiente, por isso a colagem de lâminas sempre requer cuidados. Entre os substratos aquele que tem menor umidade recebe de quem tem maior umidade. O resultado é a formação de bolhas sempre na lâmina, pois é a que tem menor umidade;

- **Tempo em aberto:** problemas de aderência com adesivo de contato são decorrentes de um curto ou longo tempo em aberto. Em substratos com alta porosidade é possível aplicar até duas demãos de adesivo, pois, na primeira demão, o adesivo pode ser totalmente absorvido pela madeira.

Portanto como a colagem só ocorre quando entra em contato adesivo + adesivo, justifica-se a segunda demão. O tempo aberto ideal deve ser observado no boletim técnico da cola. Deve-se observar que as lâminas coladas, após algumas horas ou até mesmo alguns dias, podem descolar. Isso não caracteriza uma falha de colagem, pois, devido ao fato de a reação de cura completa da borracha sintética ser lenta, essa cura propriamente dita ocorre somente após alguns dias. Uma vez completada, o adesivo adquire alta resistência a solventes e à temperatura.

(Fonte: REVISTA DA MADEIRA- julho/2008)

Adesivos de contato a base de água

São sistemas formados pela borracha sintética e por elementos que os ativam: o catalisador (ativador) e a parte líquida, que contém uma proporção de água. O processo químico da formação do filme ocorre através da aproximação das partículas, enquanto que a água é evaporada.

Apresentam como vantagem aderência quase imediata, pois a água residual se distribui através da porosidade do substrato.

Nesse sistema não há necessidade de controle do tempo em aberto para a evaporação do solvente. Outra vantagem é que a cura ocorre à temperatura ambiente e não emite solventes inflamáveis como os à base de solventes.

Quanto ao sistema de aplicação, quando requer o ativador, há necessidade de pistola especial em que o ativador e a resina se misturam sobre o substrato e saem em sistemas separados.

Outros sistemas são monocomponentes e não exigem aplicação especial. Adesivos de contato à base de água são largamente usados na colagem de espumas,

calçados, tecidos, entre outros substratos, e a principal vantagem é a boa aderência e resistência à água.

2.2.3.4.8 Hot Melts - acetato de vinilo etileno (EVA)

Os adesivos de hot melt são sólidos, sem solvente, que, sob ação do calor, sofrem amolecimento, podendo então ser aplicados. A colagem ocorre com o resfriamento e solidificação do adesivo, sendo, portanto, uma colagem física. Essa capacidade do adesivo amolecer é devido à sua natureza química de ser termoplástico e, para tal, precisar ser fundido em um coleiro, equipamento indispensável para a sua aplicação.

Uma recente tecnologia foi desenvolvida em que o adesivo de holt melt apresenta alta resistência de colagem. Isso porque sua base química contém poliuretano, no qual a colagem ocorre por um processo químico.

Os principais setores de uso dos adesivos “hot melt” são os de embalagens, gráfico, automotivo, calçadista, eletroeletrônico, rotulagem, moveleiro e de produtos descartáveis.

APLICAÇÃO DOS ADESIVOS “HOT MELT” NO SETOR MOVELEIRO

- **Colagem de bordas retas:** é o tipo mais comum de colagem, pois ocorre em ângulo reto, sem perfis curvos. O adesivo é aplicado na borda do material a colar e não na fita de borda. Esse processo de colagem, quando automatizado, é altamente produtivo, ao contrário do processo com bordas perfiladas;
- **Colagem de bordas irregulares:** o adesivo deve ser aplicado na fita de borda e não na lateral do painel. As bordas usadas são na maioria compostas de papel impregnado com resinas ou lâminas de madeira;
- **Colagem em laminados:** o laminado recobre totalmente o substrato e, nesse caso, o adesivo é sempre aplicado no laminado;
- **Montagens:** adesivos de hot melt são usados em colagens em que é necessário unir substratos diferentes, tais como apliques, componentes de móveis e tecidos em estofados;
- **Colagem de laminados plásticos :** esses materiais já vêm com um primer especial aplicado na base para favorecer a colagem, porém deve ser usado adesivo específico para esses tipos de materiais.

(Fonte: REVISTA DA MADEIRA- março/2007)

Cuidados a serem observados para melhores resultados quando utilizado adesivos hot melt:

1. **Tempo em aberto:** adesivos para montagem possuem tempo em aberto maior, enquanto em adesivos para equipamentos automáticos normalmente o tempo em aberto é curto;

2. **Temperatura de aplicação:** é a temperatura necessária para o adesivo hot melt passar do estado sólido para o estado pastoso. Deve ser consultado o boletim técnico do adesivo, pois a temperatura de aplicação varia conforme a composição do adesivo. No geral a faixa de temperatura está entre 100 a 200°C;

3. **Temperatura do ambiente:** em temperatura ambiente muito baixa, o adesivo sofre solidificação muito rápida. Com isso ele perde parte de sua pegajosidade, podendo causar falhas na colagem;

4. **Quantidade de adesivo aplicado:** a quantidade de adesivo varia conforme a composição do adesivo. Deve-se consultar o fabricante, pois alguns adesivos contêm elementos que auxiliam na formação da parte sólida, chamados de cargas. Esses elementos não são responsáveis pela colagem;

Portanto: em adesivos que contêm cargas, a gramatura de aplicação é maior; em adesivos que não contêm cargas, a gramatura de aplicação é menor. No geral a gramatura fica numa faixa entre 150 a 250 g/m².

5. **Teor de umidade da madeira:** madeiras com umidade acima de 12% apresentam problemas na colagem, pois o adesivo é aplicado em temperaturas acima de 100°C. Com umidade alta, esta tende a evaporar vindo a formar bolhas e descolamentos do laminado ou da borda colada.

2.2.3.4.9 Resinas epóxi

Duas resinas epóxi quando misturadas, após a cura, produzem uma ligação extremamente forte em diversos tipos de materiais. O adesivo é misturado com proporções iguais em um azulejo ou cartão até que ele se torna uma forte massa esbranquiçada. Aplicar, ar quente ou o calor "cozinhar" em um forno acelera o processo. Excelente **Adesivo** ou 'supercola' amplamente utilizado em toda a reparação e fabricação de pequenos objetos. utilizado em grandes quantidades não na indústria da madeira, mas muito úteis para reparar e "colar" pequenos objetos. Requer umidade para o trabalho.

2.2.3.4.10 Wonderbond –

Adesivo em emulsão aquosa “EPI”, fluido, livre de griz, grumos e/ou materiais estranhos, utilizado para colagem de artefatos de madeira, especialmente formulado para ser aplicado onde se necessita de alta resistência térmica e alta resistência a água, pelos processos de prensagem a frio e a quente. É diluído em água e é isento de Formaldeído. Deve ser utilizado com um catalisador/endurecedor.

2.2.3.4.11 Poliuretano de Óleo de Mamona

A resina é do tipo bi-componente, de cura a frio, não é agressiva ao homem e ao meio ambiente, além do óleo de mamona ser obtido de um recurso natural e renovável.

2.2.3.4.12 Purbond

É mono-componente (sem mistura), contendo 100% sólidos (não contém solvente), requerendo menor quantidade de adesivo. Os adesivos PURBOND têm sido utilizados com sucesso na Europa desde 1990 (Alcebiades Negrão Macedo e Carlito Calil Junior – USP-1999). O adesivo utilizado para aplicação em emendas dentadas é o Purbond HB 312, com aplicação em 2 minutos e com tempo de cura de 6 a 8 minutos, esse adesivo alcança sua resistência total.

2.2.4 Adesivos para a colagem de madeira com fins estruturais

A abertura do mercado brasileiro para produtos de madeira direcionados para a exportação aponta um nicho - as vigas laminadas coladas ou MLC – amplamente utilizadas mundialmente em construções habitacionais, pontes, museus, terminais. O sucesso do uso das vigas laminadas coladas está intimamente ligado ao adesivo empregado na sua construção. O adesivo deve possuir características que ofereçam uma união resistente, estável e durável, não devemos esquecer que estas características relacionam-se diretamente com as propriedades da madeira.

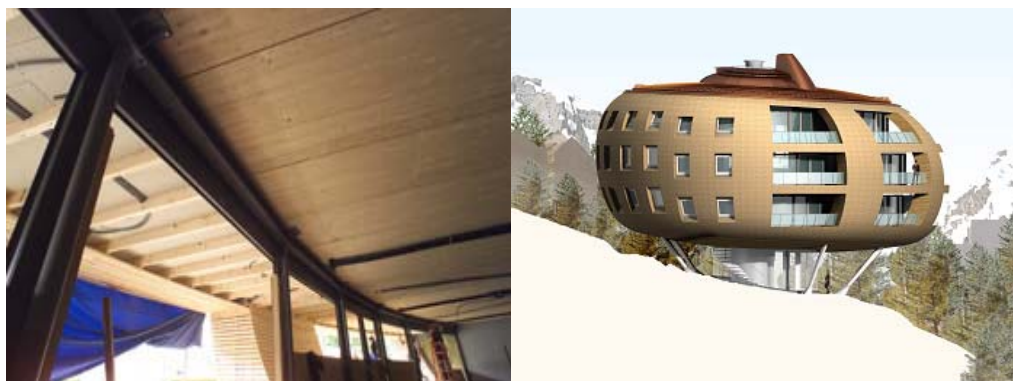


Ilustração 19 - Estação St. Moritz (Suíça 2001), composta por vigas laminadas coladas com 1C PUR

Os estudos de estruturas de madeira iniciaram-se antes de 1940, através do instituto Otto Graf em Stuttgart, Alemanha, a fim de eliminar a gama de problemas relacionados ao uso estrutural de madeira. Já em 1930, particular atenção foi dada para as propriedades das resinas sintéticas impermeáveis que estavam sendo desenvolvidas, e seu uso em construção de vigas laminadas.

Na década de 80, na Suíça começou o desenvolvimento de um adesivo altamente resistente chamado 1C PUR. Os produtos PUR (poliuretano reativo) são adesivos monocomponentes cuja matéria-prima base são pré-polímeros de isocianato, assim diferenciando-se dos adesivos base água cujo polímero base é o polivinil acetato (PVA), outras características diferenciais entre os dois produtos são exemplificadas na Tabela 1.

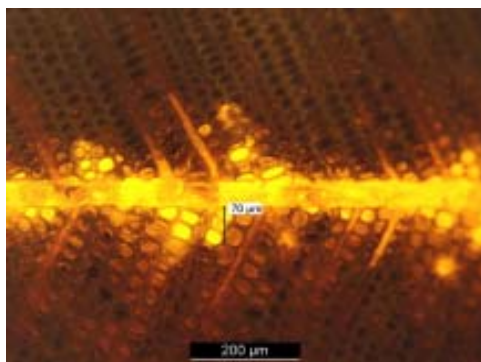
Para se ter uma boa colagem são necessários dois requerimentos básicos:

- O adesivo deve ter um excelente poder de cobertura; o adesivo e o aderente devem ter um bom contato.
- O adesivo deve ser capaz de montar e formar uma alta resistência de coesão na linha de colagem.

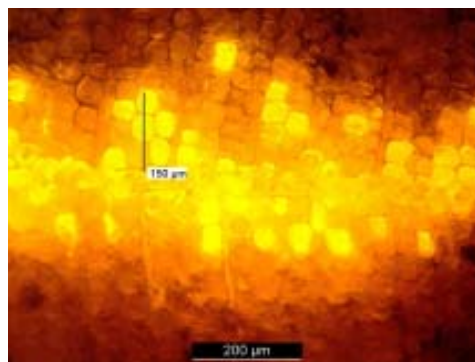
Logo, os adesivos 1C PUR reagem com a água presente na madeira e com a água presente no ambiente; o grupo -NCO do pré-polímero vai reagir com o grupo -OH da lignina e com a água da madeira formando uma união poliuretânica de alta resistência na linha de cola (ver Ilustração 20)

Tabela 1 - Comparação entre adesivos PUR & PVA

Comparação entre adesivos PUR e PVA	
Adesivos PUR	Adesivos PVA
Polímero base é um pré-polímero de isocianato	Polímero base polivinil acetato
100% sólido em formato líquido	Conteúdo de sólido variando de 40-60%, o resto é água
O mecanismo de montagem emprega a molécula de água da própria madeira ou do ambiente para formar uma boa colagem (Ilustração 20)	O mecanismo de montagem é através da absorção da água pela madeira ou pela evaporação no ambiente.
O filme é transparente e rígida	O filme é transparente e suave
Boa propriedade de enchimento	Baixa propriedade de enchimento
Linha de cola tem boa resistência a água, atende EN204/205, classificação D4	Baixa resistência a água
Resistência ao fogo de acordo com F120 (correspondente a materiais e construção)	Não oferece resistência ao fogo
Resistência ao calor acima de 120°C	Baixa resistência ao calor
Livre de formaldeído	Livre ou pouco formaldeído
Sem solvente	Sem solvente
Excelente colagem para a maioria das espécies de madeira, incluindo as madeiras duras tropicais	Não indicado para certas madeiras duras tropicais



Lenho Tardio



Lenho Inicial

Ilustração 20 - Penetração dos adesivos PUR no lúmen celular da madeira
 Fonte : www.purbond.com - National Starch & Chemical

2.3 Emendas

2.3.1 Tipos de Emendas

As emendas longitudinais podem ser de topo (butt joints), biseladas (scarf joints) ou dentadas (finger joints), (17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.)

A norma "NBR 7190/97 – Projeto de estruturas de madeira", da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997), apresenta fatores de redução da resistência, em função do tipo de emenda, que deve ser levado em consideração no dimensionamento de MLC.

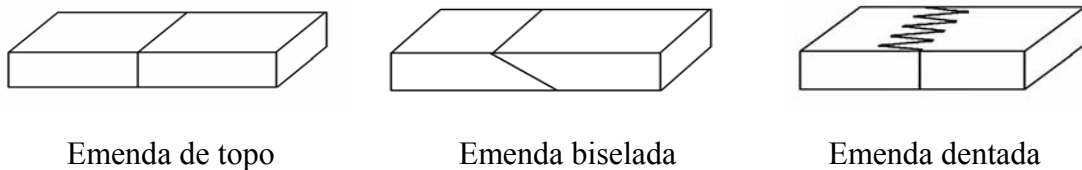


Figura 2 - Tipos de emendas utilizadas em MLC
Fonte: Alcebiades Negrão Macedo e Carlito Calil Junior - USP

2.3.1.1 Emendas de topo

As emendas de topo são de fácil execução, porém apresentam colagem deficiente, sendo as menos eficientes em termos de resistência (MACÊDO 1996).

2.3.1.2 Emendas biseladas

As emendas biseladas foram desenvolvidas para suprir as limitações de resistência das emendas de topo, porém essa limitação só é superada quando há uma baixa inclinação (da ordem de 1:10) no corte do bisel, tornando este tipo de emenda mais dispendioso, do ponto de vista da quantidade excessiva de madeira e adesivo a serem utilizados.

2.3.1.3 Emendas finger joint (dentadas)

Atualmente, as emendas dentadas são largamente utilizadas na fabricação de MLC, por reunir boas características de resistência à tração (intermediária entre as emendas de topo e biseladas) e praticidade de produção.

A figura abaixo apresenta dois tipos de perfis possíveis para as emendas dentadas,



Figura 3 - Perfis das emendas dentadas
Fonte: Alcebíades Negrão Macedo e Carlito Calil Junior USP

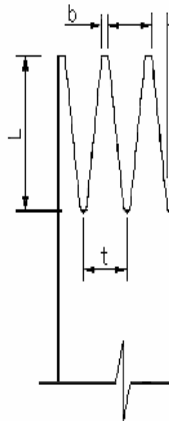


Figura 4 - Parâmetros geométricos da emenda dentada
Fonte: Alcebíades Negrão Macedo e Carlito Calil Junior USP

De acordo com CHEUNG et al (2002), a eficiência de madeiras com emendas é da ordem de 80% quando comparadas com madeiras sem emendas. Observaram também que perfis horizontais e verticais apresentaram resistência à tração equivalente, considerando um nível de significância de 5%.

2.4 Instabilidade Lateral ou Flambagem Lateral com Torção (F.L.T.)

2.4.1 Deslocamentos oriundos de Instabilidade Lateral

Instabilidade lateral, também chamada de flambagem lateral por flexo-torção ou flambagem lateral por torção, ocorre nas vigas sem contenções laterais ou com contenções laterais isoladas, muito espaçadas. Corresponde a uma perda de estabilidade global da viga, quando sujeita a flexão em torno do eixo de maior inércia.

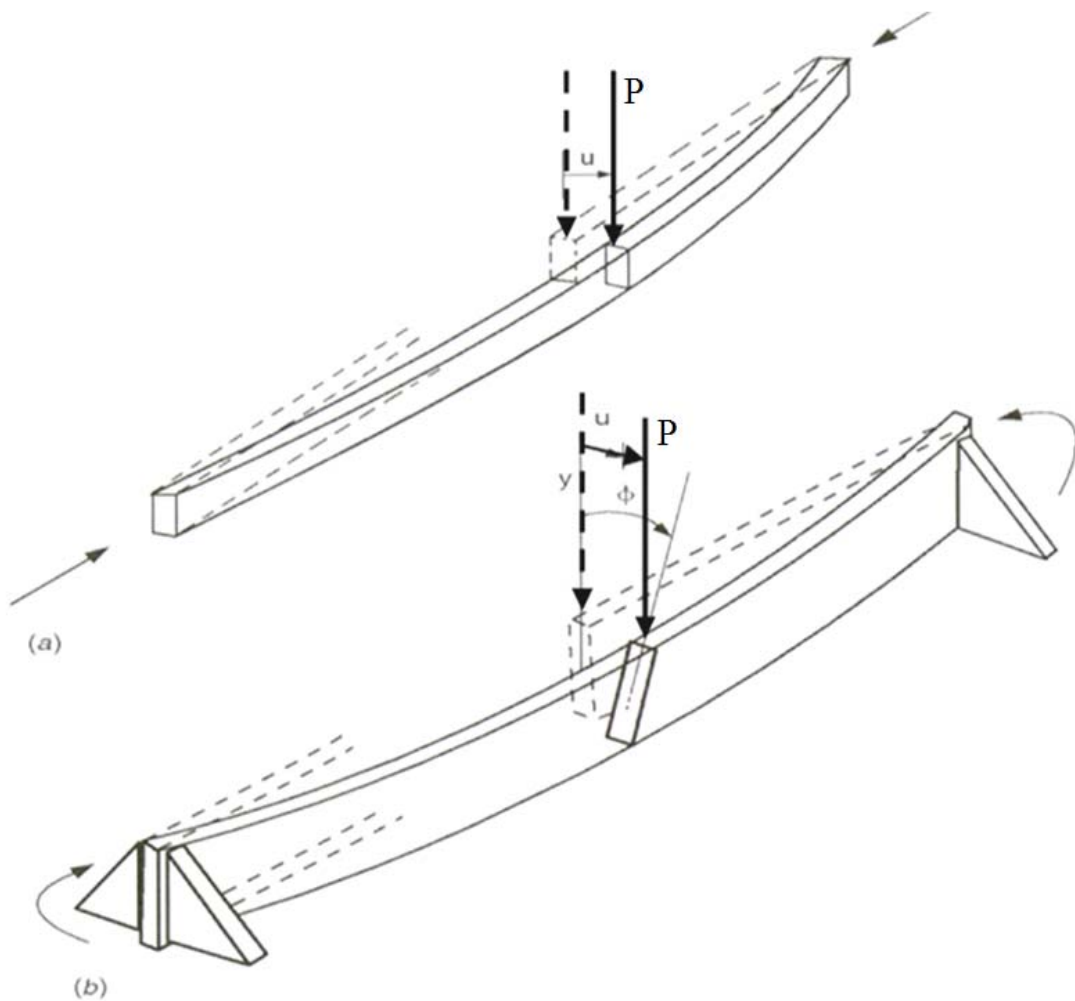


Figura 5- Instabilidade lateral ou flambagem lateral com torção (FLT)
Fonte: Estruturas de Madeira, Walter Pfeil e Michéle Pfeil – LTC – 6ª Edição

2.4.2 Origem da flambagem lateral com torção (F.L.T.)

A borda comprimida de uma viga sujeita a flexão, tende a flambar no plano de menor inércia da seção, gerando um deslocamento lateral “u”; a borda tracionada tende a ter o seu eixo retificado, impedindo o seu deslocamento lateral. A combinação desses efeitos opostos, gera o início da torção da seção, que é agravada pelo aparecimento da excentricidade "u" e respectivo momento de torção $M_T = P \cdot u$, conforme figura abaixo.

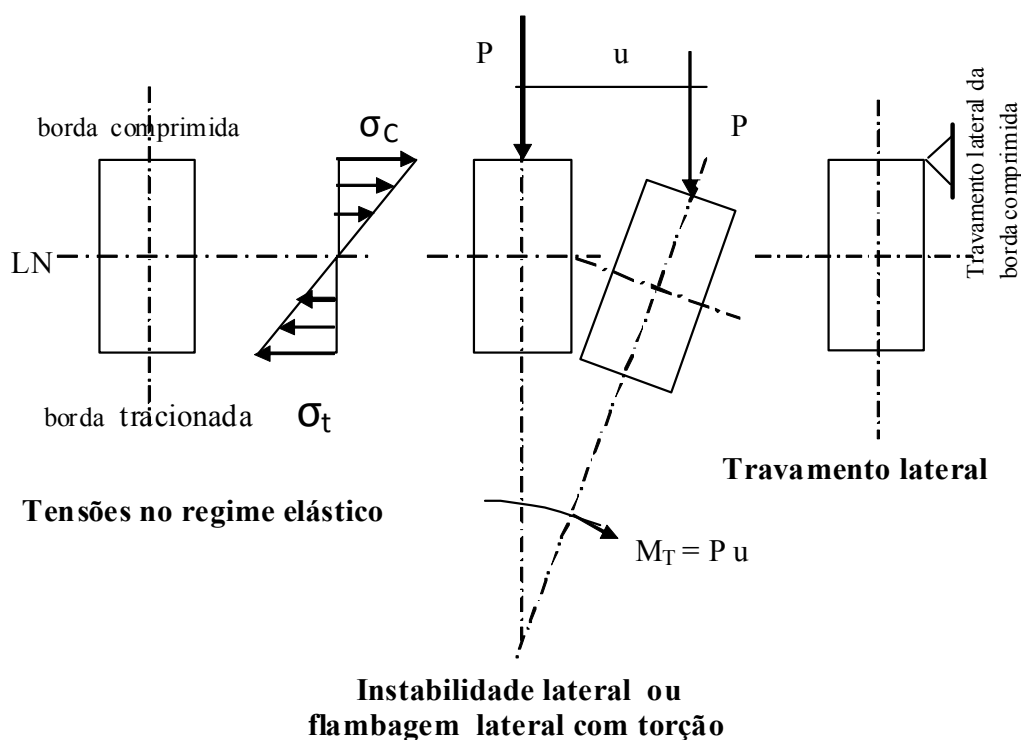
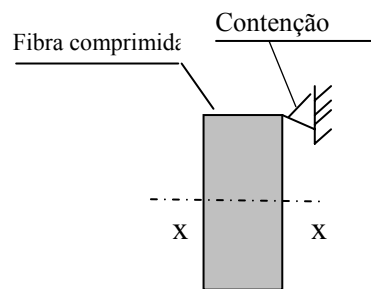


Figura 6 – Tensões atuantes, instabilidade lateral e travamento lateral esquemático de uma viga de madeira

2.4.3 Travamentos laterais para impedir o aparecimento da F.L.T.

Para evitar a instabilidade lateral (Flambagem Lateral com Torção) das bordas comprimidas das vigas fletidas em relação ao eixo de maior inércia, devem ser criadas contenções laterais (apoios laterais ou travamentos laterais ou contraventamentos), de forma a impedir o seu deslocamento. Os travamentos (contenções) laterais podem ser contínuos ou isolados e a distância entre dois pontos travados lateralmente (distância entre contenções laterais), denomina-se “ L_1 ”.



Flexão em torno do eixo de maior inércia, peça de madeira

Figura 7 - Esquema do travamento lateral da região comprimida de uma viga de madeira.

2.4.3.1 Travamento Lateral Contínuo:

No caso de travamentos laterais contínuos, a distância entre duas contenções laterais é tão pequena, que se pode considerar todos os pontos da mesa comprimida como contidos lateralmente, com $L_b = 0$.

Na prática, o travamento lateral contínuo nas vigas de madeira é obtido por placas de pisos parafusados às bordas comprimidas das vigas, podendo tais pisos serem de tábuas de madeira serrada ou pisos industrializados, como por exemplo piso wall.

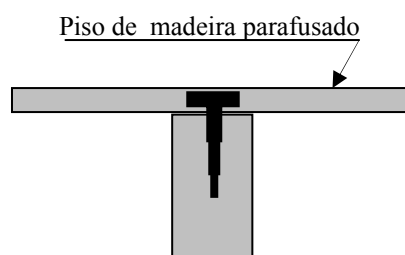


Figura 8 - Travamento lateral contínuo da fibra comprimida de uma viga de madeira, através de piso de madeira parafusado

No caso de vigas metálicas, o travamento lateral contínuo é obtido pelo emprego de conectores soldados às suas mesas comprimidas e mergulhados em lajes maciças de concreto armado ou, em alguns casos, por pisos metálicos soldados às mesas comprimidas.

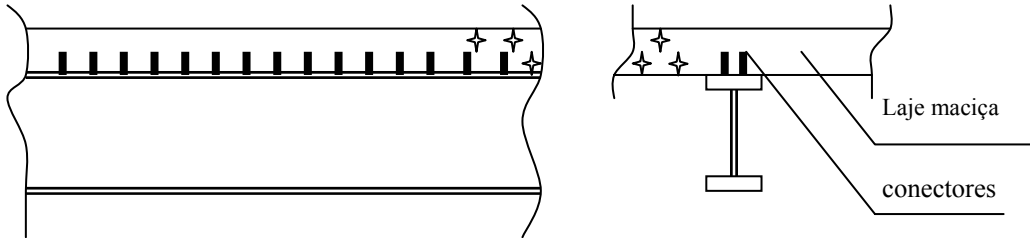


Figura 9 - Travamento lateral contínuo da mesa comprimida de uma viga metálica, através de laje maciça com conectores

2.4.3.2 Travamentos Laterais Isolados

Tanto nas estruturas metálicas como nas estruturas de madeiras, os travamentos laterais em pontos isolados são obtidos através de vigas secundárias contraventadas, ligadas perpendicularmente às mesas comprimidas das vigas que se pretende travar.

Nestes casos, $L_1 > 0$.

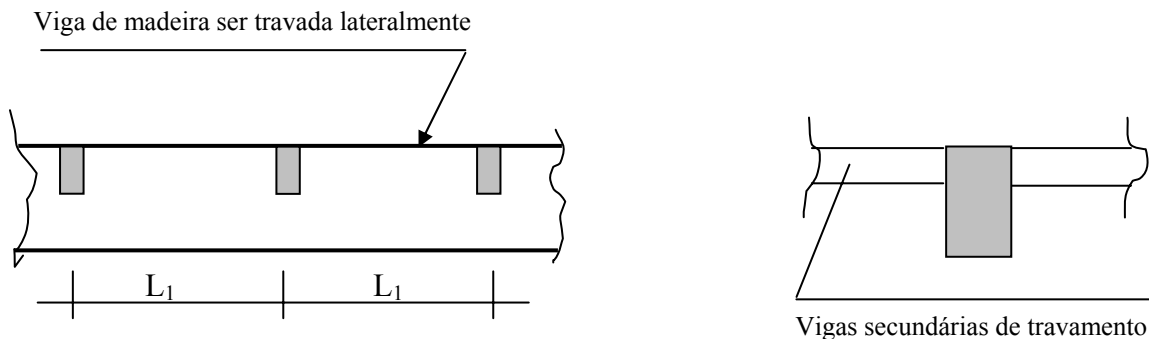


Figura 10 - Travamento lateral isolado da mesa comprimida de uma viga de madeira, através de vigas de madeira secundárias pregadas ou parafusadas

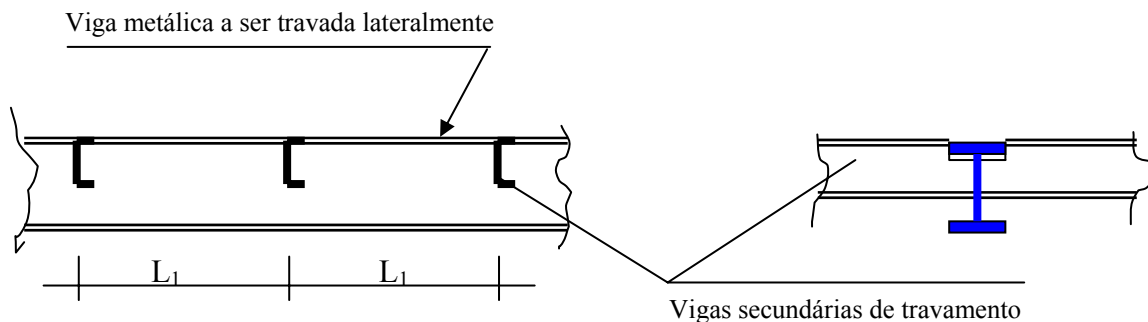


Figura 11 - Travamento lateral isolado da fibra comprimida de uma viga metálica, através de vigas metálicas secundárias

2.5 Dimensionamento à Flexão Simples Reta, Cisalhamento e Flecha, segundo a NBR 7190/97

2.5.1 Generalidades

A NBR 7190/97 apresenta critérios de dimensionamento a flexão simples reta, cisalhamento longitudinal e flechas para seções de vigas de madeira maciça serrada e nenhum critério para o mesmo dimensionamento de vigas de madeira laminada colada.

2.5.2 Dimensionamento a Flexão Simples Reta em Estados Limites Últimos

2.5.2.1 A necessidade do emprego de um vão teórico nas vigas de madeira

De acordo com a NBR 7190 / 97, as solicitações numa viga de madeira devem ser calculadas empregando o vão teórico L , usando o menor dos valores abaixo especificados. Isso se deve a rotação de apoio, que pode gerar um vão efetivo menor que o vão entre eixos. Tal rotação pode também provocar esmagamento da viga, quando apoiada sobre materiais de maior resistência a compressão perpendicular às fibras. Assim, para evitar tal inconveniente, para absorver deformações é aconselhável o emprego de aparelhos de apoio, que podem ser executados com a própria madeira da viga.

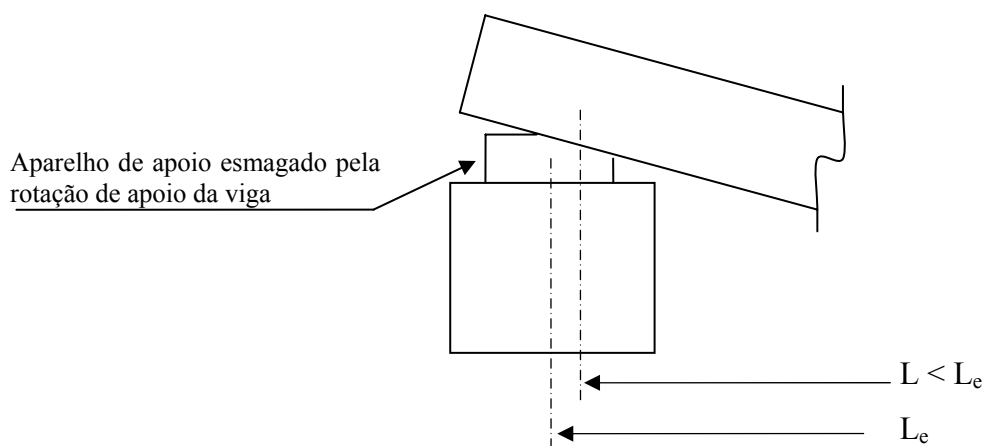


Figura 12 - Vão teórico e vão real, em função do esmagamento do aparelho de apoio pela rotação de apoio da viga

2.5.2.2 Determinação do vão teórico

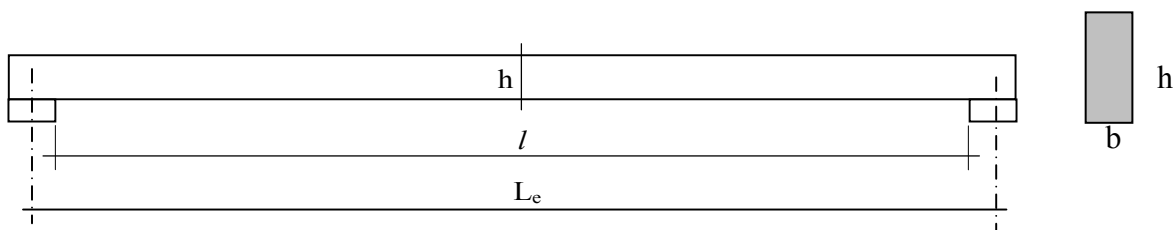


Figura 13 - Vãos da viga sobre os aparelhos de apoio e seção transversal

l = vão livre entre faces dos apoios

L_e = distância entre eixo dos apoios

L = vão teórico

Para o valor de L , adota-se o menor dentre os valores abaixo:

$$L = L_e \quad \text{ou} \quad L = l + h \quad \text{ou} \quad L = l + 10 \text{ cm}$$

2.5.2.3 Máxima distância entre travamentos laterais isolados ($L_1 \text{ max}$)

A distância $L_1 \text{ max}$ corresponde a distância entre travamentos laterais da mesa comprimida da viga, a partir da qual a mesma sofre flambagem lateral com torção. Assim, para distâncias L_1 entre travamentos laterais iguais ou inferiores a $L_1 \text{ max}$, a viga não sofre instabilidade lateral, comportando-se como se fosse travada continuamente ($L_1 = 0$)

$$L_{1\text{máx}} = \frac{b E_{c0,ef}}{\beta_m \cdot f_{c0,d}}, \quad \text{com:} \quad \beta_m = \frac{4\beta_E}{\pi \gamma_f} \cdot \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Tabela 2 - Coeficiente de Correção β_m para $\gamma_f=1,4$ e $\beta_E=4$

Fonte: Tabela nº 16 da NBR 7190 / 97

$\frac{h}{b}$	β_m	$\frac{h}{b}$	β_m	$\frac{h}{b}$	β_m	$\frac{h}{b}$	β_m
1	6,0	6	23,1	1	41,2	6	59,4
2	8,8	7	26,7	2	44,8	7	63,0
3	12,3	8	30,3	3	48,5	8	66,7
4	15,9	9	34,0	4	52,1	9	70,3
5	19,5	10	37,6	5	55,8	20	74,0

2.5.2.4 Condições de segurança a momento fletor em estados limites últimos

2.5.2.5 Tensões atuantes a flexão

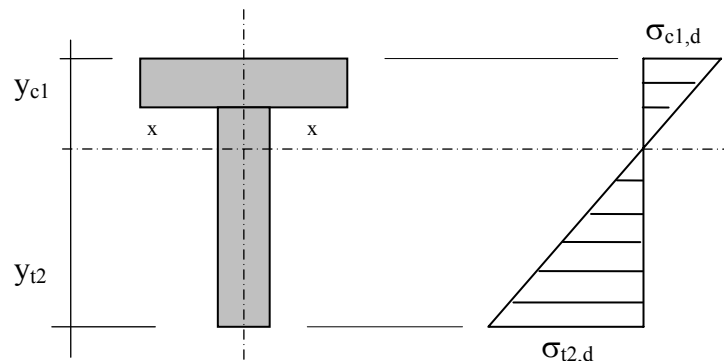


Figura 14 - Esquema ilustrativo de seção transversal sujeita a flexão
Fonte: NBR 7190/97

Onde:

$$\sigma_{c1,d} = \frac{M_d}{W_c} = \text{Tensão atuante na borda comprimida};$$

$$\sigma_{t2,d} = \frac{M_d}{W_t} = \text{Tensão atuante na borda tracionada};$$

M_d = Momento fletor de cálculo;

$$W_c = \frac{I}{y_{c1}} = \text{Módulo resistente elástico, em relação ao eixo x-x, correspondente à borda comprimida};$$

$$W_t = \frac{I}{y_{t2}} = \text{Módulo resistente elástico, em relação ao eixo x-x, correspondente à borda tracionada};$$

$I = I_x$ = Momento de inércia em relação ao eixo baricêntrico x-x

2.5.2.6 Vigas com $L1 \leq L1 \text{ max}$

Nestes casos não ocorre flambagem lateral com torção e a segurança a flexão fica garantida pela observação simultânea das seguintes condições:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{c1,d} \leq f_{c0,d} \\ \text{e} \\ \sigma_{t2,d} \leq f_{t0,d} \end{array} \right\} \text{ para } \alpha \leq 6^\circ \text{ ou} \quad \left. \begin{array}{l} \sigma_{c1,d} \leq f_{c\alpha,d} \\ \text{e} \\ \sigma_{t2,d} \leq f_{t\alpha,d} \end{array} \right\} \text{ para } \alpha > 6^\circ$$

2.5.2.7 Vigas com $L1 > L1 \text{ max}$

As vigas nestas condições estão sujeitas a instabilidade lateral da borda comprimida. Assim, a tensão admissível da borda comprimida sujeita a instabilidade lateral ($\bar{\sigma}_{c1,d}$), é

inferior à tensão admissível de compressão ($f_{c0,d}$) e é dada pela expressão $\bar{\sigma}_{c1,d} = \frac{E_{c0,ef}}{\left(\frac{L_1}{b}\right)^{\beta_M}}$.

As condições de segurança das vigas nestas condições são:

$$\sigma_{c1,d} \leq \bar{\sigma}_{c1,d} \quad \text{e} \quad \sigma_{t2,d} \leq f_{t0,d}$$

2.5.3 Condições de segurança a cisalhamento longitudinal em vigas em estados limites últimos

$$\tau_d \leq f_{v0,d} \quad \text{onde:} \quad \tau_d = \frac{V_d}{b} \frac{M_S}{I}$$

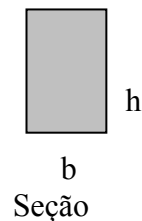


Figura 15 - Seção transversal de uma viga

$$\text{Para seções retangulares, } \tau_d = \frac{3}{2} \frac{V_d}{b \cdot h}$$

De acordo com a NBR 7190/97, na falta de determinação experimental pode-se adotar:

$$\text{Para as coníferas: } f_{v0,d} = 0,12 f_{c0,d};$$

$$\text{Para as dicotiledôneas: } f_{v0,d} = 0,10 f_{c0,d}$$

2.5.4 Condições de segurança em estados limites de utilização

2.5.4.1 Estados limites de utilização aplicáveis às estruturas de madeira:

- Deformações excessivas (flechas);
- Danos em materiais não estruturais, em consequência de deformações da estrutura;
- Vibrações excessivas.

2.5.4.2 Critério de verificação de segurança:

$$S_{d,útil} \leq S_{lim}$$

onde:

S_{lim} = valor limite fixado para o efeito estrutural que determina o aparecimento do estado limite considerado.

$S_{d,útil}$ = valores dos efeitos estruturais, decorrentes da aplicação das ações estabelecidas para a verificação, calculados com a hipótese de comportamento elástico linear da estrutura.

Para construções correntes, salvo exigências normativas em contrário, as verificações em estados limites de utilização são feitas para carregamentos usuais, correspondentes a combinações de longa duração, adotando-se $\gamma_f = 1$ e levando-se em conta os coeficientes de combinação ψ_1 e ψ_2 da tabela 2 da NBR 7190/97 .

$$\text{Assim,} \quad S_{d,útil} = F_d = \sum_{i=1}^m F_{Gi,K} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,K}$$

Os valores limites (S_{lim}) são especificados por normas próprias, pelo proprietário, ou pelo item 9 da NBR 7190/97.

A umidade e a duração do carregamento são consideradas através do módulo de elasticidade efetivo:

$$E_{c0,ef} = K_{mod} \cdot E_{co}$$

2.5.4.3 Verificação das flechas nas vigas de madeira

Justificativa:

A verificação das flechas nas vigas, visa evitar deformações excessivas que possam comprometer o aspecto estético ou a utilização normal da edificação.

$$U_{ef} = U_G + \psi_2 U_Q - U_0 \leq U_{Lim}$$

Onde: U_{ef} = flecha efetiva
 U_G = flecha devida a carga permanente
 U_Q = flecha devida a carga variável
 U_0 = contraflecha, $\leq (2/3) U_G$

Valores limites das flechas nas vigas:

$$U_{Lim} = L / 200 \text{ para vãos de vigas e}$$

$$U_{Lim} = L / 100 \text{ para balanços,}$$

Onde: L é o vão teórico da viga ou L é o comprimento do balanço.

2.6 Cargas Críticas de Instabilidade Lateral de vigas de acordo com a teoria da elasticidade (Timoshenko)

2.6.1 Generalidades

Vigas em que a rigidez do plano de maior inércia é muito maior que a rigidez do plano de menor inércia perpendicular ao mesmo, quando mal providas ou até desprovidas no plano de menor inércia, de travamentos laterais nas suas fibras comprimidas, são suscetíveis a instabilidade lateral no plano perpendicular ao carregamento, chamada Flambagem Lateral com Torção (FLT). A carga aplicada segundo o seu plano de maior rigidez correspondente ao início da F.L.T. é denominada Carga Crítica de Flambagem, denominada de P_{cr} quando concentrada, $(ql)_{cr}$ quando uniformemente distribuída.

As expressões simples (“formulinhas”) que fornecem as Cargas Críticas de Flambagem, bem como os seus correspondentes momentos fletores $(M_0)_{cr}$ e tensões atuantes (σ_{cr}) , para cada condição de apoio e travamento lateral, foram deduzidas através de complexas equações diferenciais a partir dos conceitos da Resistência dos Materiais.

2.6.2 Cargas Críticas de Flambagem nas Vigas

O formulário a seguir foi deduzido pelo Engenheiro Stephen M. Timoshenko no início do século passado e é até hoje largamente empregado no dimensionamento de peças estruturais. Foram omitidas as equações diferenciais e suas resoluções, sendo apresentadas apenas as soluções em forma de fórmulas e respectivas condições de contorno, válidas para deformações u , v e ϕ representadas na figura abaixo, muito pequenas. A Figura 16 mostra os eixos x , y e z fixos que passam pelo centro de gravidade da seção transversal da viga não curvada. peça e os eixos ,

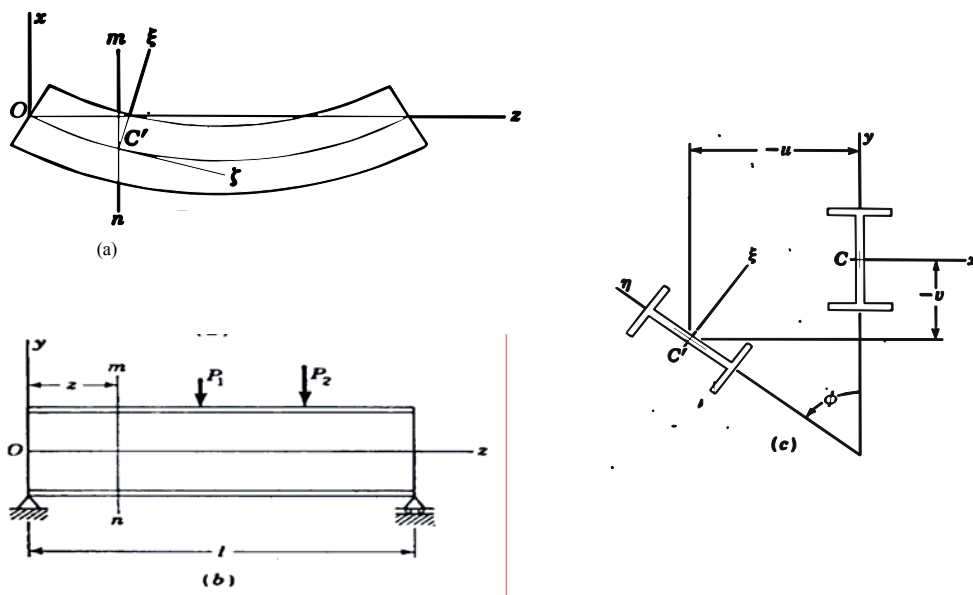


Figura 16- (a)Vista superior da curvaturas dos eixos defletidos de uma viga; (b)Vista lateral e (c)Seção transversal sofrendo instabilidade lateral

Fonte: Timoshenko&Gere-Theory of Elastic Stability

Para pequenos ângulos de rotação ϕ podemos assumir que as curvaturas nos planos $\xi\zeta$ e $\xi\eta$ possuem os mesmos valores.

As equações diferenciais para curvaturas das vigas são:

$$EI_{\xi} \frac{d^2 v}{dz^2} = M_{\xi}$$

$$EI_{\eta} \frac{d^2 v u}{dz^2} = M_{\eta}$$

$$C \frac{d\phi}{dz} - C_1 \frac{d^3 \phi}{dz^3} = M_{\xi}$$

A solução das equações acima, para uma carga concentrada P aplicada no centróide da seção transversal do centro do vão de uma viga bi-apoiada de seção retangular esbelta, com giros permitidos nos planos xy e xz, impedidos no plano yz apenas nos apoios, conforme figura abaixo, é a equação:

$$P_{cr} = \frac{16,94 \sqrt{EI_{\eta} C}}{L^2}$$

com: $I_{\eta} = \frac{hb^3}{12}$; $C = GJ = \frac{1}{3} h b^3 G$; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ e

$\nu = \text{coeficiente de Poisson}$

C = Rigidez torcional

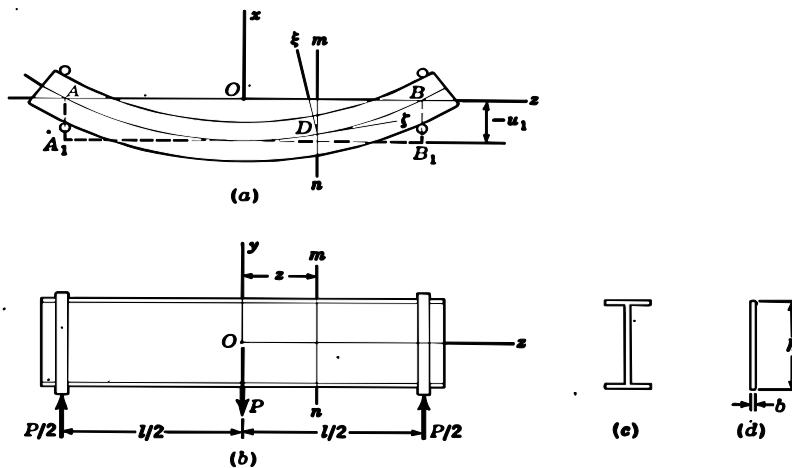


Figura 17 - Curvaturas dos eixos defletidos de uma viga bi-apoiada, com carga no centróide, contraventada apenas nos apoios
 Fonte: Timoshenko & Gere- Theory of Elastic Stability

A carga concentrada P pode também ser aplicada a uma distância “a”, acima ou abaixo do centróide, como mostra a figura abaixo.

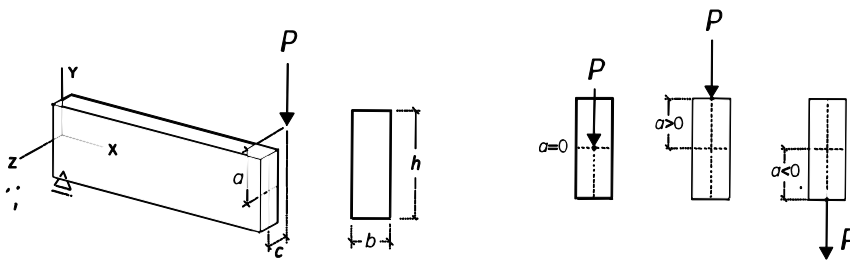


Figura 18 - Excentricidades de aplicação da carga P
 Fonte: Pappalardo

Neste caso, a equação anterior recebe um fator de correção.

$$P_{cr} = \frac{16,94 \sqrt{E I_{\eta} C}}{L^2} \left(1 - \frac{1,74 a}{L} \sqrt{\frac{E I_{\eta}}{C}} \right)$$

A figura abaixo mostra um impedimento a torção em seções situadas entre apoios.

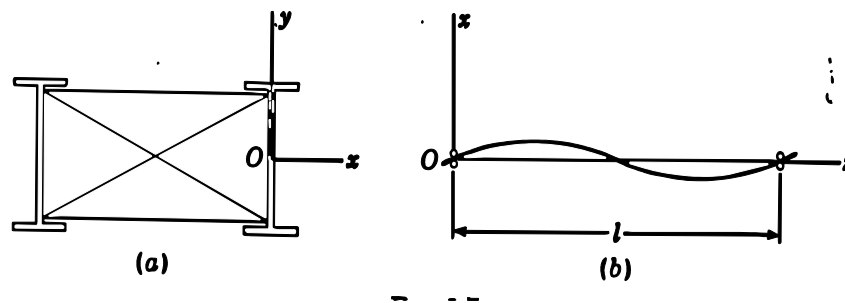


Figura 19 - Travamento na seção central
Fonte: Timoshenko & Gere- Theory of Elastic Stability

Caso numa viga, além das contenções existentes nos apoios, exista um impedimento a torção na seção central, o momento crítico é:

$$(M_0)_{cr} = \frac{2\pi \sqrt{E I_{\eta} C}}{L}$$

$$\text{Mas } (M_0)_{cr} = \frac{P_{cr} L}{4}, \text{ portanto } P_{cr} = \frac{8\pi \sqrt{E I_{\eta} C}}{L^2}$$

Para outros casos de carregamentos e condições de travamento, consultar Timoshenko & Gere- Theory of Elastic Stability.

2.7 Elementos finitos

2.7.1 Generalidades

Para se projetar uma estrutura, o engenheiro estrutural deve formular um modelo de cálculo, de forma que a mesma possa ser analisada à luz dos conceitos disponíveis da Resistência dos Materiais e da Mecânica geral. A aplicação desses conceitos, por mais simples que seja a geometria da estrutura, requer um aparato matemático complexo e um grande volume de cálculos para a sua resolução. Com o passar do tempo, os problemas continuaram os mesmos pois a Física, a Mecânica e a Resistência dos Materiais não mudaram, mudaram sim as ferramentas empregadas na resolução dos velhos problemas em função da tecnologia disponível em cada época.

O Cálculo Diferencial e Integral na sua essência, é uma ferramenta ainda largamente empregada na resolução de estruturas simples. Já para estruturas mais complexas, exige excessivas simplificações para as definições das condições de contorno, necessárias para a determinação das soluções particulares das equações diferenciais da peça analisada.

Uma vez obtida uma solução particular para uma equação diferencial, torna-se costume armazená-la para futuras aplicações em problemas similares, evitando a resolução de novas equações diferenciais, nascendo assim as popularmente chamadas *formulinhas*, evitando deduções repetitivas.

Outra ferramenta que foi largamente empregada na resolução dos problemas de estática na engenharia, foi a *grafostática*, que consiste em um conjunto de processos gráficos.

Para os cálculos, empregavam-se réguas de cálculo e algumas máquinas mecânicas de quatro operações. No final da década de 1960 surgiram grandes máquinas elétricas de mesa para quatro operações. Além desses equipamentos, para armazenar valores de cálculos repetitivos existiam os outrora populares *livros de tabelas*, como por exemplo tabelas de , *logaritmos nas diversas bases, senos, cossenos, tangentes e outras*.

No início da década de 1970, o advento das calculadoras eletrônicas com funções trigonométricas, função logaritmo e outras funções - como as da marca *Texas* e particularmente as da marca *Hewlett Packard*, as populares *HP* - , aposentou as réguas de cálculos, tabelas e outras máquinas de quatro operações. Também reduziu o uso dos métodos gráficos pela facilidade do emprego de métodos analíticos.

Contemporâneos das *HPs* foram os grandes computadores da *IBM*, ficando o seu emprego restrito a alguns projetos mais requintados, em face de fatores como: dependência de empresas especializadas em informática, alto custo da hora de processamento, dificuldade de

codificação de programas como o *STRESS*, perfuração de cartões, obtenção de listagens de dados e resultados em formulários contínuos com cópias obtidas pelo emprego de papel carbono, também contínuo, inserido entre dois formulários.

Apesar dessas dificuldades, nessas máquinas começou o emprego em larga escala de ferramentas que empregavam o *método dos elementos finitos*, pela velocidade de resolução e capacidade de armazenamento de dados, muito alta para a época.

Atualmente, em substituição aos velhos *IBM*, as máquinas empregadas em todas as modalidades do conhecimento humano são os micro computadores, carinhosamente chamados de “*micros*”.

O mesmo acontece na engenharia estrutural, onde as ferramentas usadas nos *micros* são basicamente as ferramentas *CAD* e *elementos finitos*, com capacidade de armazenamento de dados e velocidade de processamento muito maiores que as daquelas grandes máquinas dos primórdios da informática.

2.7.2 Comparação entre os métodos analíticos clássicos e o método dos elementos finitos

Ao contrário dos métodos analíticos clássicos que nos dão respostas exatas para os infinitos pontos do sistema físico estudado e se prestam a resolução de problemas simples, o método dos elementos finitos é um método de soluções aproximadas, com respostas para alguns pontos, chamados de pontos discretos. A vantagem deste método reside em resolver problemas complexos com boa precisão.

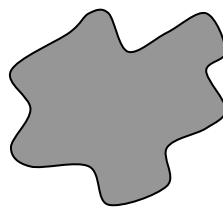


Figura 20 - Conjunto contínuo de pontos com soluções calculadas pelos métodos analíticos clássicos

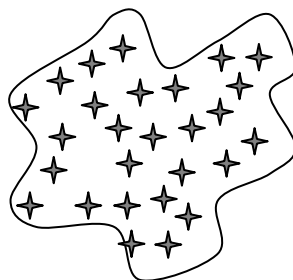


Figura 21 - Conjunto de pontos discretos com soluções calculadas pelo método dos elementos finitos

2.7.3 Conceito Intuitivo do método dos elementos finitos

Para se entender no que consiste o método dos elementos finitos, deve-se recordar alguns conceitos de uma das mais importantes ferramentas do Cálculo Diferencial e Integral, a Integral, a começar pelo seu próprio símbolo. O símbolo \int nada mais é do que a letra S que representa soma, o símbolo d significa diferencial, que nada mais é do que o limite de uma grandeza, quando a mesma tende a zero. Por exemplo, $dx = \lim_{x \rightarrow 0}$. No gráfico da figura abaixo, observa-se que na faixa de largura dx , por dx tender a zero, a altura $y=f(x)$ medida pela esquerda é praticamente igual a altura $y = f(x)$ medida pela direita, transformando-a num retângulo de largura dx e altura $y = f(x)$. Assim, a integral $\int f(x) dx$ representa a soma das áreas de todos os retângulos de altura $y = f(x)$ e largura infinitesimal dx . Definindo-se para x os valores inicial $x = a$ e final $x = b$, obtém-se a integral definida $\int_a^b f(x) dx$, que geometricamente representa a área entre a curva e o eixo Ox , entre as retas $x=a$ e $x=b$.

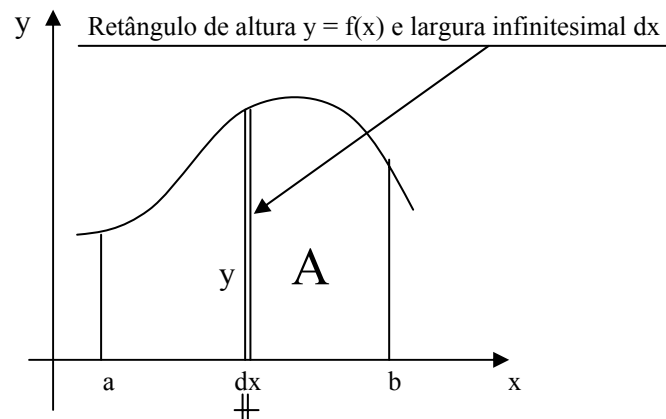


Figura 22 - Interpretação geométrica da integral $\int_a^b f(x) dx$

Em função da importância do problema ou da tecnologia disponível, nem sempre é necessário ou possível trabalhar com valores infinitesimais nas suas variáveis. Por exemplo, na topografia, no cálculo de áreas de terrenos é costume adotar incrementos não infinitesimais.

Supondo que na figura abaixo, a área desenhada represente a área A de um lote confrontante com a rua x pela frente, um rio nos fundos, uma cerca a pela esquerda e outra cerca b pela direita, ambas de quem da rua x para o lote olha. Neste caso, no cálculo da área do terreno, o topógrafo adota um modelo aproximado de soma de áreas de trapézios ou retângulos de largura Δx não infinitesimal, conforme representado na figura que segue:

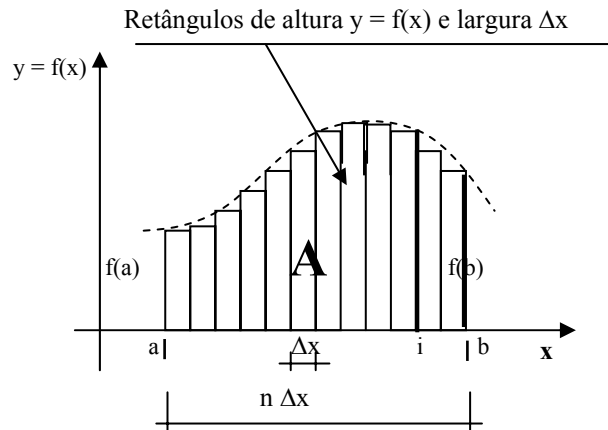


Figura 23 - A área aproximada como soma de áreas de retângulos

Em outros casos, a adoção de valores infinitesimais dx , mesmo com o uso de recursos de informática, torna-se inviável pelo tempo requerido ao processamento. O método dos elementos finitos trabalha com modelo aproximado da soma da área de retângulos em lugar das integrais, adotando para tal, incrementos Δx de precisão aceitável.

Assim, para cálculos aproximados, é válido fazer $A = \int_a^b f(x) dx \cong \sum_{i=1}^n f(i) \Delta x$, onde n é o número de retângulos, que gera elementos finitos para a resolução de esquemas unifilares.

O mesmo conceito pode ser extrapolado para as integrais duplas e triplas, onde a integral dupla $\int_c^d \int_a^b f(x, y) dx dy \cong \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f(i) \Delta x f(j) \Delta y$, gera elementos finitos bidimensionais para a resolução de estruturas em forma de chapas, placas e cascas e a integral tripla $\int_e^f \int_c^d \int_a^b f(x, y, z) dx dy dz \cong \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{\ell} f(i) \Delta x f(j) \Delta y f(k) \Delta z$, gera elementos finitos tridimensionais para a resolução de estruturas tridimensionais.

Na figura abaixo encontram-se alguns exemplos de aplicações de elementos finitos em estruturas lineares, bi-dimensionais e tri-dimensionais.

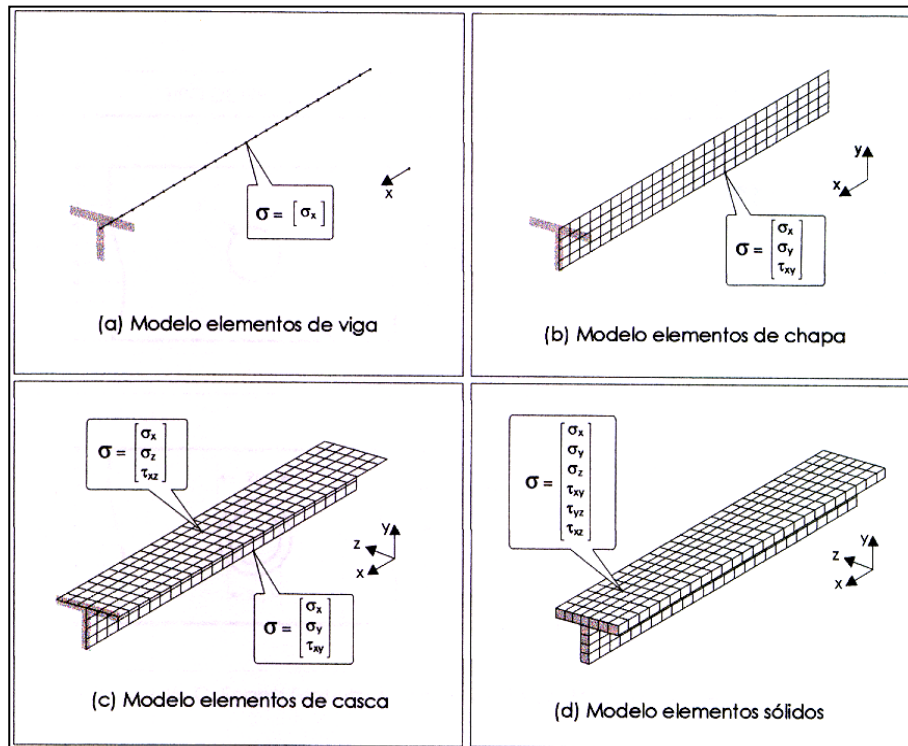


Figura 24 - Exemplos de aplicações de elementos finitos em estruturas lineares, bi-dimensionais e tri-dimensionais
 Fonte: Pappalardo 2007

2.7.4 Simulações empregando o método dos elementos finitos

Um sistema físico, pode ser considerado como um grande campo do conhecimento específico e suas variáveis, como por exemplo:

- Sistema físico das estruturas, cujas variáveis são os deslocamentos;
- Sistema físico da termodinâmica, cuja variável é a temperatura;
- Sistema físico da mecânica dos fluidos, cujas variáveis são a pressão, velocidade, temperatura;
- Sistema físico do eletromagnetismo, cuja variável é o campo elétrico;
- Sistema físico da radiação nuclear, cuja variável é a emissão das partículas alfa e beta;
- Sistema físico da aerodinâmica, cuja variável é a velocidade do ar;
- Sistema físico dos solos e rochas, cuja variável é a sua resistência mecânica;
- Outros sistemas físicos e suas respectivas variáveis.

Todo sistema contínuo pode ser simulado à luz da mecânica do contínuo, através do emprego dos métodos analíticos clássicos. No caso específico do sistema contínuo estrutura, o modelo físico pode ser simulado através de sistemas das equações diferenciais que governam o problema estrutural. Por motivos já expostos, a resolução desses sistemas no campo da mecânica dos contínuos é extremamente trabalhosa, partindo-se então para a discretização. Num sistema discreto, as soluções das equações diferenciais tornam-se pulverizadas, válidas para alguns pontos, recaindo-se em sistemas de equações lineares. Essas equações podem ser resolvidas, por exemplo, pelo método de GAUSS, gerando para o problema, soluções aproximadas no campo dos deslocamentos.

A figura abaixo mostra partes de uma estrutura a serem modelados através de elementos finitos.

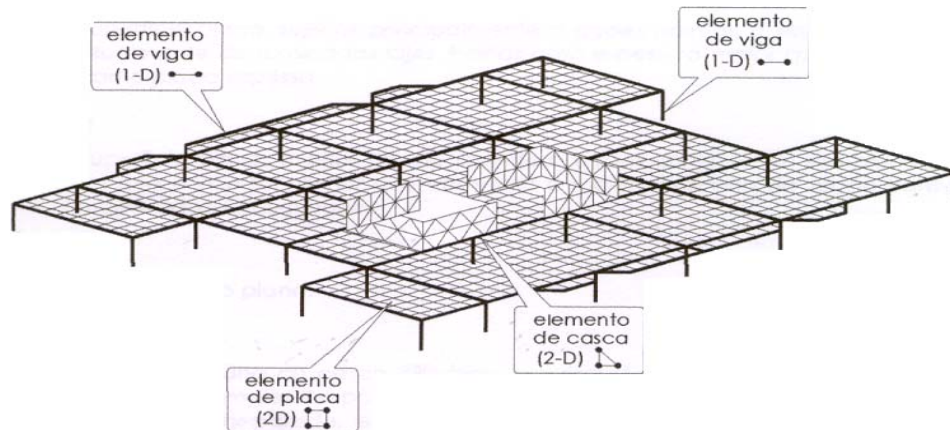


Figura 25 - Partes de uma estrutura a serem modelados através de elementos finitos
Fonte: Pappalardo 2007

A figura abaixo mostra sistemas discretos idealizados para a resolução de uma viga e uma laje por elementos finitos.

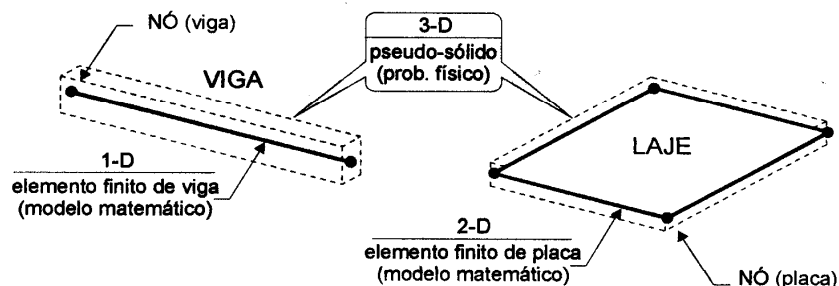


Figura 26 - Idealização de sistemas discretos para a aplicação de elementos finitos
Fonte: Pappalardo 2007

2.7.5 Princípio de cálculo e interligação entre elementos finitos

O princípio de cálculo dos elementos finitos consiste no equilíbrio da parte do todo, quando submetida a solicitações externas. Se cada parte do todo apresentar esforços externos iguais aos internos, ou seja, estiver em equilíbrio, o todo também estará. Cada uma dessas partes do todo é um dos seus *elementos finitos* e estão interligados entre si pelos vértices. Um sistema de eixos na base ortonormal é necessário para a localização de cada elemento no todo, bem como a definição da direção e sentido das ações externas e deslocamentos.

Neste método, as variáveis são os deslocamentos nos vértices dos elementos. Estes deslocamentos são facilmente transformados em tensões através da teoria da elasticidade, a partir dos deslocamentos nodais u , v e w , respectivamente nos sentidos dos eixos x , y e z . Esses deslocamentos discretos são representados pelo símbolo U .

A figura abaixo mostra uma peça sujeita a carregamento externo, subdividida em elementos finitos tridimensionais do tipo hexaédricos, detalhe da sua interação através das forças nodais com os outros elementos adjacentes, detalhe de um elemento finito deformado e sistemas de referência global x,y,z e local u, v, w .

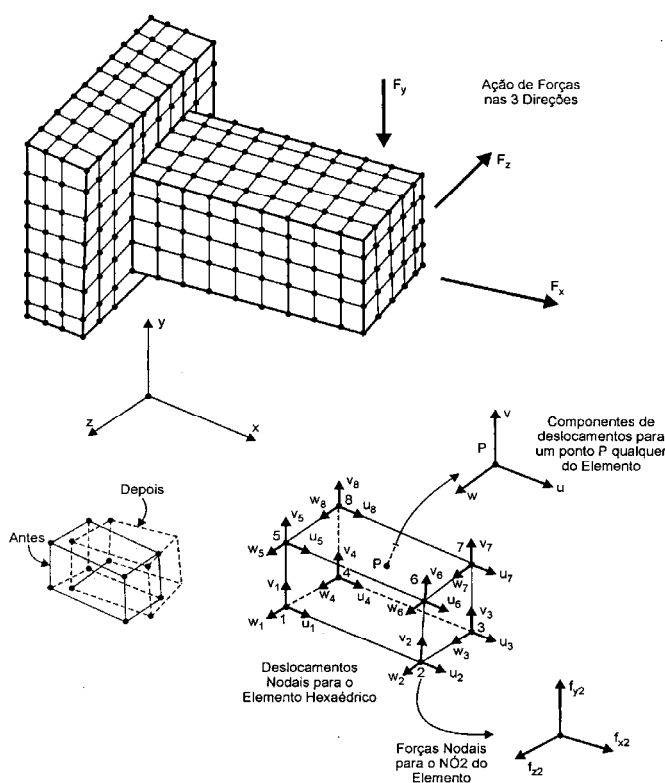


Figura 27 - Peça sujeita a ações externas subdividida em elementos finitos, detalhe de um elemento finito e sua interação com os adjacentes

Fonte: Alves Filho 2003

A figura abaixo mostra a mesma viga em balanço da figura anterior, modelada com elementos finitos tridimensionais hexaédricos, com o carregamento externo distribuído nos vértices dos elementos (pressões no bloco sólido).

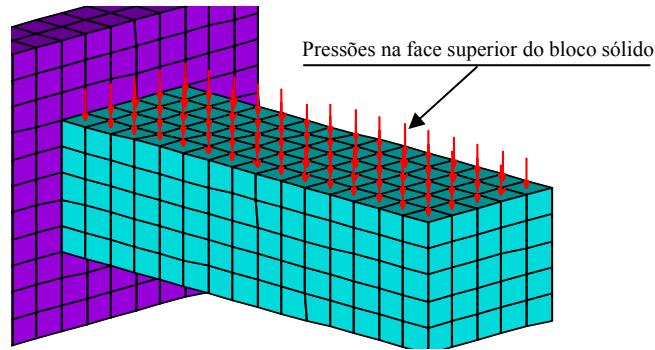


Figura 28 - Viga em balanço modelada com elementos finitos
Fonte: Software ANSYS

A figura abaixo apresenta as *Curvas de Isovalores de Tensões* (análogas às curvas de nível utilizadas em topografia) de uma viga em balanço, obtidas como resultado do processamento do carregamento da figura anterior no programa ANSYS. A variação de cores está associada a uma escala de tensões ao lado direito da figura.

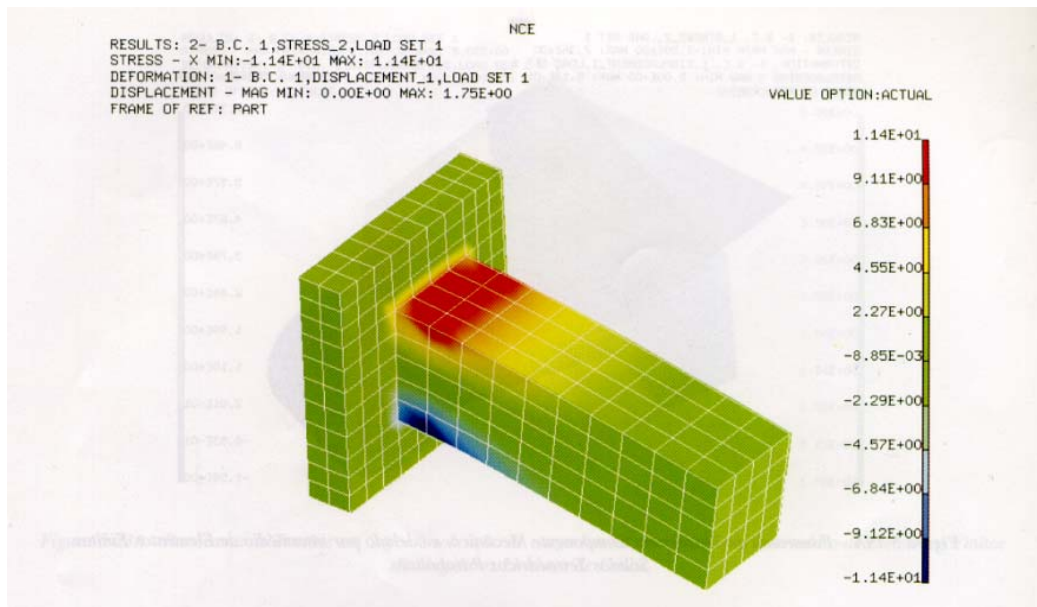


Figura 29 - Curvas de isovalores de tensões numa viga em balanço, modelada por intermédio de elementos finitos.
Fonte: Alves Filho 2003

2.7.6 Tipos de elementos finitos

Os elementos finitos podem ser dos tipos lineares, planos, laminares ou sólidos, em função do tipo de estrutura a ser modelado. Quanto ao número de nós, podem ter apenas os nós de extremidades ou ainda mais nós intermediários, dependendo da precisão de cálculo desejada. No quadro abaixo encontram-se alguns tipos de elementos finitos disponíveis no programa ANSYS.

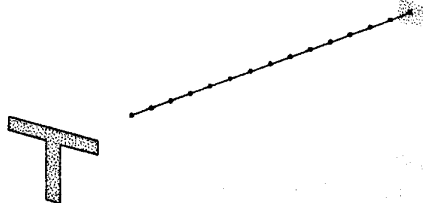
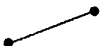
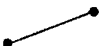
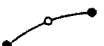
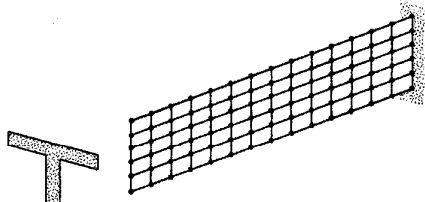
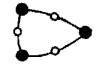


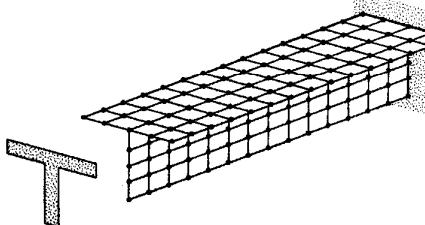



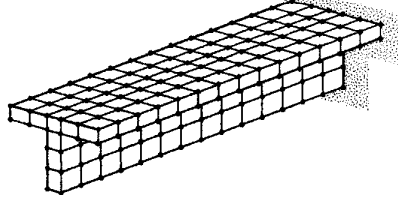

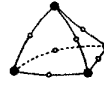

Elementos estruturais lineares			
Viga plana  BEAM3 2 nós, 2-D UX, UY, RZ	Viga espacial  BEAM4 2 nós, 3-D UX, UY, UZ RX, RY, RZ	Viga espacial  BEAM189 2 nós, 3-D UX, UY, UZ RX, RY, RZ	
Elementos estruturais planos			
Plano triangular  PLANE2 6 nós, 2-D UX, UY	Plano quadrang. ordem inferior  PLANE42 4 nós, 2-D UX, UY	Plano quadrang. ordem superior  PLANE82 8 nós, 2-D UX, UY	
Elementos estruturais laminares			
Casca ordem inferior  SHELL63 4 nós, 3-D UX, UY, UZ RX, RY, RZ	Casca ordem superior  SHELL93 8 nós, 3-D UX, UY, UZ RX, RY, RZ	Casca n-linear  SHELL43 4 nós, 3-D UX, UY, UZ RX, RY, RZ	
Elementos estruturais sólidos			
Sólido hexaédrico  SOLID45 8 nós, 3-D UX, UY, UZ	Sólido tetraédrico  SOLID92 10 nós, 3-D UX, UY, UZ	Sólido hexaédrico  SOLID95 20 nós, 3-D UX, UY, UZ	

Figura 30 - Tipos de elementos finitos
 Fonte: ANSYS / Pappalardo 2007.

2.7.7 Função de Interpolação

O método dos elementos finitos apresenta resultados para pontos discretos, como esquematicamente representado por U_1 , U_2 e U_3 . Surge então um problema, o de como prever o comportamento de uma função deslocamento em um ponto qualquer $u(x,y)$, situado entre pontos discretos.

Para a solução de tal problema, seja qual for o elemento finito empregado, lança-se mão da função chamada função de interpolação ou função de forma, que tem a finalidade de resgatar a continuidade da função. Por exemplo, para um elemento finito triangular em duas dimensões (plano) u_1 , u_2 e u_3 são os deslocamentos nodais (incógnitas) nos pontos discretos; $u_p(x_p, y_p)$ é a função do deslocamento, que permite calcular os deslocamentos num ponto qualquer no interior do elemento finito a partir dos deslocamentos nodais, ou seja; $u(x,y) = \mathbf{N} \cdot \mathbf{U}$, onde \mathbf{N} é a função de interpolação;

A função de interpolação \mathbf{N} adotada no ANSYS é a função Polinomial.

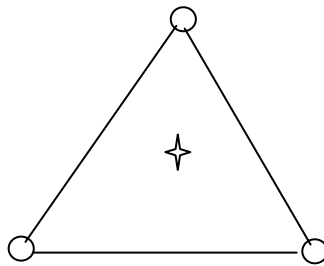


Figura 31 - Resgate da continuidade entre pontos discretos

2.7.7.1 Função polinomial

O desenvolvimento de $(a + b)^n$, sendo n um número Natural, para $n=0$, $n=1$ e $n=2$ e $n=3$, pode ser obtido do seguinte modo:

$$\text{Para } n=0 \Rightarrow (a + b)^0 = 1$$

$$\text{Para } n=1 \Rightarrow (a + b)^1 = a + b$$

$$\text{Para } n=2 \Rightarrow (a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

$$\text{Para } n=3 \Rightarrow (a + b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$$

O desenvolvimento de $(a + b)^n$ para $n > 3$ pode ser obtido com a aplicação das propriedades das potências.

$$\text{Para } n=4 \Rightarrow (a + b)^4 = (a + b)(a + b)^3 = (a + b)(a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3)$$

$$\therefore (a + b)^4 = a^4 + 4a^3b + 6a^2b^2 + 4ab^3 + b^4$$

$$\text{Para } n=5 \Rightarrow (a + b)^5 = (a + b)(a + b)^4 = \dots\dots\dots$$

$$\dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$\text{Para } n=n \Rightarrow (a + b)^n = (a + b)(a + b)^{n-1} = \dots\dots\dots$$

2.7.7.2 Coeficientes Binomiais:

No desenvolvimento de $(a + b)^n$, serão aplicados os coeficientes binomiais, assim definidos:

Dados dois números naturais n e p , com $n \geq p$, define-se como coeficiente binomial n sobre p o número $\binom{n}{p}$ e indica-se $\binom{n}{p} = \frac{n!}{p!(n-p)!} = C_{n,p}$, onde n é dito numerador e p denominador.

2.7.7.3 Casos particulares:

$$\text{Para } p = 0 \Rightarrow \binom{n}{0} = \frac{n!}{0!n!} = 1, \forall n \in \mathbb{N}$$

$$\text{Para } p = 1 \Rightarrow \binom{n}{1} = \frac{n!}{1!(n-1)!} = \frac{n(n-1)!}{(n-1)!} = n, \forall n \in \mathbb{N}$$

$$\text{Para } p = n \Rightarrow \binom{n}{n} = \frac{n!}{n!(n-n)!} = \frac{1!}{0!} = 1, \forall n \in \mathbb{N}$$

2.7.7.4 Binomiais Complementares:

Dois coeficientes binomiais de mesmo numerador são complementares se a soma de seus denominadores for igual ao numerador, isto é: $\binom{n}{p}$ e $\binom{n}{q}$ são complementares se $p + q = n$.

2.7.7.5 Triângulo de Pascal / Tartaglia:

Os coeficientes binomiais podem ser dispostos em uma tabela chamada *triângulo de Pascal* ou de *Tartaglia*, onde os coeficientes de mesmo numerador são agrupados numa mesma linha e os coeficientes de mesmo denominador numa mesma coluna.

Linha zero	$\binom{0}{0}$					
Linha 1	$\binom{1}{0}$	$\binom{1}{1}$				
Linha 2	$\binom{2}{0}$	$\binom{2}{1}$	$\binom{2}{2}$			
Linha 3	$\binom{3}{0}$	$\binom{3}{1}$	$\binom{3}{2}$	$\binom{3}{3}$		
Linha 4	$\binom{4}{0}$	$\binom{4}{1}$	$\binom{4}{2}$	$\binom{4}{3}$	$\binom{4}{4}$	

Linha k	$\binom{k}{0}$	$\binom{k}{1}$	$\binom{k}{2}$	$\binom{k}{3}$	$\binom{k}{4}$... $\binom{k}{k}$

Figura 32 - Triângulo de Pascal
Fonte: Iezzi 2001

Linha zero	1					
Linha 1	1	1				
Linha 2	1	2	1			
Linha 3	1	3	3	1		
Linha 4	1	4	6	4	1	
Linha 5	1	5	10	10	1	1

Figura 33 - Valores dos coeficientes do Triângulo de Pascal
Fonte: Iezzi 2001

2.7.7.6 Desenvolvimento de $(a + b)^n$

Observando o desenvolvimento da parte literal de $(a + b)^n$, com $n \in \mathbb{N}$, pode-se escrever:

$$\begin{array}{cccccccc}
 a^n b^0 & ; & a^{n-1} b^1 & ; & a^{n-2} b^2 & ; & a^{n-3} b^3 & ; & \dots & ; & a^1 b^{n-1} & ; & a^0 b^n \\
 \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} \\
 1^\circ \text{ termo} & & 2^\circ \text{ termo} & & 3^\circ \text{ termo} & & 4^\circ \text{ termo} & & & & n\text{-ésimo termo} & & (n+1)\text{-ésimo termo}
 \end{array}$$

Os coeficientes que aparecem nos desenvolvimentos anteriores correspondem às linhas do triângulo de Pascal. Para determinar os coeficientes do desenvolvimento de $(a + b)^n$, basta considerar a linha de denominador n do triângulo de Pascal.

$$\begin{array}{cccccccc}
 \binom{n}{0} & ; & \binom{n}{1} & ; & \binom{n}{2} & ; & \binom{n}{3} & ; & & ; & \binom{n}{n-1} & ; & \binom{n}{n} \\
 \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} \\
 \text{coeficiente do} & & \text{coeficiente do} & & \text{coeficiente do} & & \text{coeficiente do} & & & & \text{coeficiente do} & & \text{coeficiente do} \\
 \dots 1^\circ \text{ termo} & & 2^\circ \text{ termo} & & 3^\circ \text{ termo} & & 4^\circ \text{ termo} & & & & n\text{-ésimo termo} & & (n+1)\text{-ésimo termo}
 \end{array}$$

2.7.7.7 Teorema Binomial ou teorema de Newton

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^{n-k} b^k = \binom{n}{0} a^n b^0 + \binom{n}{1} a^{n-1} b^1 + \binom{n}{2} a^{n-2} b^2 + \dots + \binom{n}{n-1} a^1 b^{n-1} + \binom{n}{n} a^0 b^n$$

2.7.7.8 Função N de Interpolação empregada no programa ANSYS

Dentre várias funções de interpolação, uma das usadas no ANSYS é a função polinomial. A próxima figura ilustra as equações de superfície empregadas na solução de pontos sobre elementos finitos bidimensionais, no estado plano de tensões.

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} ,$$

sendo: \mathbf{F} = vetor carregamento ;

\mathbf{K} = matriz de rigidez;

\mathbf{U} = vetor deslocamento.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \end{bmatrix} \quad \mathbf{e} \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \end{bmatrix}$$

A resolução de uma estrutura por elementos finitos, tem início nos deslocamentos nodais \mathbf{U} , que permitem o cálculo das deformações específicas $\boldsymbol{\epsilon}$, levando ao tensor das tensões atuantes $\boldsymbol{\sigma}$ através da teoria da elasticidade. As deformações $\boldsymbol{\epsilon}$ são obtidas a partir dos deslocamentos nodais de \mathbf{U} , através das equações de compatibilidade; as tensões atuantes $\boldsymbol{\sigma}$ são obtidas a partir das deformações específicas $\boldsymbol{\epsilon}$, através das equações constitutivas. A comparação entre essas tensões atuantes $\boldsymbol{\sigma}$ e as tensões admissíveis $\bar{\sigma}$ do material, levam a tomada de decisão nos problemas de engenharia estrutural. A figura abaixo ilustra os deslocamentos numa viga em balanço, geradas pelas cargas aplicadas.

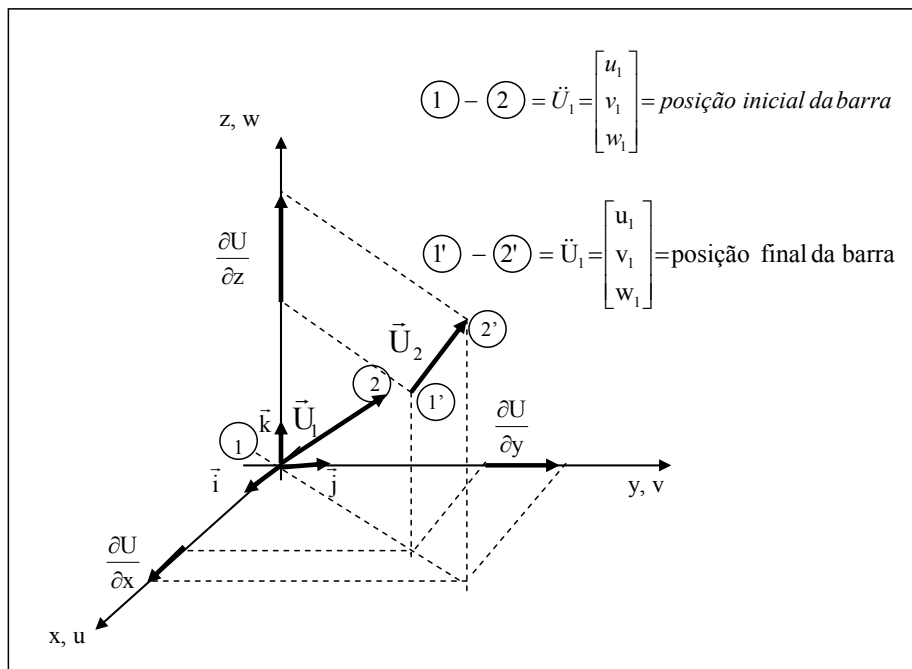


Figura 36 - Componentes do vetor deslocamento \bar{U}_2 (após deformação)

2.7.9 Equações de compatibilidade

Toda derivada parcial é uma derivada direcional na direção dos eixos Ox, Oy e Oz, de um sistema de base ortonormal positiva $B = (\vec{i} = \vec{u}, \vec{j} = \vec{v}, \vec{k} = \vec{w})$. Assim, as componentes ortogonais de um vetor deslocamento \vec{U} , são:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z};$$

A partir das componentes direcionais dos deslocamentos, calculam-se as distorções em cada um dos planos ortogonais xOy, xOz e yOz. Matricialmente pode-se escrever:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x};$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y};$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z};$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}$$

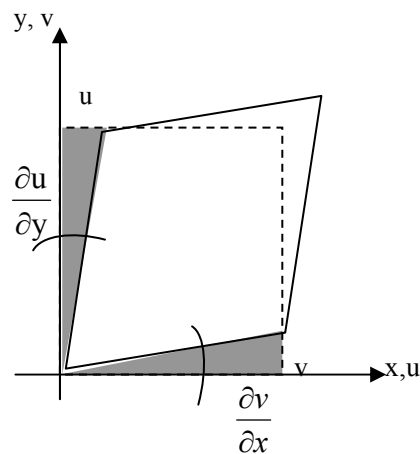


Figura 37 - Distorção no plano xOy

2.7.10 Equações constitutivas

A Lei de Hooke generalizada para um material elasto linear homogêneo isotrópico sob estado tripla de tensões, pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\varepsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E}$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} = \frac{2(1+\nu)\tau_{yz}}{E}$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} = \frac{2(1+\nu)\tau_{zx}}{E}$$

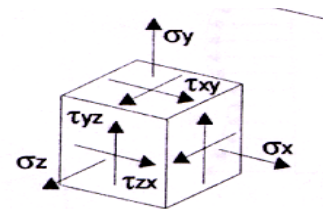


Figura 38 - Estado tripla de tensões
Fonte: Pappalardo 2007

Já para o estado duplo de tensões (estado plano), a Lei de Hooke generalizada para um material homogêneo isotrópico pode ser assim escrita:

$$\varepsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{\sigma_y}{E} \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E}$$

$$\varepsilon_y = -\nu\frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} \quad \gamma_{yz} = 0$$

$$\varepsilon_z = -\nu\frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{\sigma_y}{E} \quad \gamma_{zx} = 0$$

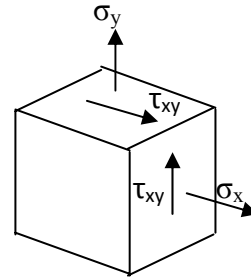


Figura 39 - Estado duplo de tensões
Fonte Pappalardo 2007

Os tensores das tensões e das deformações podem ser definidos para o estado duplo de tensões, respectivamente por: $\sigma^T = [\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}]$ e $\varepsilon^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}]$

ou na forma matricial: $\varepsilon = \mathbf{C} \sigma$

Para materiais *isotrópicos em estado duplo de tensões*, a matriz \mathbf{C}^{iso} é:

$$\mathbf{C}^{\text{iso}} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix}$$

e invertendo-se a matriz \mathbf{C} , obtém-se a matriz constitutiva $\mathbf{D} = \mathbf{C}^{-1}$

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}^{-1} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix},$$

que define o material empregado através de parâmetros físicos do material, ou seja, o seu módulo de elasticidade longitudinal E e o seu coeficiente de Poisson ν . Esta matriz relaciona as tensões com as deformações através da expressão: $\sigma = \mathbf{D} \varepsilon$.

Para outros materiais, outras matrizes para estado duplo de tensões podem ser montadas, como por exemplo para materiais com anisotropia ortogonal, os materiais chamados *ortotrópicos*, onde é necessário o conhecimento de quatro parâmetros físicos. É o caso dos solos com camadas de estratificação horizontal.

$$\mathbf{C}^{\text{ort}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+\nu_{yx}}{E_x} + \frac{1+\nu_{xy}}{E_y} \end{bmatrix}$$

No caso de materiais ortotrópicos, generalizando para o estado triplo de tensões para a simulação do comportamento elasto-linear é necessário conhecer nove parâmetros físicos do material. É o caso das madeiras, onde a equação matricial $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C} \boldsymbol{\sigma}$ corresponde a:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{LR} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{RT} \end{bmatrix}$$

Onde: L = direção longitudinal, R = direção radial e T = direção tangencial.

2.7.11 Energias envolvidas

2.7.11.1 Energia de deformação

Num sistema contínuo, o alongamento total ε_T no regime elástico, desenvolve um trabalho mecânico chamado de energia de deformação.

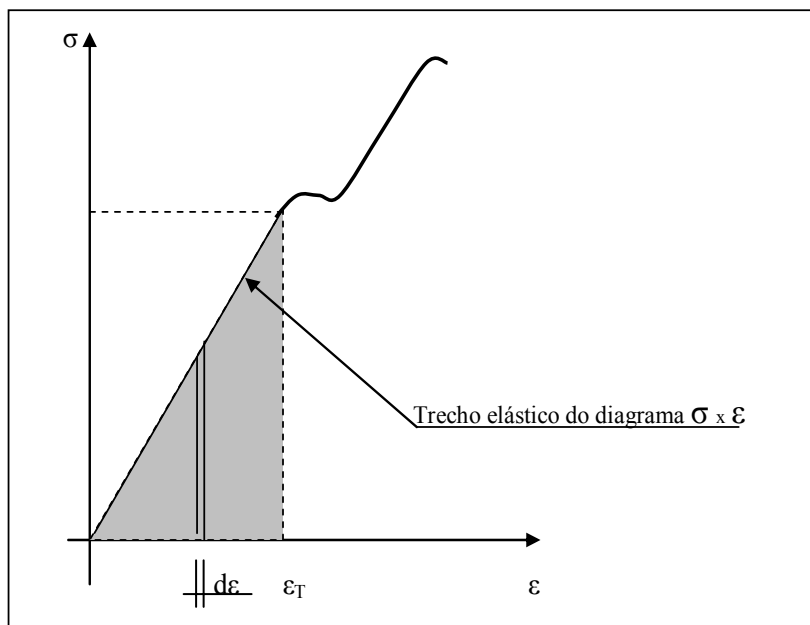


Figura 40 - Energia de deformação Ω por unidade de volume

Da resistência dos materiais, vem: $\Omega = \int_V \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV$ que representa o trabalho das forças internas por unidade de volume. Na expressão acima, não se aplica a propriedade comutativa da multiplicação pois $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ e $\boldsymbol{\sigma}$ são matrizes.

As unidades empregadas são: para σ é o MPa, para ε é $\frac{\text{m}}{\text{m}}$.

Assim, para o produto $\sigma \varepsilon$, a unidade é: $\text{M} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \frac{\text{m}}{\text{m}} = \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$

2.7.11.2 Energia potencial

A energia potencial corresponde ao trabalho das forças externas e é dado pelo produto das forças externas aplicadas, pelos respectivos deslocamentos.

Por exemplo, numa viga isostática o trabalho devido a uma força F , é dado por $W = F U$.

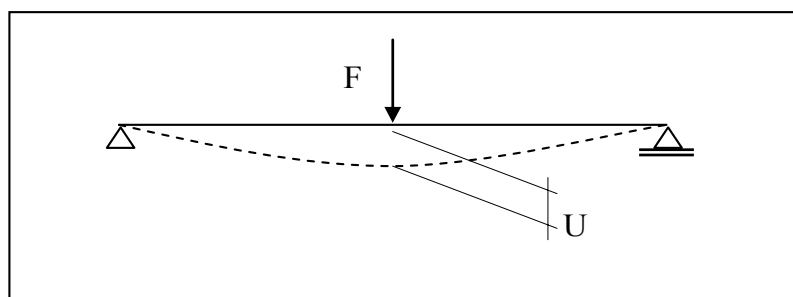


Figura 41 - Deslocamento U provocado por uma força externa F

2.7.12 Matriz de rigidez

As energias envolvidas neste caso, são a energia de deformação e a energia potencial das forças externas. A primeira representa o trabalho das forças internas e a segunda o trabalho das forças externas.

A energia potencial total é obtida pela diferença entre a energia de deformação e a energia potencial das forças externas.

$$\Pi = \Omega - W = \int_V \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV - F U \quad \text{onde:}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{U};$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \mathbf{U}^T \mathbf{B}^T;$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{U}$$

$$\therefore \Pi = \Omega - W = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{U}^T \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{U} dV - F U$$

Pelo princípio da minimização da energia potencial total, obtém-se:

$$\frac{d\Pi}{d\mathbf{U}} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \mathbf{U} - F = 0$$

Fazendo: $\int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV = \mathbf{K}$, obtém-se a equação de equilíbrio $\mathbf{K} \mathbf{U} - \mathbf{F} = \mathbf{0}$,

ou seja: $\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U}$, onde \mathbf{K} = matriz de rigidez do elemento finito considerado.

Assim, a partir da minimização da energia potencial total em um problema conservativo, pode-se escrever: $\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{U}} = 0$

3 METODOLOGIA

Tomando como base os resultados obtidos através de modelo teórico da NBR 7190/97 para vigas maciças em material isotrópico, foi desenvolvida uma simulação numérica, utilizando um programa de método de elementos finitos, para viga em madeira laminada colada de material ortotrópico, e um dimensionamento teórico, ambos propostos neste trabalho.

A comparação dos resultados obtidos através das análises numérica e teórica, norteou definições e critérios de adoção de seções transversais e vãos, para confecção das vigas de madeira laminada colada em madeiras de *Eucalyptus grandis*, em escala 1:1, a serem ensaiadas nos testes destrutivos (prensa).

3.1 Fase I

3.1.1 Determinação das dimensões dos corpos de prova (vigas em escala natural)

Segundo critérios da NBR 7190/97, objetivando a obtenção de valores dos Momentos Últimos a compressão na flexão, a tração na flexão, a cisalhamento e a flambagem lateral para travamentos laterais apenas nos apoios, em vigas de madeira maciça e material isotrópico, foram simuladas 722 (setecentos e vinte e duas) vigas. Foi também calculado o Momento Último para estado limite de utilização de deformação (flecha), para o limite de $l/200$.

Procedimentos adotados:

- Elaboração de Tabela em “Excel” com 722 (setecentos e vinte e duas) vigas com vãos (l), variando de 2,00 (dois) a 4,00 (quatro) metros, com incremento de 0,50m, altura (h) variando de $l/20$ a $l/10$ e largura (b) de 4 cm a $h/2$.

- A análise dos resultados acima, mostrou que os estados limites últimos aplicáveis eram de plastificação na flexão (Mu_{pl}) e de flambagem lateral (Mu_{flt}). Assim, foram selecionadas 24 (vinte e quatro) vigas cuja relação “ b/h ” e l , para estados limites últimos, onde o Momento de ruína por esmagamento fosse próximo do Momento último por Flambagem Lateral (situação de máximo aproveitamento da seção), com as relações entre tais momentos situadas no seguinte intervalo arbitrário: $0,95 \leq Mu_{pl} / Mu_{flt} \leq 1,05$.

- As dimensões adotadas pelo critério acima foram 4cm, 5m e 6cm de largura, por 20 cm de altura e para umvão de 3 m.

- Essas vigas alimentaram o modelo computacional em elementos finitos - software ANSYS 11.0, como vigas MLC e material ortotrópico.

3.1.2 Desenvolvimento do Modelo Computacional

O modelo de cálculo apresentado foi implementado em um programa em elementos finitos, executado no software ANSYS 11.0, que determina parâmetros para o cálculo do momento fletor último quer por ruína por esmagamento devido a compressão na flexão e/ou por instabilidade lateral por flambagem lateral com torção de vigas de MLC.

Na entrada de dados do programa o usuário informa:

- as dimensões da viga (seção transversal e vão);
- a espessura de cada lâmina que compõe a seção transversal da viga;
- a espessura da cola;
- defasagem entre emendas das lâminas;
- as propriedades mecânicas da madeira utilizada:
 - valor da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0});
 - valor da resistência à tração paralela às fibras (f_{t0});
 - valor da resistência ao cisalhamento (f_{v0}).
- os módulos de elasticidade longitudinal ($E_{C0} = E_{LL} = E_L = E_x$)

O programa estabelece o seguinte procedimento:

A partir dos dados fornecidos na modelagem computacional e entrada de dados pelo usuário, o programa calcula e passa a utilizar valores dos módulos de elasticidade transversais ($E_R = E_Y$ e $E_T = E_Z$) e dos módulos de rigidez ao cisalhamento ($G_{LR} = G_{xy}$; $G_{LT} = G_{xz}$ e $G_{TR} = G_{yz}$) seus correspondentes coeficientes de Poisson.

Coeficientes de Poisson ν_{ij} , onde: $\nu_{ij} = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} = \frac{\text{deformação na direção } j}{\text{deformação na direção } i}$

$$\nu_{LR} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L} = \frac{\text{deformação na direção } R}{\text{deformação na direção } L}$$

$$\nu_{LT} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = \frac{\text{deformação na direção } T}{\text{deformação na direção } L}$$

$$\nu_{RT} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_R} = \frac{\text{deformação na direção } T}{\text{deformação na direção } R}$$

$$\nu_{RL} = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_R} = \frac{\text{deformação na direção } L}{\text{deformação na direção } R}$$

$$\nu_{TL} = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_T} = \frac{\text{deformação na direção } L}{\text{deformação na direção } T}$$

$$\nu_{TR} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_T} = \frac{\text{deformação na direção } R}{\text{deformação na direção } T}$$

Tabela 3 - Coeficientes de Poisson de hardwoods, adotados para o eucalipto

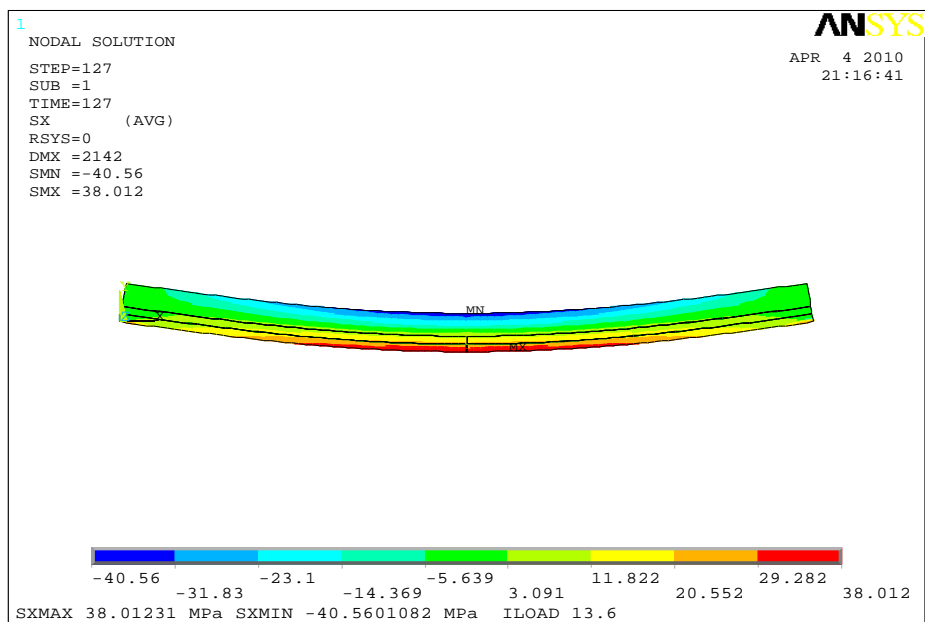
Madeira Eucalipto (hardwood)	Coeficiente de Poisson
Direção:	ν
Longitudinal-radial. = LR	$\nu_{LR} = 0,370$
Longitudinal-tangencial = LT	$\nu_{LT} = 0,500$
Radial-tangencial. = RT	$\nu_{RT} = 0,670$
Tangencial-radial. = TR	$\nu_{TR} = 0,330$
Radial-longitudinal = RL	$\nu_{RL} = 0,044$
Tangencial-longitudinal = TL	$\nu_{TL} = 0,027$

Por meio de um processo interativo o programa fornece coeficientes para o cálculo do momento fletor último a saber, na flexão “**Iload**”, na flambagem lateral “**freq**”.

No caso da flexão, considera-se que o estado limite último de compressão é atingido quando, a tensão atuante na flexão se iguala a tensão de resistência a compressão. Como resultado o programa fornece o parâmetro “**ILOAD**”, que passa a ser adotado no cálculo do momento fletor último.

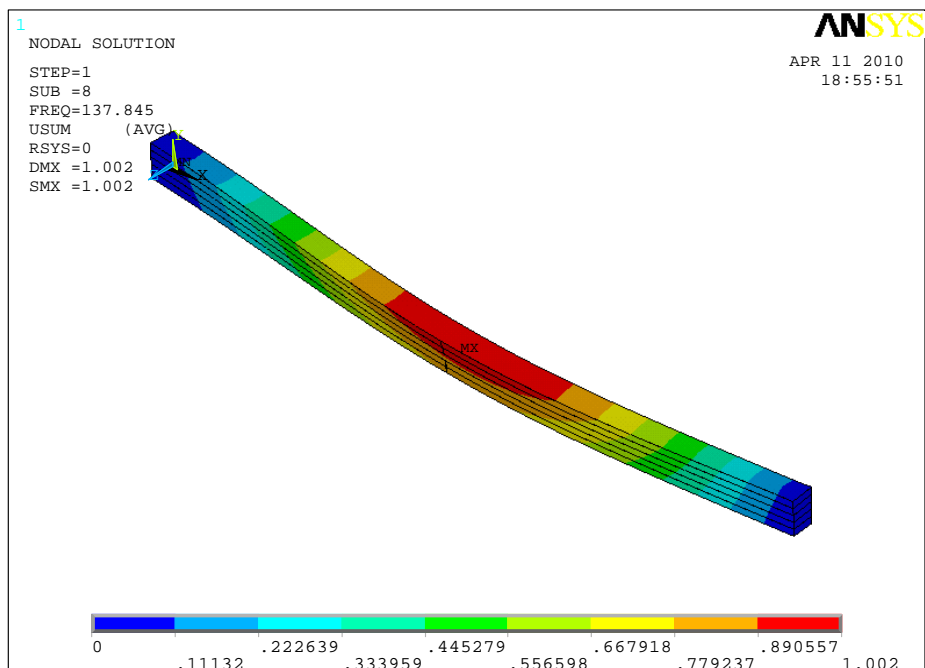
No caso da instabilidade lateral, considera-se que o estado limite último é atingido quando, a tensão atuante na flexão se iguala a tensão limite correspondente ao início da flambagem lateral. Como resultado o programa fornece o parâmetro “**freq**”, que passa a ser adotado no cálculo do momento fletor último.

Os resultados obtidos propiciarão a escolha de vigas que serão confeccionadas em escala natural, para teste destrutivo (Prensa).



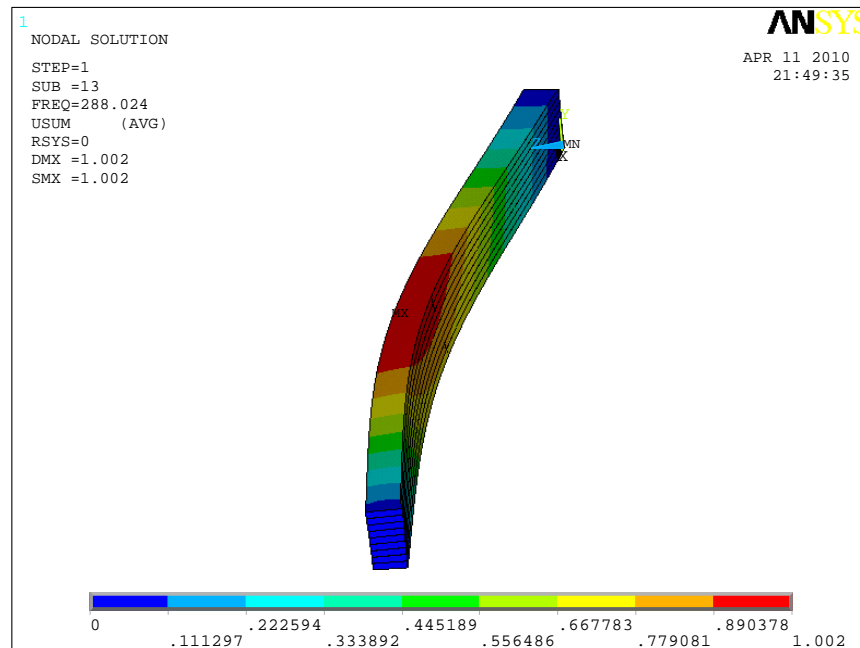
Quadro 1- Resposta ANSYS -Viga com ruptura por compressão na borda superior (ver escala de cores)

Fonte: ANSYS



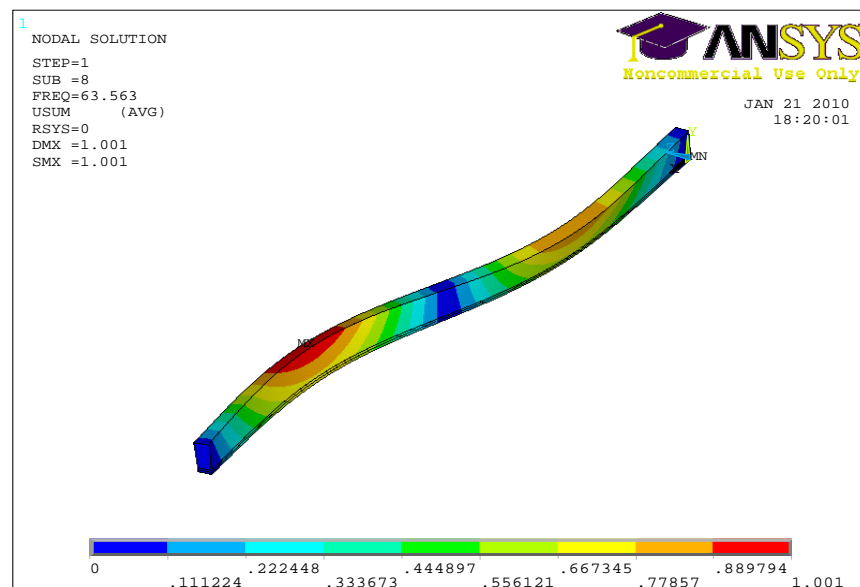
Quadro 2 - Resposta ANSYS: viga com instabilidade lateral, vista lateral para $L_1 = 300$ cm.

Fonte: ANSYS



Quadro 3- Quadro resposta ANSYS: viga com instabilidade lateral para $L_1 = 300$ cm, vista superior

Fonte: ANSYS



Quadro 4- Quadro resposta ANSYS: viga com instabilidade lateral para $L_1 = 150$ cm, vista lateral

Fonte: ANSYS

3.2 Fase II - Confeção das vigas em Madeira Laminada Colada (MLC);

As vigas foram confeccionadas pela empresa CG SISTEMAS CONSTRUTIVOS situada na cidade de Suzano- SP, empresa especializada na confecção de madeira laminada colada e painéis para construção e comercialização de galpões industriais e escoramentos em (MLC).

Abatidas árvores de *Eucaliptus Grandis* com 40 (quarenta) anos de idade, desdobradas e secas até uma umidade de 14% (quatorze por cento) para a confecção das lâminas. Desses troncos foram extraídos corpos de prova de 5cm x 5 cm x 15 cm de madeira maciça, para ensaio a compressão paralela às fibras com a finalidade de obtenção do Módulo de Elasticidade e da tensão de ruptura.

Foram desdobradas lâminas de 4, 5 e 6 centímetros de largura por 3,2 a 3,3 centímetros de altura, medidas acabadas. Cada viga composta por 6 (seis) lâminas sobrepostas, coladas com adesivo estrutural Purbond, gerando vigas acabadas de 4 , 5 e 6 centímetros de largura, por 19,2 a 19,5 centímetros de altura, medidas acabadas. Durante a sua confecção, as vigas permaneceram na prensa por 10 (dez) horas submetidas a uma tensão de 10 MPa a temperatura de 23° C.

Produziu-se 8 (oito) vigas de cada uma das larguras acima, num total de 24 (vinte e quatro) vigas, todas com 3,20 metros de comprimento, metade com lâminas com emendas do tipo finger-joint dispostas aleatoriamente nas lâminas , a outra metade com lâminas sem emendas.

Após receberem acabamento em lixadeiras, foram transportadas ao Laboratório de Ensaio de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana



Ilustração 21 - Vigas recém chegadas ao Laboratório de Ensaio de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie

Fonte: acervo pessoal

3.3 Fase III – Preparação para o ensaio destrutivo

3.3.1 Desenvolvimento e fabricação de peças complementares específicas para a reprodução das condições de contorno pretendidas

Face às condições específicas do ensaio pretendido, o maquinário disponível não dispunha de peças próprias para reproduzir as condições de contorno dos apoios e a liberdade de deslocamento lateral exatamente no ponto de aplicação da carga no centro do vão.

Para tal foram projetados e fabricados com materiais oriundos de estabelecimento de matéria prima reciclável (ferro-velho), garfos de apoios adaptados a parafusos existentes na prensa e também um cutelo móvel “traquitana”, equipado com braçadeira e rolamento para permitir deslocamento lateral no centro do vão, para ensaio de vigas com comprimento de perda de estabilidade igual ao seu vão, e dispositivo para impedir tal deslocamento lateral, para o ensaio de vigas com comprimento de perda de estabilidade lateral igual a metade do seu vão.

3.3.2 Cutelo móvel: (Traquitana)

Este dispositivo foi projetado para receber uma carga de até 100 kN (10 tf) em todas as suas partes componentes (rolamento, roda fixa, eixo e chapas). Como foi fabricado com material de qualidade desconhecida, admitiu-se características mecânicas equivalentes as de um aço carbono.

A Traquitana consiste de um cutelo longitudinal semi circular, fabricado com aço maciço de diâmetro 8,5 cm, sobre o qual encontra-se montado na direção perpendicular a do cutelo, um rolamento para permitir deslocamento lateral da viga no seu ponto central. Tal conjunto é equipado com uma braçadeira fabricada com chapas de 6,3 mm e 10,0 mm de espessura e parafusos do tipo rosca-sem-fim de 16 mm de diâmetro.

O equipamento assim montado, permite o ensaio de vigas com comprimento de instabilidade lateral igual ao vão da viga ($L_1 = 300$ cm).

Para o ensaio de vigas com comprimento de instabilidade lateral igual a metade do seu vão ($L_1 = 150$ cm), foi projetado um dispositivo metálico no formato de “perfil cartola” para eliminar o movimento do rolamento, fixando assim tal ponto contra deslocamentos laterais.



Ilustração 22 - Cutelo móvel (Traquitana) em fabricação
 Fonte : Arquivo pessoal



Ilustração 23 - Rolamento da traquitana instalado no seu eixo
 Fonte : Arquivo pessoal



Ilustração 24 - A "traquitana" pronta, sem o dispositivo de retenção lateral, instalada sobre a viga a ser ensaiada
 Fonte : Arquivo pessoal



Ilustração 25 - Detalhe do rolete móvel lateral e do cutelo fixo circular no sentido longitudinal da viga
 Fonte : Arquivo pessoal



Ilustração 26 - Vista frontal da traquitana e respectiva braçadeira, sem dispositivo de retenção lateral, sendo instalada abaixo da célula de carga na viga a ser ensaiada com $L_1=300$ cm

Fonte : Arquivo pessoal



Ilustração 27 - Vista lateral da “traquitana” e respectiva braçadeira, sem dispositivo de retenção lateral, sendo instalada abaixo da célula de carga na viga a ser ensaiada com $L_1=300$ cm

Fonte : Arquivo pessoal

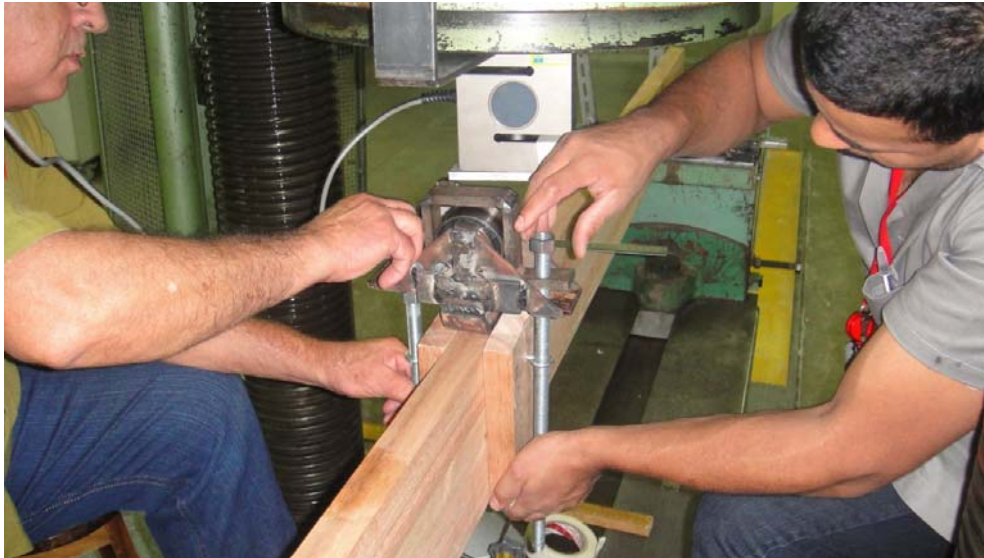


Ilustração 28 - A traquitana com a respectiva braçadeira, instalada na viga a ser ensaiada com $L_1=150$ cm, recebendo o dispositivo de retenção lateral ("perfil cartola) abaixo da célula de carga

Fonte : Arquivo pessoal

3.3.3 Garfos de apoios adaptados a parafusos existentes na prensa

Os garfos nos apoios foram projetados de forma a proporcionar uma grande área de contato da madeira com o aço, eliminando a deformação indesejável na zona de contato da madeira com o rolo do equipamento. Foram também projetados para impedir a rotação da viga ao redor do seu eixo longitudinal e liberar as rotações ao redor dos eixos baricêntricos da seção transversal da viga, reproduzindo assim as condições de contorno do modelo de cálculo da Teoria da Elasticidade (Timoshenko) e do modelo em elementos finitos.

Consiste U de chapa dobrada virados para baixo, com o interior de suas almas apoiados sobre os roletes de apoio da máquina de ensaio. Sobre essa alma apoiam-se as vigas de madeira, sobre uma grande superfície para não sofrerem deformações nas zonas de contato com os roletes

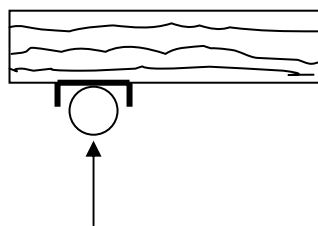


Figura 42 - Esquema de perfil U virado com a boca para baixo, apoiado sobre o rolete e recebendo a viga de madeira

Sobre os perfis U são montados dois perfis cantoneira de chapa dobrada e mãos francesas para abraçar as vigas. Uma das cantoneiras e respectiva mão francesa, é fixa, soldada perpendicularmente ao perfil U; a outra é móvel, parafusada ao perfil U para permitir ajuste às larguras das vigas. Montado o conjunto ao redor da viga a ser nsaiada, um parafuso passante une as duas braçadeiras na parte superior da viga, evitando assim que as braçadeiras venham a se abrir durante o ensaio, devido a solicitação de torção ao redor do eixo da peça. Travado dessa maneira, para evitar a rotação do conjunto foram projetados parafusos rosca-sem-fim nas extremidades do U, dotados de anéis metálicos destinados a se encaixar em parafusos existentes na máquina de ensaio.



Ilustração 29 - Vista frontal do garfo de apoio: Observar parafusos nas extremidades adaptados aos existentes na maquina de ensaio

Fonte : Arquivo pessoal



Ilustração 30 - Conjunto garfo móvel e respectiva mão francesa; perfil U de boca para baixo sobe o rolete da prensa

Fonte : Arquivo pessoal



Ilustração 31 - Garfo totalmente solicitado, impedindo a torção da viga. Observar a deformação da viga por torção em relação ao cordão esticado

Fonte: Arquivo pessoal



Ilustração 32 - Vista Global do garfo

Fonte: Arquivo Pessoal

3.4 Fase IV: ensaios destrutivos:

3.4.1 Ensaio 1: Compressão paralela às fibras

Foram rompidos em ensaio de compressão paralela às fibras, os corpos de prova de madeira maciça 5cm x 5cm x 15cm, retirados do lote de madeira usado na confecção das lâminas. Neste ensaio foram determinados o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura da madeira maciça.

3.4.2 Ensaio 2: Instabilidade lateral e Ruptura de vigas em escala natural.

Foram fabricadas vigas com três larguras, definidas em função da simulação da FASE I, a saber: 4cm, 5cm e 6cm por 19,1cm a 19,5cm de altura. De cada largura, oito vigas, numeradas de 1 a 8, sendo as quatro primeiras com emendas nas lâminas (CE) e as quatro últimas sem emendas nas lâminas (SE)

Assim, por exemplo, V 401 SE significa “viga 01, 4 cm de largura sem emendas nas lâminas.

Cada viga foi ensaiada em duas etapas numa prensa universal para 400 toneladas, usando célula de carga adequada.

Na primeira etapa as contenções laterais foram aplicadas apenas nos apoios, gerando um comprimento de instabilidade lateral igual ao vão da viga ($L_1=300$ cm), determinando-se a carga crítica de instabilidade lateral “ P_{flamba} ”. A primeira etapa correspondeu a ensaios não destrutivos, com tensões geradas pela carga “ P_{flamba} ”, correspondentes ao regime elástico.

Foi muito difícil identificar o exato momento de início do deslocamento lateral, pois num primeiro ensaio sem os garfos, a viga já solicitada com altas tensões, sem prévio aviso, a viga saltou lateralmente simultaneamente a um estrondo, levando consigo os equipamentos menores (células de carga e relógios). Posteriormente, com a instalação dos garfos, em função de uma pequena folga na abertura dos mesmos, foi possível identificar visualmente o momento em que a viga começa o processo de instabilidade lateral. No momento inicial, a viga é encaixada entre os braços do garfo, deixando-se uma pequena folga entre estes e a viga. Após um certo tempo de carregamento, bruscamente a viga gira para um dos lados, caracterizando o instante de início da instabilidade lateral e sendo a carga correspondente adotada com carga crítica de instabilidade lateral. (“ P_{flamba} ”).

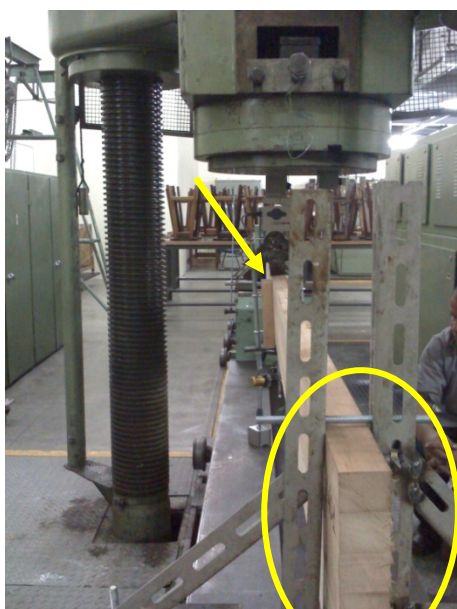


Ilustração 33 - Momento do início da instabilidade lateral, com tendência de giro anti-horário no apoio

Fonte: Arquivo pessoal



Ilustração 34 - Viga sujeita a instabilidade lateral. Detalhe da seção central torcida e seções dos apoios não

Fonte: Arquivo pessoal



Ilustração 35 - Vista da viga durante ensaio de instabilidade lateral, apresentando torção na seção central

Fonte: Arquivo pessoal

Concluída a primeira etapa, a viga é descarregada e novamente instrumentada, agora para ensaio destrutivo.

A segunda etapa do ensaio é similar a da primeira etapa, empregando-se o dispositivo em perfil cartola, projetado para impedir o deslocamento lateral do cutelo, reduzindo o comprimento de instabilidade lateral para metade do vão da viga ($L_1=150$ cm). Nestes casos, as vigas foram a ruptura sem sofrer instabilidade lateral. A carga determinada neste ensaio foi P_{rup} (carga de ruptura).

Nos dois ensaios foram medidas as flechas a cada 1,0 kN de variação de carga aplicada, visando a determinação do módulo de elasticidade à flexão da peça laminada-colada, como viga de seção maciça. A partir deste módulo, determina-se por procedimentos simplificados o módulo de elasticidade a compressão paralela às fibras.



Ilustração 36 - Vista da seção central da viga com ($L_1=150$ cm), com marca de ruptura por compressão na porção superior, junto a marca do cutelo, e ruptura frágil por tração na porção inferior
Fonte: Arquivo pessoal

3.4.3 Ensaio 3

Terminados os ensaios das vigas em escala natural, das partes intactas das vigas sem emendas nas lâminas, foram retirados corpos de prova da lâmina inferior com dimensões correspondentes a largura da viga (4, 5 e 6 cm), altura de uma lâmina (de 3 a 3,3 cm) e 70 cm de comprimento para ensaios de flexão nas lâminas. Tais corpos de prova foram rompidos em prensa universal menor, com vão de 50 cm com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade da madeira maciça a flexão e compará-lo com o da viga de madeira laminada colada. Também foi registrada a tensão de ruptura.



Ilustração 37 - Trechos de lâminas retirados das partes intactas das vigas sem emendas nas lâminas
Fonte: Arquivo pessoal

3.4.4 Ensaio 4

Ainda das partes intactas das vigas rompidas, foram retirados corpos de prova gêmeos para ensaio de cisalhamento na cola e na madeira colada. Tal ensaio visa determinar, em função da resistência a cisalhamento da cola em relação a da madeira, se a madeira laminada colada pode ser considerada como maciça.

3.5 Modelos numéricos e computacionais

De posse das características mecânicas da madeira obtidas nos ensaios acima, foram realimentados os modelos computacionais do ANSYS e numéricos da Norma de da Teoria da Elasticidade, proporcionando condições de comparações dos resultados encontrados.

De posse dos resultados dos três modelos acima, para a mesma madeira, com as mesmas características mecânicas, determinar fatores de correlação α e β que proporcionarão o cálculo de valores reais de ruptura a partir de qualquer um dos modelos teóricos empregados.

3.6 Análise estatística:

Admitindo-se uma distribuição normal, para comparações entre duas amostras foi usado o teste T e para a comparação entre mais que duas amostras, foi empregado a análise da variância (ANOVA).

4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.1 Ensaios de compressão paralela às fibras em corpos de prova de madeira maciça usada na fabricação das lâminas da MLC utilizada no ensaio

4.1.1 Teoria empregada

Foram ensaiados treze corpos de prova 5cm x 5 cm x 15 cm (a x a x L) anotando-se as cargas de ruptura (P_{rup}) e as deformações (U) correspondentes a incrementos de carga de 500 kgf.

De posse dos resultados observados, determinam-se a Tensão de Ruptura a Compressão Paralela às Fibras (f_{c0}) e o Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_{c0}), no trecho elástico do Diagrama Tensão x Deformação.

$$f_{c0} = \frac{P_{rup}}{A_0}, \text{ onde } A_0 \text{ é a área da seção transversal do corpo de prova;}$$

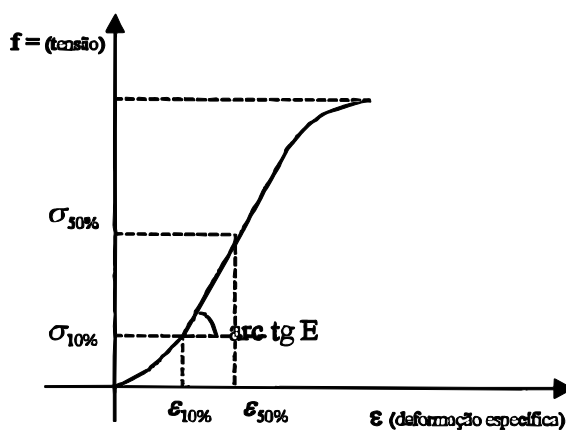


Figura 43 - Diagrama Tensão x Deformação da madeira
Fonte: NBR 7190/97

$$E_{C0} = \frac{\frac{P_{50\%}}{A} - \frac{P_{10\%}}{A}}{\frac{U_{50\%}}{L} - \frac{U_{10\%}}{L}}$$

4.1.2 Resultados de ensaios de compressão paralela às fibras em corpos de prova de madeira maciça (5 x 5 x 15)cm

Tabela 4 - Cargas Críticas e Deformações - Corpos de Prova CP 01, CP 02, CP 03 e CP 04

P (kN)	CP 01			CP 02			CP 03			CP 04		
	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05	80	80	80	95	35	65	75	55	65	100	20	60
10	160	160	160	160	110	135	120	110	115	150	80	115
15	210	210	210	210	180	195	140	145	142,5	185	175	180
20	270	270	270	300	250	275	200	195	197,5	220	185	202,5
25	310	310	310	390	280	335	230	235	232,5	260	210	235
30	350	350	350	407	380	393,5	265	260	262,5	290	240	265
35	390	390	390	490	410	450	300	295	297,5	330	340	335
40	430	430	430	500	470	485	340	335	337,5	355	405	380
45	475	475	475	521	490	505,5	385	345	365	390	420	405
50	510	510	510	627	511	569	400	398	399	410	470	440
55	550	550	550	655	550	602,5	435	420	427,5	445	480	462,5
60	590	590	590	685	580	632,5	470	440	455	570	520	545
65	625	625	625	710	611	660,5	505	480	492,5	600	580	590
70	670	670	670	740	640	690	660	620	640	630	680	655
75				765	670	717,5	680	640	660	660	738	699
80				890	780	835	710	680	695	680	760	720
∴												
∴												
140												
P_{rup}	P_{rup} = 115,00 kN			P_{rup} = 136,50 kN			P_{rup} = 135,50 kN			P_{rup} = 148,00 kN		
Obs:	medidor em apenas um dos lados			medidores nos dois lados			medidores nos dois lados			medidores nos dois lados		

Tabela 5 - Cargas Críticas e Deformações Corpos de Prova CP 05, CP 06, CP 07 e CP 08

P (kN)	CP 05			CP 06			CP 07			CP 08		
	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05	150	55	102,5	128	0	64	120	50	85	17	75	46
10	215	150	182,5	180	80	130	190	60	125	56	160	108
15	280	210	245	225	120	172,5	250	65	157,5	95	175	135
20	340	330	335	260	140	200	397	75	236	240	210	225
25	390	360	375	280	200	240	460	86	273	290	250	270
30	400	380	390	320	220	270	473	96	284,5	310	283	296,5
35	440	460	450	360	250	305	512	173	342,5	345	315	330
40	490	480	485	385	280	332,5	550	228	389	375	363	369
45	510	580	545	410	310	360	587	300	443,5	403	377	390
50	650	610	630	440	340	390	634	340	487	545	495	520
55	690	620	655	480	370	425	642	375	508,5	370	515	442,5
60	715	645	680	500	480	490	694	405	549,5	600	540	570
65	745	685	715	530	505	517,5	730	562	646	628	565	596,5
70	780	705	742,5	580	540	560	860	580	720	660	590	625
75	805	785	795	590	550	570	902	710	806	690	615	652,5
80	865	815	840	620	580	600	1075	745	910	725	640	682,5
∴												
∴												
140												
P_{rup}	P_{rup} = 139,50 kN			P_{rup} = 140,00 kN			P_{rup} = 119,00 kN			P_{rup} = 121,00 kN		
	medidores nos dois lados			medidores nos dois lados			medidores nos dois lados			medidores nos dois lados		

Tabela 6 - Cargas Críticas e Deformações Corpos de Prova CP 09, CP 10 e CP 11

P (kN)	CP 09			CP 10			CP 11		
	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05	186	189	187,5	5	94	49,5	145	25	85
10	255	255	255	28	158	93	226	38	132
15	328	328	328	48	212	130	279	48	163,5
20	395	395	395	79	258	168,5	340	90	215
25	441	441	441	102	300	201	385	130	257,5
30	492	492	492	134	332	233	428	170	299
35	540	540	540	148	380	264	466	205	335,5
40	555	555	555	202	406	304	515	248	381,5
45	623	623	623	330	452	391	550	282	416
50	656	656	656	360	480	420	586	314	450
55	691	691	691	392	518	455	625	324	474,5
60	735	735	735	485	660	572,5	756	382	569
65	752	752	752	558	677	617,5	800	418	609
70	780	780	780	590	708	649	848	452	650
75	823	823	823	622	842	732	885	500	692,5
80	847	847	847	658	872	765	916	560	738
⋮									
140									
P_{rup} =	P_{rup} = 112,90 kN medidores nos dois lados			P_{rup} = 136,00 kN medidores nos dois lados			P_{rup} = 118,00 kN medidores nos dois lados		

Tabela 7 - Cargas Críticas e Deformações Resultados Corpos de Prova CP 12, CP 13

P (kN)	CP 12			CP 13		
	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)	Deformação esquerda (cmx1000)	Deformação direita (cmx1000)	Deformação média (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0
05	102	67	84,5	120	110	115
10	147	123	135	160	180	170
15	180	180	180	220	240	230
20	211	221	216	280	260	270
25	241	271	256	320	280	300
30	275	311	293	380	330	355
35	306	440	373	390	340	365
40	347	480	413,5	420	380	400
45	378	506	442	450	390	420
50	400	640	520	490	480	485
55	527	670	598,5	510	530	520
60	553	700	626,5	560	550	555
65	582	730	656	600	580	590
70	605	747	676	625	630	627,5
75	738	780	759	760	660	710
80	745	803	774	795	680	737,5
⋮						
140						
P_{rup} =	P_{rup} = 134,00 kN medidores nos dois lados			P_{rup} = 1315,00 kN medidores nos dois lados		

4.1.3 Quadro Resumo do Cálculo das Tensões de Ruptura e Módulos de Elasticidade

Nomenclatura	b ₁ (cm)	b ₂ (cm)	h (cm)	P _{rup} (kN)	f _{rup} (kN/cm ²)	P _{50%} (kN)	U _{50%esmag} (cmx1000)	P _{10%} (kN)	U _{10%esmag} (cmx1000)	E _{c0} (kN/cm ²)
CP01	5.00	4.82	15.15	115.00	4.77	60.00	590.00	15.00	210.00	74.44
CP02	4.90	4.90	15.22	136.50	5.69	70.00	690.00	15.00	195.00	70.43
CP03	4.92	4.80	15.14	135.50	5.74	70.00	640.00	15.00	142.50	70.87
CP04	4.96	4.90	15.16	148.00	6.09	75.00	699.00	15.00	180.00	72.11
CP05	4.96	4.85	15.14	139.50	5.80	70.00	742.50	15.00	245.00	69.58
CP06	4.96	4.84	15.14	140.00	5.83	70.00	560.00	15.00	172.50	89.51
CP07	4.98	4.85	15.13	119.00	4.93	60.00	549.50	15.00	157.50	71.91
CP08	4.96	4.81	15.16	121.00	5.07	60.00	570.00	15.00	135.00	65.73
CP09	4.96	4.85	15.09	129.00	5.36	55.00	691.00	15.00	328.00	69.12
CP10	4.94	4.80	15.16	136.60	5.76	70.00	649.00	15.00	130.00	67.75
CP11	5.00	4.86	15.11	118.00	4.86	60.00	569.00	15.00	163.50	69.00
CP12	4.96	4.80	15.15	134.00	5.63	65.00	656.00	15.00	180.00	66.84
CP13	5.00	4.85	15.15	131.50	5.42	65.00	590.00	15.00	230.00	86.77

Tabela 8 - Valores das Tensões de Ruptura e Módulos de Elasticidade Paralelos às Fibras dos CP 01 ao CP 13

4.2 Ensaios de flexão em vigas na escala natural

Foram ensaiadas 24 (vinte e quatro) vigas com 3 (três) metros de vão , numa Prensa Universal para 400 tf, com carga P aplicada no centro do vão.

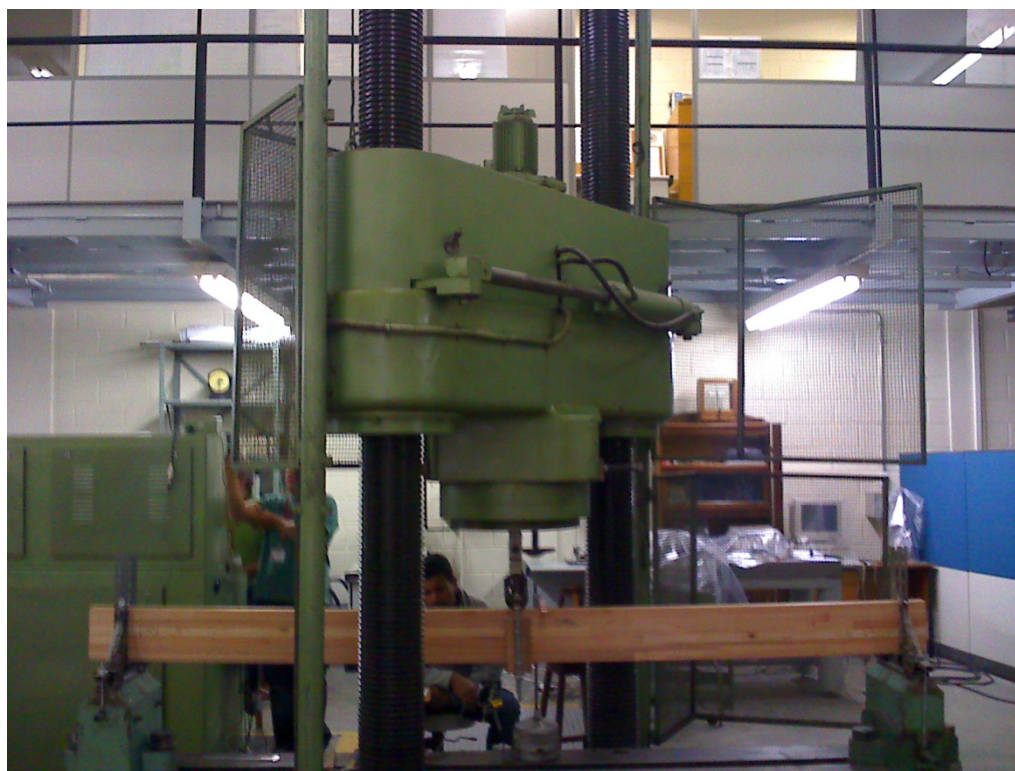


Ilustração 38 - Viga com três metros de vão sendo ensaiada na prensa

Cada Viga foi alvo de 2(dois) ensaios, a saber:

4.2.1 Primeiro ensaio:

Vigas desprovidas de travamentos laterais contra a instabilidade entre apoios, com um comprimento de instabilidade lateral L_1 igual ao vão L da viga. Neste caso, todas as vigas sofreram instabilidade lateral com cargas “ P_{flamba} ” com tensões no regime elástico, sem danos á sua estrutura. Para este ensaio foram especialmente projetados e construídos garfos para restrições de apoios e um cutelo móvel, provido de um rolamento destinado a liberar o movimento lateral (flambagem lateral) no centro do vão, ponto de aplicação da carga.

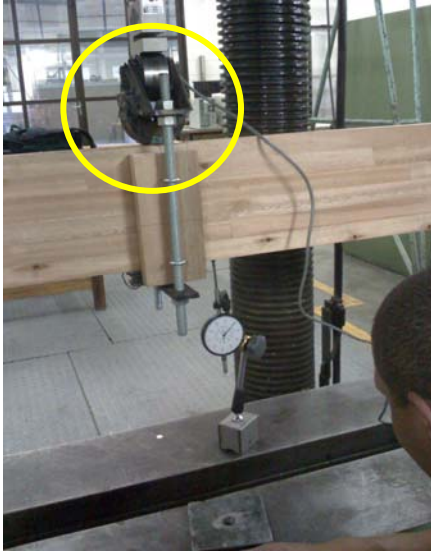


Ilustração 39 - Cutelo com rolamento lateral para permitir a instabilidade



Ilustração 40 - Primeiro ensaio: viga carregada em processo de instabilidade

4.2.2 Segundo ensaio:

As mesmas vigas acima, por não sofrerem danos no primeiro ensaio, receberam dispositivo projetado para impedir o movimento lateral do rolamento, criando por atrito, um ponto de travamento lateral no centro do vão, reduzindo para metade do vão o comprimento de perda de estabilidade (flambagem lateral).

Neste caso nenhuma viga sofreu instabilidade, sendo a carga medida a que provocou a ruptura da viga a carga denominada de “ P_{esmaga} ”.



Ilustração 41 - Dispositivo adaptado ao cutelo, para impedir deslocamento lateral



Ilustração 42 - Segundo ensaio: viga rompida sem sofrer instabilidade

As vigas foram divididas em três grupos, V600, V500 e V400, de acordo com a largura da sua seção transversal projetada, 6cm, 5cm ou 4 cm respectivamente. Dentro de cada grupo, receberam numeração de 01 a 08, sendo de 01 a 04 vigas com emendas (finger joint) nas lâminas (CE) e de 05 a 08 sem emendas nas lâminas (SE).

Por exemplo: V 601 CE corresponde à viga número 01, com largura projetada de 6 cm e sem emendas nas lâminas.

Nas tabelas a seguir, estão anotadas deformações U (flechas) para os dois ensaios, com cargas variando de 100(cem) em 100(cem) kilograma-força.

Numa tabela resumo encontram-se os Módulos de Elasticidade à Flexão (E_{M0}) calculado no trecho linear do diagrama Carga x Deformação e o Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela às Fibras (E_{c0}), calculado à partir do anterior.

$$E_{M0} = \frac{(P_{M50\%} - P_{M10\%}) L^3}{(U_{50\%} - U_{10\%}) 4 b h^3}$$

$$E_{M0} = 0,9 E_{c0} , \text{ para folhosas}$$

4.2.3 Resultados de Ensaio de Flexão em vigas com L= 300 cm

Tabela 9 - Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas)
“série 600” - VIGAS COM EMENDAS (CE)

P (kN)	V601 CE		V602 CE		V603 CE		V604 CE	
	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	109	110	100	112	110	105	115	110
2	208	210	165	212	210	195	222	222
3	312	309	265	300	305	293	335	335
4	410	414	350	390	400	580	440	440
5	507	505	445	485	490	455	545	590
6	605	600	535	580	592	586	647	648
7	704	703	626	673	687	665	715	752
8	805	792	720	765	740	763	875	860
9	902	890	810	856		860	965	963
10	1005	995	900	953		960	1075	1073
11	1110	1087	990	1050		1062	1190	1195
12	1210	1187	1090	1145		1160	1200	1300
13	1220	1292	1175	1250		1265		1392
14		1398	1270	1345		1370		1510
15		1508	1365	1420		1490		1615
16		1619	1455	1540		1600		1732
17		1731	1555	1655		1715		1845
18		1845	1656	1760		1850		1960
19		1959	1753	1860		1950		2070
20		2077	1860	1970				2200
21		2198	1990	2080				2310
22		2319		2195				2435
23		2439		2335				2585
24		2520		2520				2710
25				I				2840
26				I				
27				I				
28				I				
29				I				
	P_{flamba} = 13,00 kN		P_{flamba} = 21,00 kN		P_{flamba} = 8,00 kN		P_{flamba} = 12,00 kN	
	P_{esmaga} = 24,00 kN		P_{esmaga} = 30,00 kN		P_{esmaga} = 19,50 kN		P_{esmaga} = 25,00 kN	

Obs.: VIGAS COM EMENDAS (CE) série 600 com largura de 6cm

Tabela 10 - Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas)
 “série 600” - VIGAS SEM EMENDAS(SE)

P (kN)	V605 SE		V606 SE		V607 SE		V608 SE	
	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	102	101	101	95	113	110	105	105
2	197	205	197	190	240	205	202	210
3	295	310	290	281	310	305	300	309
4	396	405	375	368	418	392	397	405
5	499	540	480	470	520	500	493	505
6	583	610	575	550	622	603	587	610
7	687	715	652	642	721	705	693	699
8	775	822	745	723	790	800	790	793
9	872	925	840	820		902	886	891
10	975	1052	927	906		1005	987	990
11	1077	1143	1020	990		1110	1070	1082
12	1180	1266	1112	1082		1211		1182
13	1271	1326	1180	1190		1323		1284
14	1385	1477		1263		1440		1388
15	1484	1603		1351		1545		1477
16	1573	1675		1495		1665		1600
17	1690	1820		1536		1772		1710
18	1800	1926		1626		1877		1820
19	1910	2125		1722		2010		1937
20	2020	2350		1815		2135		2050
21	2140	2370		1922		2370		2177
22	2260	2465		2020		2410		2305
23	2385	2577		2121		2564		2440
24	2512	2715		2225		2728		2590
25	2692	2832		2335		2940		2745
26	2800	2937		2447		3130		2820
27	2970	3041		2570		3360		I
28	3177	3160		2690		3615		I
29	I	3290		2825		3900		I
30	I	3420		2971				I
31		3570		3160				I
32		3740		3560				I
33		3990		3621				
	P_{flamba} = 30,00 kN		P_{flamba} = 13,00 kN		P_{flamba} = 8,00 kN		P_{flamba} = 11,00 kN	
	P_{esmaga} = 38,40 kN		P_{esmaga} = 34,27 kN		P_{esmaga} = 30,40 kN		P_{esmaga} = 32,29 kN	

Obs.: VIGAS SEM EMENDAS (SE) série 600 com largura de 6cm

Tabela 11 - Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas)
 “série 500” - VIGAS COM EMENDAS (CE)

P (kN)	V501 CE		V502 CE		V503 CE		V504 CE	
	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	144	130	125	146	142	148	140	135
2	265	245	250	279	274	272	272	263
3	370	385	368	369	397	394	381	390
4	470	440	489	517	516	516	482	516
5	568	547	605	645	645	645	615	636
6	666	648	715	750	774	759	728	760
7	767	745	820	864	898	878	757	876
8	866	824	938	976	1020	1000	785	996
9	965	944	1048	1090		1115		1122
10	1067	1045	1176	1200		1242		1248
11	1166	1144	1285	1319		1366		1379
12	1269	1244	1394	1427		1488		1500
13		1345	1523	1545		1619		1638
14		1446	1622	1660		1745		1771
15		1551	1751	1775		I		1905
16		1659		1891		I		2044
17		1761		2010		I		2188
18		1872		2130		I		2236
19		1978		2256		I		2400
20		2085		2386		I		I
21		2198		2516		I		I
22		2310		2646		I		I
23		2430		2784		I		I
24		2568		2920		I		I
25		2741		3086		I		I
26		2910		3263				
27		3042		3448				
28		3189		3650				
29		3293		4010				
30				I				
P_{flamba} = 11,00 kN		P_{flamba} = 15,00 kN		P_{flamba} = 8,00 kN		P_{flamba} = 8,00 kN		
P_{esmaga} = 30,00 kN		P_{esmaga} = 30,00 kN		P_{esmaga} = 25,00 kN		P_{esmaga} = 25,00 kN		

Obs.: VIGAS COM EMENDAS (CE) série 500 com largura de 5cm

Tabela 12 - Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas)
 “série 500” - VIGAS SEM EMENDAS(SE)

P (kN)	V505 SE		V506 SE		V507 SE		V508 SE	
	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	104	110	135	136	130	131	135	130
2	180	223	261	264	249	245	257	249
3		327	294	400	362	366	364	364
4		431	509	519	474	466	467	475
5		539	641	641	576	577	578	586
6		642	747	762	693	679	690	700
7		740	862	884	800	789	800	803
8		841	986	1005	905	898	910	912
9		941	1083	1128	1012	1012	1019	1024
10		1044	1209	1249	1121	1125	1130	1135
11		1148	1336	1376	1228	1234	1245	1243
12		1246	1477	1496	1341	1339	1355	1344
13		1348	1630	1624	1456	1474	1405	1467
14		1452		1750	1559	1571		1579
15		1555		1896	1666	1683		1613
16		1660		2024	1788	1794		1715
17		1766		2160	1890	1910		1828
18		1873		2298	2020	2026		1950
19		1980		2440	2136	2140		2079
20		2092		2596	2354	2260		2135
21		2210		2760	2489	2381		2355
22		2325		2943	2622	2505		2539
23		2450		3160	2751	2650		2780
24		2576		3390	2894	2809		2985
25		2736		I	3015	2960		3205
26		2988		I		3140		3440
27		3210				I		I
28		3465				I		I
29		3758				I		I
30		4450				I		I
31		4910				I		I
P flamba = 2,00 kN		P flamba = 13,00 kN		P flamba = 25,00 kN		P flamba = 13,00 kN		
P esmaga = 35,00 kN		P esmaga = 26,00 kN		P esmaga = 30,68 kN		P esmaga = 30,28 kN		

Obs.: VIGAS SEM EMENDAS (SE) série 500 com largura de 5cm

Tabela 13 - Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas)
 “série 400” - VIGAS COM EMENDAS (CE)

P (kN)	V401 CE		V402 CE		V403 CE		V404 CE	
	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	195	285			193	232		
2	365	462			205	415		
3	533	640				587		
4	700	820				748		
5	837	1005				823		
6		1170				1097		
7		1360				1270		
8		1540				1400		
9		1730				i		
10		1920				i		
11		2130						
12		2310						
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
	P flamba = 5,00 kN		P flamba = kN		P flamba = 2,00 kN		kN	
	P esmaga = 23,00 kN		P esmaga = kN		P esmaga = 10,00 kN		P esmaga = kN	

Obs.: VIGAS COM EMENDAS (CE) série 400 com largura de 4cm

Tabela 14 - Cargas Críticas de Flambagem e de Ruptura e Deformações (Flechas)

“série 400” - VIGAS SEM EMENDAS(SE)

P (kN)	V405 SE		V406 SE		V407 SE		408 SE	
	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)	Flecha U Flamba (cmx1000)	Fecha U esmaga (cmx1000)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	157	149	144	151	166	165		
2	360	335	232	310	310	290		
3	500	487		467	440	460		
4	525	636		619	564	557		
5		795		778	645	690		
6		946		930		820		
7		1095		1089		947		
8		1246		1243		1087		
9		1400		1400		1224		
10		1562		1559		1366		
11		1720		1729		1513		
12		1892		1891		1655		
13		2080		2054		1809		
14		i		2223		1956		
15		i		2397		2109		
16		i		2579		2274		
17		i		2754		2428		
18		i		2967		2590		
19		i				2773		
20		i				i		
21		i				i		
22		i				i		
23						i		
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
	P flamba = 4,00 kN		P flamba = 2,00 kN		P flamba = 5,00 kN		P flamba = kN	
	P esmaga = 22,00 kN		P esmaga = 17,60 kN		P esmaga = 23,00 kN		P esmaga = kN	

Obs.: VIGAS SEM EMENDAS (SE) série 400 com largura de 4cm

4.2.4 Cálculo dos Módulos de Elasticidade das Vigas de MLC a partir dos Resultados obtidos nos Ensaios de Laboratório

Nomenclatura	b (cm)	h (cm)	L (cm)	P _{50%} (kN)	U _{50%} esmaga (cmx1000)	P _{10%} (kN)	U _{10%} esmaga (cmx1000)	E _M (kN/cm ²)	E _{c0} (kN/cm ²)
V 601 CE	5,80	19,30	300,00	12,00	1.187,00	3,00	309,00	1.659,40	1.843,78
V 602 CE	5,80	19,40	300,00	15,00	1.420,00	3,00	300,00	1.707,79	1.897,54
V 603 CE	5,90	19,20	300,00	10,00	960,00	2,00	195,00	1.690,35	1.878,17
V 604 CE	5,80	19,40	300,00	13,00	1.392,00	3,00	335,00	1.507,98	1.675,53
V 605 SE	6,00	19,20	300,00	19,00	2.125,00	4,00	405,00	1.386,15	1.540,17
V 606 SE	6,00	19,50	300,00	17,00	1.536,00	4,00	368,00	1.688,69	1.876,32
V 607 SE	6,00	19,60	300,00	15,00	1.545,00	3,00	305,00	1.445,92	1.606,58
V 608 SE	6,00	19,20	300,00	16,00	1.600,00	3,00	309,00	1.600,54	1.778,38
V 501 CE	4,90	19,20	300,00	15,00	1.551,00	3,00	385,00	2.003,03	2.225,59
V 502 CE	4,90	19,30	300,00	15,00	1.775,00	3,00	369,00	1.635,43	1.817,14
V 503 CE	4,90	19,40	300,00	13,00	1.619,00	3,00	394,00	1.540,16	1.711,29
V 504 CE	5,00	19,50	300,00	13,00	1.638,00	3,00	390,00	1.458,87	1.620,96
V 505 SE	5,00	19,20	300,00	18,00	1.873,00	4,00	431,00	1.851,79	2.057,55
V 506 SE	5,00	19,50	300,00	13,00	1.624,00	3,00	400,00	1.487,47	1.652,75
V 507 SE	5,00	19,40	300,00	15,00	1.683,00	3,00	366,00	1.684,71	1.871,90
V 508 SE	4,80	19,20	300,00	15,00	1.613,00	3,00	364,00	1.908,88	2.120,97
V 401 CE	3,80	19,00	300,00	11,00	2.130,00	3,00	640,00	1.390,47	1.544,97
V 402 CE	3,80	19,20	300,00						
V 403 CE	3,80	19,50	300,00	5,00	823,00	1,00	232,00	1.621,40	1.801,55
V 404 CE	4,00	19,20	300,00						
V 405 SE	4,00	19,50	300,00	11,00	1.720,00	2,00	335,00	1.478,88	1.643,20
V 406 SE	3,80	19,20	300,00	9,00	1.400,00	2,00	310,00	1.611,71	1.790,79
V 407 SE	3,80	19,20	300,00	11,00	1.513,00	2,00	290,00	1.846,85	2.052,06
V 408 SE	4,00	19,20	300,00						

Tabela 15 - Resultado dos Módulos de Elasticidade das Vigas de MLC a partir dos Resultados obtidos nos Ensaios de Laboratório

4.3 Ensaios de flexão em lâminas retiradas dos trechos intactos das vigas rompidas

4.3.1 Teoria Empregada

Os corpos de prova para ensaios de flexão, foram confeccionados com pedaços intactos das lâminas inferiores das vigas rompidas, com as seguintes dimensões:

$h = 3,2 \text{ cm}$ = altura da lâmina;

$b = 4 \text{ cm}$ ou 5 cm ou 6 cm = largura da viga correspondente;

$L = 70 \text{ cm}$ = comprimento do corpo de prova.

Tais corpos de prova receberam a mesma numeração da viga de onde foram retirados foram retirados e submetidos a carga centralizada num vão de 50 (cinquenta) centímetros entre eixos.

De posse dos resultados de cargas e respectivas deformações, bem como carga crítica de ruptura a flexão, foram calculados os módulos de elasticidade a flexão e a compressão paralela às fibras.

$$E_{M0} = \frac{(P_{M50\%} - P_{M10\%}) L^3}{(U_{50\%} - U_{10\%}) 4 b h^3}$$

$$E_{M0} = 0,9 E_{C0} , \text{ para folhosas}$$

4.3.2 Deformações e Cargas de ruptura em Lâminas de Madeira Maciça retiradas dos trechos intactos das Vigas de MLC ensaiadas

Tabela 16 - Valores de Carga de Ruptura e Deformações em Corpos de Prova de Flexão, de Lâminas de Madeira retiradas das Vigas Ensaaiadas – CP 601 a CP 608

Dimensões	CP V 601 CE	CP V 602 CE	CP V 603 CE	CP V 604 CE	CP V 605 SE	CP V 606 SE	CP V 607 SE	CP V 608 SE
b (cm)					5,87		6,00	5,95
h (cm)					3,51		3,45	3,51
vão (cm)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
P (kN)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2					0,315		0,185	0,256
0,4					0,518		0,361	0,392
0,6					0,678		0,476	0,586
0,8					0,872		0,660	0,812
1,0					1,119		0,812	0,978
1,2					1,300		1,012	1,178
1,4					1,498		1,220	1,383
1,6					1,716		1,398	1,564
1,8					1,925		1,538	1,719
2,0					2,048		1,699	1,922
2,2					2,225		1,833	2,088
2,4					2,380		1,974	2,244
2,6					2,533		2,130	2,415
2,8					2,666		2,254	2,587
3,0					2,815		2,412	2,722
3,2					2,998		2,578	2,899
3,4					3,144		2,711	3,033
3,6					3,333		2,868	3,225
3,8					3,548		3,040	3,425
4,0					3,694		3,198	3,568
4,2					3,898		3,380	3,735
4,4					4,084		3,590	3,925
4,6					4,255		3,680	4,074
4,8					4,450		3,905	4,288
5,0					4,648		4,012	4,436
P_{rup} (kN)					8,70		9,40	10,00

Tabela 17 - Valores de Carga e Deformações em Corpos de Prova de Flexão, de Lâminas de Madeira retiradas das Vigas Ensaçadas – CP 501 a CP 508

Dimensões	CP V 501 CE	CP V 502 CE	CP V 503 CE	CP V 504 CE	CP V 505 SE	CP V 506 SE	CP V 507 SE	CP V 508 SE
b (cm)					5,06	4,87	4,92	
h (cm)					3,50	3,45	3,46	
vão (cm)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
P (kN)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)
0,0					0,000	0,000	0,000	
0,2					0,378	0,339	0,466	
0,4					0,533	0,599	0,758	
0,6					0,698	0,797	0,933	
0,8					0,914	1,120	1,172	
1,0					1,078	1,345	1,425	
1,2					1,286	1,570	1,658	
1,4					1,478	1,871	1,966	
1,6					1,625	2,068	2,238	
1,8					1,828	2,370	2,415	
2,0					2,067	2,568	2,648	
2,2					2,268	2,915	2,815	
2,4					2,398	3,217	3,048	
2,6					2,566	3,565	3,378	
2,8					2,748	3,857	3,578	
3,0					2,900	4,102	3,765	
3,2					3,076	4,433	3,948	
3,4					3,278	4,734	4,115	
3,6					3,515	5,072	4,368	
3,8					3,678	5,468	4,615	
4,0					3,804	5,715	4,903	
4,2					3,998	6,115	5,125	
4,4					4,290	6,560	5,398	
4,6					4,398	6,979	5,633	
4,8					4,615	7,530	5,888	
5,0					4,680	8,021	6,138	
P_{rup} (kN)					9,90	5,80	8,90	

Tabela 18 - Valores de Carga e Deformações em Corpos de Prova de Flexão, de Lâminas de Madeira retiradas das Vigas Ensaçadas – CP 401 a CP 408

Dimensões	CP V 401 CE	CP V 402 CE	CP V 403 CE	CP V 404 CE	CP V 405 SE	CP V 406 SE	CP V 407 SE	CP V 408 SE
b (cm)					3,99		3,95	
h (cm)					3,45		3,54	
vão (cm)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
P (kN)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)	U (cm)
0,0					0,000		0,000	
0,2					0,425		0,477	
0,4					0,735		0,745	
0,6					0,988		0,986	
0,8					1,398		1,300	
1,0					1,647		1,644	
1,2					1,914		1,988	
1,4					2,215		2,215	
1,6					2,598		2,512	
1,8					2,837		2,860	
2,0					3,142		3,228	
2,2					3,419		3,512	
2,4					3,731		3,815	
2,6					4,012		4,088	
2,8					4,287		4,415	
3,0					4,548		4,658	
3,2					4,876		4,976	
3,4					5,148		5,236	
3,6					5,536		5,644	
3,8					5,938		6,088	
4,0					6,299		6,453	
4,2					6,789			
4,4					7,186			
4,6					7,766			
4,8					8,977			
5,0								
P_{rup} (kN)					5,60		4,00	

4.3.3 Cálculo dos Módulos de Elasticidade das Lâminas das Vigas de MLC a partir dos Resultados obtidos nos Ensaios de Laboratório

Tabela 19 - Resultados dos Módulos de Elasticidade das Lâminas das Vigas de MLC a partir dos Resultados obtidos nos Ensaios de Laboratório

Nomenclatura	b (cm)	h (cm)	L (cm)	P _{50%} (kN)	U _{50%} esmaga (cmx1000)	P _{10%} (kN)	U _{10%} esmaga (cmx1000)	E _M (kN/cm ²)	E _{c0} (kN/cm ²)
V 601 CE			50,00						
V 602 CE			50,00						
V 603 CE			50,00						
V 604 CE			50,00						
V 605 SE	5,87	3,51	50,00	4,40	4,08	0,80	1,12	1.494,75	1.660,83
V 606 SE			50,00						
V 607 SE	6,00	3,45	50,00	4,80	3,91	1,00	0,81	1.558,28	1.731,42
V 608 SE	5,95	3,51	50,00	5,00	4,44	1,00	0,98	1.404,90	1.561,00
V 501 CE			50,00						
V 502 CE			50,00						
V 503 CE			50,00						
V 504 CE			50,00						
V 505 SE	5,06	3,50	50,00	5,00	4,68	1,00	1,08	1.599,60	1.777,33
V 506 SE	4,87	3,45	50,00	2,80	3,86	0,60	0,80	1.123,48	1.248,31
V 507 SE	4,92	3,46	50,00	4,40	5,40	1,00	1,43	1.312,25	1.458,06
V 508 SE			50,00						
V 401 CE			50,00						
V 402 CE			50,00						
V 403 CE			50,00						
V 404 CE			50,00						
V 405 SE	3,99	3,45	50,00	2,80	4,29	0,60	0,99	1.271,92	1.413,25
V 406 SE			50,00						
V 407 SE	3,95	3,54	50,00	2,00	3,23	0,20	0,48	1.166,88	1.296,53
V 408 SE			50,00						

4.4 Ensaios de cisalhamento em madeira maciça e em lâminas de cola, de corpos de prova retirados dos trechos intactos das vigas rompidas

4.4.1 Procedimentos

Os corpos de prova para ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, foram confeccionados com pedaços intactos das lâminas inferiores das vigas rompidas, sempre aos pares, sendo um para ensaio de cisalhamento na madeira e o outro par ensaio de cisalhamento na cola.

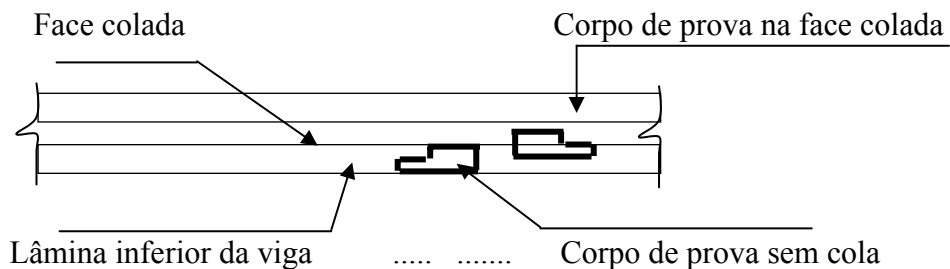


Figura 44 - Retirada de corpos de prova de cisalhamento, de trechos intactos de vigas rompidas

Tais corpos de prova receberam a mesma numeração da viga de onde foram retirados, acrescida da sigla SC para corpos de prova sem cola (madeira maciça) e CC para corpos de prova com cola.

Exemplo: V 405 SC e V405 CC são o par de corpos de prova retirados da viga 405, fora da linha de cola e com a linha de cola no plano de cisalhamento respectivamente.

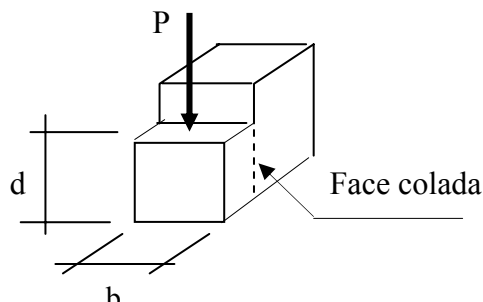


Figura 45 - Retirada de corpos de prova de cisalhamento, de trechos intactos de vigas rompidas Corpo de prova a cisalhamento na face colada, paralela às fibras

De posse das cargas de ruptura nos corpos sem cola, determinou-se a tensão de cisalhamento paralelo às fibras da madeira. No caso dos corpos de prova com cola, teoricamente a tensão aplicada seria a de cisalhamento na cola. Porém, a ruptura dos mesmos ocorreu de duas maneiras distintas, ora no plano da cola e ora na madeira adjacente ao

mesmo com tensão dada por: $f_v = \frac{P_{Rup}}{b d}$

5 MODELOS NUMÉRICOS E COMPUTACIONAIS

5.1 Modelo de dimensionamento da NBR 7190/97 para vigas de seção maciça fletidas em torno do eixo de maior inércia

5.1.1 Generalidades

O formulário empregado foi alimentado com os valores dos Módulos de Elasticidade e tensões de ruptura a compressão paralela às fibras, obtidos nos ensaios destrutivos.

Foram calculados os momentos últimos para distância entre travamentos igual ao vão da viga ($L_1 = 300$ cm) e para um travamento lateral no centro do vão, além dos travamentos nos apoios. Em ambos os casos os Momentos Últimos foram de flambagem lateral.

Tabela 21 - Cargas Críticas pela NBR 7190/97, para $L_1 = 300\text{cm}$ (Distância entre travamentos Laterais)

continua

Nº DE ORDEM	Pesmagas ensaio (kN)	f_{c0} (kN/cm ²)	f_{t0} (kN/cm ²)	E_{c0} (kN/cm ²)	b (cm)	h (cm)	h / b	$W_x = bh^2/6$ (cm ³)	$MC_{max} = W_x \cdot f_{c0}$ (kN.cm)
601-CE	24,00	5,00	6,49	1.843,78	5,8	19,3	3,33	360,1	1.800,0
602-CE	30,00	6,18	8,03	1.897,54	5,8	19,4	3,34	363,8	2.250,0
603-CE	19,50	4,03	5,24	1.878,17	5,9	19,2	3,25	362,5	1.462,5
604-CE	25,00	5,15	6,69	1.675,53	5,8	19,4	3,34	363,8	1.875,0
605-SE	38,40	7,81	10,15	1.540,17	6,0	19,2	3,20	368,6	2.880,0
606-SE	34,27	6,76	8,78	1.876,32	6,0	19,5	3,25	380,3	2.570,3
607-SE	30,40	5,94	7,71	1.606,58	6,0	19,6	3,27	384,2	2.280,0
608-SE	32,29	6,57	8,53	1.778,38	6,0	19,2	3,20	368,6	2.421,8
501-CE	30,00	7,47	9,71	2.225,59	4,9	19,2	3,92	301,1	2.250,0
502-CE	30,00	7,40	9,61	1.817,14	4,9	19,3	3,94	304,2	2.250,0
503-CE	25,00	6,10	7,92	1.711,29	4,9	19,4	3,96	307,4	1.875,0
504-CE	25,00	5,92	7,68	1.620,96	5,0	19,5	3,90	316,9	1.875,0
505-SE	35,00	8,54	11,10	2.057,58	5,0	19,2	3,84	307,2	2.625,0
506-SE	26,00	6,15	7,99	1.652,75	5,0	19,5	3,90	316,9	1.950,0
507-SE	30,68	7,34	9,53	1.871,90	5,0	19,4	3,88	313,6	2.301,0
508-SE	30,28	7,70	10,00	2.120,97	4,8	19,2	4,00	294,9	2.271,0
401-CE	23,00	7,54	9,80	1.544,97	3,8	19,0	5,00	228,6	1.725,0
402-CE					3,8	19,2	5,05	233,5	
403-CE	10,00	3,11	4,04	1.801,55	3,8	19,5	5,13	240,8	750,0
404-CE					4,0	19,2	4,80	245,8	
405-SE	22,00	6,51	8,45	1.643,20	4,0	19,5	4,88	253,5	1.650,0
406-SE	17,60	5,65	7,34	1.790,79	3,8	19,2	5,05	233,5	1.320,0
407-SE	23,00	7,39	9,60	2.052,60	3,8	19,2	5,05	233,5	1.725,0
408-SE					4,0	19,2	4,80	245,8	

Considerando-se (parâmetros fixos) L (cm) = 300cm; $L_1 = 300\text{cm}$; $\gamma_f = 1,0$ e $\beta_E = 4,0$

Tabela 21 - Cargas Críticas pela NBR 7190/97, para $L_1 = 300\text{cm}$ (Distância entre travamentos Laterais)

Conclusão

$M_{Tmax}=W_x \cdot f_{t0}$ (kN.cm)	β_M	L1 max (cm)	σ_{FL} (kN/cm ²)	$M_{FLT}=W_x \cdot \sigma_{FL}$ (kN.cm)	se $L1 < L1_{max}$ e $M_{cmax} < M_{tmax}$ MPL (kN.cm)	se $L1 > L1_{max}$ MFLT (kN.cm)	Mu Colapso (kN . Cm)	Pcr (kN)
2.337.7	18.82	113.7	1.89	681.9	1800 (Compressão)	681,9 (Flambagem)	681,9 (Flambagem)	9.09
2.922.1	18.91	94.1	1.94	705.9	2250 (Compressão)	705,8 (Flambagem)	705,8 (Flambagem)	9.41
1.899.4	18.46	148.8	2.00	725.5	1462,5 (Compressão)	725,4 (Flambagem)	725,4 (Flambagem)	9.67
2.435.1	18.91	99.7	1.71	623.3	1875 (Compressão)	623,2 (Flambagem)	623,2 (Flambagem)	8.31
3.740.3	18.19	65.0	1.69	624.4	2880 (Compressão)	624,4 (Flambagem)	624,4 (Flambagem)	8.33
3.338.0	18.44	90.3	2.04	774.0	2570,25 (Compressão)	774 (Flambagem)	774 (Flambagem)	10.32
2.961.0	18.52	87.7	1.74	666.6	2280 (Compressão)	666,5 (Flambagem)	666,5 (Flambagem)	8.89
3.145.1	18.19	89.3	1.96	721.0	2421,75 (Compressão)	720,9 (Flambagem)	720,9 (Flambagem)	9.61
2.922.1	21.78	67.0	1.67	502.4	2250 (Compressão)	502,3 (Flambagem)	502,3 (Flambagem)	6.70
2.922.1	21.89	55.0	1.36	412.5	2250 (Compressão)	412,5 (Flambagem)	412,5 (Flambagem)	5.50
2.435.1	21.99	62.5	1.27	390.7	1875 (Compressão)	390,6 (Flambagem)	390,6 (Flambagem)	5.21
2.435.1	21.69	63.1	1.25	394.7	1875 (Compressão)	394,6 (Flambagem)	394,6 (Flambagem)	5.26
3.409.1	21.39	56.3	1.60	492.5	2625 (Compressão)	492,5 (Flambagem)	492,5 (Flambagem)	6.57
2.532.5	21.69	61.9	1.27	402.4	1950 (Compressão)	402,3 (Flambagem)	402,3 (Flambagem)	5.37
2.988.3	21.59	59.1	1.44	453.2	2301 (Compressão)	453,1 (Flambagem)	453,1 (Flambagem)	6.04
2.949.4	22.19	59.6	1.53	450.9	2271 (Compressão)	450,9 (Flambagem)	450,9 (Flambagem)	6.01
2.240.3	27.24	28.6	0.72	164.3	1725 (Compressão)	164,2 (Flambagem)	164,2 (Flambagem)	2.19
	27.50							
974.0	27.90	78.8	0.82	196.9	750 (Compressão)	196,9 (Flambagem)	196,9 (Flambagem)	2.63
	26.23							
2.142.9	26.61	38.0	0.82	208.7	1650 (Compressão)	208,7 (Flambagem)	208,7 (Flambagem)	2.78
1.714.3	27.50	43.8	0.82	192.5	1320 (Compressão)	192,5 (Flambagem)	192,5 (Flambagem)	2.57
2.240.3	27.50	38.4	0.95	220.7	1725 (Compressão)	220,6 (Flambagem)	220,6 (Flambagem)	2.94
	26.23							

Considerando-se (parâmetros fixos) L (cm)= 300cm; $L_1=300\text{cm}$; $\gamma_f = 1,0$ e $\beta_E = 4,0$

Tabela 22 - Cargas Críticas pela NBR 7190/97, para $L_1 = 150\text{cm}$ (Distância entre travamentos Laterais)

continua

Nº DE ORDEM	Pesmagas ensaio (kN)	f_{c0} (kN/cm ²)	f_{t0} (kN/cm ²)	E_{c0} (kN/cm ²)	b (cm)	h (cm)	h / b	$W_x = bh^2/6$ (cm ³)	MCmax= $W_x \cdot f_{c0}$ (kN.cm)
601-CE	24,00	5,00	6,49	1.843,78	5,8	19,3	3,33	360,1	1.800,0
602-CE	30,00	6,18	8,03	1.897,54	5,8	19,4	3,34	363,8	2.250,0
603-CE	19,50	4,03	5,24	1.878,17	5,9	19,2	3,25	362,5	1.462,5
604-CE	25,00	5,15	6,69	1.675,53	5,8	19,4	3,34	363,8	1.875,0
605-SE	38,40	7,81	10,15	1.540,17	6,0	19,2	3,20	368,6	2.880,0
606-SE	34,27	6,76	8,78	1.876,32	6,0	19,5	3,25	380,3	2.570,3
607-SE	30,40	5,94	7,71	1.606,58	6,0	19,6	3,27	384,2	2.280,0
608-SE	32,29	6,57	8,53	1.778,38	6,0	19,2	3,20	368,6	2.421,8
501-CE	30,00	7,47	9,71	2.225,59	4,9	19,2	3,92	301,1	2.250,0
502-CE	30,00	7,40	9,61	1.817,14	4,9	19,3	3,94	304,2	2.250,0
503-CE	25,00	6,10	7,92	1.711,29	4,9	19,4	3,96	307,4	1.875,0
504-CE	25,00	5,92	7,68	1.620,96	5,0	19,5	3,90	316,9	1.875,0
505-SE	35,00	8,54	11,10	2.057,58	5,0	19,2	3,84	307,2	2.625,0
506-SE	26,00	6,15	7,99	1.652,75	5,0	19,5	3,90	316,9	1.950,0
507-SE	30,68	7,34	9,53	1.871,90	5,0	19,4	3,88	313,6	2.301,0
508-SE	30,28	7,70	10,00	2.120,97	4,8	19,2	4,00	294,9	2.271,0
401-CE	23,00	7,54	9,80	1.544,97	3,8	19,0	5,00	228,6	1.725,0
402-CE					3,8	19,2	5,05	233,5	
403-CE	10,00	3,11	4,04	1.801,55	3,8	19,5	5,13	240,8	750,0
404-CE					4,0	19,2	4,80	245,8	
405-SE	22,00	6,51	8,45	1.643,20	4,0	19,5	4,88	253,5	1.650,0
406-SE	17,60	5,65	7,34	1.790,79	3,8	19,2	5,05	233,5	1.320,0
407-SE	23,00	7,39	9,60	2.052,60	3,8	19,2	5,05	233,5	1.725,0
408-SE					4,0	19,2	4,80	245,8	

Considerando-se (parâmetros fixos) L (cm) = 300cm; $L_1 = 150\text{cm}$; $\gamma_f = 1,0$ e $\beta_E = 4,0$

Tabela 22 - Cargas Críticas pela NBR 7190/97, para $L_1 = 150\text{cm}$ (Distância entre travamentos Laterais)

								conclusão
$M_{Tmax}=W_x.ft_0$ (kN.cm)	β_M	L_1 max (cm)	σ_{FL} (kN/cm ²)	$M_{FLT}=W_x \sigma_{FL}$ (kN.cm)	se $L_1 < L_{1max}$ e $M_{cmax} < M_{tmax}$ MPL (kN.cm)	se $L_1 > L_{1max}$ MFLT (kN.cm)	Mu Colapso (kN . Cm)	Pcr (kN)
2.337,7	18,82	113,7	3,79	1.363,8	1800 (Compressão)	1363,8 (Flambagem)	1363,8 (Flambagem)	18,18
2.922,1	18,91	94,1	3,88	1.411,7	2250 (Compressão)	1411,7 (Flambagem)	1411,7 (Flambagem)	18,82
1.899,4	18,46	148,8	4,00	1.451,0	1462,5 (Compressão)	1450,9 (Flambagem)	1450,9 (Flambagem)	19,35
2.435,1	18,91	99,7	3,43	1.246,5	1875 (Compressão)	1246,5 (Flambagem)	1246,5 (Flambagem)	16,62
3.740,3	18,19	65,0	3,39	1.248,8	2880 (Compressão)	1248,8 (Flambagem)	1248,8 (Flambagem)	16,65
3.338,0	18,44	90,3	4,07	1.548,1	2570,25 (Compressão)	1548 (Flambagem)	1548 (Flambagem)	20,64
2.961,0	18,52	87,7	3,47	1.333,1	2280 (Compressão)	1333,1 (Flambagem)	1333,1 (Flambagem)	17,78
3.145,1	18,19	89,3	3,91	1.442,0	2421,75 (Compressão)	1441,9 (Flambagem)	1441,9 (Flambagem)	19,23
2.922,1	21,78	67,0	3,34	1.004,8	2250 (Compressão)	1004,7 (Flambagem)	1004,7 (Flambagem)	13,40
2.922,1	21,89	55,0	2,71	825,0	2250 (Compressão)	825 (Flambagem)	825 (Flambagem)	11,00
2.435,1	21,99	62,5	2,54	781,4	1875 (Compressão)	781,3 (Flambagem)	781,3 (Flambagem)	10,42
2.435,1	21,69	63,1	2,49	789,3	1875 (Compressão)	789,3 (Flambagem)	789,3 (Flambagem)	10,52
3.409,1	21,39	56,3	3,21	985,0	2625 (Compressão)	985 (Flambagem)	985 (Flambagem)	13,13
2.532,5	21,69	61,9	2,54	804,8	1950 (Compressão)	804,7 (Flambagem)	804,7 (Flambagem)	10,73
2.988,3	21,59	59,1	2,89	906,4	2301 (Compressão)	906,3 (Flambagem)	906,3 (Flambagem)	12,08
2.949,4	22,19	59,6	3,06	901,8	2271 (Compressão)	901,8 (Flambagem)	901,8 (Flambagem)	12,02
2.240,3	27,24	28,6	1,44	328,5	1725 (Compressão)	328,5 (Flambagem)	328,5 (Flambagem)	4,38
	27,50							
974,0	27,90	78,8	1,64	393,9	750 (Compressão)	393,8 (Flambagem)	393,8 (Flambagem)	5,25
	26,23							
2.142,9	26,61	38,0	1,65	417,5	1650 (Compressão)	417,4 (Flambagem)	417,4 (Flambagem)	5,57
1.714,3	27,50	43,8	1,65	385,1	1320 (Compressão)	385 (Flambagem)	385 (Flambagem)	5,13
2.240,3	27,50	38,4	1,89	441,4	1725 (Compressão)	441,3 (Flambagem)	441,3 (Flambagem)	5,89
	26,23							

Considerando-se (parâmetros fixos) L (cm)= 300cm; $L_1=150\text{cm}$; $\gamma_f = 1,0$ e $\beta_E = 4,0$

5.2 Modelo de Dimensionamento da Teoria da Elasticidade para Vigas de Seção Maciça Fletidas em Torno Do Eixo De Maior Inércia

5.2.1 Generalidades

A teoria aqui empregada foi desenvolvida no século passado por Stephen P. Timoshenko, para peças de materiais isotrópicos, especificamente o aço.

Para simular a madeira como material isotrópico, foram adotadas as seguintes propriedades:

$$E = E_{LL} = \text{módulo de elasticidade longitudinal e } \nu = \frac{\nu_{LR} + \nu_{LT}}{2} = \frac{0,37 + 0,50}{2} = 0,435$$

Foram simuladas vigas sujeitas a cargas concentradas no centro do vão, para duas hipóteses de travamentos laterais contra a instabilidade.

5.2.2 Simulações :

5.2.2.1 Primeira simulação: dois travamentos contra a instabilidade lateral

Nesta simulação, os travamentos laterais foram aplicados apenas nos apoios de forma a impedir a rotação somente em torno do eixo longitudinal da viga, gerando um comprimento de perda de estabilidade lateral igual ao vão da mesma. Neste caso, pela liberdade de rotação da seção central é relevante considerar o efeito desestabilizador gerado pela aplicação da carga acima do centroide da seção transversal da peça.

$$P_{cr} = \frac{16,94 \sqrt{E I_n C}}{l^2} \left(1 - \frac{1,74 a}{l} \sqrt{\frac{E I_n}{C}} \right)$$

$$C = GJ = G \frac{hb^3}{3}$$

$$G = \frac{E_{c0}}{2(1+\nu)}$$

$$I_n = \frac{hb^3}{12}$$

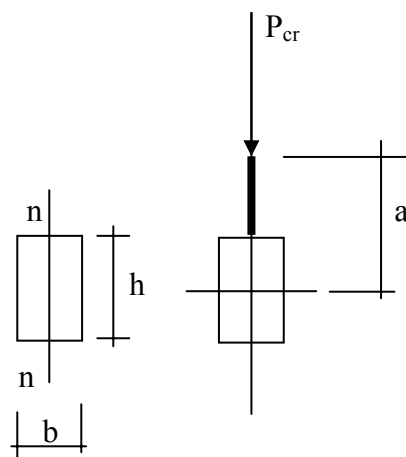


Figura 46 - Excentricidade “a” do ponto de aplicação da carga

5.2.2.2 Segunda simulação: três travamentos contra a instabilidade lateral

Nesta simulação, os travamentos laterais foram aplicados nos apoios e na seção central correspondente ao ponto de aplicação da carga, de forma a impedir a rotação somente em torno do eixo longitudinal da viga, gerando um comprimento de perda de estabilidade lateral igual a metade o vão da mesma. Neste caso, pelo impedimento de rotação da seção central, não é relevante considerar o efeito desestabilizador gerado pela aplicação da carga acima do centroide da seção transversal da peça.

$$P_{cr} = \frac{8\pi\sqrt{EI_n C}}{l^2} = \frac{25,133\sqrt{EI_n C}}{l^2}$$

Tabela 23 - Cargas Críticas de Flambagem Lateral pela Teoria da Elasticidade (Timoshenko) – para $L_1 = 300$ cm

Nº DE ORDEM	b (cm)	h (cm)	L (cm)	L_1 (cm)	a (cm)	ν	$J = hb^3/3$ (cm ⁴)	E_c0 (kN/cm ²)	G (kN/cm ²)	C (kN.cm ²)	Per (kN)
601-CE	5,80	19,30	300,00	300,00	20,25	0,435	1.255,22	1.843,78	642,43	806.393,91	115,78
602-CE	5,80	19,40	300,00	300,00	20,30	0,435	1.261,72	1.897,54	661,16	834.206,36	119,74
603-CE	5,90	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	1.314,43	1.878,17	654,41	860.179,35	123,53
604-CE	5,80	19,40	300,00	300,00	20,30	0,435	1.261,72	1.675,53	583,81	736.605,18	105,73
605-SE	6,00	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	1.382,40	1.540,17	536,64	741.857,49	106,54
606-SE	6,00	19,50	300,00	300,00	20,35	0,435	1.404,00	1.876,32	653,77	917.893,13	131,71
607-SE	6,00	19,60	300,00	300,00	20,40	0,435	1.411,20	1.606,58	559,78	789.967,14	113,26
608-SE	6,00	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	1.382,40	1.778,38	619,64	856.596,69	123,02
501-CE	4,90	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	752,95	2.225,59	775,47	583.890,59	83,85
502-CE	4,90	19,30	300,00	300,00	20,25	0,435	756,88	1.817,14	633,15	479.215,42	68,80
503-CE	4,90	19,40	300,00	300,00	20,30	0,435	760,80	1.711,29	596,27	453.639,05	65,11
504-CE	5,00	19,50	300,00	300,00	20,35	0,435	812,50	1.620,96	564,79	458.895,47	65,85
505-SE	5,00	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	800,00	2.057,55	716,92	573.533,10	82,37
506-SE	5,00	19,50	300,00	300,00	20,35	0,435	812,50	1.652,75	575,87	467.895,25	67,14
507-SE	5,00	19,40	300,00	300,00	20,30	0,435	808,33	1.871,90	652,23	527.219,22	75,67
508-SE	4,80	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	707,79	2.120,97	739,01	523.065,79	75,12
401-CE	3,80	19,00	300,00	300,00	20,10	0,435	347,52	1.544,97	538,32	187.077,38	26,88
402-CE	3,80	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	351,18			
403-CE	3,80	19,50	300,00	300,00	20,35	0,435	356,67	1.801,55	627,72	223.886,84	32,13
404-CE	4,00	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	409,60			
405-SE	4,00	19,50	300,00	300,00	20,35	0,435	416,00	1.643,20	572,54	238.178,12	34,18
406-SE	3,80	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	351,18	1.790,79	623,97	219.125,81	31,47
407-SE	3,80	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	351,18	2.052,06	715,00	251.095,50	36,06
408-SE	4,00	19,20	300,00	300,00	20,20	0,435	409,60			

Tabela 24 - Cargas Críticas de Flambagem Lateral pela Teoria da Elasticidade (Timoshenko) – para $L_1 = 150$ cm

Nº DE ORDEM	b (cm)	h (cm)	L (cm)	L_1 (cm)	a (cm)	ν	$J = hb^3/3$ (cm ⁴)	E_c0 (kN/cm ²)	G (kN/cm ²)	C (kN.cm ²)	Per (kN)
601-CE	5,80	19,30	300,00	150,00		0,435	1.255,22	1.843,78	642,43	806.393,91	190,75
602-CE	5,80	19,40	300,00	150,00		0,435	1.261,72	1.897,54	661,16	834.206,36	197,33
603-CE	5,90	19,20	300,00	150,00		0,435	1.314,43	1.878,17	654,41	860.179,35	203,47
604-CE	5,80	19,40	300,00	150,00		0,435	1.261,72	1.675,53	583,81	736.605,18	174,24
605-SE	6,00	19,20	300,00	150,00		0,435	1.382,40	1.540,17	536,64	741.857,49	175,48
606-SE	6,00	19,50	300,00	150,00		0,435	1.404,00	1.876,32	653,77	917.893,13	217,12
607-SE	6,00	19,60	300,00	150,00		0,435	1.411,20	1.606,58	559,78	789.967,14	186,86
608-SE	6,00	19,20	300,00	150,00		0,435	1.382,40	1.778,38	619,64	856.596,69	202,62
501-CE	4,90	19,20	300,00	150,00		0,435	752,95	2.225,59	775,47	583.890,59	138,12
502-CE	4,90	19,30	300,00	150,00		0,435	756,88	1.817,14	633,15	479.215,42	113,36
503-CE	4,90	19,40	300,00	150,00		0,435	760,80	1.711,29	596,27	453.639,05	107,31
504-CE	5,00	19,50	300,00	150,00		0,435	812,50	1.620,96	564,79	458.895,47	108,55
505-SE	5,00	19,20	300,00	150,00		0,435	800,00	2.057,55	716,92	573.533,10	135,67
506-SE	5,00	19,50	300,00	150,00		0,435	812,50	1.652,75	575,87	467.895,25	110,68
507-SE	5,00	19,40	300,00	150,00		0,435	808,33	1.871,90	652,23	527.219,22	124,71
508-SE	4,80	19,20	300,00	150,00		0,435	707,79	2.120,97	739,01	523.065,79	123,73
401-CE	3,80	19,00	300,00	150,00		0,435	347,52	1.544,97	538,32	187.077,38	44,25
402-CE	3,80	19,20	300,00	150,00		0,435	351,18			
403-CE	3,80	19,50	300,00	150,00		0,435	356,67	1.801,55	627,72	223.886,84	52,96
404-CE	4,00	19,20	300,00	150,00		0,435	409,60			
405-SE	4,00	19,50	300,00	150,00		0,435	416,00	1.643,20	572,54	238.178,12	56,34
406-SE	3,80	19,20	300,00	150,00		0,435	351,18	1.790,79	623,97	219.125,81	51,83
407-SE	3,80	19,20	300,00	150,00		0,435	351,18	2.052,06	715,00	251.095,50	59,40
408-SE	4,00	19,20	300,00	150,00		0,435	409,60			

5.3 Modelo de dimensionamento por elementos finitos através do programa Ansys

5.3.1 Generalidades

O modelo simula um ponto de carga fixo no meio do vão para deslocamentos verticais e os apoios subindo em sucessivos incrementos Δ , chamados "TIMES". Assim gerada a deformação, fica registrada a tensão correspondente.

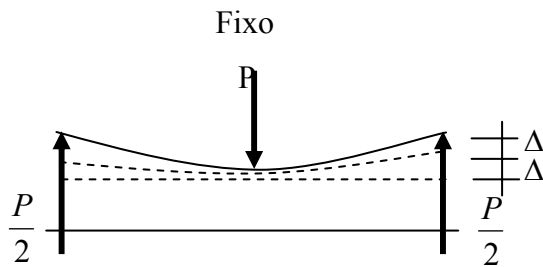


Figura 47 - Esquema de simulação de carga no programa ANSYS

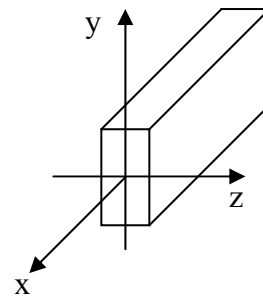


Figura 48 - Referencial

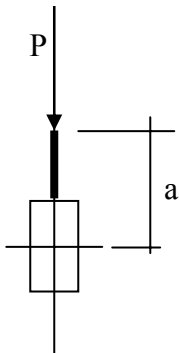


Figura 49 - Excentricidade "a" de aplicação da carga

O modelo foi alimentado com os valores dos Módulos de Elasticidade e tensões de ruptura a compressão paralela às fibras, obtidos nos ensaios destrutivos, para um comprimento de perda de estabilidade igual ao vão da viga

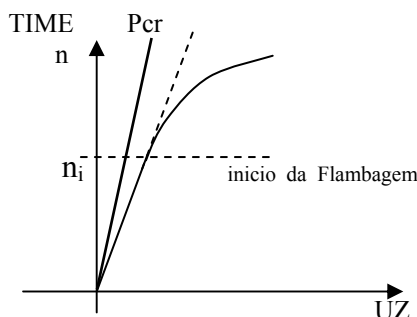


Figura 50 - Obtenção dos resultados do Modelo Computacional

O início da instabilidade lateral corresponde ao ponto transição do trecho reto para o trecho curvilíneo do gráfico TIME x VALUE Uz, ou seja, número de interações $n\Delta$ x flecha lateral. Sobrepondo-se o gráfico Time x P_{CR} , determina-se o valor de P_{CR} correspondente ao início da Flambagem Lateral.

Determinado o número n_i da interação correspondente a mudança acima, consulta-se a Tensão normal correspondente e conseqüentemente a carga P_{CR} que a gerou.

5.4 Descrição do Modelo em Elementos Finitos Empregados neste Modelo

O modelo em elementos finitos das vigas deste trabalho é composto por dois tipos de elementos finitos: um tri-dimensional sólido, o SOLID45, com oito nós e três graus de liberdade por nó (apenas translações) simulando o material madeira de propriedades ortotrópicas, mostrado na Figura 51., e um segundo elemento finito estrutural de interface, o COMBIN39 unidirecional, definido por dois nós e um diagrama tensão de cisalhamento x deformação mostrado na..Figura 52, representando a área de cola longitudinal entre lâminas, a sua resistência e a tendência de gerar deslizamentos relativos entre as mesmas.

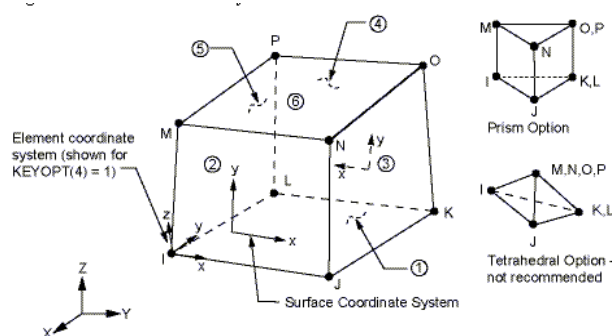


Figura 51 - Geometria do Elemento SOLID45
Fonte: Manual do ANSYS

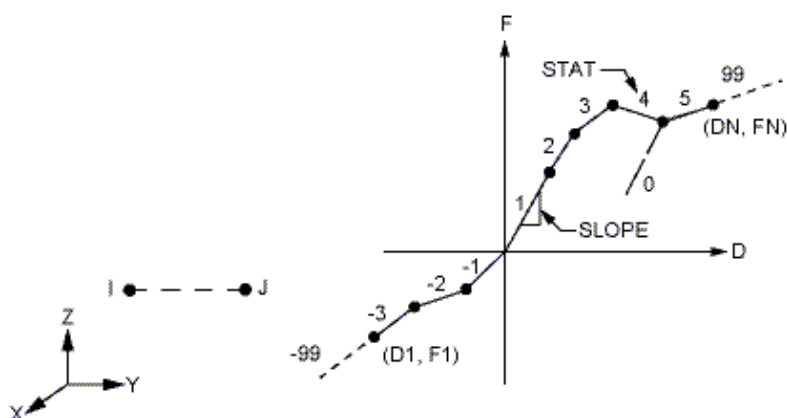


Figura 52 - Geometria do Elemento COMBIN39
Fonte: Manual do ANSYS

Para cada par de nós na interface entre duas lâminas, temos três elementos, um em cada um dos eixos globais x,y e z, mostrados na. Figura 53.

Vários tipos de elementos tem grande capacidade de deformação, como as mostradas na Figura 52, onde F_N representa a força de tração normal ao plano da cola e F_T e a força cortante que gera o deslocamento relativo entre duas lâminas ao longo da sua interface.

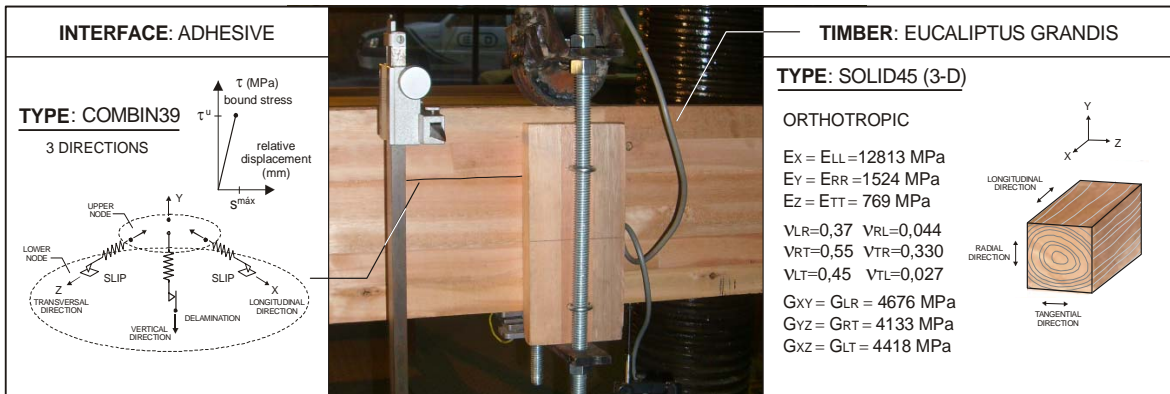


Figura 53 - Tipos de Elementos Finitos e propriedades físicas empregadas nos modelos numéricos de vigas laminadas coladas

Fonte: Ansys / foto arquivo pessoal

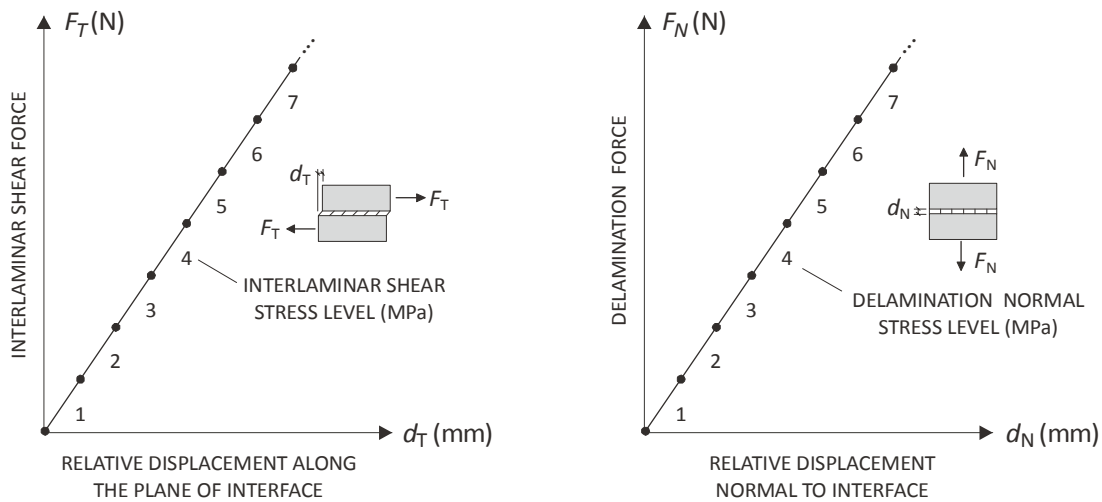


Figura 54 - Curvas Força x Deflexão para os elementos de interface

5.4.1 Condições de contorno utilizadas no Modelo em elementos finitos

As mesmas condições de contorno empregadas nos ensaios destrutivos são consideradas em um modelo matemático em elementos finitos. Para refletir a situação de um sistema da aplicação da carga de instabilidade do ensaio é necessário incluir restrições verticais e horizontais nos apoios (simulando os garfos) e no ponto central de aplicação de carga (simulando o cutelo móvel), mostradas na figura abaixo.

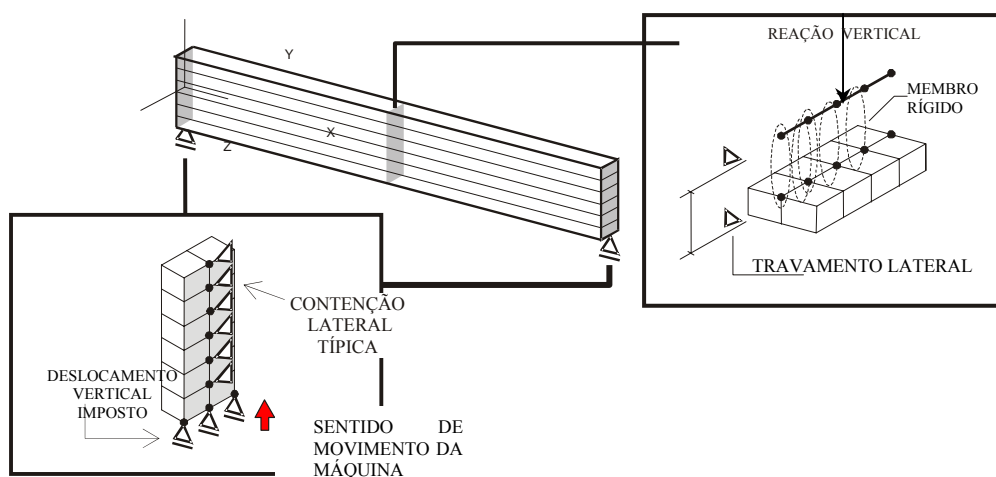
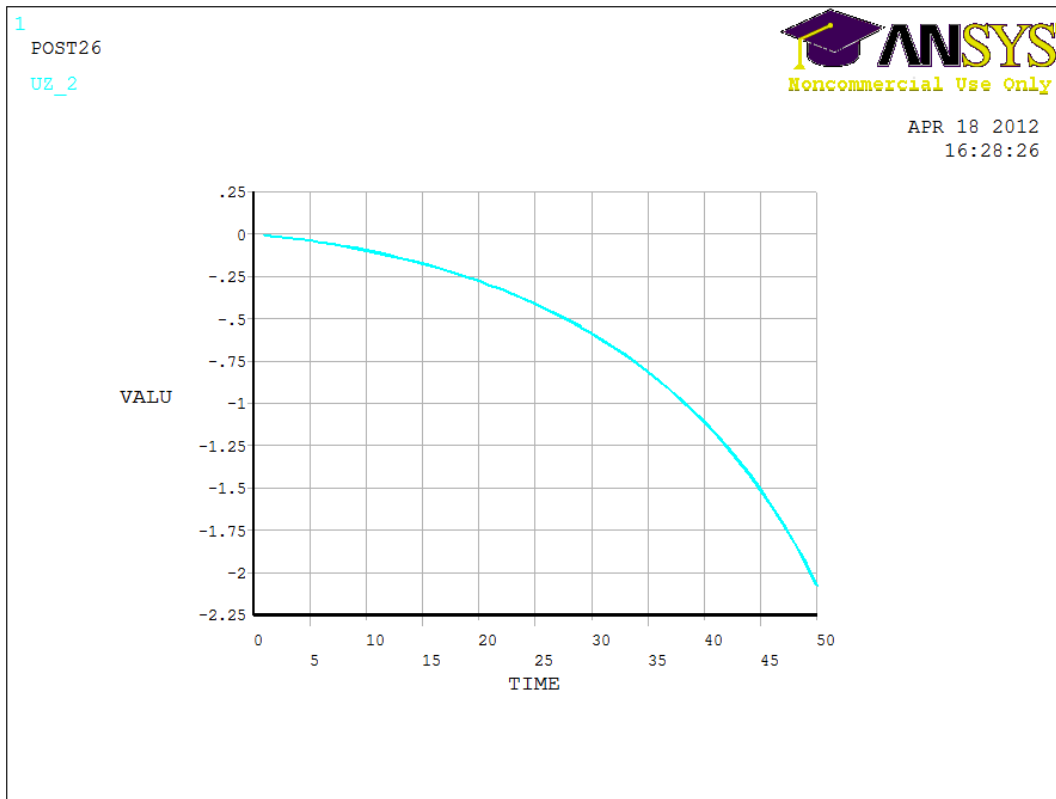


Figura 55 - Condições de contorno empregadas no modelo matemático

5.4.2 Resultados do Processamento do Modelo em Elementos Finitos no ANSYS

Gráfico 2 - V-607—ISOTROPICO - grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

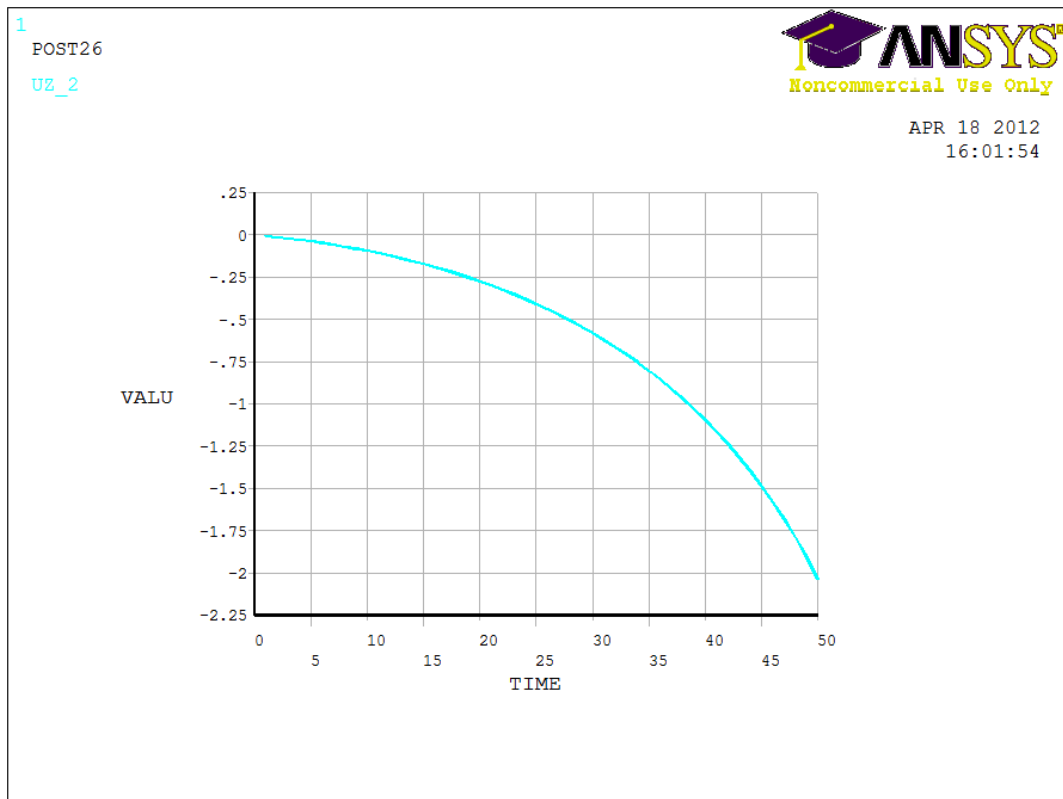
TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-833.544	21.000	-17456.9	41.000	-34002.1
2.0000	-1666.82	22.000	-18286.7	42.000	-34834.7
3.0000	-2499.92	23.000	-19116.7	43.000	-35639.7
4.0000	-3332.81	24.000	-19947.0	44.000	-36466.7
5.0000	-4165.50	25.000	-20777.8	45.000	-37295.4
6.0000	-4998.02	26.000	-21609.4	46.000	-38127.0
7.0000	-5830.42	27.000	-22442.1	47.000	-38963.6
8.0000	-6662.74	28.000	-23251.1	48.000	-39762.7
9.0000	-7495.03	29.000	-24078.9	49.000	-40593.3
10.000	-8327.36	30.000	-24906.7	50.000	-41429.7
11.000	-9159.84	31.000	-25734.6		
12.000	-9992.57	32.000	-26562.8		
13.000	-10825.7	33.000	-27391.5		
14.000	-11647.6	34.000	-28221.1		
15.000	-12477.9	35.000	-29051.8		
16.000	-13308.0	36.000	-29884.4		
17.000	-14138.0	37.000	-30689.5		
18.000	-14967.8	38.000	-31516.3		
19.000	-15797.5	39.000	-32343.7		
20.000	-16627.2	40.000	-33172.1		

V-606—ISOTROPICO -TABELAS-UZ e FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
TIME	2553 UZ		TIME	2553 UZ	
	UZ_2			UZ_2	
1.0000	-0.643803E-02		21.0000	-0.314552	
2.0000	-0.136040E-01		22.0000	-0.341317	
3.0000	-0.215100E-01		23.0000	-0.369518	
4.0000	-0.301694E-01		24.0000	-0.399228	
5.0000	-0.395971E-01		25.0000	-0.430524	
6.0000	-0.498099E-01		26.0000	-0.463492	
7.0000	-0.608258E-01		27.0000	-0.498226	
8.0000	-0.726650E-01		28.0000	-0.534827	
9.0000	-0.853492E-01		29.0000	-0.573404	
10.0000	-0.989023E-01		30.0000	-0.614077	
11.0000	-0.113350		31.0000	-0.656980	
12.0000	-0.128721		32.0000	-0.702254	
13.0000	-0.145045		33.0000	-0.750058	
14.0000	-0.162356		34.0000	-0.800565	
15.0000	-0.180689		35.0000	-0.853966	
16.0000	-0.200083		36.0000	-0.910470	
17.0000	-0.220579		37.0000	-0.970310	
18.0000	-0.242223		38.0000	-1.03374	
19.0000	-0.265064		39.0000	-1.10106	
20.0000	-0.289155		40.0000	-1.17257	

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
TIME	RFOR FY		TIME	RFOR FY	
	FY_3			FY_3	
1.0000	-967.438		21.0000	-20262.1	
2.0000	-1934.62		22.0000	-21225.7	
3.0000	-2901.52		23.0000	-22189.8	
4.0000	-3868.19		24.0000	-23154.6	
5.0000	-4834.66		25.0000	-24120.3	
6.0000	-5800.97		26.0000	-25087.5	
7.0000	-6767.16		27.0000	-26025.0	
8.0000	-7733.30		28.0000	-26985.9	
9.0000	-8699.48		29.0000	-27947.0	
10.0000	-9665.81		30.0000	-28908.3	
11.0000	-10632.4		31.0000	-29870.1	
12.0000	-11599.5		32.0000	-30832.5	
13.0000	-12554.5		33.0000	-31796.2	
14.0000	-13518.4		34.0000	-32761.6	
15.0000	-14482.1		35.0000	-33729.4	
16.0000	-15445.6		36.0000	-34660.0	
17.0000	-16409.0		37.0000	-35620.1	
18.0000	-17372.3		38.0000	-36581.3	
19.0000	-18335.5		39.0000	-37543.9	
20.0000	-19298.7		40.0000	-38509.0	

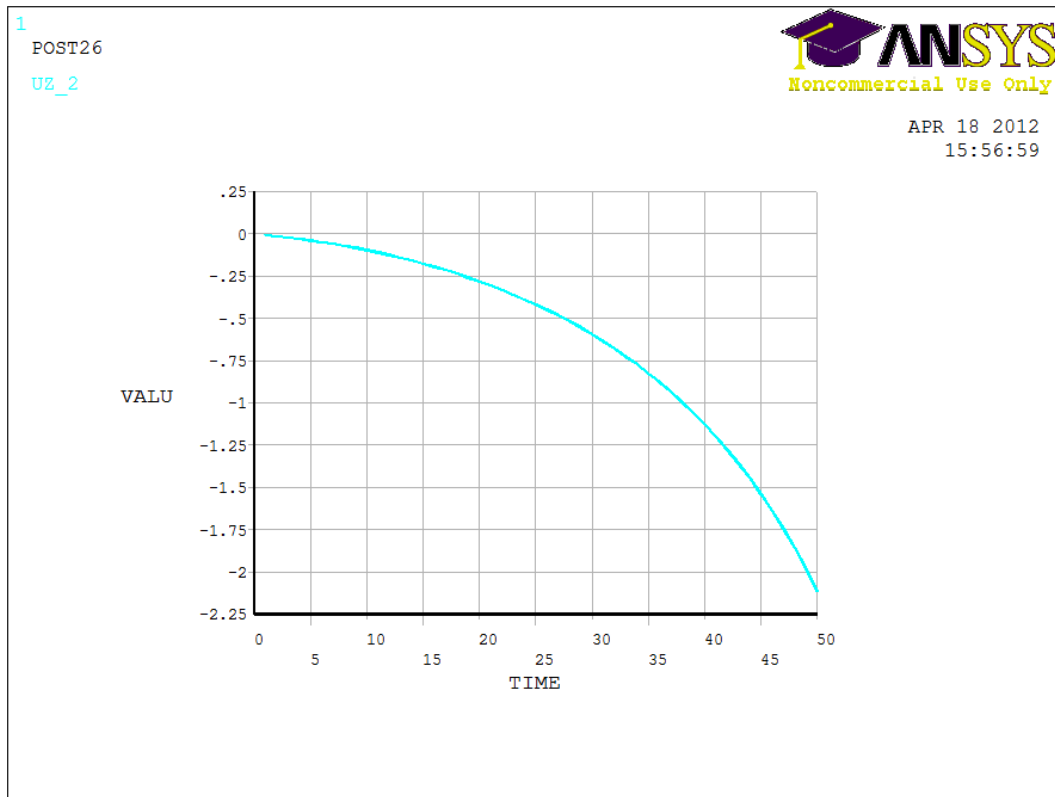
Gráfico 3 - V-605—ISOTROPICO -grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-800.467	21.000	-16762.7	41.000	-32648.3
2.0000	-1600.55	22.000	-17559.4	42.000	-33446.5
3.0000	-2400.55	23.000	-18356.3	43.000	-34247.8
4.0000	-3200.31	24.000	-19153.4	44.000	-35016.1
5.0000	-3999.87	25.000	-19950.9	45.000	-35810.9
6.0000	-4799.29	26.000	-20749.1	46.000	-36607.9
7.0000	-5598.58	27.000	-21548.1	47.000	-37408.7
8.0000	-6397.78	28.000	-22326.7	48.000	-38180.5
9.0000	-7196.94	29.000	-23121.5	49.000	-38976.4
10.0000	-7996.13	30.000	-23916.3	50.000	-39776.5
11.0000	-8795.45	31.000	-24711.2		
12.0000	-9594.92	32.000	-25506.3		
13.0000	-10394.8	33.000	-26301.8		
14.0000	-11195.1	34.000	-27097.9		
15.0000	-11981.8	35.000	-27895.1		
16.0000	-12778.9	36.000	-28693.6		
17.0000	-13575.9	37.000	-29494.3		
18.0000	-14372.7	38.000	-30263.0		
19.0000	-15169.4	39.000	-31057.2		
20.0000	-15966.1	40.000	-31852.1		

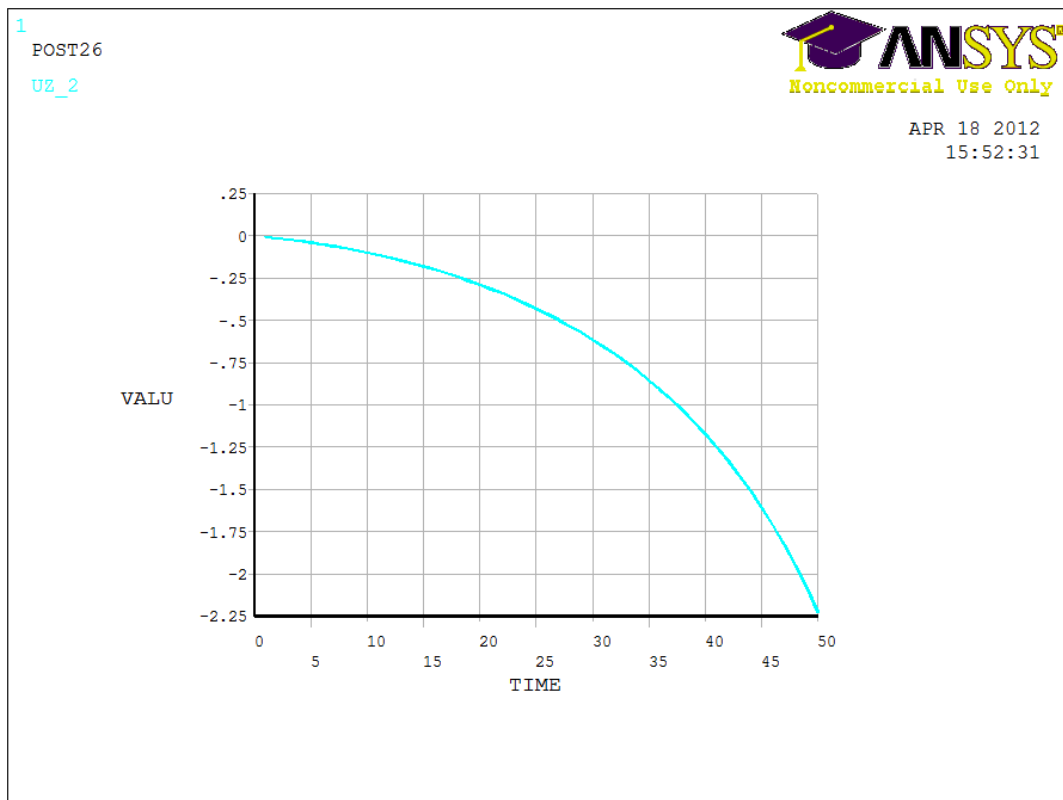
Gráfico 4 - V-604—ISOTROPICO -grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-867.908	21.000	-18176.8	41.000	-35406.4
2.0000	-1735.53	22.000	-19041.0	42.000	-36275.0
3.0000	-2602.98	23.000	-19905.3	43.000	-37109.4
4.0000	-3470.21	24.000	-20770.1	44.000	-37971.2
5.0000	-4337.24	25.000	-21635.5	45.000	-38835.2
6.0000	-5204.09	26.000	-22501.7	46.000	-39703.2
7.0000	-6070.83	27.000	-23369.2	47.000	-40541.2
8.0000	-6937.48	28.000	-24209.6	48.000	-41404.0
9.0000	-7804.14	29.000	-25071.6	49.000	-42271.1
10.000	-8670.85	30.000	-25933.6	50.000	-43146.3
11.000	-9537.73	31.000	-26795.8		
12.000	-10404.9	32.000	-27658.4		
13.000	-11272.6	33.000	-28521.7		
14.000	-12127.7	34.000	-29385.9		
15.000	-12992.3	35.000	-30251.6		
16.000	-13856.6	36.000	-31119.5		
17.000	-14720.8	37.000	-31954.8		
18.000	-15584.9	38.000	-32816.0		
19.000	-16448.9	39.000	-33677.9		
20.000	-17312.8	40.000	-34541.2		

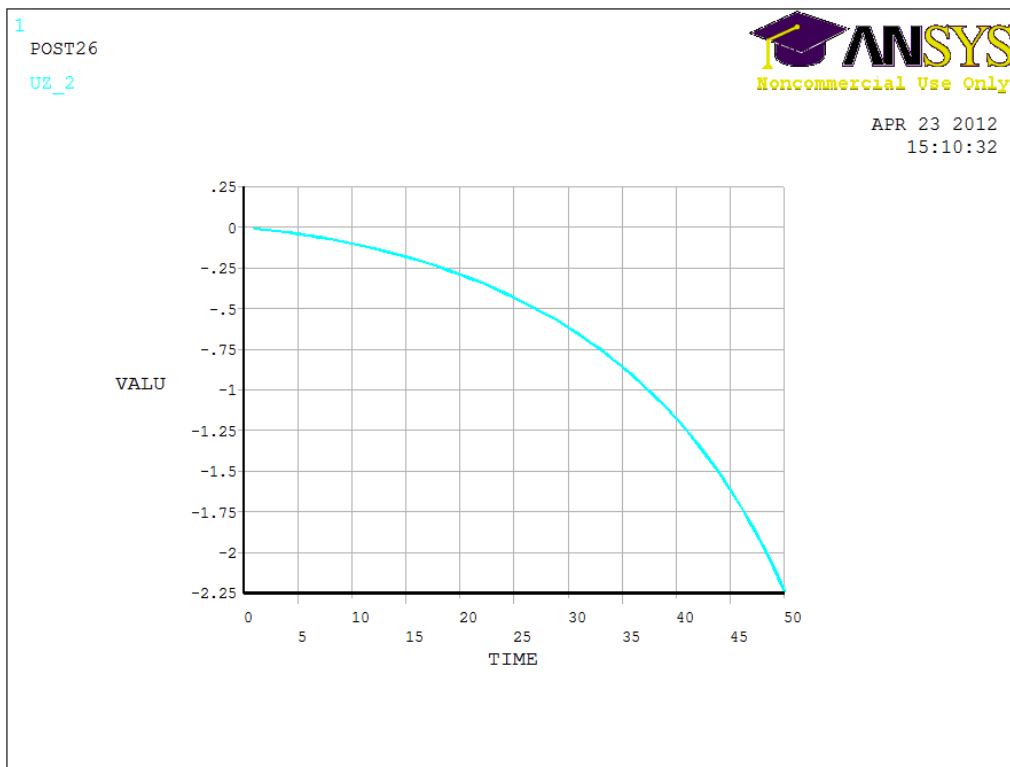
Gráfico 5 - V-603—ISOTROPICO -grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-968.204	21.000	-20278.2	41.000	-39509.4
2.0000	-1936.15	22.000	-21242.6	42.000	-40438.8
3.0000	-2903.82	23.000	-22207.4	43.000	-41400.7
4.0000	-3871.25	24.000	-23173.0	44.000	-42365.3
5.0000	-4838.49	25.000	-24139.5	45.000	-43334.6
6.0000	-5805.56	26.000	-25107.4	46.000	-44267.9
7.0000	-6772.52	27.000	-26045.6	47.000	-45231.2
8.0000	-7739.43	28.000	-27007.3	48.000	-46200.0
9.0000	-8706.39	29.000	-27969.1	49.000	-47137.0
10.000	-9673.46	30.000	-28931.2	50.000	-48102.7
11.000	-10640.9	31.000	-29893.7		
12.000	-11608.7	32.000	-30857.0		
13.000	-12564.5	33.000	-31821.4		
14.000	-13529.1	34.000	-32787.5		
15.000	-14493.6	35.000	-33756.3		
16.000	-15457.9	36.000	-34687.4		
17.000	-16422.0	37.000	-35648.4		
18.000	-17386.0	38.000	-36610.2		
19.000	-18350.0	39.000	-37573.6		
20.000	-19314.0	40.000	-38539.5		

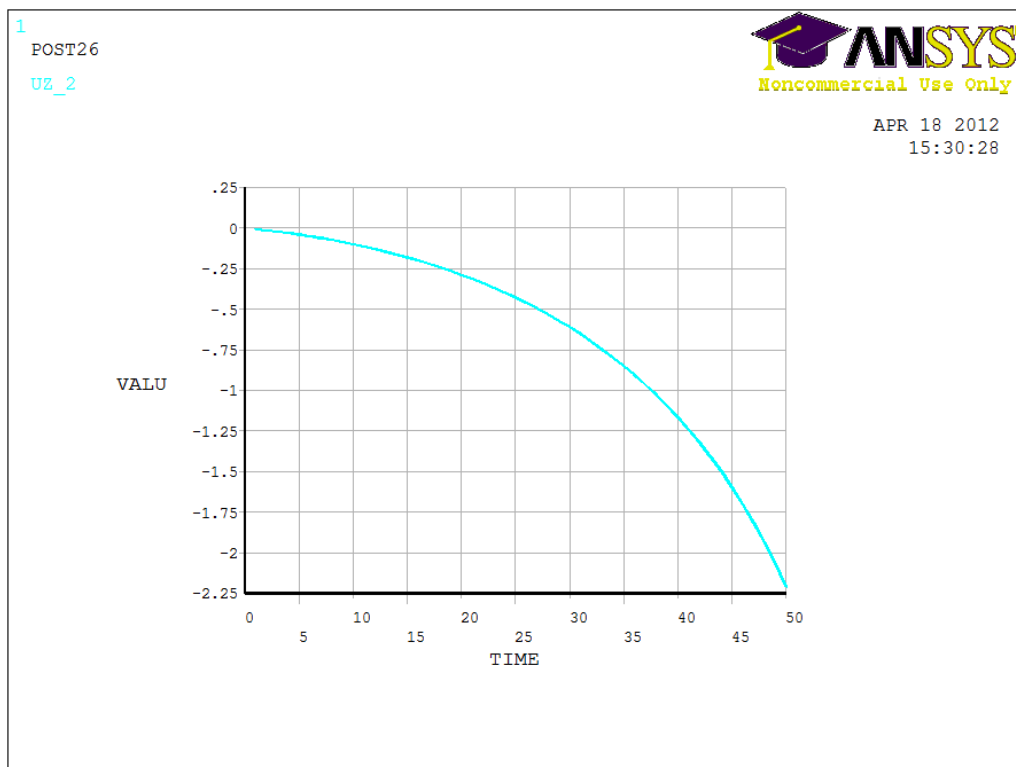
Gráfico 6 - V-602—ISOTROPICO graficoUZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR	FY	TIME	RFOR	FY	TIME	RFOR	FY
FY_3			FY_3			FY_3		
1.0000	-977.723		21.000	-20477.6		41.000	-39899.1	
2.0000	-1955.19		22.000	-21451.5		42.000	-40836.5	
3.0000	-2932.37		23.000	-22426.0		43.000	-41808.1	
4.0000	-3909.31		24.000	-23401.1		44.000	-42782.6	
5.0000	-4886.06		25.000	-24377.2		45.000	-43762.2	
6.0000	-5862.65		26.000	-25354.8		46.000	-44703.4	
7.0000	-6839.12		27.000	-26301.6		47.000	-45676.6	
8.0000	-7815.54		28.000	-27272.8		48.000	-46655.8	
9.0000	-8792.01		29.000	-28244.2		49.000	-47600.9	
10.000	-9768.62		30.000	-29215.7		50.000	-48576.8	
11.000	-10745.6		31.000	-30187.8				
12.000	-11722.9		32.000	-31160.6				
13.000	-12688.0		33.000	-32134.7				
14.000	-13662.1		34.000	-33110.5				
15.000	-14636.1		35.000	-34089.1				
16.000	-15609.8		36.000	-35028.5				
17.000	-16583.5		37.000	-35999.0				
18.000	-17557.0		38.000	-36970.5				
19.000	-18530.5		39.000	-37943.5				
20.000	-19503.9		40.000	-38919.3				

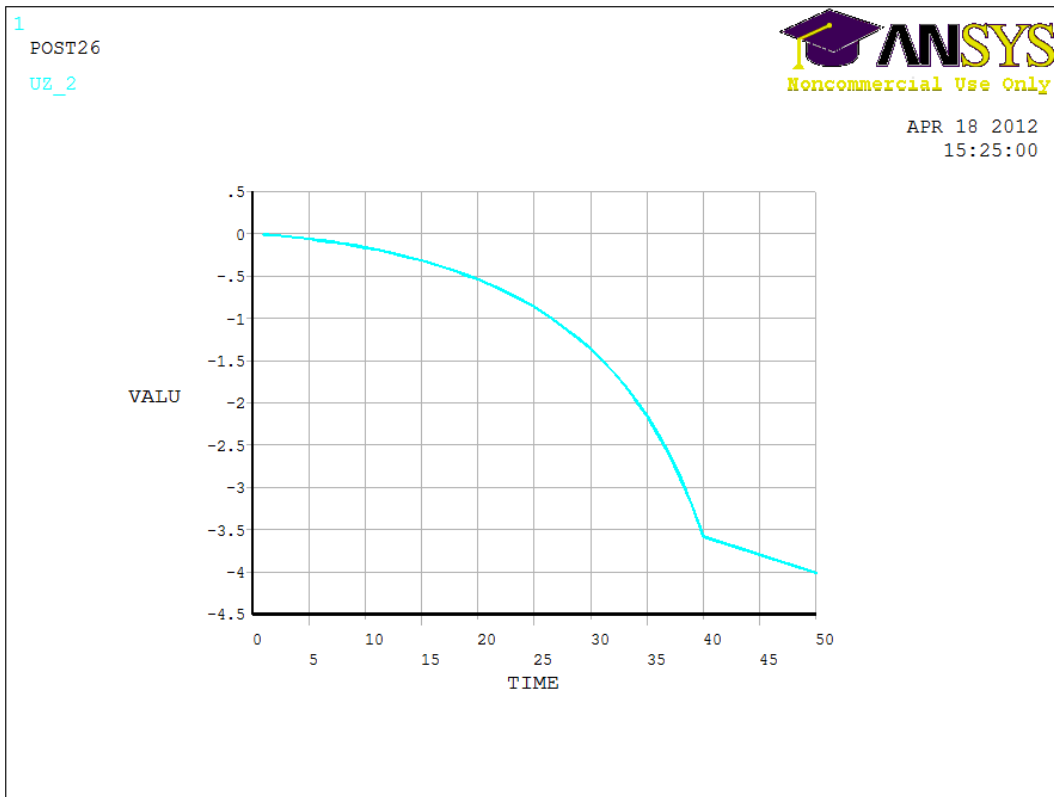
Gráfico 7 - V-601—ISOTROPICO - grafico- UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-951.225	21.000	-19922.4	41.000	-38814.2
2.0000	-1902.20	22.000	-20869.8	42.000	-39729.4
3.0000	-2852.89	23.000	-21817.6	43.000	-40674.0
4.0000	-3803.36	24.000	-22766.1	44.000	-41621.1
5.0000	-4753.63	25.000	-23715.5	45.000	-42572.3
6.0000	-5703.74	26.000	-24666.1	46.000	-43491.1
7.0000	-6653.73	27.000	-25588.8	47.000	-44436.9
8.0000	-7603.66	28.000	-26533.7	48.000	-45387.3
9.0000	-8553.64	29.000	-27478.6	49.000	-46346.6
10.000	-9503.72	30.000	-28423.7	50.000	-47257.2
11.000	-10454.1	31.000	-29369.2		
12.000	-11404.9	32.000	-30315.4		
13.000	-12356.3	33.000	-31262.6		
14.000	-13291.9	34.000	-32211.5		
15.000	-14239.4	35.000	-33162.6		
16.000	-15186.8	36.000	-34079.0		
17.000	-16134.0	37.000	-35023.0		
18.000	-17081.1	38.000	-35967.8		
19.000	-18028.2	39.000	-36914.0		
20.000	-18975.2	40.000	-37862.3		

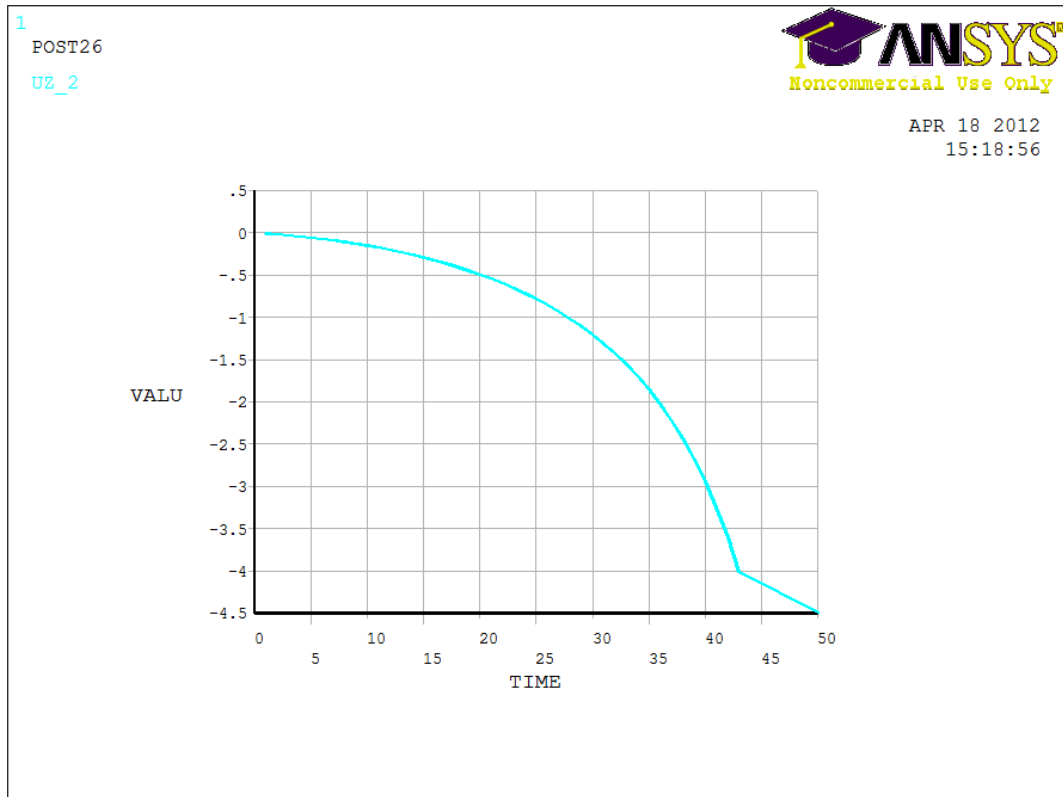
Gráfico 8 - V-508—ISOTROPICO -grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-899.513	21.000	-18846.4	50.000	-36739.5
2.0000	-1798.98	22.000	-19747.6		
3.0000	-2698.69	23.000	-20629.0		
4.0000	-3598.40	24.000	-21526.2		
5.0000	-4498.82	25.000	-22426.2		
6.0000	-5394.15	26.000	-23309.7		
7.0000	-6292.46	27.000	-24207.3		
8.0000	-7190.76	28.000	-25109.4		
9.0000	-8089.23	29.000	-25991.0		
10.000	-8988.15	30.000	-26893.0		
11.000	-9887.95	31.000	-27776.4		
12.000	-10789.3	32.000	-28681.9		
13.000	-11675.7	33.000	-29565.6		
14.000	-12572.7	34.000	-30453.1		
15.000	-13470.1	35.000	-31342.8		
16.000	-14368.3	36.000	-32234.2		
17.000	-15267.9	37.000	-33128.4		
18.000	-16154.7	38.000	-34028.2		
19.000	-17050.9	39.000	-34911.0		
20.000	-17947.9	40.000	-35801.5		

Gráfico 9 - V-507—ISOTROPICO -grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

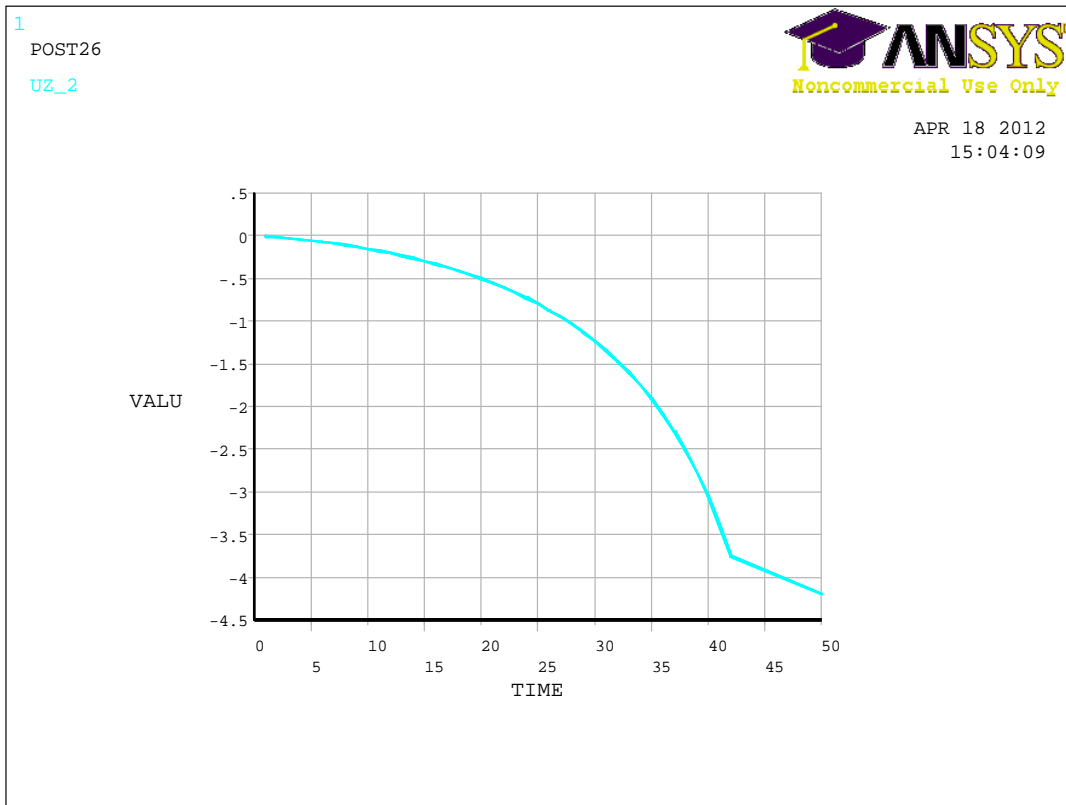
TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-815.298	21.000	-17073.9	41.000	-33251.8
2.0000	-1630.39	22.000	-17886.2	42.000	-34054.3
3.0000	-2445.32	23.000	-18699.7	43.000	-34863.2
4.0000	-3260.21	24.000	-19515.4	50.000	-35784.1
5.0000	-4075.27	25.000	-20314.5		
6.0000	-4890.87	26.000	-21126.7		
7.0000	-5702.26	27.000	-21940.9		
8.0000	-6516.08	28.000	-22758.9		
9.0000	-7329.86	29.000	-23554.4		
10.000	-8143.69	30.000	-24369.5		
11.000	-8957.78	31.000	-25169.9		
12.000	-9772.38	32.000	-25984.4		
13.000	-10587.9	33.000	-26805.9		
14.000	-11405.0	34.000	-27602.2		
15.000	-12205.5	35.000	-28404.3		
16.000	-13018.0	36.000	-29226.4		
17.000	-13831.0	37.000	-30028.9		
18.000	-14644.6	38.000	-30834.7		
19.000	-15459.4	39.000	-31643.5		
20.000	-16276.4	40.000	-32437.6		

V-506—ISOTROPICO -TABELA-UZ e FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
TIME	2553 UZ	TIME	2553 UZ	TIME	2553 UZ
	UZ_2		UZ_2		UZ_2
1.0000	-0.833831E-02	21.000	-0.527653	41.000	-3.08167
2.0000	-0.179869E-01	22.000	-0.579289	42.000	-3.40650
3.0000	-0.289752E-01	23.000	-0.634745	43.000	-3.78019
4.0000	-0.413373E-01	24.000	-0.694351	50.000	-4.21424
5.0000	-0.551126E-01	25.000	-0.758478		
6.0000	-0.703458E-01	26.000	-0.827548		
7.0000	-0.870876E-01	27.000	-0.902042		
8.0000	-0.105395	28.000	-0.982508		
9.0000	-0.125331	29.000	-1.06958		
10.000	-0.146968	30.000	-1.16397		
11.000	-0.170384	31.000	-1.26653		
12.000	-0.195668	32.000	-1.37824		
13.000	-0.222917	33.000	-1.50024		
14.000	-0.252240	34.000	-1.63389		
15.000	-0.283759	35.000	-1.78077		
16.000	-0.317607	36.000	-1.94281		
17.000	-0.353934	37.000	-2.12231		
18.000	-0.392905	38.000	-2.32207		
19.000	-0.434707	39.000	-2.54553		
20.000	-0.479545	40.000	-2.79695		

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
	FY_3		FY_3		FY_3
1.0000	-723.537	21.000	-15153.8	41.000	-29511.6
2.0000	-1446.19	22.000	-15874.3	42.000	-30221.6
3.0000	-2169.68	23.000	-16595.4	43.000	-30950.3
4.0000	-2893.61	24.000	-17317.8	50.000	-31671.6
5.0000	-3616.95	25.000	-18042.4		
6.0000	-4340.65	26.000	-18750.0		
7.0000	-5061.10	27.000	-19471.1		
8.0000	-5783.39	28.000	-20194.3		
9.0000	-6505.60	29.000	-20921.6		
10.000	-7227.82	30.000	-21625.6		
11.000	-7950.16	31.000	-22350.0		
12.000	-8672.82	32.000	-23059.1		
13.000	-9396.10	33.000	-23782.9		
14.000	-10120.4	34.000	-24493.6		
15.000	-10833.0	35.000	-25219.3		
16.000	-11554.1	36.000	-25930.3		
17.000	-12275.3	37.000	-26643.9		
18.000	-12996.9	38.000	-27374.8		
19.000	-13719.3	39.000	-28090.1		
20.000	-14442.9	40.000	-28791.8		

Gráfico 10 - V-505—ISOTROPICO -grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

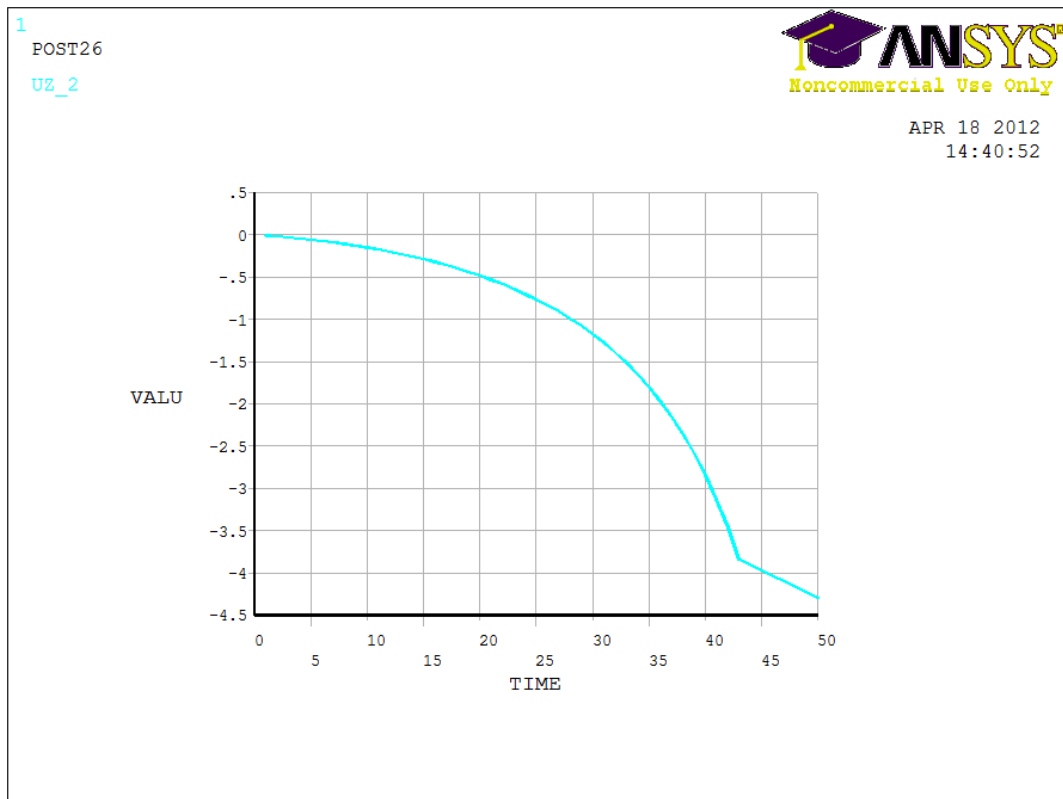
TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-892.248	21.000	-18686.0	41.000	-36387.6
2.0000	-1784.27	22.000	-19575.6	42.000	-37269.4
3.0000	-2676.12	23.000	-20467.0	50.000	-38195.8
4.0000	-3567.94	24.000	-21361.5		
5.0000	-4460.01	25.000	-22232.7		
6.0000	-5349.68	26.000	-23122.6		
7.0000	-6240.48	27.000	-24015.6		
8.0000	-7131.16	28.000	-24889.8		
9.0000	-8021.81	29.000	-25780.2		
10.000	-8912.59	30.000	-26675.3		
11.000	-9803.74	31.000	-27547.9		
12.000	-10695.6	32.000	-28442.8		
13.000	-11588.8	33.000	-29317.6		
14.000	-12468.4	34.000	-30216.0		
15.000	-13357.6	35.000	-31091.2		
16.000	-14247.1	36.000	-31970.6		
17.000	-15137.1	37.000	-32852.2		
18.000	-16028.1	38.000	-33735.6		
19.000	-16921.0	39.000	-34621.7		
20.000	-17797.3	40.000	-35513.1		

V-504—ISOTROPICO - TABELA-UZ e FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
TIME	2553 UZ	TIME	2553 UZ	TIME	2553 UZ
	UZ_2		UZ_2		UZ_2
1.0000	-0.830942E-02	21.000	-0.525333	41.000	-3.05549
2.0000	-0.179241E-01	22.000	-0.576693	42.000	-3.37581
3.0000	-0.288732E-01	23.000	-0.631842	43.000	-3.74393
4.0000	-0.411907E-01	24.000	-0.691108	50.000	-4.17097
5.0000	-0.549155E-01	25.000	-0.754855		
6.0000	-0.700920E-01	26.000	-0.823503		
7.0000	-0.867705E-01	27.000	-0.897523		
8.0000	-0.105007	28.000	-0.977457		
9.0000	-0.124866	29.000	-1.06393		
10.000	-0.146416	30.000	-1.15764		
11.000	-0.169738	31.000	-1.25944		
12.000	-0.194917	32.000	-1.37027		
13.000	-0.222051	33.000	-1.49127		
14.000	-0.251248	34.000	-1.62377		
15.000	-0.282627	35.000	-1.76932		
16.000	-0.316322	36.000	-1.92982		
17.000	-0.352480	37.000	-2.10751		
18.000	-0.391265	38.000	-2.30514		
19.000	-0.432862	39.000	-2.52606		
20.000	-0.477475	40.000	-2.77444		

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
	FY_3		FY_3		FY_3
1.0000	-710.075	21.000	-14871.7	41.000	-28960.2
2.0000	-1419.33	22.000	-15578.8	42.000	-29670.7
3.0000	-2129.33	23.000	-16286.4	43.000	-30369.8
4.0000	-2839.76	24.000	-16995.1	50.000	-31075.8
5.0000	-3549.62	25.000	-17705.9		
6.0000	-4259.85	26.000	-18400.9		
7.0000	-4966.91	27.000	-19108.4		
8.0000	-5675.76	28.000	-19817.9		
9.0000	-6384.53	29.000	-20530.9		
10.000	-7093.28	30.000	-21222.7		
11.000	-7802.15	31.000	-21933.1		
12.000	-8511.32	32.000	-22629.5		
13.000	-9221.06	33.000	-23339.4		
14.000	-9931.74	34.000	-24037.3		
15.000	-10631.4	35.000	-24748.6		
16.000	-11339.0	36.000	-25446.8		
17.000	-12046.8	37.000	-26164.1		
18.000	-12754.9	38.000	-26862.8		
19.000	-13463.7	39.000	-27564.6		
20.000	-14173.7	40.000	-28269.6		

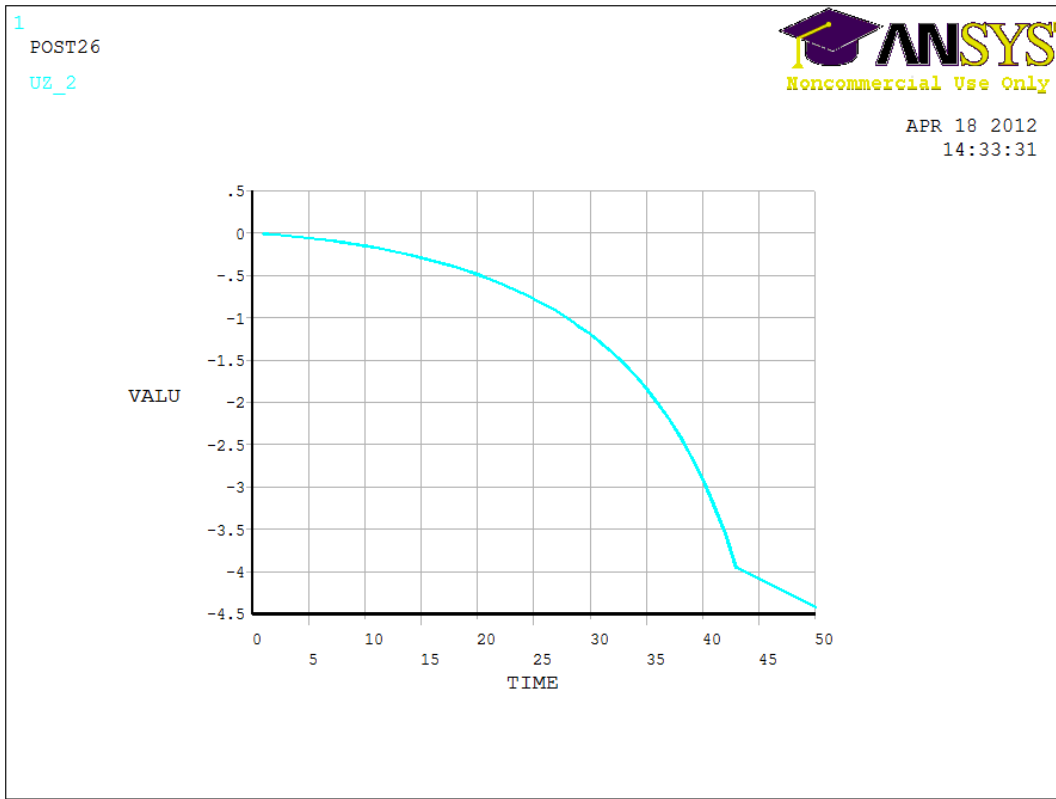
Gráfico 11 - V-503—ISOTROPICO -grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-748.117	21.000	-15668.8	41.000	-30519.5
2.0000	-1495.95	22.000	-16413.9	42.000	-31253.1
3.0000	-2243.76	23.000	-17159.8	43.000	-31992.1
4.0000	-2991.95	24.000	-17907.1	50.000	-32763.9
5.0000	-3739.89	25.000	-18657.0		
6.0000	-4488.23	26.000	-19387.4		
7.0000	-5233.08	27.000	-20133.4		
8.0000	-5979.93	28.000	-20881.9		
9.0000	-6726.70	29.000	-21615.1		
10.000	-7473.49	30.000	-22361.4		
11.000	-8220.43	31.000	-23111.5		
12.000	-8967.75	32.000	-23843.5		
13.000	-9715.76	33.000	-24593.2		
14.000	-10464.9	34.000	-25327.1		
15.000	-11201.1	35.000	-26079.3		
16.000	-11946.7	36.000	-26813.6		
17.000	-12692.5	37.000	-27551.1		
18.000	-13438.8	38.000	-28290.2		
19.000	-14186.0	39.000	-29030.8		
20.000	-14934.6	40.000	-29773.2		

Gráfico 12 - V-502—ISOTROPICO -grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3		FY_3	
1.0000	-792.349	21.000	-16595.7	41.000	-32316.2
2.0000	-1584.88	22.000	-17385.1	42.000	-33096.1
3.0000	-2376.84	23.000	-18175.6	43.000	-33880.6
4.0000	-3168.90	24.000	-18967.9	50.000	-34747.9
5.0000	-3961.12	25.000	-19745.5		
6.0000	-4753.83	26.000	-20534.7		
7.0000	-5542.58	27.000	-21325.6		
8.0000	-6333.61	28.000	-22119.9		
9.0000	-7124.58	29.000	-22894.3		
10.000	-7915.59	30.000	-23685.9		
11.000	-8706.82	31.000	-24482.8		
12.000	-9498.51	32.000	-25255.6		
13.000	-10291.1	33.000	-26052.4		
14.000	-11085.0	34.000	-26827.7		
15.000	-11863.6	35.000	-27607.8		
16.000	-12653.4	36.000	-28404.6		
17.000	-13443.5	37.000	-29185.0		
18.000	-14234.2	38.000	-29968.0		
19.000	-15026.0	39.000	-30753.4		
20.000	-15819.6	40.000	-31542.4		

V-501—ISOTROPICO - TABELA-UZ e FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
TIME	2553 UZ		TIME	2553 UZ	
	UZ_2			UZ_2	
1.0000	-0.876217E-02		21.0000	-0.560853	
2.0000	-0.189044E-01		22.0000	-0.616466	
3.0000	-0.304594E-01		23.0000	-0.676340	
4.0000	-0.434652E-01		24.0000	-0.740866	
5.0000	-0.579656E-01		25.0000	-0.810484	
6.0000	-0.740108E-01		26.0000	-0.885699	
7.0000	-0.916571E-01		27.0000	-0.967090	
8.0000	-0.110968		28.0000	-1.05532	
9.0000	-0.132016		29.0000	-1.15116	
10.0000	-0.154880		30.0000	-1.25551	
11.0000	-0.179649		31.0000	-1.36940	
12.0000	-0.206423		32.0000	-1.49406	
13.0000	-0.235313		33.0000	-1.63096	
14.0000	-0.266442		34.0000	-1.78181	
15.0000	-0.299947		35.0000	-1.94870	
16.0000	-0.335982		36.0000	-2.13414	
17.0000	-0.374718		37.0000	-2.34121	
18.0000	-0.416346		38.0000	-2.57370	
19.0000	-0.461080		39.0000	-2.83637	
20.0000	-0.509159		40.0000	-3.13521	

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****					
V501-isso-FY					
TIME	RFOR FY		TIME	RFOR FY	
	FY_3			FY_3	
1.0000	-961.268		21.0000	-20134.0	
2.0000	-1922.48		22.0000	-21093.7	
3.0000	-2884.12		23.0000	-22056.1	
4.0000	-3846.02		24.0000	-22997.5	
5.0000	-4808.92		25.0000	-23955.6	
6.0000	-5763.87		26.0000	-24916.2	
7.0000	-6723.73		27.0000	-25881.6	
8.0000	-7683.54		28.0000	-26818.6	
9.0000	-8643.44		29.0000	-27780.4	
10.0000	-9603.68		30.0000	-28723.7	
11.0000	-10564.6		31.0000	-29684.6	
12.0000	-11526.8		32.0000	-30654.2	
13.0000	-12475.7		33.0000	-31592.5	
14.0000	-13434.0		34.0000	-32538.0	
15.0000	-14392.4		35.0000	-33508.2	
16.0000	-15351.4		36.0000	-34454.3	
17.0000	-16311.2		37.0000	-35404.2	
18.0000	-17272.6		38.0000	-36358.0	
19.0000	-18218.3		39.0000	-37294.0	
20.0000	-19175.8		40.0000	-38254.0	

V-407—ISOTROPICO - TABELA-UZ e FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****			
TIME	2553 UZ	TIME	2553 UZ
	UZ_2		UZ_2
1.0000	-0.132575E-01	21.000	-1.51383
2.0000	-0.298327E-01	22.000	-1.73493
3.0000	-0.498558E-01	23.000	-1.99313
4.0000	-0.734894E-01	50.000	-2.29785
5.0000	-0.100933		
6.0000	-0.132425		
7.0000	-0.168253		
8.0000	-0.208756		
9.0000	-0.254334		
10.000	-0.305464		
11.000	-0.362705		
12.000	-0.426725		
13.000	-0.498316		
14.000	-0.578425		
15.000	-0.668193		
16.000	-0.768998		
17.000	-0.882522		
18.000	-1.01084		
19.000	-1.15652		
20.000	-1.32281		

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****			
TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
	FY_3		FY_3
1.0000	-690.370	21.000	-14457.2
2.0000	-1380.44	22.000	-15142.3
3.0000	-2070.80	23.000	-15829.9
4.0000	-2762.83	50.000	-16537.8
5.0000	-3449.58		
6.0000	-4140.06		
7.0000	-4827.65		
8.0000	-5517.46		
9.0000	-6208.73		
10.000	-6894.20		
11.000	-7584.90		
12.000	-8270.63		
13.000	-8961.73		
14.000	-9646.95		
15.000	-10340.0		
16.000	-11024.8		
17.000	-11710.8		
18.000	-12397.6		
19.000	-13085.3		
20.000	-13774.7		

V-406—ISOTROPICO - TABELA-UZ e FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****			
TIME	2553 UZ	TIME	2553 UZ
	UZ_2		UZ_2
1.0000	-0.130825E-01	21.000	-1.48457
2.0000	-0.294434E-01	22.000	-1.69951
3.0000	-0.492097E-01	23.000	-1.94990
4.0000	-0.725398E-01	50.000	-2.24458
5.0000	-0.996275E-01		
6.0000	-0.130706		
7.0000	-0.166054		
8.0000	-0.206000		
9.0000	-0.250936		
10.000	-0.301321		
11.000	-0.357699		
12.000	-0.420717		
13.000	-0.491139		
14.000	-0.569880		
15.000	-0.658038		
16.000	-0.756940		
17.000	-0.868201		
18.000	-0.993802		
19.000	-1.13620		
20.000	-1.29849		

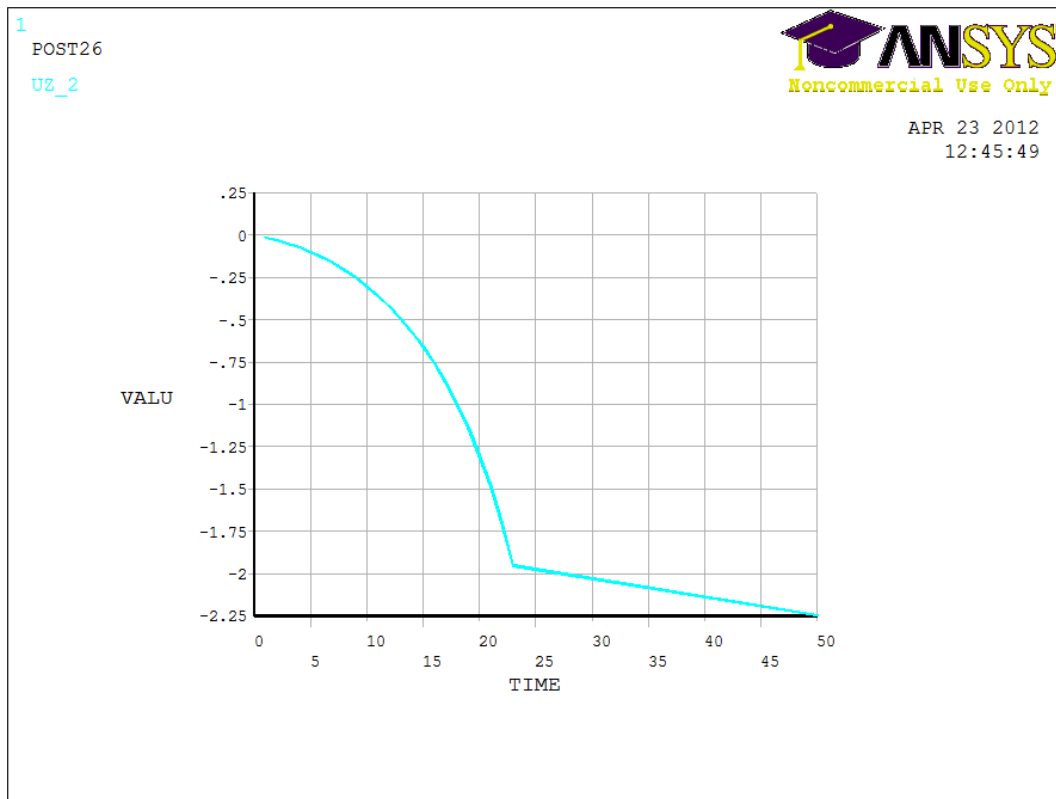
***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****			
TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
	FY_3		FY_3
1.0000	-606.164	21.000	-12697.7
2.0000	-1210.14	22.000	-13298.1
3.0000	-1817.11	23.000	-13901.2
4.0000	-2425.48	50.000	-14508.6
5.0000	-3028.82		
6.0000	-3634.89		
7.0000	-4242.32		
8.0000	-4844.33		
9.0000	-5450.80		
10.000	-6053.19		
11.000	-6659.13		
12.000	-7267.43		
13.000	-7867.70		
14.000	-8469.83		
15.000	-9076.95		
16.000	-9678.71		
17.000	-10281.2		
18.000	-10884.1		
19.000	-11487.4		
20.000	-12091.6		

V-405—ISOTROPICO - TABELA-UZ e FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****			
TIME	2553 UZ	TIME	2553 UZ
UZ_2		UZ_2	
1.0000	-0.129629E-01	21.000	-1.46355
2.0000	-0.291750E-01	22.000	-1.67409
3.0000	-0.487609E-01	23.000	-1.91893
4.0000	-0.718759E-01	24.000	-2.20648
5.0000	-0.987103E-01	50.000	-2.54817
6.0000	-0.129493		
7.0000	-0.164495		
8.0000	-0.204042		
9.0000	-0.248514		
10.000	-0.298361		
11.000	-0.354117		
12.000	-0.416409		
13.000	-0.485986		
14.000	-0.563739		
15.000	-0.650735		
16.000	-0.748265		
17.000	-0.857893		
18.000	-0.981540		
19.000	-1.12158		
20.000	-1.28100		

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****			
TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3	
1.0000	-558.169	21.000	-11690.0
2.0000	-1114.56	22.000	-12243.1
3.0000	-1673.32	23.000	-12797.8
4.0000	-2233.22	24.000	-13355.1
5.0000	-2789.00	50.000	-13960.4
6.0000	-3346.99		
7.0000	-3906.04		
8.0000	-4460.69		
9.0000	-5018.89		
10.000	-5579.00		
11.000	-6131.57		
12.000	-6691.08		
13.000	-7244.32		
14.000	-7804.45		
15.000	-8357.41		
16.000	-8911.75		
17.000	-9473.00		
18.000	-10027.3		
19.000	-10582.9		
20.000	-11140.0		

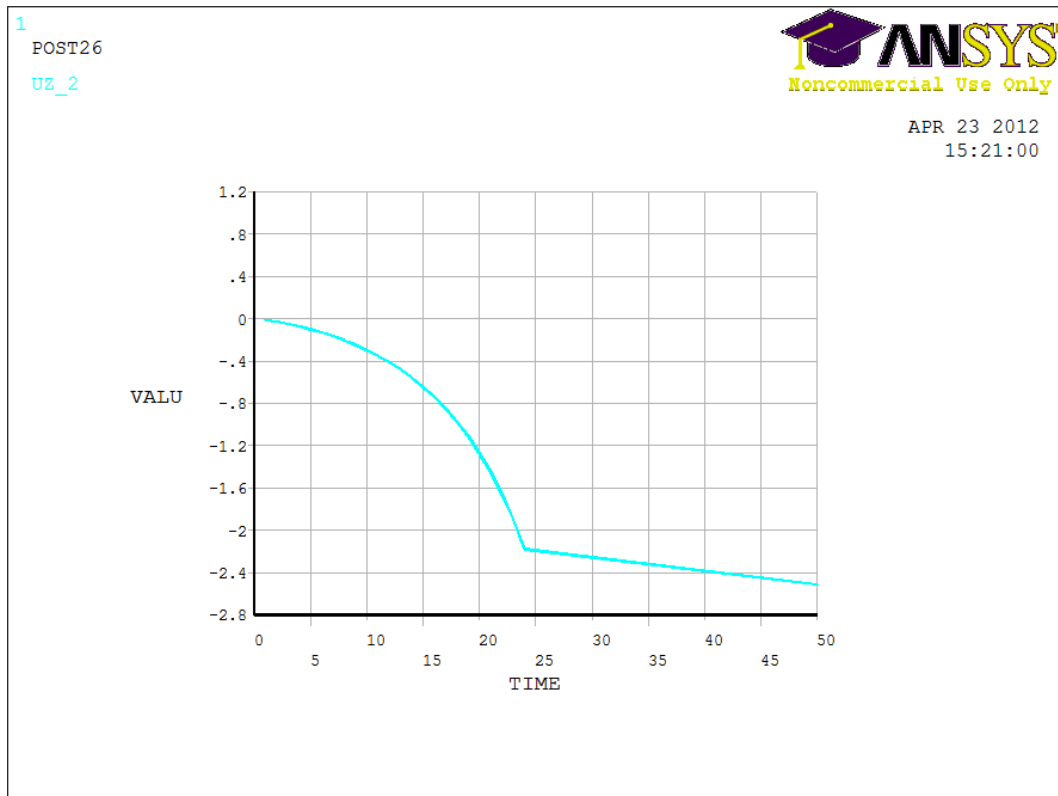
Gráfico 13 - V-403--ISOTROPICO-grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3	
1.0000	-609.657	21.000	-12771.1
2.0000	-1217.09	22.000	-13374.9
3.0000	-1827.58	23.000	-13981.5
4.0000	-2439.46	50.000	-14592.6
5.0000	-3046.27		
6.0000	-3655.84		
7.0000	-4266.78		
8.0000	-4872.25		
9.0000	-5482.23		
10.000	-6088.08		
11.000	-6697.53		
12.000	-7309.38		
13.000	-7913.08		
14.000	-8518.66		
15.000	-9129.32		
16.000	-9734.54		
17.000	-10340.5		
18.000	-10946.8		
19.000	-11553.7		
20.000	-12161.4		

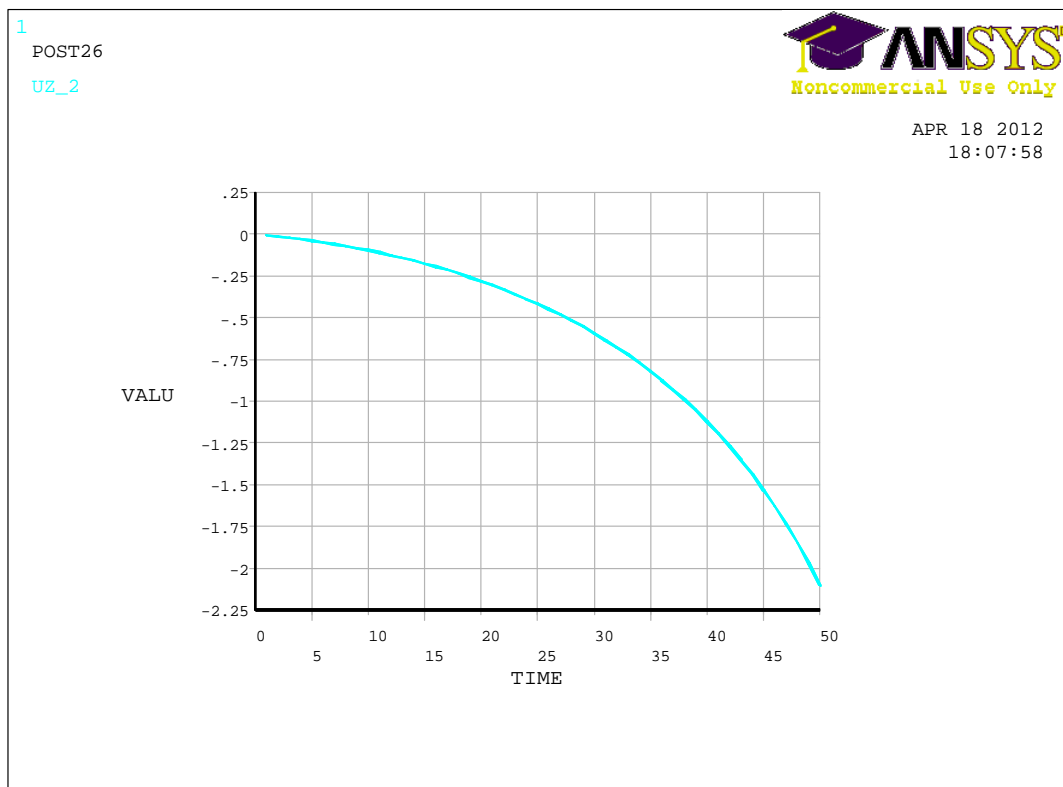
Gráfico 14 - V-401—ISOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
FY_3		FY_3	
1.0000	-526.037	21.000	-11015.9
2.0000	-1050.53	22.000	-11542.6
3.0000	-1577.04	23.000	-12064.9
4.0000	-2104.55	24.000	-12584.0
5.0000	-2628.44	50.000	-13142.5
6.0000	-3154.25		
7.0000	-3680.93		
8.0000	-4203.86		
9.0000	-4729.78		
10.0000	-5257.28		
11.0000	-5778.42		
12.0000	-6305.34		
13.0000	-6827.03		
14.0000	-7354.39		
15.0000	-7875.83		
16.0000	-8398.39		
17.0000	-8926.44		
18.0000	-9448.94		
19.0000	-9972.34		
20.0000	-10496.8		

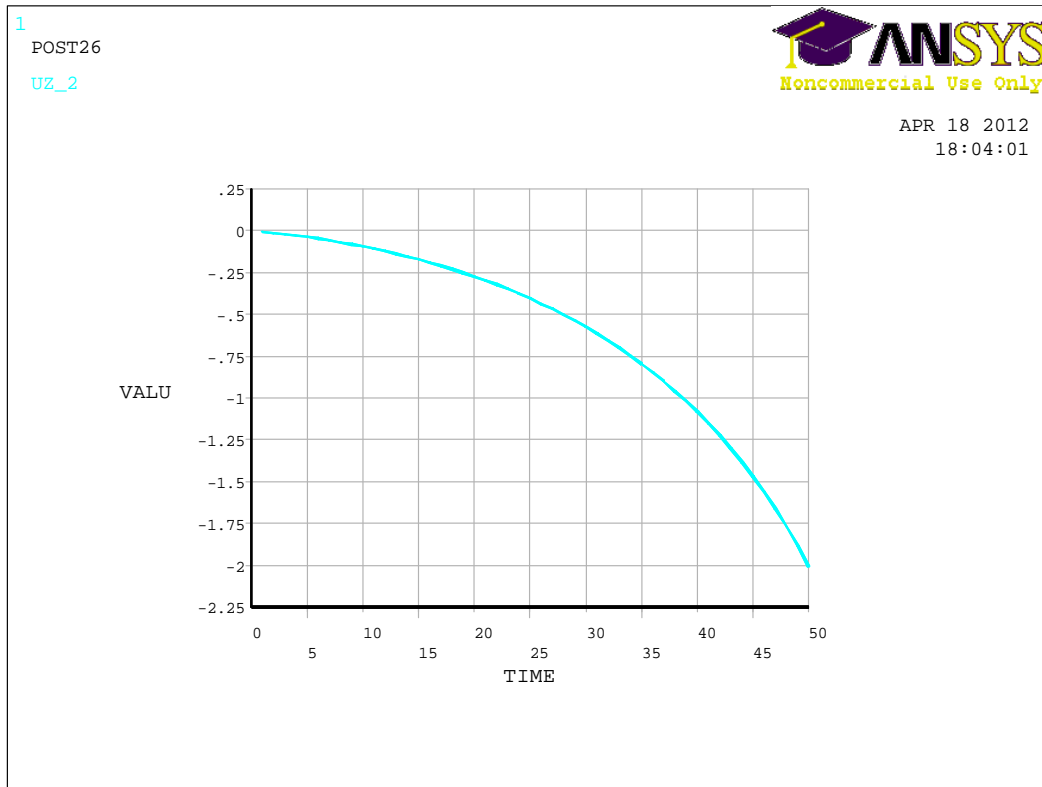
Gráfico 15 - V-608—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY_3	TIME	RFOR FY_3	TIME	RFOR FY_3
1.000	-904.325	21.000	-18929.0	41.000	-36843.7
2.000	-1808.33	22.000	-19827.3	42.000	-37737.1
3.000	-2712.02	23.000	-20725.3	43.000	-38630.2
4.000	-3615.45	24.000	-21623.0	44.000	-39523.4
5.000	-4518.54	25.000	-22520.3	45.000	-40416.5
6.000	-5421.30	26.000	-23417.4	46.000	-41310.0
7.000	-6323.75	27.000	-24314.3	47.000	-42203.5
8.000	-7226.18	28.000	-25210.9	48.000	-43087.4
9.000	-8128.13	29.000	-26107.3	49.000	-43978.0
10.000	-9029.78	30.000	-27003.3	50.000	-44868.3
11.000	-9931.13	31.000	-27899.6		
12.000	-10832.2	32.000	-28794.7		
13.000	-11733.0	33.000	-29690.0		
14.000	-12633.5	34.000	-30585.1		
15.000	-13533.7	35.000	-31479.9		
16.000	-14433.6	36.000	-32374.4		
17.000	-15333.2	37.000	-33268.7		
18.000	-16232.6	38.000	-34162.8		
19.000	-17131.7	39.000	-35056.6		
20.000	-18030.5	40.000	-35950.3		

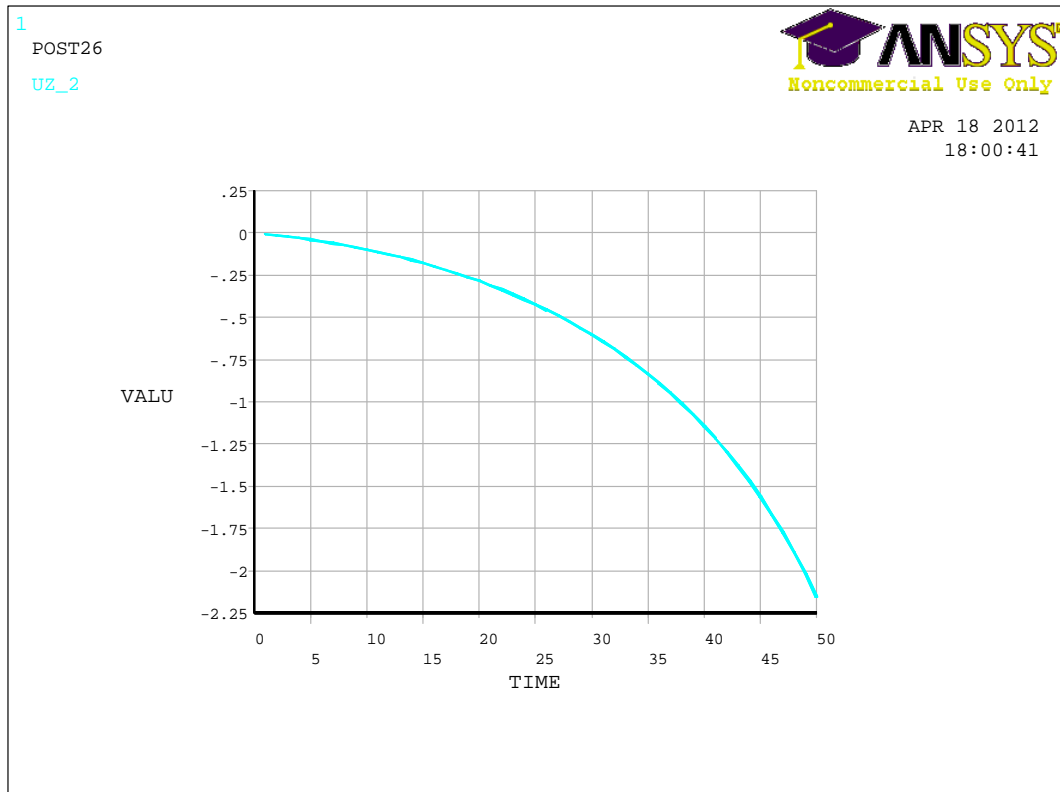
Gráfico 16 - V-607—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY_3	TIME	RFOR FY_3	TIME	RFOR FY_3
1.0000	-820.311	21.000	-17170.8	41.000	-33422.3
2.0000	-1640.34	22.000	-17985.6	42.000	-34232.6
3.0000	-2460.07	23.000	-18800.2	43.000	-35042.9
4.0000	-3279.50	24.000	-19614.5	44.000	-35853.0
5.0000	-4098.77	25.000	-20428.7	45.000	-36663.1
6.0000	-4917.68	26.000	-21242.5	46.000	-37473.2
7.0000	-5736.31	27.000	-22056.0	47.000	-38283.5
8.0000	-6554.63	28.000	-22869.4	48.000	-39094.0
9.0000	-7373.05	29.000	-23682.5	49.000	-39895.2
10.000	-8190.95	30.000	-24495.4	50.000	-40703.0
11.000	-9008.58	31.000	-25308.0		
12.000	-9825.95	32.000	-26120.4		
13.000	-10643.1	33.000	-26933.1		
14.000	-11459.9	34.000	-27744.6		
15.000	-12276.5	35.000	-28556.4		
16.000	-13092.8	36.000	-29367.9		
17.000	-13908.9	37.000	-30179.1		
18.000	-14724.8	38.000	-30990.2		
19.000	-15540.4	39.000	-31801.1		
20.000	-16355.7	40.000	-32611.8		

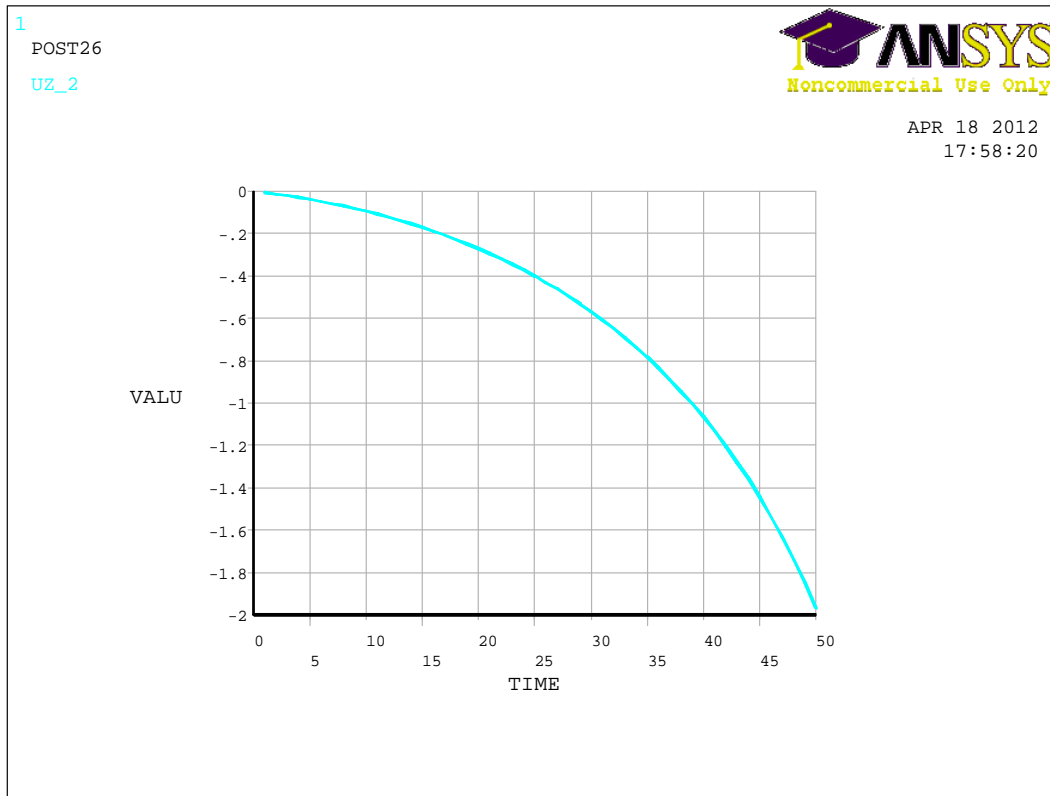
Gráfico 17 - V-606—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-951.958	21.000	-19925.9	41.000	-38783.5
2.0000	-1903.58	22.000	-20871.4	42.000	-39724.1
3.0000	-2854.86	23.000	-21816.6	43.000	-40665.4
4.0000	-3805.88	24.000	-22761.6	44.000	-41605.4
5.0000	-4756.53	25.000	-23706.2	45.000	-42545.5
6.0000	-5706.84	26.000	-24650.6	46.000	-43485.6
7.0000	-6656.80	27.000	-25594.7	47.000	-44426.0
8.0000	-7606.79	28.000	-26538.5	48.000	-45366.6
9.0000	-8556.23	29.000	-27482.0	49.000	-46292.8
10.000	-9505.36	30.000	-28425.6	50.000	-47229.9
11.000	-10454.2	31.000	-29368.2		
12.000	-11402.7	32.000	-30310.9		
13.000	-12350.9	33.000	-31253.3		
14.000	-13298.5	34.000	-32195.4		
15.000	-14246.5	35.000	-33137.3		
16.000	-15193.8	36.000	-34078.9		
17.000	-16140.8	37.000	-35020.3		
18.000	-17087.5	38.000	-35961.4		
19.000	-18033.9	39.000	-36902.3		
20.000	-18980.0	40.000	-37843.0		

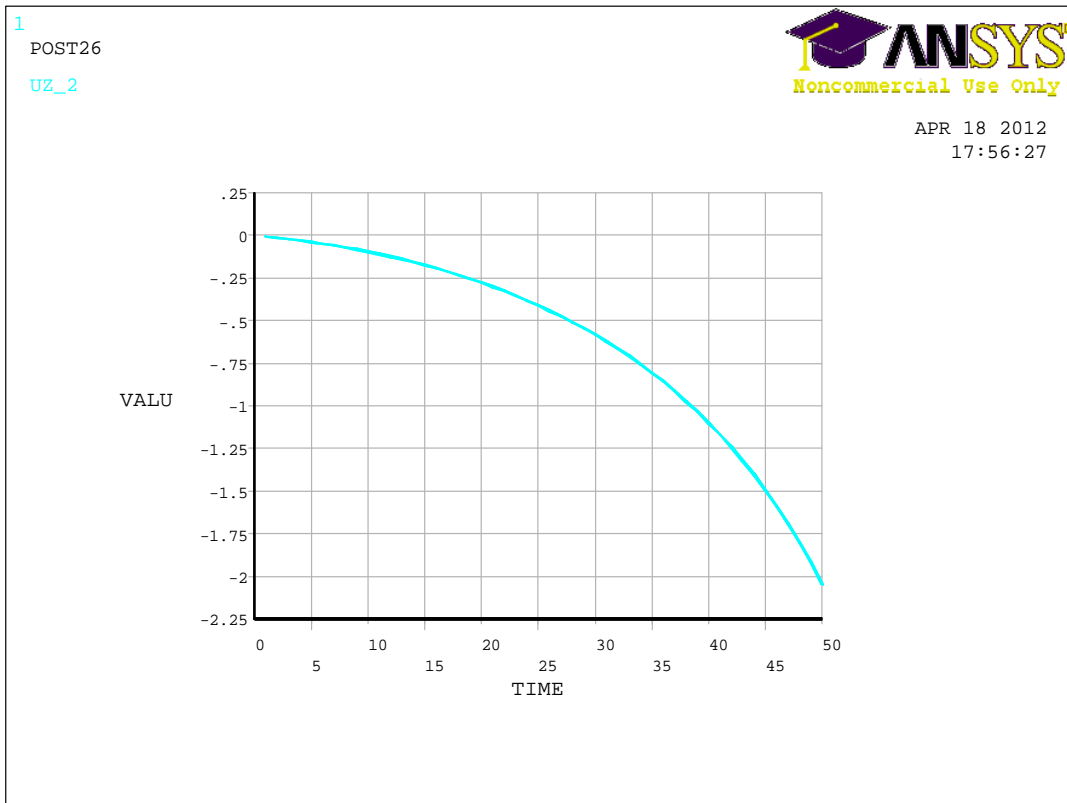
Gráfico 18 - V-605—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-787.688	21.000	-16488.0	41.000	-32093.7
2.0000	-1575.11	22.000	-17270.5	42.000	-32871.8
3.0000	-2362.24	23.000	-18052.7	43.000	-33649.8
4.0000	-3149.09	24.000	-18834.7	44.000	-34427.8
5.0000	-3935.78	25.000	-19616.4	45.000	-35205.6
6.0000	-4722.13	26.000	-20397.9	46.000	-35983.4
7.0000	-5508.21	27.000	-21179.2	47.000	-36761.4
8.0000	-6294.00	28.000	-21960.1	48.000	-37539.6
9.0000	-7079.51	29.000	-22740.9	49.000	-38309.7
10.0000	-7865.22	30.000	-23521.5	50.000	-39085.4
11.0000	-8650.35	31.000	-24301.9		
12.0000	-9435.23	32.000	-25082.0		
13.0000	-10219.8	33.000	-25861.9		
14.0000	-11004.2	34.000	-26642.1		
15.0000	-11788.4	35.000	-27421.1		
16.0000	-12572.2	36.000	-28200.4		
17.0000	-13355.9	37.000	-28979.4		
18.0000	-14139.3	38.000	-29758.3		
19.0000	-14922.4	39.000	-30536.9		
20.0000	-15705.4	40.000	-31315.4		

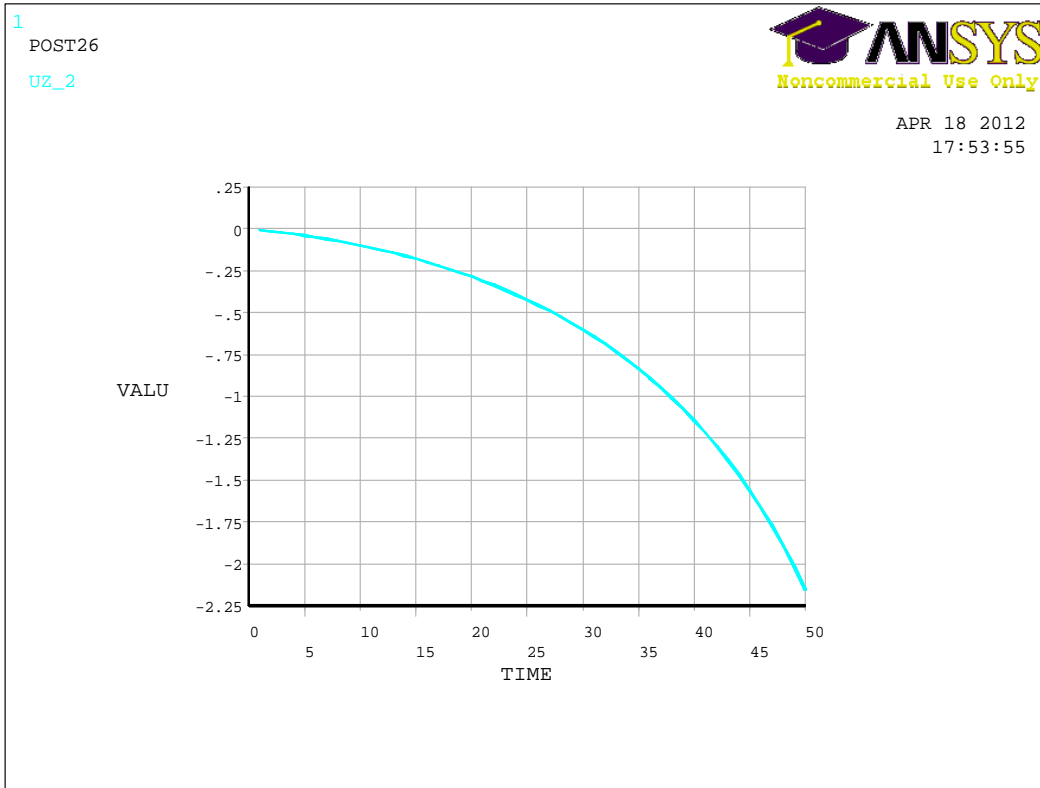
Gráfico 19 - V-604—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-854.138	21.000	-17878.7	41.000	-34800.0
2.0000	-1707.98	22.000	-18727.1	42.000	-35643.7
3.0000	-2561.51	23.000	-19575.3	43.000	-36487.3
4.0000	-3414.73	24.000	-20423.2	44.000	-37330.9
5.0000	-4267.78	25.000	-21270.9	45.000	-38174.3
6.0000	-5120.46	26.000	-22118.1	46.000	-39017.9
7.0000	-5972.83	27.000	-22965.3	47.000	-39861.8
8.0000	-6824.90	28.000	-23812.2	48.000	-40705.9
9.0000	-7677.07	29.000	-24658.8	49.000	-41539.1
10.000	-8528.69	30.000	-25505.2	50.000	-42380.1
11.000	-9380.03	31.000	-26351.3		
12.000	-10231.1	32.000	-27197.7		
13.000	-11081.9	33.000	-28042.9		
14.000	-11932.4	34.000	-28888.3		
15.000	-12782.7	35.000	-29733.5		
16.000	-13632.7	36.000	-30578.4		
17.000	-14482.4	37.000	-31423.2		
18.000	-15331.9	38.000	-32267.6		
19.000	-16181.1	39.000	-33111.9		
20.000	-17030.0	40.000	-33956.0		

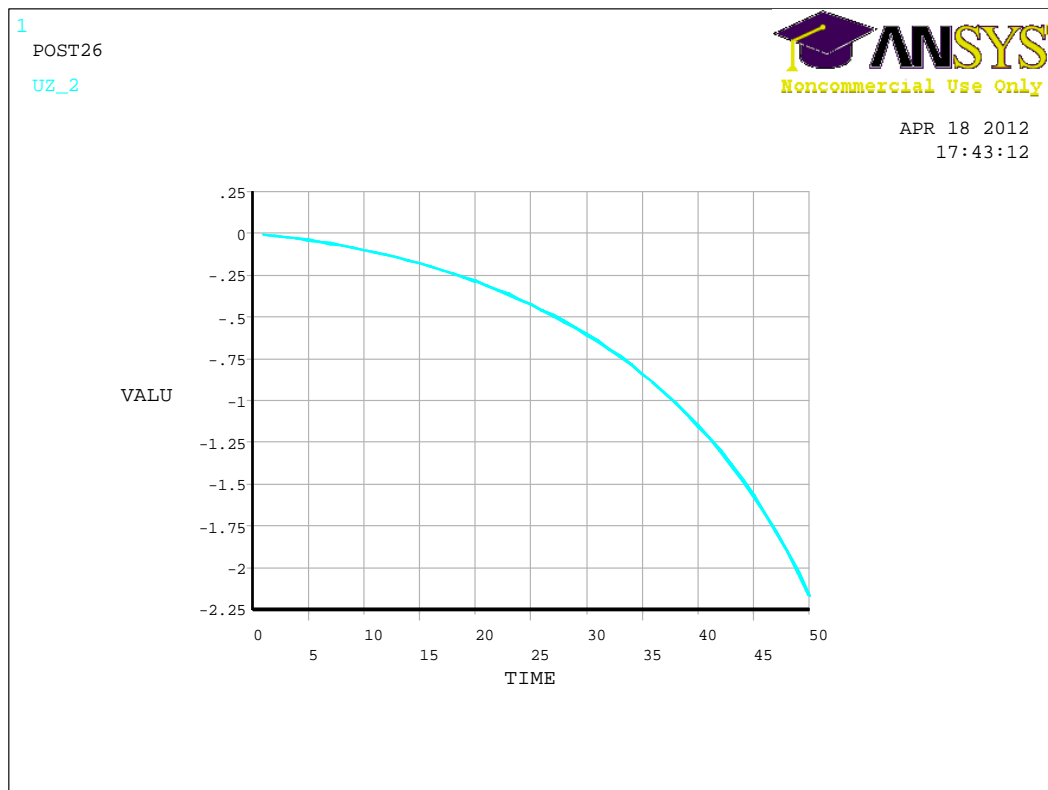
Gráfico 20 - V-603—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-952.874	21.000	-19945.0	41.000	-38820.8
2.0000	-1905.42	22.000	-20891.5	42.000	-39762.4
3.0000	-2857.61	23.000	-21837.6	43.000	-40704.4
4.0000	-3809.54	24.000	-22783.5	44.000	-41645.3
5.0000	-4761.11	25.000	-23729.0	45.000	-42586.3
6.0000	-5712.33	26.000	-24674.3	46.000	-43527.4
7.0000	-6663.21	27.000	-25619.3	47.000	-44468.4
8.0000	-7614.11	28.000	-26564.0	48.000	-45410.3
9.0000	-8564.46	29.000	-27508.4	49.000	-46337.4
10.000	-9514.51	30.000	-28452.9	50.000	-47275.3
11.000	-10464.2	31.000	-29396.5		
12.000	-11413.7	32.000	-30340.0		
13.000	-12362.8	33.000	-31283.4		
14.000	-13311.3	34.000	-32226.4		
15.000	-14260.2	35.000	-33169.2		
16.000	-15208.4	36.000	-34111.7		
17.000	-16156.3	37.000	-35054.0		
18.000	-17103.9	38.000	-35996.0		
19.000	-18051.2	39.000	-36937.8		
20.000	-18998.3	40.000	-37879.4		

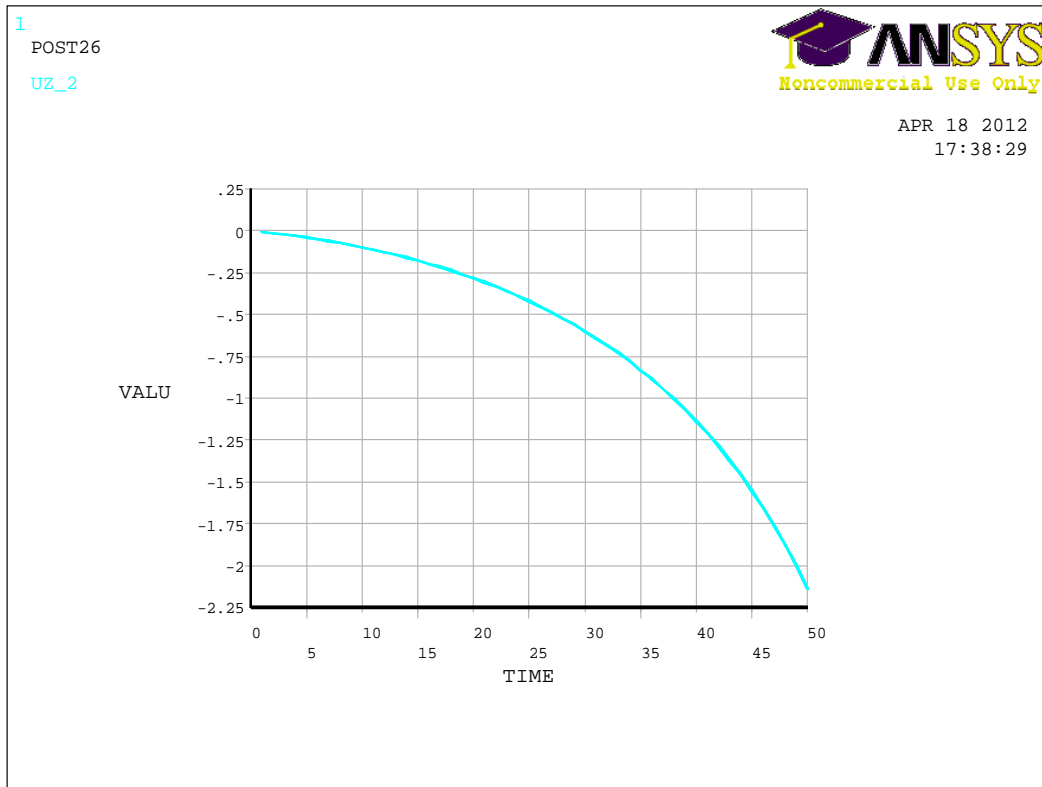
Gráfico 21 - V-602—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.000	-962.245	21.000	-20141.2	41.000	-39203.7
2.000	-1924.15	22.000	-21096.9	42.000	-40154.2
3.000	-2885.71	23.000	-22052.3	43.000	-41104.5
4.000	-3847.01	24.000	-23007.5	44.000	-42054.7
5.000	-4807.93	25.000	-23962.3	45.000	-43004.9
6.000	-5768.50	26.000	-24916.9	46.000	-43955.2
7.000	-6728.73	27.000	-25871.2	47.000	-44905.8
8.000	-7688.98	28.000	-26825.2	48.000	-45856.6
9.000	-8648.69	29.000	-27779.2	49.000	-46792.7
10.000	-9608.07	30.000	-28732.3	50.000	-47739.8
11.000	-10567.1	31.000	-29685.4		
12.000	-11525.9	32.000	-30638.3		
13.000	-12484.4	33.000	-31590.9		
14.000	-13442.5	34.000	-32543.2		
15.000	-14400.4	35.000	-33495.2		
16.000	-15357.9	36.000	-34447.4		
17.000	-16315.2	37.000	-35399.7		
18.000	-17272.1	38.000	-36351.0		
19.000	-18228.7	39.000	-37302.1		
20.000	-19185.1	40.000	-38253.0		

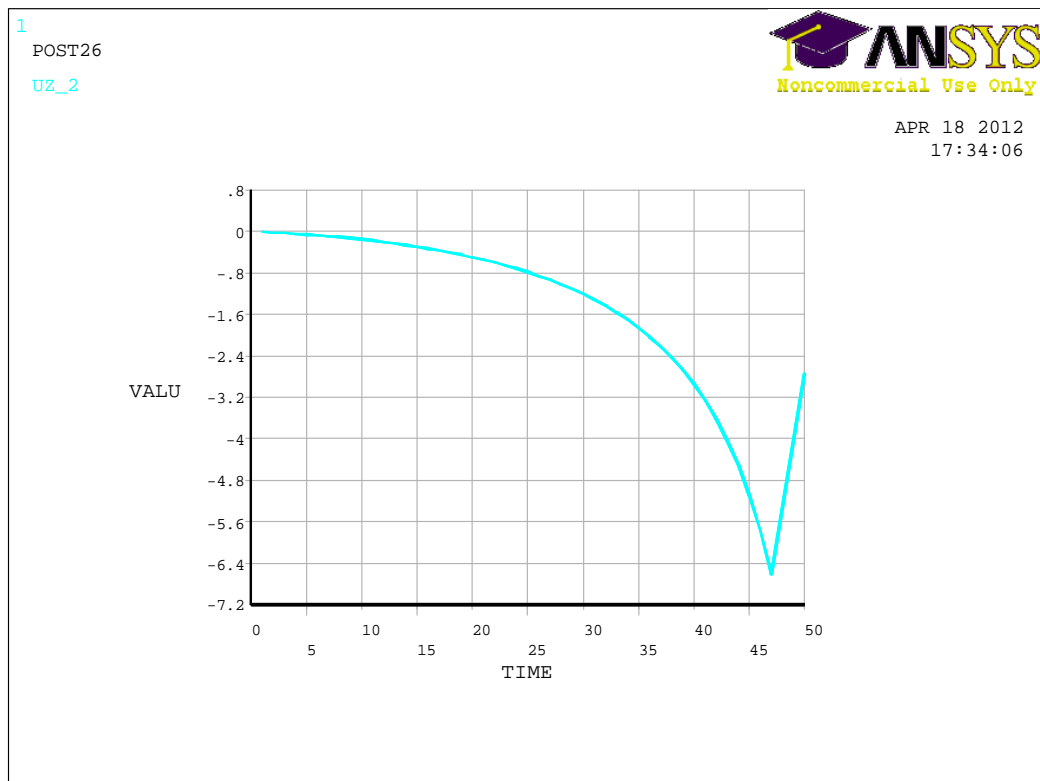
Gráfico 22 - V-601—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-936.158	21.000	-19595.2	41.000	-38140.1
2.0000	-1871.99	22.000	-20525.1	42.000	-39064.8
3.0000	-2807.48	23.000	-21454.6	43.000	-39989.5
4.0000	-3742.72	24.000	-22383.8	44.000	-40914.1
5.0000	-4677.59	25.000	-23312.9	45.000	-41838.8
6.0000	-5612.13	26.000	-24241.6	46.000	-42763.5
7.0000	-6546.33	27.000	-25170.0	47.000	-43689.0
8.0000	-7480.54	28.000	-26098.1	48.000	-44603.0
9.0000	-8414.23	29.000	-27026.0	49.000	-45524.9
10.000	-9347.61	30.000	-27953.9	50.000	-46446.3
11.000	-10280.7	31.000	-28880.9		
12.000	-11213.5	32.000	-29808.0		
13.000	-12145.9	33.000	-30734.8		
14.000	-13078.1	34.000	-31661.3		
15.000	-14010.0	35.000	-32587.6		
16.000	-14941.6	36.000	-33513.5		
17.000	-15872.9	37.000	-34439.3		
18.000	-16803.9	38.000	-35364.8		
19.000	-17734.6	39.000	-36290.1		
20.000	-18665.1	40.000	-37215.2		

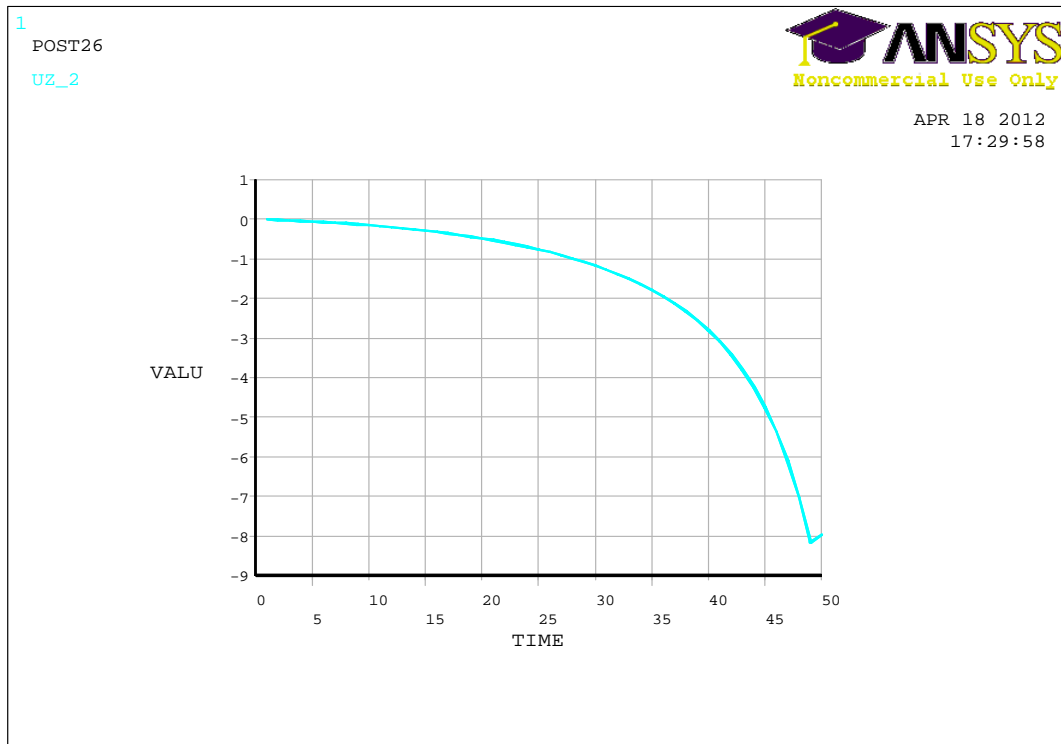
Gráfico 23 - V-508—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-903.854	21.000	-18918.4	41.000	-36803.3
2.0000	-1807.32	22.000	-19817.3	42.000	-37684.5
3.0000	-2710.57	23.000	-20712.9	43.000	-38588.2
4.0000	-3613.36	24.000	-21610.0	44.000	-39464.9
5.0000	-4515.71	25.000	-22506.9	45.000	-40358.8
6.0000	-5417.55	26.000	-23403.6	46.000	-41221.2
7.0000	-6320.62	27.000	-24300.3	47.000	-42118.8
8.0000	-7222.38	28.000	-25196.7	50.000	0.279156E+12
9.0000	-8123.80	29.000	-26091.1		
10.000	-9024.92	30.000	-26986.1		
11.000	-9925.86	31.000	-27880.8		
12.000	-10825.2	32.000	-28775.0		
13.000	-11726.6	33.000	-29668.7		
14.000	-12626.8	34.000	-30561.6		
15.000	-13526.3	35.000	-31453.3		
16.000	-14425.7	36.000	-32343.0		
17.000	-15324.8	37.000	-33243.2		
18.000	-16223.6	38.000	-34136.1		
19.000	-17122.1	39.000	-35029.9		
20.000	-18020.3	40.000	-35927.8		

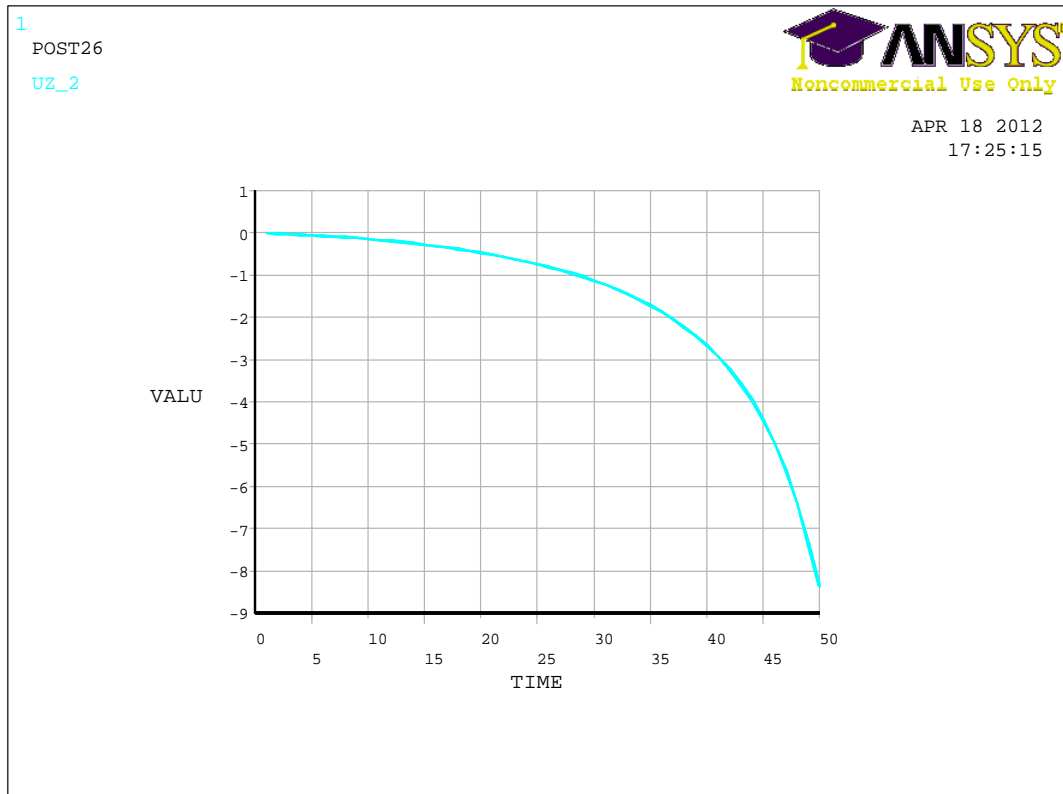
Gráfico 24 - V-507—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-802.349	21.000	-16794.2	41.000	-32675.1
2.0000	-1604.36	22.000	-17591.2	42.000	-33461.8
3.0000	-2406.18	23.000	-18388.0	43.000	-34256.5
4.0000	-3207.61	24.000	-19186.2	44.000	-35050.4
5.0000	-4008.67	25.000	-19980.2	45.000	-35821.5
6.0000	-4809.31	26.000	-20776.3	46.000	-36623.2
7.0000	-5609.45	27.000	-21572.3	47.000	-37400.8
8.0000	-6411.31	28.000	-22368.2	48.000	-38159.5
9.0000	-7211.55	29.000	-23162.0	49.000	-38951.7
10.000	-8011.50	30.000	-23956.7	50.000	0.109108E+10
11.000	-8811.18	31.000	-24751.0		
12.000	-9610.60	32.000	-25545.0		
13.000	-10409.9	33.000	-26338.5		
14.000	-11207.1	34.000	-27131.5		
15.000	-12008.3	35.000	-27923.6		
16.000	-12806.2	36.000	-28714.4		
17.000	-13604.0	37.000	-29502.7		
18.000	-14401.9	38.000	-30304.4		
19.000	-15199.6	39.000	-31097.2		
20.000	-15997.0	40.000	-31891.6		

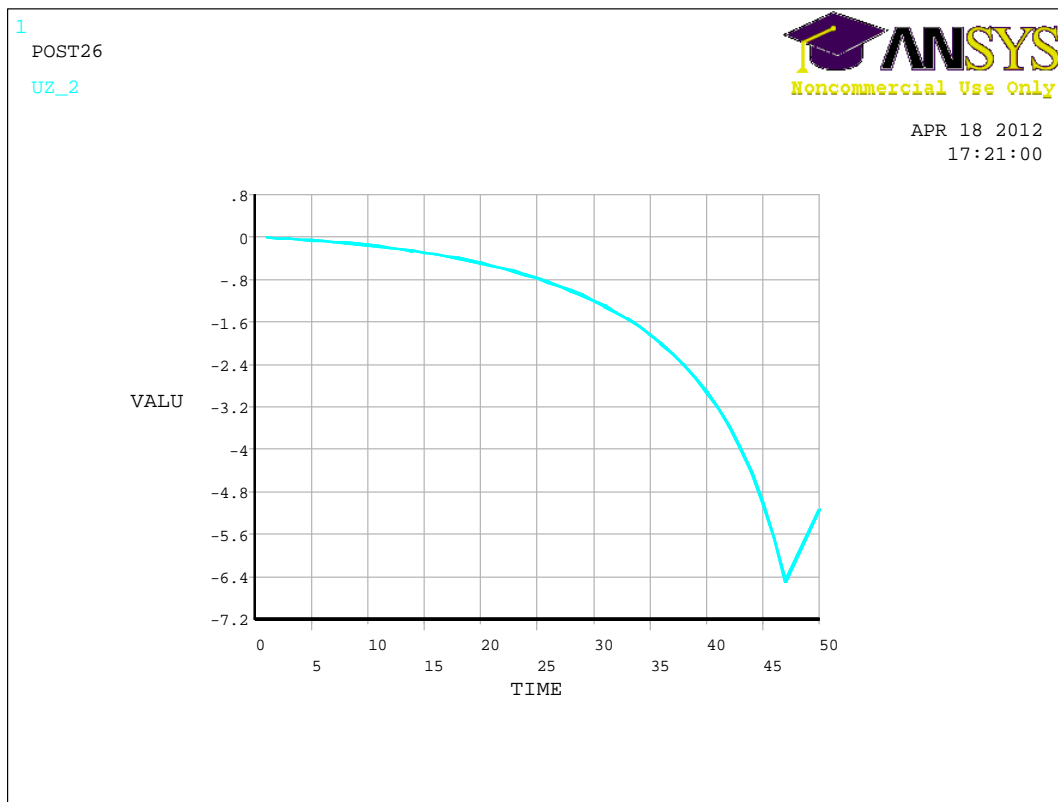
Gráfico 25 - V-506—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-712.109	21.000	-14905.6	41.000	-29011.1
2.0000	-1423.93	22.000	-15613.0	42.000	-29703.7
3.0000	-2135.50	23.000	-16320.2	43.000	-30400.4
4.0000	-2846.87	24.000	-17027.4	44.000	-31107.8
5.0000	-3557.88	25.000	-17734.4	45.000	-31802.7
6.0000	-4268.52	26.000	-18441.6	46.000	-32491.1
7.0000	-4978.75	27.000	-19150.7	47.000	-33193.6
8.0000	-5688.52	28.000	-19853.2	48.000	-33900.7
9.0000	-6397.69	29.000	-20557.8	49.000	-34583.1
10.000	-7110.46	30.000	-21263.2	50.000	0.881041E+09
11.000	-7820.28	31.000	-21968.3		
12.000	-8529.81	32.000	-22673.1		
13.000	-9239.11	33.000	-23377.5		
14.000	-9948.18	34.000	-24081.5		
15.000	-10657.2	35.000	-24785.0		
16.000	-11363.6	36.000	-25487.5		
17.000	-12076.6	37.000	-26188.6		
18.000	-12782.8	38.000	-26897.7		
19.000	-13490.3	39.000	-27601.1		
20.000	-14198.1	40.000	-28305.0		

Gráfico 26 - V-505—ORTOTROPICO grafico-UZ



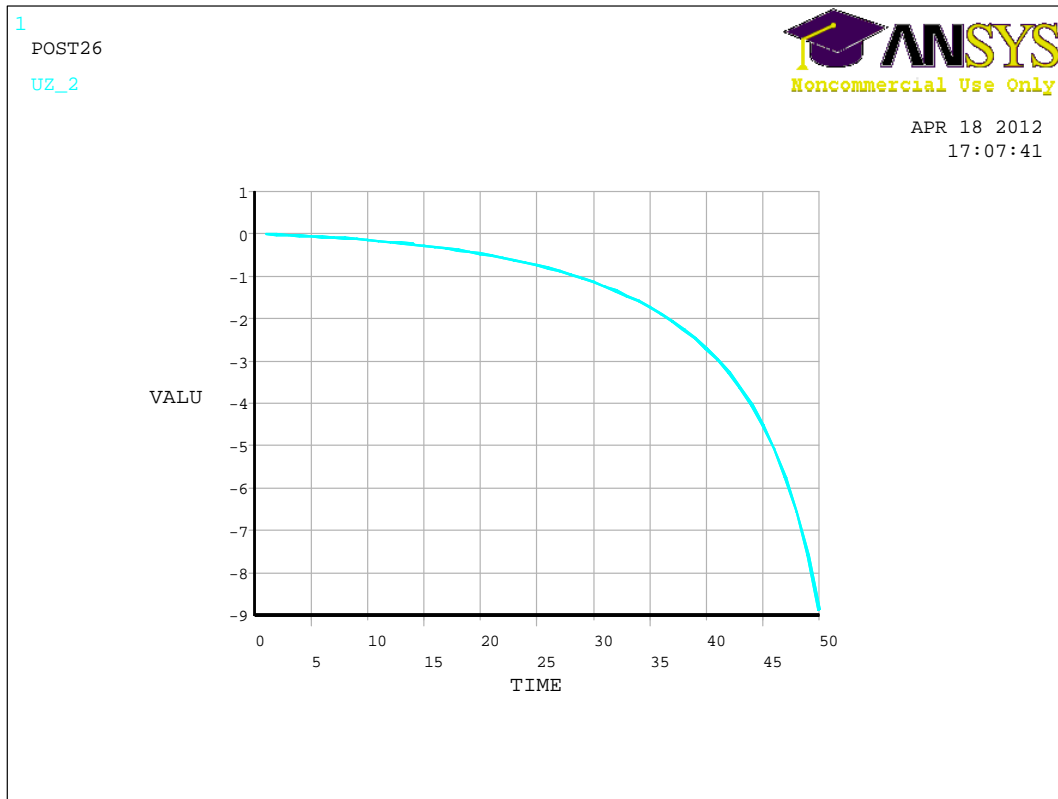
TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-878.111	21.000	-18379.7	41.000	-35756.5
2.0000	-1755.85	22.000	-19251.9	42.000	-36613.7
3.0000	-2633.37	23.000	-20125.3	43.000	-37489.4
4.0000	-3510.46	24.000	-20994.8	44.000	-38343.5
5.0000	-4387.12	25.000	-21866.2	45.000	-39209.8
6.0000	-5263.29	26.000	-22737.3	46.000	-40053.9
7.0000	-6138.90	27.000	-23608.4	47.000	-40904.9
8.0000	-7016.65	28.000	-24479.4	50.000	-0.494258E+12
9.0000	-7892.45	29.000	-25348.2		
10.000	-8767.91	30.000	-26217.9		
11.000	-9643.08	31.000	-27087.1		
12.000	-10518.1	32.000	-27955.9		
13.000	-11391.2	33.000	-28824.2		
14.000	-12267.4	34.000	-29691.7		
15.000	-13141.4	35.000	-30558.2		
16.000	-14014.9	36.000	-31422.8		
17.000	-14888.4	37.000	-32296.9		
18.000	-15761.6	38.000	-33164.3		
19.000	-16634.5	39.000	-34032.6		
20.000	-17507.2	40.000	-34903.9		

V-504—ORTOTRÓPICO - TABELA- FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
	FY_3		FY_3		FY_3
1.0000	-698.853	21.000	-14628.2	41.000	-28470.7
2.0000	-1397.42	22.000	-15322.4	42.000	-29151.5
3.0000	-2095.75	23.000	-16016.5	43.000	-29835.8
4.0000	-2793.88	24.000	-16710.5	44.000	-30529.1
5.0000	-3491.65	25.000	-17404.3	45.000	-31222.1
6.0000	-4189.08	26.000	-18098.3	46.000	-31889.6
7.0000	-4886.11	27.000	-18794.1	47.000	-32577.8
8.0000	-5582.68	28.000	-19483.8	48.000	-33267.8
9.0000	-6278.68	29.000	-20177.1	49.000	-33932.7
10.000	-6978.11	30.000	-20867.5	50.000	-34626.7
11.000	-7674.72	31.000	-21559.5		
12.000	-8371.05	32.000	-22251.2		
13.000	-9067.15	33.000	-22942.5		
14.000	-9763.03	34.000	-23633.5		
15.000	-10458.8	35.000	-24323.9		
16.000	-11152.1	36.000	-25013.4		
17.000	-11851.2	37.000	-25701.7		
18.000	-12544.9	38.000	-26387.2		
19.000	-13239.8	39.000	-27087.5		
20.000	-13933.8	40.000	-27778.3		

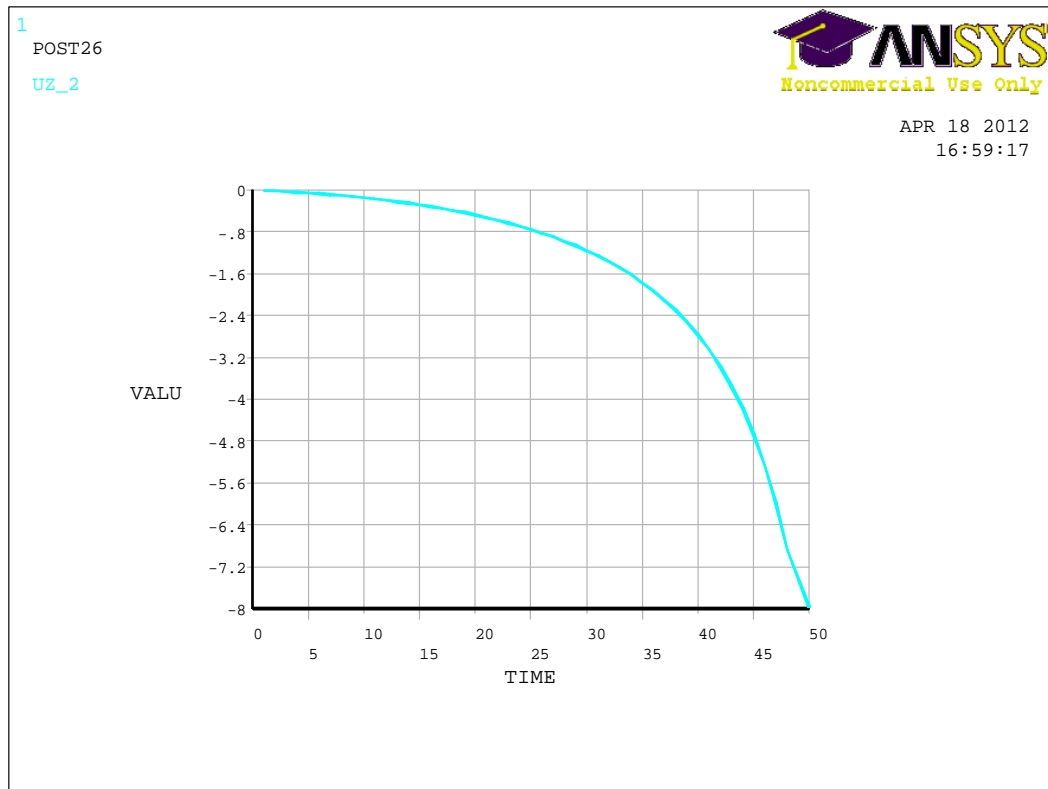
Gráfico 27 - V-503—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY_3	TIME	RFOR FY_3	TIME	RFOR FY_3
1.0000	-736.314	21.000	-15412.2	41.000	-29998.0
2.0000	-1472.33	22.000	-16143.6	42.000	-30712.0
3.0000	-2208.16	23.000	-16874.9	43.000	-31431.0
4.0000	-2943.64	24.000	-17606.1	44.000	-32165.0
5.0000	-3678.79	25.000	-18337.1	45.000	-32881.6
6.0000	-4413.57	26.000	-19070.1	46.000	-33607.2
7.0000	-5147.93	27.000	-19797.4	47.000	-34317.1
8.0000	-5881.78	28.000	-20527.9	48.000	-35032.4
9.0000	-6618.02	29.000	-21256.3	49.000	-35740.2
10.000	-7352.19	30.000	-21985.7	50.000	-36134.0
11.000	-8086.07	31.000	-22714.7		
12.000	-8819.72	32.000	-23443.4		
13.000	-9553.12	33.000	-24171.8		
14.000	-10286.4	34.000	-24899.6		
15.000	-11017.5	35.000	-25626.9		
16.000	-11753.1	36.000	-26353.1		
17.000	-12484.9	37.000	-27077.8		
18.000	-13217.2	38.000	-27811.5		
19.000	-13948.8	39.000	-28538.8		
20.000	-14680.6	40.000	-29266.9		

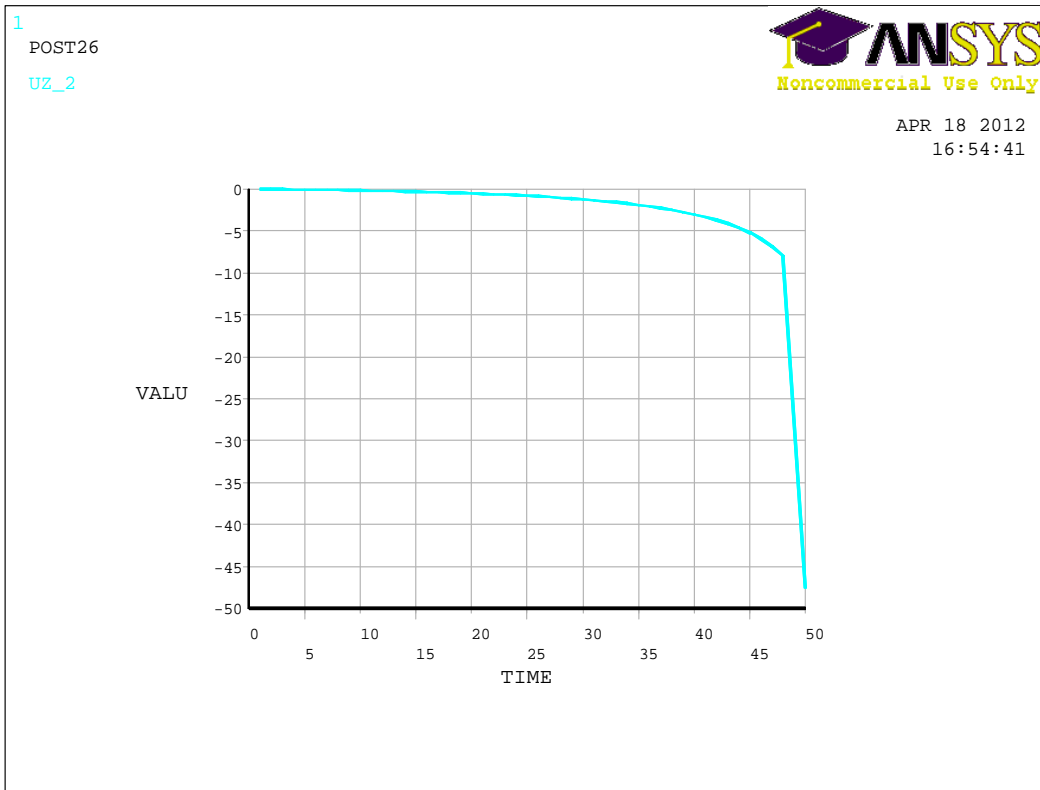
Gráfico 28 - V-502—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-779.875	21.000	-16323.8	41.000	-31760.8
2.0000	-1559.42	22.000	-17098.5	42.000	-32526.1
3.0000	-2338.78	23.000	-17873.0	43.000	-33297.5
4.0000	-3117.77	24.000	-18647.5	44.000	-34068.0
5.0000	-3896.40	25.000	-19423.6	45.000	-34821.4
6.0000	-4674.62	26.000	-20194.5	46.000	-35595.8
7.0000	-5452.37	27.000	-20968.3	47.000	-36352.9
8.0000	-6229.55	28.000	-21741.9	48.000	-37110.6
9.0000	-7009.51	29.000	-22513.4	49.000	-37872.9
10.000	-7787.11	30.000	-23285.9		
11.000	-8564.39	31.000	-24058.0		
12.000	-9341.43	32.000	-24829.7		
13.000	-10118.3	33.000	-25601.1		
14.000	-10893.3	34.000	-26371.9		
15.000	-11671.7	35.000	-27142.0		
16.000	-12448.9	36.000	-27910.8		
17.000	-13223.4	37.000	-28677.4		
18.000	-13998.6	38.000	-29455.9		
19.000	-14773.9	39.000	-30226.5		
20.000	-15549.0	40.000	-30998.2		

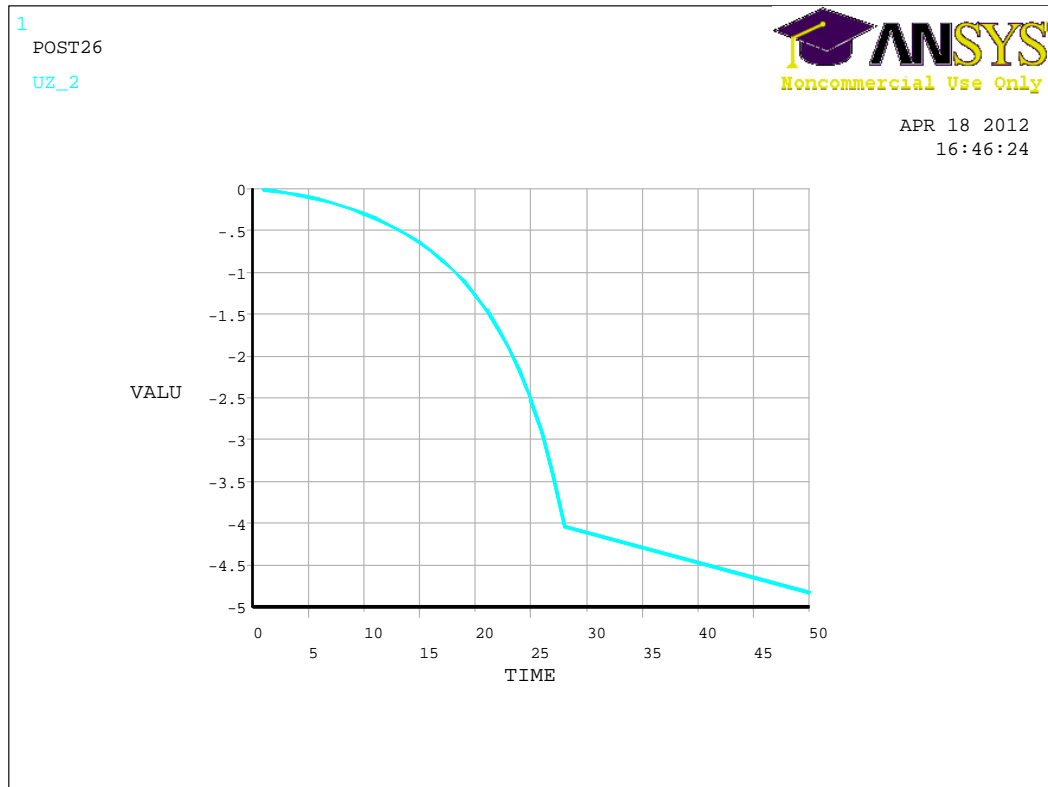
Gráfico 29 - V-501—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-946.117	21.000	-19803.6	41.000	-38521.9
2.0000	-1891.87	22.000	-20741.8	42.000	-39457.4
3.0000	-2837.31	23.000	-21681.1	43.000	-40392.4
4.0000	-3782.30	24.000	-22620.1	44.000	-41305.2
5.0000	-4726.82	25.000	-23558.9	45.000	-42246.8
6.0000	-5670.80	26.000	-24497.5	46.000	-43165.9
7.0000	-6616.14	27.000	-25435.9	47.000	-44081.0
8.0000	-7560.06	28.000	-26374.4	48.000	-44974.8
9.0000	-8503.62	29.000	-27310.6	50.000	-0.405400E+15
10.000	-9446.87	30.000	-28247.4		
11.000	-10389.9	31.000	-29183.9		
12.000	-11331.3	32.000	-30119.9		
13.000	-12274.9	33.000	-31055.4		
14.000	-13217.2	34.000	-31990.0		
15.000	-14158.7	35.000	-32923.5		
16.000	-15100.1	36.000	-33855.0		
17.000	-16041.2	37.000	-34796.5		
18.000	-16982.0	38.000	-35731.0		
19.000	-17922.5	39.000	-36666.8		
20.000	-18862.8	40.000	-37607.0		

Gráfico 30 - V-407—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

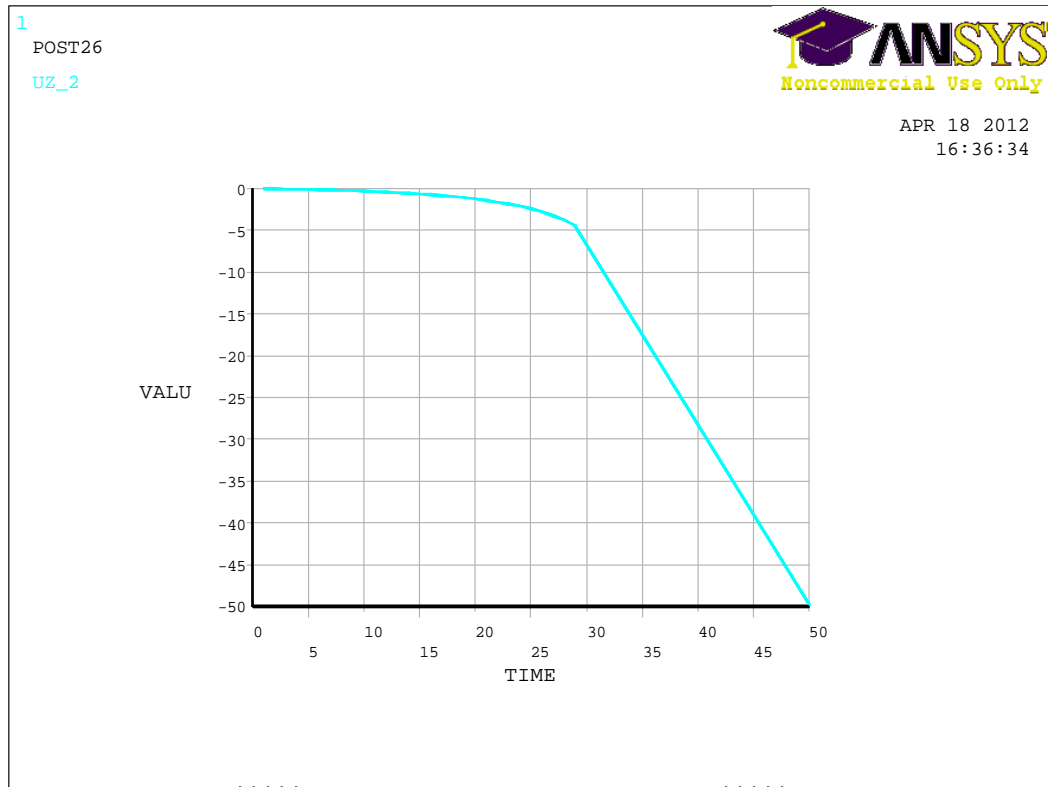
TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-679.224	21.000	-14215.3
2.0000	-1357.88	22.000	-14886.8
3.0000	-2036.98	23.000	-15558.3
4.0000	-2712.08	24.000	-16235.1
5.0000	-3394.03	25.000	-16903.9
6.0000	-4072.46	26.000	-17580.9
7.0000	-4750.79	27.000	-18252.4
8.0000	-5427.14	28.000	-18920.4
9.0000	-6104.67	50.000	-19677.0
10.000	-6782.19		
11.000	-7459.37		
12.000	-8135.35		
13.000	-8811.33		
14.000	-9488.64		
15.000	-10165.3		
16.000	-10842.6		
17.000	-11516.1		
18.000	-12190.9		
19.000	-12865.5		
20.000	-13540.0		

V-406—ORTOTRÓPICO TABELA- FY

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
	FY_3		FY_3
1.0000	-596.266	21.000	-12482.0
2.0000	-1192.28	22.000	-13075.4
3.0000	-1787.84	23.000	-13661.4
4.0000	-2382.37	24.000	-14254.7
5.0000	-2979.93	25.000	-14843.2
6.0000	-3575.70	26.000	-15435.5
7.0000	-4171.47	27.000	-16024.3
8.0000	-4765.05	28.000	-16607.6
9.0000	-5359.63	29.000	-17191.1
10.000	-5953.44	50.000	-47142.2
11.000	-6548.94		
12.000	-7143.24		
13.000	-7737.44		
14.000	-8331.62		
15.000	-8926.11		
16.000	-9519.97		
17.000	-10110.9		
18.000	-10704.4		
19.000	-11295.9		
20.000	-11888.2		

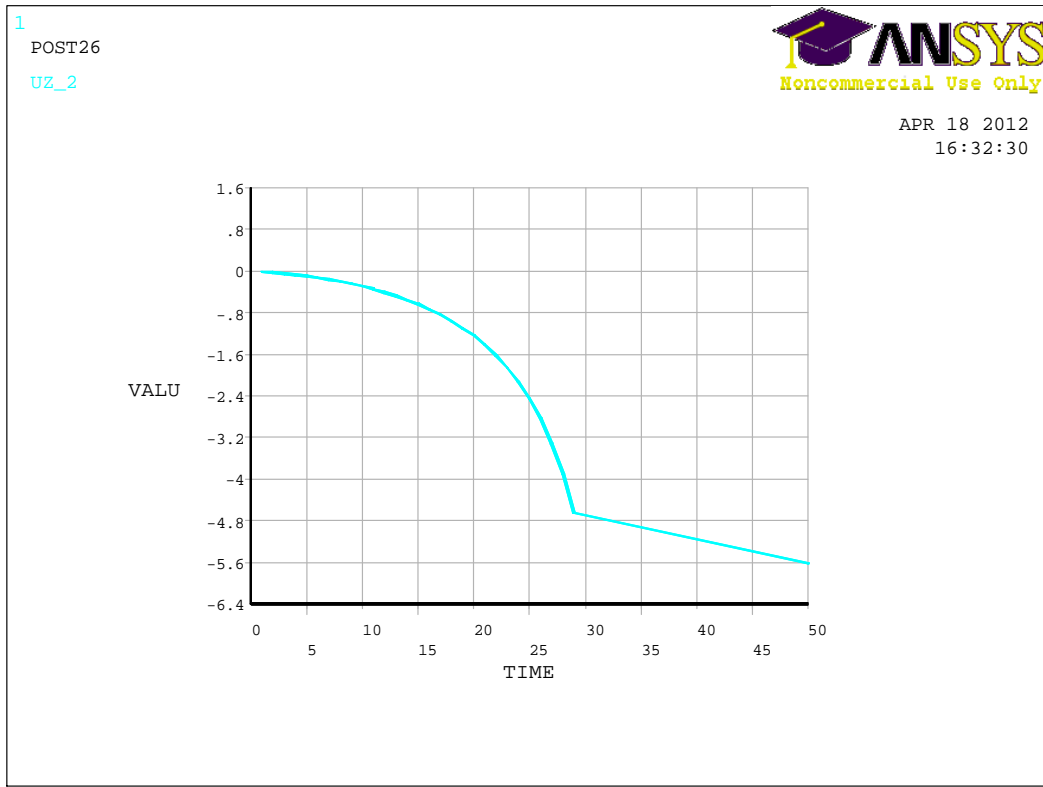
Gráfico 31 - V-405—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY FY_3	TIME	RFOR FY FY_3
1.0000	-549.053	21.000	-11492.2
2.0000	-1097.88	22.000	-12039.7
3.0000	-1646.32	23.000	-12580.2
4.0000	-2193.91	24.000	-13126.1
5.0000	-2743.93	25.000	-13672.9
6.0000	-3292.46	26.000	-14213.2
7.0000	-3839.97	27.000	-14751.2
8.0000	-4387.72	28.000	-15298.5
9.0000	-4935.28	29.000	-15832.8
10.000	-5482.40	50.000	0.186210E+14
11.000	-6030.24		
12.000	-6577.65		
13.000	-7124.82		
14.000	-7671.83		
15.000	-8218.86		
16.000	-8767.00		
17.000	-9310.28		
18.000	-9856.68		
19.000	-10403.6		
20.000	-10947.1		

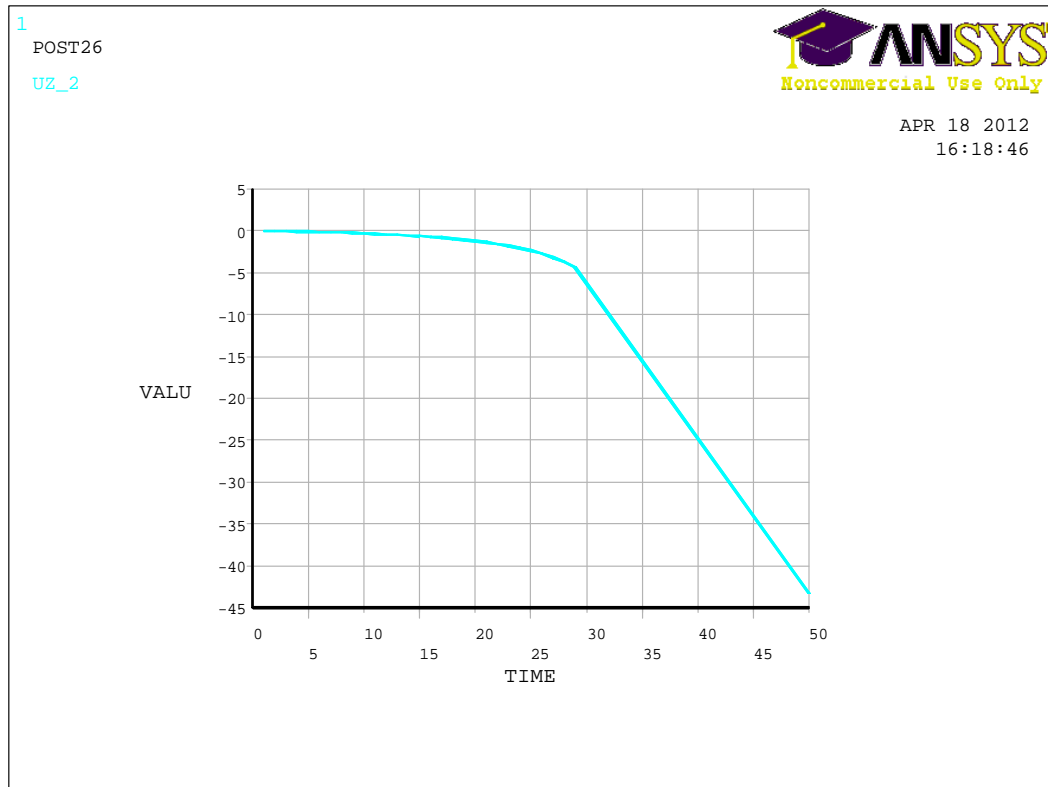
Gráfico 32 - V-403—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
	FY_3		FY_3
1.0000	-599.700	21.000	-12554.0
2.0000	-1199.15	22.000	-13150.8
3.0000	-1798.14	23.000	-13740.2
4.0000	-2396.09	24.000	-14336.9
5.0000	-2997.11	25.000	-14928.7
6.0000	-3596.31	26.000	-15524.5
7.0000	-4195.52	27.000	-16116.6
8.0000	-4792.53	28.000	-16703.0
9.0000	-5390.52	29.000	-17289.6
10.000	-5987.69	50.000	-1372.48
11.000	-6586.67		
12.000	-7184.43		
13.000	-7782.06		
14.000	-8379.59		
15.000	-8977.48		
16.000	-9574.84		
17.000	-10169.2		
18.000	-10766.0		
19.000	-11361.0		
20.000	-11956.7		

Gráfico 33 - V-401—ORTOTROPICO grafico-UZ



***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

TIME	RFOR FY	TIME	RFOR FY
	FY_3		FY_3
1.0000	-517.446	21.000	-10831.1
2.0000	-1034.68	22.000	-11346.2
3.0000	-1551.57	23.000	-11856.2
4.0000	-2067.71	24.000	-12370.5
5.0000	-2585.94	25.000	-12885.3
6.0000	-3102.85	26.000	-13390.8
7.0000	-3618.90	27.000	-13903.5
8.0000	-4135.05	28.000	-14417.1
9.0000	-4651.01	29.000	-14927.0
10.000	-5166.78	50.000	0.439307E+13
11.000	-5681.89		
12.000	-6198.64		
13.000	-6714.61		
14.000	-7230.17		
15.000	-7745.62		
16.000	-8261.18		
17.000	-8774.38		
18.000	-9289.20		
19.000	-9804.48		
20.000	-10317.2		

6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

6.1 Generalidades

Na Análise Estatística dos resultados obtidos neste trabalho, foram usadas ferramentas de análise do Programa EXCEL referentes a igualdade de médias de populações.

Para testes de hipóteses para diferenças entre médias de amostras pequenas de mesmo tamanho ou não, de duas populações independentes que seguem uma distribuição normal, foi aplicado o teste T para duas amostras presumindo variâncias equivalentes.

No caso específico de duas amostras de mesmo tamanho, mantidas as demais condições acima, foi também aplicado o teste T para duas amostras em par para médias.

Nos testes acima, as hipóteses dos testes foram aplicadas da seguinte maneira:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad \text{Onde } \mu_1 \text{ e } \mu_2 \text{ são as médias das populações estudadas}$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Para comparar as médias de amostras aleatórias e independentes, retiradas de mais de duas populações com distribuição normal e mesma variância, foi usado o teste análise da variância ou ANOVA (Analysis of Variance) .

Neste teste a diferença entre as médias dos diversos grupos analisados, não deve ser superior ao valor da Diferença Mínima Significativa (DMS), onde:

$$DMS = t_{N-K;0,025} \sqrt{\frac{2Q_{MR}}{n}}$$

n = tamanho das repetições em cada amostra;

v = $N - K$ = graus de liberdade dentro do grupo;

N = Total dos graus de liberdade;

K = Número de graus de liberdade entre grupos;

$Q_{MR} = MQ$ = Quadrado médio dos desvios, dentro do grupo

SQ = soma de quadrados;

0,025 = grau de significância do teste.

Nas análises das vigas deste trabalho foram considerados 30 (trinta) tratamentos, a saber:

Tabela 25 - Considerações sobre o adotado nos ensaios

TRATAMENTO	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE
TC (Técnicas de cálculo)	1- Ensaio destrutivo; 2- Modelo da NBR7190/97; 3- Modelo da Teoria da Elasticidade, 4- Elementos Finitos Ortotrópico; 5- Elementos Finitos Isotrópico	5
TL (Tipos de lâminas)	1- Lâminas sem emendas (SE) e 2- Lâminas com emendas (CE)	2
E (Espessura da viga)	1- $b_1=4$ cm; 2) $b_1=5$ cm; 3) $b_1=6$ cm	3
	TOTAL = TC x TL x E .	30

- Número de Graus de Liberdade: $n = 30 - 1 = 29$

No caso da comparação das médias dos cinco tratamentos de Técnicas de Cálculo, foi aplicado o ANOVA com a seguinte hipótese de teste:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

Nas demais comparações entre dois tratamentos, foi empregado o teste T.

VIGA	f_v Ruptura na cola (kN/cm ²)	tipo de ruptura observado	f_v ruptura na madeira (kN/cm ²)	tipo de ruptura observado
V 601 CE				
V 602 CE				
V 603 CE				
V 604 CE				
V 605 SE	0,71	Tipo I	0,35	Tipo III
V 606 SE				
V 607 SE	0,54	Tipo I	0,86	Tipo III
V 608 SE				
V 501 CE				
V 502 CE				
V 503 CE				
V 504 CE				
V 505 SE				
V 506 SE	0,66	Tipo I	0,64	Tipo III
V 507 SE	0,65	Tipo I	0,90	Tipo III
V 508 SE				
V 401 CE				
V 402 CE				
V 403 CE				
V 404 CE				
V 405 SE	0,53	Tipo I	0,67	Tipo II
V 406 SE				
V 407 SE	0,56	Tipo I	1,76	Tipo II
V 408 SE				

Convenção: tipos de rupturas:
 Tipo I: Ruptura na madeira por cisalhamento paralelo às fibras
 Tipo II: Ruptura na madeira por cisalhamento, adjacente ao plano da cola
 Tipo III: Ruptura na cola

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	Variável 1	Variável 2
Média	0,6077	0,8622
Variância	0,0056	0,2314
Observações	6	6
Variância agrupada	0,1185	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	10	
Stat t	-1,2803	
P(T<=t) uni-caudal	0,1147	
t crítico uni-caudal	1,8125	
P(T<=t) bi-caudal	0,2293	
t crítico bi-caudal	2,2281	

Teste-t: duas amostras em par para médias

	Variável 1	Variável 2
Média	0,6077	0,8622
Variância	0,0056	0,2314
Observações	6	6
Correlação de Pearson	-0,5016	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	5	
Stat t	-1,1926	
P(T<=t) uni-caudal	0,1433	
t crítico uni-caudal	2,0150	
P(T<=t) bi-caudal	0,2865	
t crítico bi-caudal	2,5706	

Quadro 5 - Comparativo Ruptura por Cisalhamento na Cola x Ruptura por Cisalhamento na Madeira

VIGA (MLC) vão = 300 cm	E_M (kN/cm ²)	CP-VIGA (Maciça) vão = 50 cm	E_M (kN/cm ²)	Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
					<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
V 601 CE	1.659,40	CP V 601 CE		Média	1628,8793	1366,5075
V 602 CE	1.707,79	CP V 602 CE		Variância	28876,5271	31404,7292
V 603 CE	1.690,35	CP V 603 CE		Observações	21	8
V 604 CE	1.507,98	CP V 604 CE		Variância agrupada	29531,98693	
V 605 SE	1.386,15	CP V 605 SE	1.494,75	Hipótese da diferença de média	0	
V 606 SE	1.688,69	CP V 606 SE		gl	27	
V 607 SE	1.445,92	CP V 607 SE	1.558,28	Stat t	3,6747	
V 608 SE	1.600,54	CP V 608 SE	1.404,90	P(T<=t) uni-caudal	0,00051971	
V 501 CE	2.003,03	CP V 501 CE		t crítico uni-caudal	1,703288423	
V 502 CE	1.635,43	CP V 502 CE		P(T<=t) bi-caudal	0,001039419	
V 503 CE	1.540,16	CP V 503 CE		t crítico bi-caudal	2,0518	
V 504 CE	1.458,87	CP V 504 CE				
V 505 SE	1.851,79	CP V505 SE	1.599,60			
V 506 SE	1.487,47	CP V 506 SE	1.123,48			
V 507 SE	1.684,71	CP V 507 SE	1.312,25			
V 508 SE	1.908,88	CP V508 SE				
V 401 CE	1.390,47	CP V 401 CE				
V 402 CE		CP V 402 CE				
V 403 CE	1.621,40	CP V 403 CE				
V 404 CE		CP V 404 CE				
V 405 SE	1.478,88	CP V 405 SE	1.271,92			
V 406 SE	1.611,71	CP V 406 SE				
V 407 SE	1.846,85	CP V 407 SE	1.166,88			
V 408 SE		CP V 408 SE				

Quadro 6 - Comparativo Módulo de Elasticidade - VIGA MLC x VIGA MACIÇA

VIGA (MLC) vão = 300 cm	E_M (kN/cm ²)	CP-VIGA (Maciça) vão = 50 cm	E_M (kN/cm ²)	Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
					Variável 1	Variável 2
V 605 SE	1.386,15	CP V 605 SE	1.494,75	Média	1597,7895	1366,5075
V 607 SE	1.445,92	CP V 607 SE	1.558,28	Variância	32611,0988	31404,7292
V 608 SE	1.600,54	CP V 608 SE	1.404,90	Observações	8	8
V 505 SE	1.851,79	CP V505 SE	1.599,60	Variância agrupada	32007,9140	
V 506 SE	1.487,47	CP V 506 SE	1.123,48	Hipótese da diferença de média	0	
V 507 SE	1.684,71	CP V 507 SE	1.312,25	gl	14	
V 405 SE	1.478,88	CP V 405 SE	1.271,92	Stat t	2,5855	
V 407 SE	1.846,85	CP V 407 SE	1.166,88	P(T<=t) uni-caudal	0,0108	
				t crítico uni-caudal	1,7613	
				P(T<=t) bi-caudal	0,0216	
				t crítico bi-caudal	2,1448	
				Teste-t: duas amostras em par para médias		
					Variável 1	Variável 2
				Média	1597,7895	1366,5075
				Variância	32611,0988	31404,7292
				Observações	8	8
				Correlação de Pearson	-0,05951	
				Hipótese da diferença de média	0	
				gl	7	
				Stat t	2,5118	
				P(T<=t) uni-caudal	0,02014	
				t crítico uni-caudal	1,8946	
				P(T<=t) bi-caudal	0,0403	
				t crítico bi-caudal	2,3646	

Quadro 7 - Comparativo Módulo de Elasticidade - VIGA MLC x VIGA MACIÇA - sem emendas nas lâminas

VIGA	E_M	VIGA	E_M	Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes	
vão = 300 cm	(kN/cm ²)	vão = 300 cm	(kN/cm ²)	<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
V 601 CE	1.659,40	V 605 SE	1.386,15	Média	1621,4874
V 602 CE	1.707,79	V 606 SE	1.688,69	Variância	28744,9103
V 603 CE	1.690,35	V 607 SE	1.445,92	Observações	10
V 604 CE	1.507,98	V 608 SE	1.600,54	Variância agrupada	30341,4414
V 501 CE	2.003,03	V 505 SE	1.851,79	Hipótese da diferença de média	0
V 502 CE	1.635,43	V 506 SE	1.487,47	gl	19
V 503 CE	1.540,16	V 507 SE	1.684,71	Stat t	-0,1854
V 504 CE	1.458,87	V 508 SE	1.908,88	P(T<=t) uni-caudal	0,4274
V 401 CE	1.390,47	V 405 SE	1.478,88	t crítico uni-caudal	1,7291
V 402 CE		V 406 SE	1.611,71	P(T<=t) bi-caudal	0,8549
V 403 CE	1.621,40	V 407 SE	1.846,85	t crítico bi-caudal	2,0930
V 404 CE		V 408 SE			
				Teste-t: duas amostras em par para médias	
VIGA	E_M	VIGA	E_M	<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
vão = 300 cm	(kN/cm ²)	vão = 300 cm	(kN/cm ²)		
V 601 CE	1.659,40	V 605 SE	1.386,15	Média	1621,4874
V 602 CE	1.707,79	V 606 SE	1.688,69	Variância	28744,9103
V 603 CE	1.690,35	V 607 SE	1.445,92	Observações	10
V 604 CE	1.507,98	V 608 SE	1.600,54	Correlação de Pearson	0,1893
V 501 CE	2.003,03	V 505 SE	1.851,79	Hipótese da diferença de média	0
V 502 CE	1.635,43	V 506 SE	1.487,47	gl	9
V 503 CE	1.540,16	V 507 SE	1.684,71	Stat t	-0,2290
V 504 CE	1.458,87	V 508 SE	1.908,88	P(T<=t) uni-caudal	0,4120
V 401 CE	1.390,47	V 405 SE	1.478,88	t crítico uni-caudal	1,8331
V 403 CE	1.621,40	V 407 SE	1.846,85	P(T<=t) bi-caudal	0,8240
				t crítico bi-caudal	2,2622

Quadro 8 - Comparativo Módulo de Elasticidade - Viga MLC - com emenda x sem emenda

VIGA (MLC) vão = 300 cm	P_{flamb} (kN) L1 = 300 cm	VIGA (MLC) vão = 300 cm	P_{flamb} (kN) L1 = 300 cm	Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
					Variável 1	Variável 2
V 601 CE	13,00	V 605 SE	30,00	Média	10,3000	11,4545
V 602 CE	21,00	V 606 SE	13,00	Variância	28,9000	82,2727
V 603 CE	8,00	V 607 SE	8,00	Observações	10	11
V 604 CE	12,00	V 608 SE	11,00	Variância agrupada	56,9909	
V 501 CE	11,00	V 505 SE	2,00	Hipótese da diferença de média	0	
V 502 CE	15,00	V 506 SE	13,00	gl	19	
V 503 CE	8,00	V 507 SE	25,00	Stat t	-0,3500	
V 504 CE	8,00	V 508 SE	13,00	P(T<=t) uni-caudal	0,3651	
V 401 CE	5,00	V 405 SE	4,00	t crítico uni-caudal	1,7291	
V 402 CE		V 406 SE	2,00	P(T<=t) bi-caudal	0,7302	
V 403 CE	2,00	V 407 SE	5,00	t crítico bi-caudal	2,0930	
V 404 CE		V 408 SE				
				Teste-t: duas amostras em par para médias		
VIGA (MLC) vão = 300 cm	P_{flamb} (kN) L1 = 300 cm	VIGA (MLC) vão = 300 cm	P_{flamb} (kN) L1 = 300 cm		Variável 1	Variável 2
V 601 CE	13,00	V 605 SE	30,00	Média	10,3000	12,4000
V 602 CE	21,00	V 606 SE	13,00	Variância	28,9000	80,4889
V 603 CE	8,00	V 607 SE	8,00	Observações	10	10
V 604 CE	12,00	V 608 SE	11,00	Correlação de Pearson	0,3059	
V 501 CE	11,00	V 505 SE	2,00	Hipótese da diferença de média	0	
V 502 CE	15,00	V 506 SE	13,00	gl	9	
V 503 CE	8,00	V 507 SE	25,00	Stat t	-0,7430	
V 504 CE	8,00	V 508 SE	13,00	P(T<=t) uni-caudal	0,2382	
V 401 CE	5,00	V 405 SE	4,00	t crítico uni-caudal	1,8331	
V 403 CE	2,00	V 407 SE	5,00	P(T<=t) bi-caudal	0,4764	
				t crítico bi-caudal	2,2622	

Quadro 9 - Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - VIGA MLC com emenda x VIGA MLC sem emenda

Ensaio destrutivo		Modelo da Teoria da Elasticidade		Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
VIGA	P_{flamba} (kN) $L_1 = 300$ cm	P_{flamba} (kN) $L_1 = 300$ cm			<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
V 601 CE	13.00	115.78		Média	10.9048	80.1876
V 602 CE	21.00	119.74		Variância	54.4905	1201.2630
V 603 CE	8.00	123.53		Observações	21	21
V 604 CE	12.00	105.73		Variância agrupada	627.8767	
V 605 SE	30.00	106.54		Hipótese da diferença de média	0	
V 606 SE	13.00	131.71		gl	40	
V 607 SE	8.00	113.26		Stat t	-8.9594	
V 608 SE	11.00	123.02		P(T<=t) uni-caudal	2.0789E-11	
V 501 CE	11.00	83.85		t crítico uni-caudal	1.6839	
V 502 CE	15.00	68.80		P(T<=t) bi-caudal	4.1577E-11	
V 503 CE	8.00	65.11		t crítico bi-caudal	2.0211	
V 504 CE	8.00	65.85				
V 505 SE	2.00	82.37				
V 506 SE	13.00	67.14				
V 507 SE	25.00	75.67				
V 508 SE	13.00	75.12				
V 401 CE	5.00	26.88				
V 402 CE						
V 403 CE	2.00	32.13				
V 404 CE						
V 405 SE	4.00	34.18				
V 406 SE	2.00	31.47				
V 407 SE	5.00	36.06				
V 408 SE						
				Teste-t: duas amostras em par para médias		
					<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
				Média	10.9048	80.1876
				Variância	54.4905	1201.2630
				Observações	21	21
				Correlação de Pearson	0.5019	
				Hipótese da diferença de média	0	
				gl	20	
				Stat t	-10.0453	
				P(T<=t) uni-caudal	1.4661E-09	
				t crítico uni-caudal	1.7247	
				P(T<=t) bi-caudal	2.9322E-09	
				t crítico bi-caudal	2.0860	

Quadro 11 - Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - Ensaio Destrutivo x Modelo da teoria da Elasticidade

Ensaio destrutivo			Modelo Elementos Finitos Ortotrópico		Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
VIGA	P_{flamba} (kN)	P_{flamba} (kN)					
	$L_1 = 300$ cm	$L_1 = 300$ cm				<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
V 601 CE	13,00	16,84			Média	10,9048	13,2638
V 602 CE	21,00	21,10			Variância	54,4905	38,8285
V 603 CE	8,00	19,95			Observações	21	21
V 604 CE	12,00	22,12			Variância agrupada	46,6595	
V 605 SE	30,00	21,96			Hipótese da diferença de média	0	
V 606 SE	13,00	19,93			gl	40	
V 607 SE	8,00	18,80			Stat t	-1,1191	
V 608 SE	11,00	18,93			P(T<=t) uni-caudal	0,1349	
V 501 CE	11,00	15,10			t crítico uni-caudal	1,6839	
V 502 CE	15,00	12,45			P(T<=t) bi-caudal	0,2698	
V 503 CE	8,00	10,29			t crítico bi-caudal	2,0211	
V 504 CE	8,00	7,67					
V 505 SE	2,00	9,64			Teste-t: duas amostras em par para médias		
V 506 SE	13,00	10,66				<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
V 507 SE	25,00	12,81			Média	10,9048	13,2638
V 508 SE	13,00	14,43			Variância	54,4905	38,8285
V 401 CE	5,00	4,65			Observações	21	21
V 402 CE					Correlação de Pearson	0,6283	
V 403 CE	2,00	5,99			Hipótese da diferença de média	0	
V 404 CE					gl	20	
V 405 SE	4,00	3,84			Stat t	-1,8140	
V 406 SE	2,00	5,95			P(T<=t) uni-caudal	0,0424	
V 407 SE	5,00	5,43			t crítico uni-caudal	1,7247	
V 408 SE					P(T<=t) bi-caudal	0,0847	
					t crítico bi-caudal	2,0860	

Quadro 12 - Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - Ensaio Destrutivo x Modelo dos Elementos Finitos Ortotrópico

Ensaio destrutivo		Modelo Elementos Finitos Isotrópico	Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes	
VIGA	P_{flamb} (kN) $L_1=300$ cm	P_{flamb} (kN) $L_1=300$ cm		
V601 CE	13.00	18.98		
V602 CE	21.00	22.43		
V603 CE	8.00	19.31		
V604 CE	12.00	18.18		
V605 SE	30.00	19.15		
V606 SE	13.00	19.30		
V607 SE	8.00	18.27		
V608 SE	11.00	15.59		
V501 CE	11.00	11.53		
V502 CE	15.00	15.82		
V503 CE	8.00	9.72		
V504 CE	8.00	8.51		
V505 SE	2.00	10.70		
V506 SE	13.00	11.55		
V507 SE	25.00	13.02		
V508 SE	13.00	13.47		
V401 CE	5.00	5.26		
V402 CE				
V403 CE	2.00	4.87		
V404 CE				
V405 SE	4.00	4.45		
V406 SE	2.00	4.84		
V407 SE	5.00	5.51		
V408 SE				

	Variável 1	Variável 2
Média	10.9048	12.8790
Variância	54.4905	33.6729
Observações	21	21
Variância agrupada	44.0817	
Hipótese da diferença de r	0	
gl	40	
Stat t	-0.9636	
P(T<=t) uni-caudal	0.1705	
t crítico uni-caudal	1.6839	
P(T<=t) bi-caudal	0.3411	
t crítico bi-caudal	2.0211	

Teste-t: duas amostras empar para médias

	Variável 1	Variável 2
Média	10.9048	12.8790
Variância	54.4905	33.6729
Observações	21	21
Correlação de Pearson	0.6506	
Hipótese da diferença de r	0	
gl	20	
Stat t	-1.5888	
P(T<=t) uni-caudal	0.0639	
t crítico uni-caudal	1.7247	
P(T<=t) bi-caudal	0.1278	
t crítico bi-caudal	2.0860	

Quadro 13 - Comparativo Carga Crítica de Flambagem Lateral - Ensaio Destrutivo x Modelo dos Elementos Finitos Isotrópico

VIGA	P_{cr} isotrópico	P_{cr} ortotrópico
	ANSYS (kN)	ANSYS (kN)
V 601 CE	18,98	16,84
V 602 CE	22,43	21,10
V 603 CE	19,31	19,95
V 604 CE	18,18	22,12
V 605 SE	19,15	21,96
V 606 SE	19,30	19,93
V 607 SE	18,27	18,80
V 608 SE	15,59	18,93
V 501 CE	11,53	15,10
V 502 CE	15,82	12,45
V 503 CE	9,72	10,29
V 504 CE	8,51	7,67
V 505 SE	10,70	9,64
V 506 SE	11,55	10,66
V 507 SE	13,02	12,81
V 508 SE	13,47	14,43
V 401 CE	5,26	4,65
V 402 CE		
V 403 CE	4,87	5,99
V 404 CE		
V 405 SE	4,45	3,84
V 406 SE	4,84	5,95
V 407 SE	5,51	5,43
V 408 SE		

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
Média	12,8790	13,2638
Variância	33,6729	38,8285
Observações	21	21
Variância agrupada	36,2507	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	40	
Stat t	-0,2071	
P(T<=t) uni-caudal	0,4185	
t crítico uni-caudal	1,6839	
P(T<=t) bi-caudal	0,8370	
t crítico bi-caudal	2,0211	

Teste-t: duas amostras em par para médias

	<i>Variável 1</i>	<i>Variável 2</i>
Média	12,8790	13,2638
Variância	33,6729	38,8285
Observações	21	21
Correlação de Pearson	0,9540	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	20	
Stat t	-0,9414	
P(T<=t) uni-caudal	0,1789	
t crítico uni-caudal	1,7247	
P(T<=t) bi-caudal	0,3577	
t crítico bi-caudal	2,0860	

Quadro 14 - Comparativo Modelo Elementos Finitos - Isotrópico x Ortotrópico

VIGA	Ensaio destrutivo	Modelo da NBR 7190/97	Modelo da Teoria da Elasticidade	Modelo Elementos Finitos Ortotrópico	Modelo Elementos Finitos Isotrópico
	P_{flamba} (kN) $L_1 = 300$ cm	P_{flamba} (kN) $L_1 = 300$ cm	P_{flamba} (kN) $L_1 = 300$ cm	P_{flamba} (kN) $L_1 = 300$ cm	P_{flamba} (kN) $L_1 = 300$ cm
V 601 CE	13.00	9.09	115.78	16.84	18.98
V 602 CE	21.00	9.41	119.74	21.10	22.43
V 603 CE	8.00	9.67	123.53	19.95	19.31
V 604 CE	12.00	8.31	105.73	22.12	18.18
V 605 SE	30.00	8.33	106.54	21.96	19.15
V 606 SE	13.00	10.32	131.71	19.93	19.30
V 607 SE	8.00	8.89	113.26	18.80	18.27
V 608 SE	11.00	9.61	123.02	18.93	15.59
V 501 CE	11.00	6.70	83.85	15.10	11.53
V 502 CE	15.00	5.50	68.80	12.45	15.82
V 503 CE	8.00	5.21	65.11	10.29	9.72
V 504 CE	8.00	5.26	65.85	7.67	8.51
V 505 SE	2.00	6.57	82.37	9.64	10.70
V 506 SE	13.00	5.37	67.14	10.66	11.55
V 507 SE	25.00	6.04	75.67	12.81	13.02
V 508 SE	13.00	6.01	75.12	14.43	13.47
V 401 CE	5.00	2.19	26.88	4.65	5.26
V 402 CE					
V 403 CE	2.00	2.63	32.13	5.99	4.87
V 404 CE					
V 405 SE	4.00	2.78	34.18	3.84	4.45
V 406 SE	2.00	2.57	31.47	5.95	4.84
V 407 SE	5.00	2.94	36.06	5.43	5.51
V 408 SE					

Quadro 15 - Resumo para Comparativo das cargas Críticas de Flambagem pelo Método Destrutivo e pelos Métodos Matemáticos

ANOVA: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Coluna 1	21	229	10.9048	54.4905
Coluna 2	21	133.4	6.3524	7.1427
Coluna 3	21	1683.94	80.1876	1201.2630
Coluna 4	21	278.54	13.2638	38.8285
Coluna 5	21	270.46	12.8790	33.6729

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	81403.1278	5	16280.6256	60.3484	1.570E-28	2.3063
Dentro dos grupos	26707.9512	99	269.7773			
Total	108111.079	104				

$$t_{(n-k);0,025} = t_{(100);0,025} = 1.984$$

$$DMS = 10.0566$$

	<i>Média</i>	<i>DM</i>	<i>Grupo</i>	<i>Conclusão</i>
Coluna 1	10.9047619	0	Coluna 1	
Coluna 2	6.352380952	-4.55238095	Coluna 2	DM < DMS, não se deve rejeitar H ₀
Coluna 3	80.18761905	69.2828571	Coluna 3	DM > DMS, rejeita-se H ₀
Coluna 4	13.26380952	2.35904762	Coluna 4	DM < DMS, não se deve rejeitar H ₀
Coluna 5	12.87904762	1.97428571	Coluna 5	DM < DMS, não se deve rejeitar H ₀

Quadro 16 - Teste ANOVA para comparação entre os resultados de Cargas Críticas obtidos entre Ensaio Destrutivo x Modelo NBR 7190/97 x Modelo da Teoria da Elasticidade x Modelo de Elementos Finitos Ortotrópico x Modelo Elementos Finitos Isotrópico

7 CONCLUSÕES

7.1 Comentários

As conclusões abaixo foram obtidas a partir da revisão bibliográfica e das análises teóricas e experimentais contidas neste trabalho, sendo que a maioria já foi comentada ao longo da tese.

7.1.1 Em relação à revisão bibliográfica

Concluiu-se que:

- O uso da madeira laminada colada proporciona um maior aproveitamento da madeira, sendo também ecologicamente correto por usar espécies de reflorestamento;
- A madeira laminada colada é versátil do ponto de vista das formas e dimensões das peças, apresentando grande potencial arquitetônico.

7.1.2 Em relação aos modelos de cálculo empregados, a partir da análise estatística,

Concluiu-se que:

- A resistência ao cisalhamento na lâmina de cola é igual à da madeira colada, assim em termos de resistência a madeira laminada colada pode ser considerada como madeira maciça;
- É indiferente a adoção da madeira como material ortotrópico ou isotrópico no modelo de cálculo em elementos finitos;
- Pelas conclusões acima, também podem ser empregados no dimensionamento de madeira laminada colada, os modelos de cálculo existentes para madeiras maciças consideradas como material de comportamento isotrópico;
- Pelo resultado do teste ANOVA, o modelo de cálculo da NBR 7190/97 para madeira maciça, material isotrópico não é rejeitado. ($DM < DMS$). e pelo teste t, o modelo é rejeitado por apresentar “Start t” > “t_{crítico}”. Porém, levando-se em conta que a diferença entre “os valores de “Start t” e “t_{crítico}” é pequena e que os resultados obtidos para P_{flamba} pelo modelo da NBR são inferiores aos obtidos pelo ensaio destrutivo, portanto a favor da segurança, pode-se aceitar como válido o emprego de tal modelo de cálculo;

- Pelo teste ANOVA, além do modelo de cálculo da NBR 7190/97, também não se rejeitam os modelos de cálculo pelo método dos Elementos Finitos para materiais isotrópicos e ortotrópicos.
- O modelo de cálculo da Teoria da Elasticidade também é rejeitado pelo teste t.
- É indiferente considerar ou não nos cálculos, a presença de emendas nas lâminas das vigas;
- O módulo de elasticidade representativo da viga de madeira laminada colada não representa o da madeira maciça da mesma viga;
- A presença ou não de emendas nas lâminas, não afeta o módulo de elasticidade representativo de uma viga de madeira laminada colada;
- Os módulos de elasticidade a flexão obtidos a partir do ensaio de compressão paralela às fibras em corpos de prova de madeira maciça 5cm x 5 cm x 15 cm, não representam os módulos de elasticidade representativos das vigas de madeira laminada colada.

7.2 Sugestão para complementação deste trabalho

Considerando que:

- O modelo de cálculo pela Teoria da Elasticidade (Timoshenko) foi desenvolvido no começo do século passado, com todos os rigores do Cálculo Diferencial e Integral, empregando condições de contorno muito bem definidas (por exemplo, perfeitamente engastado, perfeitamente articulado), para ser empregado com materiais de comportamento isotrópico (aço);
- O emprego dessa teoria para o cálculo de vigas foi rejeitado por dois testes estatísticos;
- Os valores obtidos por este método foram maiores que os obtidos nos ensaios destrutivos em material de comportamento ortotrópico (madeira).

Fica aqui a sugestão para a adaptação daquela teoria ao material madeira, por exemplo do tipo emprego de um módulo de elasticidade representativo.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, C.A. **Estruturas de madeira**. São Paulo 2003. Apostila do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. 13 v.
- ABRANTES, C.A. **Dimensionamento de uma seção composta de quatro seções quadradas, solidarizadas descontinuamente, sujeitas a compressão paralela às fibras** 2005. 340p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2005.
- ALVES, A.F. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE** – São Paulo: Érica, 2000 , ISBN: 85- 7194-741.
- ALVES, A.F. **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE**. 2.ed. São Paulo: Érica, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of A.S.T.M. standards**. Philadelphia, 1994. 608p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço**. Rio de Janeiro, 1986.
- AZAMBUJA, M.A. **Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)**.2002. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York, Van Nostrand Reinhold, 1982.
- COLORADO STATE UNIVERSITY, **Department of Civil Engineering**. Reability: based design of transformation line structures: final report, Colorado, 1987. v.1, v.2 .
- COSTA, E.V. **Curso de resistência dos materiais, com elementos de grafostática e de energia de deformação**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1974. 4 v.
- FAHERTY, K.F.; WILLIAMSON, T.G. **Wood engineering and construction handbook**. . New York: McGraw-Hill, 1998.
- FRANCO, N. **Three-dimensional finite elements model to predict pole strength**, 1992. Requeriments for the Degree of Doctos of Phiolosophy - Colorado State University – Fort Collim, 1992.
- GARCIA, J.N. **Estados de tensão em árvores e de deformação em peças de madeira serrada**. São Paulo, 1992. 243p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1992.
- HENRIQUES, J.M.J.de. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. 109p. Tese (Doutorado em Ciência e engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,São Carlos, 2000.

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.-
Flambagem em barras prismáticas. São Paulo, 1954 . v 1.Publicação 513.
- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída.** Curitiba: FUPEF, 2005. 247p..
- LAPONI,J.C. **Estatística usando Excel.** 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 476p.
- LIMA, C.P. **Formas e escoramentos para estruturas de concreto armado para edifícios e apresentação dos sistemas disponíveis no mercado brasileiro.** 2002. 198p.
Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Construção de Edifícios) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2002.
- LOBÃO, M.S.; GOMES, A. **Qualidade da adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes planos e densidades.** 2006. 189p. Tese de (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Cerne, 2006.
- MACÊDO, A.N.; CALIL,C.Jr. **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada: avaliação de método de ensaio.** 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- MACÊDO, A.N. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada.** 195p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- MELLO, D.A. de. ; WATANABE, R.G. **Vetores e uma iniciação à geometria analítica.** 3 ed. São Paulo: Gráfica Palas Athena, 2005. 228p.
- MIOTTO, J.L.**Avaliação dos critérios de dimensionamento de peças comprimidas e flexo-comprimidas de madeira.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos São, 2003.
- MIOTTO, J.L.;DIAS, A.A. **Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto.** Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA 2009, p. 35-45, 2009
- MOLITERNO, A. **Caderno de Projetos de Telhados em Estruturas de Madeira .** 2.ed. – São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1997.
- MOODY, R. C. *et al.* Glued structural members. In: **Wood Handbook – Wood as an engineering material.** Madison: Forest Products Laboratory, 1999.
- NATURE FOREST PRODUCTS ASSOCIATION. **Wood construction.** Washington DC, 1986.
- OLIVEIRA, J.T. de. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil.** 1997. 450p.. - Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PAPPALARDO, A.JR. **Método dos Elementos Finitos**: Teoria e Prática Aplicadas a Problemas Multidisciplinares. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2007. 234p.

PAPPALARDO, A.JR.. **Método dos elementos finitos**: técnicas de modelagem. São Paulo 2005. **Apostila do Curso de Graduação** – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

PFEIL, W. **Estruturas de madeira**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 123p.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224p

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira** .6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2006. 349p.

POPOV, E.P. **Introdução à mecânica dos sólidos**. Tradução Mauro O. C. Morelli, Revisão Técnica Arno Blass. São Paulo: Edgard Blucher, 1978. 349p.

QUEIROZ, G. de. **Elementos de estruturas de aço**. Belo Horizonte: Livraria Importadora Científica, 1986. 289p.

Revista Madeira , Março de 2005:/Artigo: **Colagem varia de acordo com a propriedade da madeira**. REMADE. www.remade.com.br/br/revistadamadeira.

Revista Madeira , Março de 2007:/Artigo: **Adesivos vinílicos apresentam soluções para madeira**. REMADE. www.remade.com.br/br/revistadamadeira.

Revista Madeira , Edição nº 115 Julho de 2008:/Artigo: **Adesivos** Processo de fixação da madeira, Tipos de Adesivos. REMADE. www.remade.com.br/br/revistadamadeira.

Revista Técnica nº 120, Março de 2007: / Artigo: **Estrutura de Madeira Laminada Colada**, pg 48 a 53. / Editora Pini.

RODRIGUES, R.A.D. **Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para construção civil**. 2002. 239p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba (SP), 2002.

SANTOS, E.B. dos.; SEDDER, M.M. **Guia para elaboração de mestrado**. 2. ed. São Paulo: IPT / CENATEC, 2005.

SILVA JR., C. da; SASSON, S. **Biologia**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 1999. 346p.

TIMOSHENKO, S.P.; GERE, J.M.. **Theory of elastic stability**. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1963. 541p.

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE. Apresentação de Trabalhos Acadêmicos. 3. ed. São Paulo: Editora Mackenzie, São Paulo. 2004

VI EBRAMEM – VI ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA – 22 A 24 de Julho de 1998 – Florianópolis _ Santa Catarina – Volume 1