

**ALEXSANDRO BAYESTORFF DA CUNHA**

**PRODUÇÃO DE VIGAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA  
AVALIADAS POR MEIO DE ENSAIOS  
ESTÁTICOS E DINÂMICOS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de “Doutor em Engenharia Florestal”, Área de Concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos

Co-orientadores: Dr. Márcio Pereira da Rocha  
Dr. Setsuo Iwakiri

**CURITIBA - PR**

**2007**

***À MINHA ESPOSA E FILHA***

***Graziela Greinert Vieira da Cunha***

***Maria Eduarda Vieira da Cunha***

***AOS MEUS PAIS***

***Adélcio José da Cunha***

***Nilsa Bayestorff da Cunha***

***À MINHA IRMÃ E A SUA FAMILIA***

***Thaís Bayestorff da Cunha de Amorim***

***AOS MEUS ALUNOS E AMIGOS***

***Curso de Engenharia Florestal***

***DEDICO***

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente **A DEUS**, pela vida, pela inspiração, pela provisão, pelo cuidado em todos os momentos da minha existência e especialmente durante a construção deste trabalho.

Qualquer jornada não é vencida sozinha, há sempre a necessidade da ajuda de familiares e amigos, que nos fortalecem, apóiam, oferecem o ombro e nos impelem à luta quando nos sentimos derrotados. Nesta etapa, como em qualquer outra de minha vida houve pessoas que foram fundamentais, sem as quais, tenho certeza, não teria conseguido. Desta forma, este trabalho é o fruto de cada apoio, de cada sorriso, de cada palavra, de cada olhar, enfim, é o resultado da relevante contribuição destas pessoas, as quais eu faço questão de tornar pública. Os meus sinceros agradecimentos:

**À MINHA FILHA MARIA EDUARDA** que com seu amor, seu sorriso, sua alegria, faz-me renovar todos os dias, tendo a certeza que tudo que faço é para que ela desfrute das melhores coisas que a vida tem para oferecer.

**À MINHA ESPOSA**, companheira de todas as horas. Seu amor e sua dedicação foram, são e sempre serão fundamentais em minha vida. Tenho certeza que este momento em minha vida só foi possível com o seu apoio, fazendo muitas vezes o papel de *pãe* para a nossa filha e estimulando cada passo desta jornada.

**AOS MEUS PAIS**, por serem os primeiros professores da minha vida e por terem me dado à oportunidade de estudar nos melhores lugares, não medindo esforços para que eu pudesse subir todos os degraus da minha vida pessoal e profissional. **A MINHA IRMÃ E A SUA FAMÍLIA**, pelos constantes incentivos.

**AO MEU ORIENTADOR E AMIGO PROF. JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS**, pela competente orientação desse trabalho e por compartilhar sua sabedoria, firmeza, determinação, humildade e, em especial, por ser referência como professor, pesquisador e orientador.

**AOS PROFESSORES PARTICIPANTES DA BANCA EXAMINADORA** que aceitaram o convite e dispuseram de seu tempo para enriquecer o estudo: Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca, Dr. Everton Hillig, Dr. Setsuo Iwakiri e Dr. Sidon Keinert Júnior.

**À UNIVERSIDADE DO CONTESTADO** – UnC, Campus Universitário de Canoinhas, pela confiança depositada nestes anos, em atividades de ensino, desenvolvimento de projetos de pesquisa e extensão, além da coordenação de cursos; estas atividades me oportunizaram crescimento profissional e amadurecimento pessoal. Em especial ao Prof. Argos Gumbowsky pelo estímulo e apoio na tomada de decisões em minha vida pessoal e profissional. Agradeço também a todos os professores da UnC, em especial os docentes do Curso de Engenharia Florestal; a todos os funcionários, em especial ao meu amigo Adilson Padilha Walter; além de todos os meus alunos.

**À EMPRESA BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO** – Unidade Industrial de Lages, na pessoa do Sr. Fernando Fuganti, o qual disponibilizou toda a matéria-prima e equipamentos necessários para a confecção das vigas, além das sugestões que enriqueceram o presente estudo. Agradeço também a todos os funcionários desta empresa, em especial a funcionária Elaine, que estava sempre presente no desenvolvimento das atividades.

Às Empresas fabricantes dos adesivos utilizados no experimento, **A NATIONAL, AKZO NOBEL E HEXION**, que oportunizaram a utilização de seus produtos neste estudo, em especial a Merielen que

participou de forma plena no desenvolvimento da parte prática do estudo.

**AOS FUNCIONÁRIOS E BOLSISTAS** do Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio durante a execução dos ensaios, Prata, Gilnei, Rosilaine, Silvia, Ademir e Vitor.

Enfim, a todos que de uma forma ou de outra, contribuíram no desenvolvimento deste estudo.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Alexsandro Bayestorff da Cunha, filho de Adélcio José da Cunha e Nilsa Bayestorff da Cunha, nasceu em 28 de outubro de 1972, em Canoinhas, Estado de Santa Catarina.

Concluiu o ensino fundamental no Colégio Sagrado Coração de Jesus em 1986 e o ensino médio na Fundação das Escolas do Planalto Catarinense (FUNPLOC) em 1989 na cidade de Canoinhas.

Ingressou no Curso de Engenharia Florestal da Universidade do Contestado – Campus Universitário de Canoinhas em 1993, onde além de participar de atividades acadêmicas, desenvolveu Projetos de Pesquisa e realizou estágios nas empresas Battistella Indústria e Comércio Ltda, Rigesa MeadWestvaco e Fornecedora e Exportadora de Madeiras Forex S.A. Graduou-se como Engenheiro Florestal em 1997, sendo homenageado na cerimônia como segundo melhor aluno da turma.

Ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais na Universidade Federal do Paraná, em nível de Mestrado, área de concentração de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais em março de 1998. obtendo o grau de Mestre em Ciências Florestais em 23 de março de 2001, com dissertação intitulada de “Avaliação do Processo Produtivos de uma Indústria de *Clear Blocks* na Região Sul do Brasil”, a qual foi orientada pela Prof<sup>a</sup>. Ghislaine Miranda Bonduelle.

Iniciou suas atividades acadêmicas em agosto de 1999, na Universidade do Contestado, em Canoinhas – SC, atuando como docente do Curso de Engenharia Florestal na Área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais. Em 2003 passou a atuar também

como docente do Curso de Tecnologia da Madeira na Universidade do Contestado – Núcleo Universitário de Porto União – SC.

Desde então, vem desenvolvendo nesta instituição atividades de ensino, pesquisa e extensão na área de concentração mencionada anteriormente, tendo ministrado disciplinas de Tecnologia da Madeira, Estruturas de Madeira, Industrialização, Preservação e Secagem da Madeira, Polpa e Papel, e Painéis de Madeira.

Em 2001, ingressou no Curso de Pós – Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho, em nível de Especialização, o qual foi promovido pela parceria entre Universidade do Contestado e Universidade Federal do Paraná, tendo concluído no ano de 2003.

Foi coordenador do Curso de Engenharia Florestal da UnC – Canoinhas entre os anos de 2002 e 2004 e vice coordenador entre 2005 e 2007. Foi representante dos coordenadores no CONSEPE da instituição durante o ano de 2002.

Ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, nível Doutorado, área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais em março de 2003.

Participou como coordenador e pesquisador em 02 projetos de pesquisa da FAPESC entre os anos de 2003 e 2005, tendo até o momento 26 artigos publicados em anais de eventos científicos. Orientou 26 trabalhos de conclusão de curso e cinco trabalhos de iniciação científica.

Em março de 2007 passou no Concurso Público para Professor Efetivo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, onde está atuando em atividades de ensino, pesquisa e extensão na área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>RESUMO</b> .....	xv
<b>ABSTRACT</b> .....	xvi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	03
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	04
3.1 MERCADO DE PRODUTOS FLORESTAIS.....	04
3.1.1 Madeira Laminada Colada.....	06
3.1.2 Vigas com Perfil I.....	07
3.2 MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL.....	09
3.2.1 A Madeira de Pinus para Industrialização.....	12
3.3 PRODUTOS ENGENHEIRADOS.....	15
3.3.1 MDF ( <i>Médium Density Fiberboard</i> ).....	15
3.3.2 OSB ( <i>Oriented Strand Board</i> ).....	16
3.3.3 LVL ( <i>Laminated Veneer Lumber</i> ).....	20
3.3.4 Madeira Laminada Colada.....	22
3.3.5 Vigas com Perfil em I.....	27
3.4 ADESIVOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA MADEIREIRA....	29
3.4.1 Adesivo Resorcina Formaldeído.....	31
3.4.2 Adesivo Melamina Uréia Formaldeído.....	32
3.4.3 Poliuretano.....	32
3.5 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRAS.....	36
3.5.1 Classificação Visual.....	39
3.5.2 Classificação Mecânica.....	43
3.5.2.1 MSR ( <i>Machine Stress Rating</i> ).....	43
3.5.2.2 Vibração transversal.....	46



3.5.2.3 <i>Stress wave</i> .....	49
3.5.2.4 Ultrassom.....	51
3.6 ASPECTOS TÉCNICOS DA CONSTRUÇÃO DE COMPOSTOS 3.6.1 ESTRUTURAS.....	55
3.6.1 Madeira Laminada Colada.....	55
3.6.1.1 Escolha da madeira.....	56
3.6.1.2 Produção das lâminas.....	58
3.6.1.3 Espessura das tábuas.....	59
3.6.1.4 Umidade das lâminas.....	59
3.6.1.5 Classificação das lâminas.....	61
3.6.1.6 Fabricação das emendas.....	62
3.6.1.7 Aplicação do adesivo.....	68
3.6.1.8 Dimensionamento das vigas de madeira laminada colada....	70
3.6.2 Vigas com Perfil I.....	73
3.6.2.1 Aspectos Gerais.....	73
3.6.2.2 Flanges.....	74
3.6.2.3 Alma.....	74
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	76
4.1 MATÉRIA – PRIMA.....	76
4.1.1 Madeira.....	76
4.1.2 Adesivos.....	77
4.1.3 Chapas de OSB.....	78
4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	78
4.3 PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DAS VIGAS ESTRUTURAS	80
4.3.1 Pré – Bitolamento.....	81
4.3.2 Destopo e Classificação.....	82
4.3.3 Formação das Lamelas e Bitolamento.....	84
4.3.4 Fresamento das Flanges das Chapas de OSB.....	87

4.3.5 Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico das Lamelas por Emissão de Ondas Acústicas.....	88
4.3.6 Composição das Vigas.....	90
4.3.7 Aplicação do Adesivo nas Lamelas.....	90
4.3.7.1 Adesivos melamina uréia formaldeído e resorcina fenol formaldeído.....	90
4.3.7.2 Adesivo poliuretano.....	92
4.3.8 Prensagem.....	93
4.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA ESTRUTURAL.....	94
4.4.1 Estimativa do MOE Dinâmico das Vigas Estruturais de Madeira Laminada Colada pelo Método Não Destrutivo.....	94
4.4.2 Determinação do MOE e do MOR pelo Método Destrutivo....	96
4.5 ANÁLISE ECONÔMICA.....	101
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>102</b>
5.1 MADEIRA LAMINADA COLADA.....	102
5.1.1 Módulo de Elasticidade Dinâmico das Lamelas.....	102
5.1.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico das Vigas.....	111
5.1.3 Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura Estático das Vigas.....	112
5.2 VIGA PERFIL I.....	120
5.2.1 Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura Estático das Vigas.....	120
5.3 Análise Econômica.....	125
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>132</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>134</b>

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Dados de Produção, Importação, Exportação e Consumo de Chapas de MDF, Chapas Duras e Chapas de Aglomerado no Brasil entre 2000 e 2005.....	06
QUADRO 2 - Consumo e Produção de Madeira Laminada Colada na América do Norte 2001-2005.....	07
QUADRO 3 - Produção e Consumo de Vigas em I nos Estados Unidos entre 2001 e 2005 .....	08
QUADRO 4 - Tipo de Cola em Função do Uso Previsto para a Estrutura.....	30
QUADRO 5 - Tempo de Montagem e Prensagem para Madeira Laminada e Colada em Função da Temperatura.....	69
QUADRO 6 - Fatores de Ajuste da Resistência de Corpos de Prova Isentos de Defeitos ASTM D3737/96.....	72
QUADRO 7 - Tratamentos utilizados no Experimento com Vigas Estruturais.....	78
QUADRO 8 - Valores Individuais de ME, Velocidade de Propagação de Onda pelo SWT e MOE para as Lamelas Utilizadas na Produção de Vigas com Adesivo RFF.....	105
QUADRO 9 - Valores Individuais de ME, Velocidade de Propagação de Onda pelo SWT e MOE para as Lamelas Utilizadas na Produção de Vigas com Adesivo MUF.....	107
QUADRO 10 - Valores Individuais de ME, Velocidade de Propagação de Onda pelo SWT e MOE para as Lamelas Utilizadas na Produção de Vigas com Adesivo PUR.....	109
QUADRO 11 - Módulo de Elasticidade Dinâmico Estimado pelo SWT.	112

QUADRO 12 - Valores de MOE estático das vigas de MLC compostas pelos 3 adesivos utilizados no estudo.....	113
Quadro 13 - Análise da Variância para MOE de Madeira Laminada Colada.....	114
QUADRO 14 - Valores de MOR das vigas de MLC comparando-se os três adesivos utilizados no estudo.....	117
Quadro 15 - Análise da Variância para MOR de Madeira Laminada Colada.....	117
QUADRO 16 - Valores de MOE estático das vigas com perfil I compostas pelos três adesivos utilizados no estudo.....	121
Quadro 17 - Análise da Variância para MOE de Viga Perfil I.....	121
QUADRO 18 - Valores de MOR estático das vigas com perfil I compostas pelos 3 adesivos utilizados no estudo.....	123
Quadro 19 - Análise da Variância para MOR de Viga Perfil I.....	124
Quadro 20 - Teste de Tukey a 95% de Significância para MOR de Viga Perfil I.....	124
QUADRO 21 - Quantificação da Matéria-prima Utilizada para Fabricação das Vigas Estruturais.....	127
QUADRO 22 - Custo para a Fabricação das Vigas Estruturais de MLC e com Perfil I.....	129

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Chapas de OSB.....	17
FIGURA 2 - Esquema de uma Viga de MLC.....	24
FIGURA 3 - Cobertura de uma Piscina Construída com Madeira Laminada Colada.....	26
FIGURA 4 - Ponte com 19 m de Vão Livre em Madeira Laminada Colada. Sleaford, Lincolnshire.....	27
FIGURA 5 - Viga com Perfil I.....	28
FIGURA 6 - Classificação de Peças de Madeira pelo MSR.....	44
FIGURA 7 - Esquema de um Equipamento para a Determinação do MOE por Vibração Transversal.....	47
FIGURA 8 - Equipamento para Avaliação Não – Destrutiva por Meio de Emissão Ultra-Som.....	53
FIGURA 9 - Emendas em Madeira Laminada Colada.....	64
FIGURA 10 - Madeira para Produção das Vigas.....	76
FIGURA 11 - Esquema Ilustrativo da MLC Utilizado no Experimento.....	79
FIGURA 12 - Esquema Ilustrativo de uma Viga com Perfil em I....	79
FIGURA 13 - Flange Fresada para Encaixe da Alma de OSB.....	80
FIGURA 14 - Pré – bitolamento das Peças de Madeira Serrada.....	81
FIGURA 15 - Destopo e Classificação das Peças.....	82
FIGURA 16 - Classificação das Peças de Acordo com a Densidade e a Presença de Defeitos.....	84
FIGURA 17 - Processo de Fresamento das Peças de Madeira Serrada.....	86
FIGURA 18 - Processo de Formação das Lamelas.....	86
FIGURA 19 - Fresamento das Flanges e Montagem das Vigas em I	87

FIGURA 20 - Ensaio Não Destrutivo das Lamelas através do MSR.....	89
FIGURA 21 - Aplicação do Adesivo Melamina Uréia Formaldeído.....	91
FIGURA 22 - Aplicação do Adesivo Poliuretano com Sistema de Cortina.....	93
FIGURA 23 - Carregamento e Prensagem das Vigas na prensa.....	94
FIGURA 24 - Vigas de MLC e com Perfil I Ensaídas em uma Máquina Universal de Ensaios, detalhando os Aplicadores de Carga e o Deflectômetro.....	98
FIGURA 25 - Vigas Estruturais em Processo de Ensaio.....	99
FIGURA 26 - Vigas Estruturais no Momento da Ruptura.....	99
FIGURA 27 – Gráfico de Correlação entre os Diferentes Métodos de Obtenção do MOE.....	115
FIGURA 28 - Caracterização dos Locais de Ruptura nas Vigas de MLC.....	118
FIGURA 29 - Matéria-Prima Utilizada para a Produção das Vigas MLC.....	130
FIGURA 30 - Matéria-prima Utilizada para a Produção das Vigas com Perfil I.....	131

## RESUMO

O objetivo geral do presente estudo foi avaliar tecnicamente a produção de elementos / vigas estruturais de *Pinus taeda*, voltados para a construção civil e habitacional, que foram confeccionados com três diferentes adesivos e avaliados através de sistema de classificação destrutivo e não-destrutivo. O trabalho foi desenvolvido utilizando-se peças de madeira serrada, chapas de OSB (*Oriented Strand Board*) e três adesivos: Resorcina Fenol Formaldeído, Melamina Uréia Formaldeído e Poliuretano. O processo de fabricação das vigas envolveu a classificação das peças, usinagem de emendas, formação das lamelas, montagem e prensagem das vigas. Já os ensaios envolveram a determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd) através do *Stress Wave Method*; além da obtenção do Módulo de Elasticidade (MOE) e de Ruptura (MOR) pelos ensaios destrutivos por meio de uma máquina universal de ensaios. Os resultados foram analisados através da Análise da Variância e do Teste de Tukey. A análise econômica foi fundamentada no custo da matéria-prima utilizada para a composição das vigas. Concluiu-se que o sistema de classificação visual utilizado na seleção de peças para as vigas estruturais de Madeira Laminada Colada foi insuficiente para se atingir os valores máximos de módulo de elasticidade; o processo de classificação visual pode ser utilizado no destopo e pré-classificação das peças para a composição das lamelas; o posicionamento correto das lamelas através do método dinâmico de classificação teve como consequência direta o aumento médio do módulo de elasticidade; os valores de MOE e MOR das vigas estruturais demonstraram a superioridade do poliuretano, seguido das vigas com adesivo resorcinólico e melamínico; as rupturas das vigas foram localizadas principalmente nas regiões tracionadas e que apresentavam redutores de resistência; o estudo evidenciou que não houve correlação entre o MOE dinâmico e estático das vigas; em virtude da diferenciação das gramaturas utilizadas para cada adesivo, observou-se que o adesivo resorcinólico necessita de mais adesivo para realizar o mecanismo de adesão, tendo como consequência o maior custo de aquisição; quanto ao adesivo melamínico, mesmo apresentando gramatura diferenciada, acabou se aproximando em termos de custo do poliuretano; o custo da matéria prima utilizada nas vigas foi maior na produção de madeira laminada colada em função do preço da madeira serrada.

**Palavras-chave:** Vigas Estruturais de Madeira, Adesivos, Ensaio destrutivos e não destrutivos.

## ABSTRACT

The main goal of the present study was to technically evaluate the production of structural elements / beams of *Pinus taeda* destined for civil and housing construction prepared with three different adhesives and evaluated through the destructive and non-destructive testing systems. The work was developed using pieces of saw wood, OSB (Oriented Strand Board) plates and three adhesives: Phenol-Resorcinol- Formaldehyde, Melamine-Urea-Formaldehyde and Polyurethane. The beam fabrication process concerned the classification of the pieces, correction machining and lamella formation, as well as the assemblage and pressurization of the beams. The assays, nevertheless, involved the determination of the Dynamic Elasticity Module (MOEd) through the Stress Wave Method and also the obtainment of the Modulus of Elasticity (MOE) and Modulus of Rupture (MOR) on the destructive assays through the use of a universal machine of assays. The results were analyzed through the Variance Analysis and the Tukey Test. The economical analysis was based on the cost of the raw material used for the composition of the beams. It was concluded that the visual classification system used to select pieces for the Glued Laminated Wood structural beams was insufficient to obtain the maximum values of the modulus of elasticity. The visual classification can be used for the splitting and pre-classification of the pieces for the composition of lamellas; the correct positioning of the lamellas through the dynamic classification method had as a direct consequence the medium increase of the modulus of elasticity; the MOE and MOR values of the structural beams demonstrated the superiority of polyurethane, followed by the beams with resorcinol and melamine adhesives; the ruptures of the beams were located mainly in the tractioned region and the region that presented resistance reducers; the study demonstrated that there was no correlation between the dynamic and static MOE of the beams; due to the difference of the gramatures used for each adhesive, it could be observed that the resorcinol adhesive demands more adhesive in order to accomplish the adhesion mechanism, and even when presenting differentiated gramature, it wound up similar to polyurethane in terms of cost; the cost of the raw material used in the beams was higher in the production of glued laminated wood due to the price of saw wood.

**Keywords:** Wood Structural Beams, Adhesives, Destructive and Non-destructive Testings.