

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^a. 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

LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	01
2 OBJETIVOS	03
3 REVISÃO DE LITERATURA	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
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	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
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	102
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
6 CONCLUSÃO.....	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134

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.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é sempre apresentada como um dos mais importantes materiais de construção utilizados pelo homem. Desde ruínas de civilizações primitivas que datam de 5000 a.c. até os mais atuais exemplos arquitetônicos encontra-se inúmeras obras onde verifica-se a sua presença.

O princípio arquitetônico era a imitação de formas naturais, a choupana primitiva era construída sem o uso de nenhuma ferramenta: somente galhos encostados numa pedra com a colocação de peles de animais por cima. Tudo era feito de forma a conseguir um refúgio contra intempéries.

ANDRIGUETO *et al* (2006) citam que o material madeira possui características importantes na construção civil, colocando-a em posição de destaque frente a outros materiais como a estética agradável, proporcionando ampla gama de cores e texturas, resistência mecânica elevada em relação à massa própria, facilidade de usinagem, resistência química apreciável, boas propriedades de isolamento térmico e elétrico, além de ser matéria-prima renovável e apresentar baixo consumo energético durante seu processamento.

O uso da madeira no Brasil em estruturas tem-se apoiado desde os tempos coloniais, no emprego de espécies nativas, principalmente aquelas oriundas das florestas tropicais e subtropicais do país. Assim, as madeiras usadas na construção civil restringiam-se a espécies como peroba, cedro, ipê, jatobá, cabriúva e imbuia. Espécies amazônicas são de emprego relativamente recente (NAHUZ *et al*, 1998).

A escassez dessas espécies tradicionais, a crescente preocupação pela conservação dos recursos florestais e os elevados custos finais dos materiais de construção, intensificaram a busca de madeiras

alternativas, que tivessem assegurado o seu suprimento, a qualidade e o nível dos preços. Estes elementos, associados à redução da pressão sobre as florestas nativas, fizeram das madeiras de reflorestamento a resposta ideal para a demanda de madeiras para o uso em construção civil, especialmente em estruturas.

No Brasil, as indústrias de base florestal, associadas às florestas plantadas com espécies exóticas como o pinus e o eucalipto, incorporaram gradativamente conhecimentos técnicos na formação de suas florestas. A produção madeireira voltou-se basicamente à produção de celulose ou à industrialização de painéis de madeira reconstituída. A formação de florestas voltadas para fins estruturais diferencia-se dos plantios realizados para outros fins como indústria de celulose e papel, e indústria moveleira, devido as características de crescimento e o manejo silvicultural aplicado.

Nesse contexto, surgiram as vigas estruturais de madeira laminada colada e com perfil I, apresentam-se ainda como uma forma racional de emprego da madeira na construção de estruturas, obtida pela associação de peças, Esta técnica facilita a construção de grandes estruturas de madeira, com dimensões e formas variadas, limitadas, apenas, ao local onde serão fabricadas e ao meio de transporte utilizado. Como uma das vantagens principais permite a redução dos defeitos observados em peças de madeira maciça com grandes dimensões, como por exemplo, nós e rachaduras.

Para tanto, a confecção de vigas estruturais de madeira é limitada pela qualidade da madeira disponível no mercado, pelo alto preço da matéria-prima e pela falta de conhecimento / investimento em equipamentos de classificação de peças que proporcionam o aumento dos coeficientes de resistência da viga de forma significativa.

2 OBJETIVOS

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, com intuito de determinar as propriedades de resistência de dois modelos de vigas e o desempenho de três tipos de adesivo.

Para tanto, delimitou-se os seguintes objetivos específicos:

- Classificar as lamelas através do método não destrutivo pelo *Stress Wave Timer*, de forma a se determinar o MOE dinâmico, para aumentar a resistência do composto pela distribuição não aleatória das camadas;

- Confeccionar e avaliar vigas estruturais de Madeira Laminada Colada e com Perfil I, de acordo com o processo de classificação da madeira pelo método visual, o qual é utilizado pela empresa estudada;

- Ensaiar as vigas pelo método destrutivo com uma Máquina Universal de Ensaio, de modo a estabelecer correlações entre o processo dinâmico e estático;

- Proceder análise do comportamento dos adesivos durante o ensaio destrutivo das vigas, determinando estatisticamente as suas diferenças;

- Comparar a resistência das vigas de Madeira Laminada Colada e com Perfil I através dos coeficientes de Módulo de Elasticidade e Ruptura;

- Desenvolver uma análise econômica através do custo da matéria-prima envolvida no processo produtivo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MERCADO DE PRODUTOS FLORESTAIS

A cobertura florestal brasileira é formada por florestas naturais e plantadas, totalizando 544 milhões de hectares, o que equivale a 2/3 do território nacional. As florestas naturais cobrem cerca 539 milhões de hectares, enquanto as florestas plantadas atingem um pouco mais de 5 milhões, cerca de 1% do total da cobertura florestal no país.

A maioria dos plantios florestais existentes foi estabelecida durante as décadas de 70 e 80, por meio do programa de incentivos fiscais, o que proporcionou um aumento substancial na oferta da madeira para uso industrial.

A atual produção para uso industrial tem se mostrado abaixo da capacidade de produção existente. Isso significa que, em princípio, existe ainda espaço para crescimento sustentado da indústria florestal.

De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Madeira Processada Mecanicamente – ABIMCI (2005), o Brasil figura entre os principais produtores mundiais de madeira serrada. Em 2004, a produção brasileira de madeira serrada atingiu 23,5 milhões de metros cúbicos, predominando a produção de madeira serrada tropical frente à produção de madeira serrada de pinus. A maior parte da produção de madeira serrada é consumida no mercado doméstico, uma vez que os volumes exportados são pouco significativos frente à produção nacional. Porém, uma parcela significativa da produção de madeira serrada é exportada através de remanufaturas de madeira (produtos de maior valor agregado).

Com relação à Indústria de Compensados, pode-se dizer que a produção brasileira tem crescido de forma bastante acentuada desde a

última década, alcançando o volume recorde de 3,8 milhões de metros cúbicos em 2004. Tal crescimento está associado basicamente ao excelente desempenho das exportações. Até meados da década de 90 predominava a produção de compensado tropical frente ao compensado de pinus. Após a crise asiática de 1997, o compensado de pinus passou a ocupar posição de destaque, e atualmente contribui com 2/3 da produção nacional.

Segundo a ABIMCI (2005), a produção brasileira de compensado está predominantemente orientada para a exportação. Atualmente, estima-se que existam em operação cerca de 200 indústrias produtoras de compensado no Brasil; destacando-se as empresas que utilizam o pinus como matéria-prima, as quais estão obtendo maior espaço no mercado.

As empresas ligadas a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira – ABIPA (2006), Berneck, Duratex, Eucatex, Fibraplac, Satipel e Tafisa, geram 25 mil postos de trabalho, com faturamento em 2004 de US\$ 840 milhões na produção de Chapas de MDF (*Médium Density Fiberboard*), Chapas Duras e Aglomerado. A capacidade de produção das empresas é de 5,2 milhões de metros cúbicos por ano, os quais são produzidos a partir de 480 mil hectares de florestas plantadas. A produção, consumo, importação das chapas podem ser observadas no Quadro 1, onde nota-se um incremento significativo ao longo de seis anos de produção; já a exportação apresentou variações ao longo dos anos, apresentando uma queda no ano de 2005, provavelmente pelo aumento no consumo interno, principalmente na indústria moveleira.

A demanda por produtos com maior valor agregado é significativamente influenciada pelas atividades de construção e decoração residencial. Os produtos engenheirados de madeira

apresentam novas características de desempenho, combinando produtos primários como a madeira serrada e laminada, com produtos de maior valor como as vigas laminadas coladas e os painéis de lâminas paralelas.

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

	Produção (m³)	Importação (m³)	Total (m³)	Consumo Interno (m³)	Exportação (m³)
2000	2.702.342	25.988	2.728.340	2.514.671	213.669
2001	2.976.524	70.146	3.046.670	2.853.784	192.886
2002	3.142.986	68.410	3.211.396	3.211.396	384.254
2003	3.415.005	192.631	3.607.636	3.152.256	455.380
2004	3.984.512	265.140	4.249.652	3.820.904	428.748
2005	3.939.383	217.711	4.157.094	3.798.904	360.507

Fonte: ABIPA (2006)

O crescimento dos produtos engenheirados continua, especialmente na América do Norte, Europa e Japão. A demanda por estes produtos e conseqüentemente o processamento primário destes materiais está ligado ao setor de construção na América do Norte, como no caso da demanda por produtos de maior valor agregado. Entretanto, fora do setor de construção, os produtos engenheirados vêm ganhando mercado no setor de móveis e outras aplicações, substituindo a madeira sólida.

3.1.1 Madeira Laminada Colada

De acordo com dados da UNECE / FAO (2006), a produção de madeira laminada colada bateu recorde nos Estados Unidos no ano de 2004, atingindo cerca de 618.000 ft³ (Quadro 2). Estes números são

expressivos, sendo resultado do mercado da construção e da capacidade de dimensionamento das vigas que está disponível no momento, o que aumenta a demanda. O restabelecimento do mercado de construção não residencial também contribuiu para o aumento da demanda da madeira laminada colada.

QUADRO 2 - CONSUMO E PRODUÇÃO DE MADEIRA LAMINADA COLADA NA AMÉRICA DO NORTE 2001-2005 (1000 m³)

	2001	2002	2003	2004	2005	2001-2005 % incremento
Estados Unidos						
Consumo Residencial	323,1	332,3	352,3	447,7	430,8	33,3
Consumo Não Residencial	163,1	135,4	138,5	153,9	176,9	8,5
Consumo Outras Indústrias	18,5	18,5	18,5	20,0	21,5	16,7
Total	504,6	486,2	509,2	621,5	629,2	24,7
Exportação	26,2	21,5	15,4	10,8	15,4	-41,2
Importação	15,4	13,9	27,7	53,9	61,5	300,0
Produção	515,4	493,9	496,9	578,5	583,1	13,1
Canadá						
Consumo	18,5	15,4	18,5	21,5	18,5	0,0
Exportação	20,0	10,8	12,3	18,5	15,4	-23,1
Produção	38,5	26,2	30,8	40,0	33,9	-12,0
Total	553,9	520,0	527,7	618,5	616,9	11,4

Fonte: APA – The Engineered Wood Association (2005) citado por UNECE/FAO (2006)

3.1.2 Vigas com Perfil I (*I – Joist*)

As vigas com perfil em I estão aumentando a participação no mercado de chapas (Quadro 3), sendo que em 2004 representava nos Estados Unidos 46% das chapas utilizadas para estrutura de pisos comparada com o de madeira sólida que abrangia neste mesmo ano 39%, e 15% para outros produtos. De forma geral, estes dados servem para mostrar a penetração do produto no mercado. Não existem

incentivos substanciais sobre o aumento da produção desde o ano de 2003. Mesmo assim, houve um aumento em 2004, provavelmente com a economia favorável ao mercado de LVL (*Laminated Veneer Lumber*) para todas as partes do composto, tanto a alma como flanges (UNECE/FAO, 2006).

QUADRO 3 - PRODUÇÃO E CONSUMO DE VIGAS COM PERFIL I NOS ESTADOS UNIDOS ENTRE 2001 E 2005 (1000 m³)

	2001	2002	2003	2004	2005	2001-2005 % incremento
Estados Unidos						
Demanda do mercado interno						
Novas Residencias	216,4	236,2	221,0	271,3	266,7	23,2%
Não Residenciais	33,5	32,0	59,4	68,6	73,2	118,2%
Total Interno	249,9	268,2	280,4	339,9	339,9	36,0%
Produção	227,7	230,4	243,2	268,2	266,7	17,1%
Canadá						
Demanda do mercado interno	32,3	30,8	46,9	50,9	46,9	45,3%
Produção	54,6	68,6	84,1	122,5	84,1	54,2
Total da Produção na América do Norte	282,2	299,0	327,4	390,8	393,2	39,3%

Fonte: APA – The Engineered Wood Association (2005) citado por UNECE/FAO (2006)

Em 2004, estima-se que 890 milhões de pés lineares de Vigas com Perfil I tenham sido usadas nos Estados Unidos para estrutura de pisos residenciais, forros e paredes, e 225 milhões de pés lineares sendo usadas em reformas e construção de estruturas não residenciais (UNECE/FAO (2006)).

As Vigas com Perfil I tem vantagem com relação à qualidade e pouca perda de material quando comparada com as vigas formadas por madeira sólida, além dos construtores terem preferência pelo

composto, aumentando a demanda. Com o aumento da capacidade de produção de chapas OSB (*Oriented Strand Board*), deve-se aumentar também o setor. Os materiais habitualmente utilizados para as flanges são o LVL, madeira serrada e *Laminated Strand Lumber*. Possivelmente, há uma possibilidade de aumento do LVL para as flanges com a sua importação de outros países. Alguns fabricantes estão intercalando às flanges de madeira serrada e LVL, dependendo dos custos de produção e da aceitação do mercado. Estima-se que 74% das flanges foram de LVL em 1997, 68% em 2003 e aproximadamente 54% em 2004. Este fato deve-se ao aumento da participação da madeira serrada e da *Laminated Strand Lumber* para a fabricação das flanges no composto (UNECE/FAO, 2006).

3.2 MADEIRA COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

Apesar da multiplicidade de recursos florestais, no Brasil a questão da construção civil envolve interesses de grandes monopólios como a do aço, concreto e plástico. Produtos utilizando estes materiais vão se industrializando e gradativamente substituindo a madeira. A pouca utilização da madeira de reflorestamento tem origem na falta de informação das possibilidades de uso da madeira de qualidade. O estigma de que o pinus é madeira susceptível ao ataque de microorganismos e o eucalipto é madeira de baixa qualidade, levaram ao preconceito com relação ao uso da madeira (LAROCA, 2002).

Em países como os Estados Unidos, Canadá, Austrália e Japão a madeira é muito utilizada na construção de habitações com resultados satisfatórios. Na Alemanha pode-se encontrar construções tradicionais utilizando o sistema de pilar em estilo enxaimel. O uso da madeira na construção civil já é consagrado. No Japão, as construções tradicionais

utilizam madeira na sua estrutura e vedação; atualmente há diversas empresas que fabricam casas em painéis de cimento madeira.

A madeira como material de construção oferece vantagens que superam outros materiais tradicionais como o aço, concreto e alvenaria. Dentre as potencialidades da madeira, destacam-se: baixo peso em relação a uma alta resistência e pouco consumo energético para o seu processamento. Também apresenta outros aspectos positivos como: capacidade para suportar sobrecargas de curta duração; boa resistência ao fogo para uso estrutural, quando comparada com as estruturas de aço e de mais estruturas metálicas; vantagens econômicas, quando seu custo inicial é analisado, levando-se em conta um longo prazo de utilização do material.

A resistência por parte de muitos consumidores em relação à casa de madeira se deve ainda a inúmeros fatores que já foram apontados por pesquisadores voltados ao estudo desse tipo de edificação. Todavia, para cada tipo de “preconceito” já existem estudos e recomendações técnicas voltadas a solucionar e esclarecer os problemas apontados. Além destes fatores de resistência em se adquirir uma casa de madeira, CÉSAR (2002) cita outros que também contribuem com a manutenção de uma faixa de mercado pequena desse sub-setor de edificações:

a) imagem de material não durável e descartável, quando comparado freqüentemente com alvenaria e estruturas de concreto armado, sem levar em conta a manutenção periódica que qualquer material requer;

b) material perecível e degradável por agentes biológicos e pelo fogo;

c) imagem negativa do material decorrente de seu emprego em obras provisórias como tapumes, andaimes, barracões de obras e barracos de favelas;

d) rotulação da madeira como material para população de baixa renda – segregação social pelo material;

e) construções de madeira apresentam problemas técnicos no nível do projeto e do processo de produção, conseqüentemente ocorre à insatisfação do cliente, propagando uma imagem negativa do material;

f) poucos pesquisadores voltados ao estudo da habitação de madeira, desproporcional em relação ao potencial brasileiro;

g) pesquisas na área de madeira estão ainda com enfoque muito centrado na caracterização do material e análise de estruturas;

h) poucos estudos na área da habitação que enfocam o usuário e suas necessidades em relação a este produto;

i) habitação de madeira ainda vista como uma opção de casa de praia e campo, pela maioria da população de maior poder aquisitivo.

O desenvolvimento de novas tecnologias pode ser feito através do “repensar” dos sistemas construtivos já existentes e bastantes difundidos. Neste caso, é necessário um estudo minucioso da técnica selecionada e da tecnologia empregada no processo de produção de uma edificação de madeira.

A melhoria do produto implica no conseqüente aumento de qualidade da construção de madeira, refletindo na satisfação do consumidor. A necessidade de se imprimir à sistematização do projeto do produto à industrialização da “casa de madeira” para o seu aprimoramento contínuo incrementará a chance de superação de um conceito indevidamente desenvolvido no consumidor pela desvalorização do material madeira aplicado à construção.

3.2.1 A Madeira de Pinus para Industrialização

A grande variabilidade, bem como todas as peculiaridades do pinus em relação às madeiras folhosas não deve ser entendida como inviabilização do uso dessa madeira como material estrutural, e sim deve ser estudada e entendida para garantir sua boa aplicação, pois, se considerarmos a disponibilidade dessa madeira nas regiões sul e sudeste, seria inconseqüente descartar tal matéria prima alegando ignorância de seu comportamento. Entendidas as peculiaridades necessárias para seu bom uso, é interessante ressaltar também suas vantagens para a industrialização das estruturas de madeira.

Em primeiro lugar, o parque industrial voltado para o processamento do pinus aplica, hoje, muito mais tecnologia do que o processamento de madeiras nativas. Além disso, a baixa densidade representa uma das características mais importantes no que se refere à industrialização. Essa baixa densidade facilita o manuseio das peças durante a produção e a montagem do telhado, que se tornariam muito mais lentas e complicadas se as peças tivessem o dobro do peso.

O pinus apresenta também ótima trabalhabilidade, o que permite o uso de equipamentos mais rápidos e leves, além de permitir soluções como às chapas com dentes estampados, ou de receber pregos de pequenos diâmetros sem necessidade de pré-furação, apesar da Norma Brasileira não fazer essa diferenciação.

A alta permeabilidade do pinus também é vantagem por diversos motivos, pois permite o tratamento de 100% da seção, enquanto algumas madeiras folhosas, mesmo de média densidade, não tem permeabilidade suficiente para a impregnação do cerne, não garantindo à eficiência total do tratamento preservativo em determinadas situações.

A alta porosidade do pinus permite a rápida secagem da madeira, essencial para um processo de industrialização em que o custo de espera de secagem e o capital imobilizado em grandes estoques durante a secagem poderiam inviabilizar a produção.

Além disso, a alta permeabilidade garante grande eficiência nos processos que utilizam adesivos, seja para colagem de madeira laminada colada, para vigas com perfil I, *finger joints*, entre outros, pois o mecanismo de fixação dos adesivos mais utilizados para madeira exige uma determinada permeabilidade para que a linha de cola tenha resistência mecânica.

Diversos elementos estruturais industrializados de madeira surgiram da necessidade de se vencer grandes vãos, mas utilizando como matérias-prima árvores de pequenas dimensões.

Sendo assim, as dimensões necessárias para a industrialização das estruturas de madeira podem ser facilmente supridas pelas seções de pinus serrado disponíveis no mercado brasileiro.

STAMATO *et al* (2006) cita que diversas são as aplicações da madeira de pinus em estruturas industrializadas, principalmente devido ao fato de que a grande maioria das tecnologias desenvolvidas para a industrialização de estruturas de madeira é voltada para o uso de coníferas como matéria prima, como: madeira laminada colada, vigas com perfil I, seções compostas, treliças e estruturas lamelares.

Desta forma, como considerações principais sobre o uso de coníferas como elementos estruturais, ressaltasse a necessidade de classificação prévia das peças, como forma de minimizar os efeitos da grande variabilidade das propriedades e da ocorrência de defeitos naturais e de processos.

Essa classificação deve ser feita quanto às dimensões das peças e ao seu uso final, já que os defeitos naturais interferem diferentemente nas propriedades mecânicas das peças.

Devido à grande variabilidade das propriedades mecânicas das coníferas, a maioria das estruturas industrializadas que utilizam essa matéria prima enfocam a redundância como segurança para eventuais falhas, mesmo sendo feita toda a classificação das peças utilizadas.

Devido ao baixo MOE (Módulo de Elasticidade) e à magnitude dos efeitos de fluência na flexão, o uso de coníferas é mais indicado para situações de tração e compressão, sendo pouco indicada para flexão devido às grandes flechas que podem ocorrer.

Outro ponto comum à utilização de coníferas é a necessidade de tratamento preservativo eficiente, pois essa madeira é altamente suscetível ao ataque de organismos xilófagos, mas deve-se observar que mesmo utilizando a madeira tratada, deve-se evitar elementos estruturais expostos às intempéries para garantir maior vida útil da estrutura.

Devido ao efeito corrosivo do tratamento preservativo em metais, todas as peças metálicas da estrutura que estiverem em contato com a madeira devem receber tratamento anti-corrosão. É recomendado também que se utilize sempre pregos anelados e galvanizados a fogo, ao invés de pregos lisos, para garantir a eficiência da ligação em madeira de baixa densidade.

Finalmente, destaca-se aqui que o direcionamento adequado do processo de obtenção da madeira serrada de pinus é um dos pontos mais importantes para que se possa melhorar a qualidade das estruturas que utilizam essa espécie como matéria-prima.

3.3 PRODUTOS ENGENHEIRADOS

O parque industrial madeireiro do Brasil apresenta uma infraestrutura razoável, sendo considerado no exterior como exportador de produtos de baixo custo, o que permite ter boas perspectivas para o comércio de produtos de madeira com maior valor agregado (PMVA). Entre as ameaças e oportunidades no segmento de produto com maior valor agregado estão o ciclo de uso dos produtos, a entrada de produtos substitutos, os concorrentes diretos, os preços e a necessidade de constante evolução do parque industrial instalado. Entre os produtos substitutos aos PMVA estão os produtos de madeira engenheirados como: as Vigas com Perfil I, LVL e Madeira Laminada; e os painéis engenheirados como OSB e MDF, os quais têm se mantido em constante evolução. Tanto os produtos engenheirados como os de madeira certificada são competitivos frente a outros materiais como o aço, plástico e o concreto.

3.3.1 MDF (*Médium Density Fiberboard*)

As chapas de MDF surgiram em meados dos anos 60, mais precisamente tendo a primeira placa sendo produzida pela empresa Allied Chemicals, na cidade de Nova York em 1965. No Brasil, a primeira fábrica foi a Duratex em Agudos – SP, seguido pela Tafisa em Piên – PR. Entretanto, a defasagem de tecnologia do Brasil em relação aos principais países produtores de chapas de MDF é considerável; um quadro que precisa ser urgentemente reduzido a fim de que se atinja a médio e longo prazo, uma igualdade técnica e competitiva com estes países, o que é plenamente viável (ALBUQUERQUE, 1999).

Os painéis MDF são definidos por MALONEY (1996) como painéis fabricados pelo processo a seco feitos com fibras lignocelulósicas combinadas com uma resina sintética ou outro agente ligante, compactados a uma densidade entre 0,50 e 0,80 g/cm³ por prensagem a quente, num processo em que a totalidade da colagem entre as fibras é criada pelo adesivo adicionado.

Segundo simulação de INDI (1996) citado por ELEOTÉRIO (2000), a resina e em seguida a madeira são os dois maiores componentes no custo total de produção de painéis MDF, representando 23,3% e 15,9%, respectivamente.

Este tipo de chapa de fibra, devido a sua homogeneidade e isotropia, apresenta vantagens quanto à resistência, facilidade de moldagem, junções, colagens, acabamento superficial, ideal para alto brilho, não requer armazenamento especial e de secagem, possui boa resistência ao arranque de parafusos e tem boa adequação para trabalhos realizados com *designs* sofisticados (CARDOSO, 1999). Além destas, são destacadas as características de usinabilidade das bordas das chapas e melhor qualidade de ligação interna (IWAKIRI, 1998).

3.3.2 OSB (*Oriented Strand Board*)

IWAKIRI *et al* (2004) cita que as chapas de partículas OSB surgiram em meados da década de 1970 nos Estados Unidos e no Canadá, como produto de 2ª geração das chapas estruturais “*waferboard*”. A partir da década de 1980, o uso de chapas OSB foi largamente difundido, resultando no aumento expressivo de novas unidades produtoras em todas as regiões do mundo. No Brasil, a

primeira fábrica de chapas OSB iniciou a sua produção em 2002, tendo a capacidade instalada de 350.000 m³/ano.

OSB é um painel engenheirado de uso estrutural produzido a partir de finas partículas denominadas “*strand*” unidas por uma resina resistente à água sobre a ação de calor e pressão (Figura 1). As partículas que fazem parte da composição do painel devem apresentar a relação entre comprimento e largura em no mínimo igual a 3, podendo produzir um painel com maior resistência e dureza (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999)

FIGURA 1 - CHAPAS DE OSB, EVIDENCIANDO AS PARTÍCULAS UTILIZADAS



Fonte: Disponível em <http://www.niem.ipt.br/ipt/> em 20 de abril de 2007.

Os painéis OSB podem ser obtidos a partir de madeira proveniente de desbastes e de troncos finos e tortuosos, bem como de espécies de menor valor comercial. Competem com os compensados, que requerem toras de alta qualidade para a sua manufatura e, por isso, são de custo relativamente superior (WALKER, 1993).

De acordo com SELLERS (2001), a resina mais utilizada na produção do OSB é a fenólica, entretanto o uso da resina de isocianato é crescente, embora tenha custo superior. Segundo TSOUMIS (1991), esse tipo de painel é tipicamente formado por três camadas, sendo nas externas as partículas de madeira orientadas paralelamente na direção de formação do painel; na interna, a orientação é perpendicular.

De acordo com CLOUTIER (1998), o processo industrial das chapas de OSB divide-se em onze etapas: toragem e acondicionamento das toras; descascamento das toras; geração das partículas “*strand*”; armazenamento das partículas úmidas; secagem das partículas; classificação e peneiramento; mistura dos componentes do colchão; formação do colchão, prensagem a quente; acabamento e expedição.

Os parâmetros mais importantes no controle do processo de manufatura de chapas OSB são: densidade da madeira e da chapa; geometria das partículas e sua orientação; proporção da orientação de partículas em camadas face-centro da chapa; conteúdo de umidade do colchão; quantidade de resina e parafina; tempo de fechamento da prensa; tempo e temperatura de prensagem (CLOUTIER, 1998).

A principal aplicação do OSB é na indústria da construção civil, pois suas características físicas e mecânicas permitem o uso para fins estruturais. Por esse motivo, esse painel concorre em algumas aplicações com o compensado (TOMASELLI, 1998). O OSB pode expandir-se consideravelmente, quando estiver exposto a chuvas ou a

condições de alta umidade relativa em longos períodos. Devido a isso, deve ser utilizado somente em construções protegidas ou em interiores (JANSSENS, 1998).

O OSB pode ser utilizado praticamente em quase todos os usos tradicionais de painéis de partículas e compensados. Ressalta-se que o OSB pode ser desenvolvido para reunir um grande número de especificações. Atualmente, os principais usos do OSB são segundo MENDES (2001): forro para telhados; base para paredes e pisos em construções residenciais; empacotamento e engradamento; *pallets* para estocagem a seco; estandes para exibição; armações para mobília, assento e encosto de cadeira; tampos de mesas industriais; painéis de paredes decorativas; miolo para composto destinado a piso de madeiras nobres; piso acabado; base para tampo de escrivaninha; construção de depósitos e tanques; tapumes e divisórias; formas descartáveis para concreto; *decks* e plataformas; carrocerias de caminhões; móveis; painéis estruturais; painéis isolantes; entre outros.

A produção de OSB está basicamente concentrada nos Estados Unidos e no Canadá, sendo esses dois países responsáveis por cerca de 95% da produção mundial. Os Estados Unidos são responsáveis por mais de 80% do consumo mundial do produto (TOMASELLI, 1998).

A utilização de chapas OSB tem crescido significativamente e ocupado espaço antes exclusivo de compensados, em virtude de fatores como: redução da disponibilidade de toras de boa qualidade para laminação; o OSB pode ser produzido de toras de qualidade inferior e de espécies de baixo valor comercial; a largura das chapas OSB é determinada pela tecnologia de produção e não em função do comprimento das toras, como no caso de compensados (IWAKIRI, 1999).

3.3.3 LVL (*Laminated Vanner Lumber*)

O painel LVL é um produto de alta *performance* que foi desenvolvido em resposta a necessidade para aumentar as propriedades de resistência e dureza, a estabilidade dimensional e a pequena variação em altura dos componentes estruturais (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987 citado por KRETSCHMANN *et al*, 1993).

Segundo PIO (2002), os painéis de lâminas paralelas (PLP) designados LVL, são produtos estruturais compostos de lâminas de madeira com as fibras orientadas na mesma direção (longitudinal), oferecendo alta resistência, e surgiram a mais de 28 anos no mercado americano. Representa um produto alternativo para usuários de madeira estrutural. Dependendo do processo e espécies utilizadas em sua manufatura, uma ampla faixa de características de desempenho e custos do produto é alcançada.

O LVL foi utilizado pela primeira vez na confecção de hélices de avião e outras peças de alta resistência de aeronaves durante a segunda guerra mundial. A literatura aponta que a origem do processo de obtenção deste painel estaria no trabalho de LUXFORD em 1944, o qual construiu elementos estruturais de aviões com elevada resistência, a partir de painéis de lâminas paralelas, fabricados de lâminas de madeira de 3,6 mm de espessura coladas paralelamente a frio (SCHAFFER *et al*, 1972 citado por MATOS, 1997).

Na década de 60, já no segmento da construção civil, empresários norte americanos introduziram no mercado vigas compostas de madeira do tipo Viga-I. Estas Vigas com Perfil I representavam um produto que podia suportar mais carga em relação ao seu próprio peso do que qualquer outro material existente até então. Contudo, a produção destas vigas de alta qualidade dependia de um

suprimento de madeira serrada de alta resistência para confecção das peças superiores e inferiores, e este suprimento de peças uniformes era bastante problemático. Como solução, desenvolveu-se peças de madeira produzidas com lâminas de 2,54 mm coladas de Douglas Fir. Estava criado o LVL na construção civil. O material passou então a ser comercializado na composição de vigas e como peças inteiriças como acontece até hoje (RECH, 2003).

De acordo com PEACE (1994), as vantagens do LVL frente à madeira sólida são:

- maior resistência: a estrutura reconstituída dos painéis os torna mais estável. Um processo de classificação das lâminas pode conferir propriedades de resistência que podem ser calculadas com precisão;

- flexibilidade dimensional: os painéis podem ser fabricados com qualquer largura e comprimento desejado. Além disso, podem ser produzidas em curva;

- utilização de grande variedade de espécies e tamanhos de toras, sendo as coníferas as mais utilizadas. Nos EUA é mais comum o uso de espécies como *Douglas fir* e os *Southern Pines*.

As lâminas utilizadas para a fabricação do LVL devem ser selecionadas para que o produto atinja as propriedades desejadas. TAMMELA (1998) citado por PEDROSA (2003) considerou que desta forma, estruturas de LVL fabricadas com madeiras de classes estruturais mais baixas podem substituir àquelas produzidas com madeiras sólidas de classes mais elevadas e de maior custo.

A fabricação dos painéis de LVL é muito semelhante à produção de chapas de compensado, diferenciando na distribuição das lâminas ao longo do painel, do adesivo utilizado e conseqüentemente na utilização, que são mais direcionados para uso estrutural.

O painel LVL apresenta duas categorias distintas: LVL estrutural para uso em aplicações de larga dimensão e longos períodos, e não estruturais ou instalações móveis. A primeira é usada extensivamente na América do Norte, com mais da metade de toda a sua produção sendo usada como bordas em vigas. A Europa também está começando a usar mais produto estrutural. O produto não estrutural é popular na Ásia, particularmente no Japão, e devido a sua excelente estabilidade é usada em várias aplicações como esquadrias de janelas e portas e componentes para escada (RECH, 2003).

3.3.4 Madeira Laminada Colada

Pelo que se tem conhecimento a sua aplicação concreta teve início no século XIX. No entanto, a junção das técnicas para dar origem à Madeira Laminada-Colada (MLC) empregada na fabricação de elementos estruturais a serem utilizados na construção civil, só foi possível, com o surgimento de colas de alta resistência. Foi, portanto, em 1906, com o aparecimento da cola de caseína (derivada do leite) que o mestre carpinteiro suíço Otto Hetzer teve a idéia de substituir pela cola, as ligações metálicas de braçadeiras e parafusos, utilizadas pelo coronel Emy. Com isso, obteve-se uma seção mais homogênea e sem a ocorrência de deslizamentos entre as lâminas (SZUCS, 2006).

No Brasil, a primeira indústria de MLC, a ESMARA Estruturas de Madeira Ltda, foi fundada em 1934, em Curitiba-PR, com tecnologia trazida por alemães. Mais tarde, outra empresa de mesmo nome foi fundada em Viamão-RS. Merecem citações outras indústrias também da Região Sul, como a PRÉ-MONTAL Estruturas de Madeira Ltda (PREMON), fundada em Curitiba-PR, em 1977, executando a maioria de seus projetos nas décadas de 70/80; a EMADEL Estruturas

de Madeira Ltda, fundada em Araucária-PR, em 1981; e a BATTISTELLA Indústria e Comércio Ltda, situada em Lages-SC, atuando no setor madeireiro há mais de 40 anos e que, atualmente, possui uma linha de produção de casas e estruturas pré-fabricadas, com largo uso de elementos estruturais de MLC.

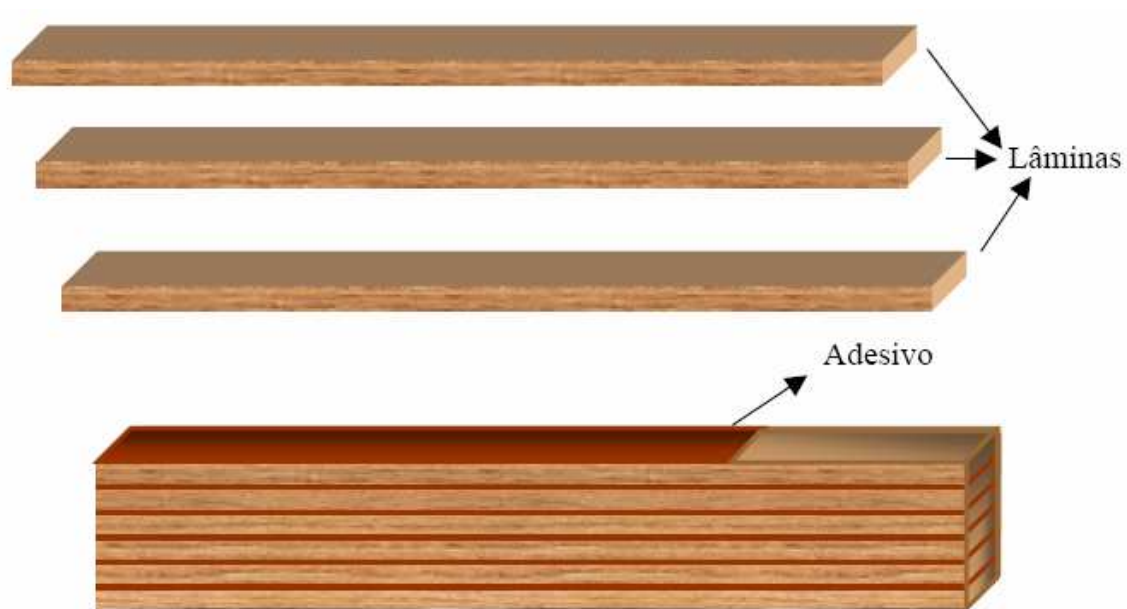
A fabricação da madeira laminada colada (MLC) reúne duas técnicas bastante antigas. Como o próprio nome indica, a mesma foi concebida a partir da técnica da colagem aliada à técnica da laminação, ou seja, da reconstituição da madeira a partir de lâminas (tábuas).

Para FREAS & SELBO (1954), o termo madeira laminada colada aplicado a peças estruturais refere-se ao material colado de pequenas peças de madeira, com espessura variando de 10 mm a 50 mm, de forma reta ou curva, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao comprimento da peça. As lâminas podem ser de diferentes espécies de madeira, espessuras, larguras e comprimentos, que são colocadas borda a borda obtendo peças de dimensões e qualidade desejadas. São características que proporcionam infinitas possibilidades de projeto, condicionadas apenas ao uso final e aos fatores econômicos de produção.

LAHR (1983) define viga laminada colada como uma peça estrutural formada por duas ou mais peças de madeira, unidas por adesivo. As lâminas podem ser coladas na horizontal ou na vertical, formando laminados horizontais e verticais, respectivamente. O laminado horizontal é o mais utilizado por não apresentar limitação em altura, além de possibilitar a construção de peças curvas. O sistema de emendas das extremidades permite que o conjunto dessas peças coladas funcione como uma única unidade estrutural.

Chama-se, portanto, “Madeira Laminada Colada” as peças de madeira, reconstituídas a partir de lâminas (tábuas), que são de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da peça final assim constituída. Essas lâminas, que são unidas por colagem, ficam dispostas de tal maneira que as suas fibras estejam paralelas entre si (SZÜCS, 2006), conforme pode ser observado na Figura 2.

FIGURA 2 - ESQUEMA DE UMA VIGA DE MLC



Fonte: ZANZIÁCOMO (2003)

Uma das características de peças laminadas coladas é a possibilidade da utilização racional e otimizada da madeira, permitindo a utilização de tábuas com seções e comprimentos variados, além de combinações com madeira de qualidade diferenciada. (NIELSEN, 1998).

A MLC tem seus usos mais frequentes em estruturas de cobertura, elementos estruturais principais para pontes, torres de

transmissão, edifícios, embarcações, banzos de escadas e corrimão, equipamentos decorativos planos ou em relevos, esquadrias e móveis. Isto se deve ao fato da MLC adaptar-se a uma significativa variedade de formas e apresentar alta resistência a solicitações mecânicas em função de seu peso próprio relativamente baixo (ZANGIÁCOMO, 2003).

NATTERER (1991) afirma que uma das características da MLC é a versatilidade na obtenção das mais variadas formas geométricas para elementos estruturais. As possibilidades arquitetônicas daí resultantes são inúmeras e dependem principalmente da indispensável colaboração entre arquitetos e engenheiros. Têm-se como principais vantagens de acordo com o autor:

- Facilidade na construção de grandes estruturas a partir de peças de dimensões comerciais;
- Redução de rachaduras e outros defeitos típicos de peças maciças de madeira, com grandes dimensões;
- Possibilidade de emprego de peças de qualidade inferior em zonas menos solicitadas, e de peças de melhor qualidade em zonas mais solicitadas, podendo-se combinar, assim, espécies distintas;
- Possibilidade de aplicação de contra-flechas durante o processo de fabricação;
- Baixa relação peso/ resistência, não exigindo equipamentos possantes para içamento, bem como conduzindo a fundações com ações de menores intensidades;
- Bom desempenho sob a ação do fogo, em razão de seções transversais avantajadas.

Como aspecto restritivo, pode ser citado que a MLC tem custo superior ao da madeira maciça, e requer técnicas especiais, equipamentos e mão-de-obra especializada no processo de fabricação.

Comparada á outros materiais, a madeira laminada pode apresentar ainda as seguintes vantagens: (MATSUNAGA, 1995)

- a relação peso / resistência é baixa, podendo por esta razão, as peças serem transportadas e colocadas em serviço com baixo custo. Estudos demonstraram que para uma resistência equivalente, a madeira laminada é até cinco vezes mais leve que o concreto;

- as fundações são consideradas leves, permitindo a pré-fabricação e assentamento com bastante redução de mão-de-obra, além de não necessitar de manutenção para utilização em interiores.

As figuras 3 e 4 ilustram exemplos de aplicações das vigas MLC.

FIGURA 3 - COBERTURA DE UMA PISCINA CONSTRUÍDA COM MADEIRA LAMINADA COLADA



Fonte: Disponível em <http://www.glulam.co.uk>. Acesso em 20 de junho de 2007

FIGURA 4 - PONTE COM 19 m DE VÃO LIVRE EM MADEIRA LAMINADA COLADA. SLEAFORD, LINCOLNSHIRE



Fonte: Disponível em <http://www.glulam.co.uk> em 20 de junho de 2007.

3.3.5 Vigas com Perfil “I”

As vigas com perfil “I” são a segunda geração de produtos engenheirados de madeira que envolve um painel estrutural que compõe a alma e outro tipo de painel nas flanges (Figura 5) .

As vigas em I tornaram-se conhecidas em 1968, bem como as suas propriedades. Atualmente, os Estados Unidos tem cerca de 12 fábricas deste produto que produzem mais de 3600 milhões de polegadas lineares anualmente. As vigas com perfil em I variam em altura de 9,25 a 38 polegadas e estão disponíveis em comprimentos superiores a 960 pés. As flanges podem ser de madeira sólida ou LVL, e podem variar de 1,5 X 1,5 polegadas, 4,625 X 2,625 polegadas de seção transversal. Painéis de compensado e OSB são usados para a alma da viga, podendo ter suas dimensões variando de 0,375 a 0,875 polegadas de espessura. (SMULSKI,1997).

FIGURA 5 - VIGA COM PERFIL I



Fonte: Disponível em <http://www.trada.co.uk> em 13 de junho de 2007.
<http://www.bobvila.com> em 20 de junho de 2007.

O processo de fabricação das vigas em I usadas para cada produto varia desde as normas técnicas que fornecem especificações das propriedades, tanto quanto às flanges como para as almas das vigas; desta forma, cada fabricante produz um produto único. Cada fabricante deve estabelecer parâmetros de aceitação para o seu produto; seja baseado em ensaios ou através de teorias da engenharia, ou combinação dos procedimentos da análise empírica / racional para estabelecer as propriedades desejadas. Os delineamentos dos procedimentos empírico e racional estão estabelecidos pela ASTM D5055, conforme mencionado pela ASTM 1997 citada por GREEN & HERNANDEZ, (1998).

3.4 ADESIVOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA MADEIREIRA

A utilização de adesivos encontra-se presente em inúmeros ambientes, desde aqueles produzidos na natureza por insetos, peixes e aves que segregam líquidos viscosos capazes de unir materiais para a fabricação de seus ninhos, até aqueles produzidos atualmente pelo homem, utilizando a mais refinada tecnologia. Nota-se então, que estes possuem elevada importância tanto para a natureza, quanto para o homem contemporâneo.

A existência de centenas de preparações adesivas, as constantes inovações tecnológicas que surgem a cada dia e por fim a globalização da economia neste final de milênio, requerem um estudo detalhado da relação custo benefício na escolha do material adesivo a ser utilizado, visto que diversos adesivos podem ser empregados para manter unida, por adesão superficial, peças diferentes.

Para a correta escolha do adesivo a ser utilizado na confecção de vigas é preciso levar em consideração principalmente o meio a que a estrutura estará inserida, ou seja, temperatura e teor de umidade. Segundo a NBR 7190 (1997) – Projeto de Estruturas de Madeira, o adesivo utilizado para a produção de vigas deve ser a prova d'água.

Outro fator que deve ser considerado na escolha do adesivo é se a permanência da estrutura ficará abrigada na edificação, ou exposta à variação das condições atmosféricas, tais como alternância de sol e chuva. O Quadro 4 apresenta os tipos de colas que podem ser utilizadas em função do uso previsto para a estrutura.

A verificação da eficiência da cola deverá ser atestada por ensaios de cisalhamento na linha de cola e tração normal na linha de cola, segundo as recomendações da norma NBR 7190/97.

Desta forma, as resinas que mais freqüentemente são utilizadas para uso estrutural em madeiras são: a resina fenólica e suas modificações, bem como as resinas fenol resorcinol para uso exterior. As resinas epóxi possuem características muito úteis, mas não são utilizadas devido ao seu custo; e atualmente se está fazendo uso das resinas de poliuretano.

O sucesso do uso das vigas laminadas coladas está intimamente ligado ao adesivo empregado na sua construção. O adesivo deve possuir características de uma união resistente, estável e durável, mas não devendo se esquecer que estas características relacionam-se diretamente com as propriedades da madeira.

QUADRO 4 - TIPO DE COLA EM FUNÇÃO DO USO PREVISTO PARA A ESTRUTURA

	Boas Condições Atmosféricas		Más Condições Atmosféricas
	Umidade da Madeira		Exposição em atmosfera contendo produtos químicos ou exposição direta à intempéries
	< 18%	≥ 18%	
Temperatura elevada	Resorcina Caseína	Resorcina	Resorcina
Temperatura normal	Resorcina Caseína	Resorcina Uréia-Formol	Resorcina
As colas de resorcina-fenol devem oferecer as mesmas condições das colas de resorcina pura. Na dúvida, devem ser realizados ensaios de laboratório.			

Fonte: SZÜCS (1992)

3.4.1 Adesivo Resorcina Formaldeído

O adesivo de resorcina é semelhante ao de fenol, melamina e uréia, tendo sua reação de cura sem aquecimento, ou seja, a temperatura ambiente. A união do fenol e do formaldeído forma a base da resina fenólica. Sua principal utilização está na fabricação de fórmicas, e o seu uso está bem restrito a madeira, embora sua resistência ao sol, chuva e vapores de água seja excelente.

Este tipo de resina, de coloração marrom, de processo de cura à frio (5 a 70°C), e com a utilização de catalisador, vem sendo empregado desde 1943. Suas aplicações principais se direcionam para a manufatura de vigas laminadas coladas (“*glulam*”), na construção de barcos, na aviação, e na montagem em geral de peças a serem instaladas em situações ou condições adversas (PIZZI, 1983).

Resorcinol é uma substância fenólica de reatividade muito mais elevada do que o fenol, todavia, é um produto muito caro, o que leva à mistura-lo, em parte iguais, com o fenol, ou ainda, usado como co-condensado de resorcinol e fenol. O formaldeído está presente normalmente na forma de paraformaldeído, sendo geralmente acrescentado imediatamente antes da aplicação (PIZZI, 1983).

A viscosidade situa-se entre 500 e 800 cp, a 25°C, e o adesivo possui uma vida útil de armazenagem de um ano aproximadamente, a uma temperatura de 25°C. O tempo de prensagem é muito variável, pois é dependente da temperatura ambiente: 20°C, 10 a 14 horas; 24°C, 8 a 10 horas; 28°C, 6 a 8 horas; 32°C, 5 a 6 horas (IWAKIRI, 1998).

3.4.2 Adesivo Melamina Uréia Formaldeído

Esta resina líquida à base de melamina-formol, que é apresentada em solução aquosa, é muito indicada para incorporação às resinas à base de uréia-formol convencionais, conferindo melhor resistência à água das colagens. Seu preparo segue o de um adesivo convencional (uréia-formol), sendo necessária à mistura de um extensor, de um endurecedor e de água. O extensor mais utilizado é a farinha de trigo, que confere melhor consistência ao adesivo e ajuda na sua penetração na madeira. A água tem como principal função ajustar a consistência e com isso melhorar a trabalhabilidade da mistura. Já o endurecedor, é o responsável pela cura (secagem) do adesivo, conforme as indicações do trabalho. O endurecedor mais amplamente utilizado nessa mistura é o sulfato de alumínio (OLIVEIRA JÚNIOR *et al*, 2006).

3.4.3 Poliuretano

Os poliuretanos foram desenvolvidos por Otto Bayer *et al* em Stuttgart, Alemanha, no ano de 1937, a fim de eliminar a gama de problemas relacionados ao uso estrutural de madeira. A sua comercialização teve início na década de 30, com a fabricação de espumas rígidas, adesivos e tintas. Na década de 40, na Alemanha e Inglaterra, foram originados os elastômeros de poliuretano. A década de 50 registrou o grande desenvolvimento comercial do produto, como espumas flexíveis. Na atualidade, o maior destaque é a moldagem por injeção e reação, que deu ímpeto aos estudos relacionando estrutura molecular e propriedades dos poliuretanos (VILAR, 1993).

As resinas poliuretano mostram grande versatilidade de aplicação, podendo ser utilizadas em diferentes segmentos industriais.

Os poliuretanos são consumidos principalmente sob a forma de espumas flexíveis ou rígidas e elastômeros. Suas aplicações são variadas e incluem volantes, painéis, assentos e para-choques na indústria automotiva, colchões e assentos na indústria de móveis, sola de sapatos, núcleo de esquis e pranchas de *windsurfing*, na indústria de esporte e lazer, adesivos, refrigeradores, aquecedores, entre outros (BONVIER, 1997)

Na década de 80, na Suíça começou o desenvolvimento de um adesivo altamente resistente chamado PUR (poliuretano reativo). Os produtos PUR são adesivos mono-componentes cuja matéria-prima base são pré-polímeros de isocianato, assim diferenciando-se dos adesivos base água cujo polímero base é o polivinil acetato (PVA).

Segundo LOPES & GARCIA (2004), para se ter uma boa colagem são necessários dois requerimentos básicos:

a) O adesivo deve ter um excelente poder de cobertura, ou seja, o adesivo e o aderente devem ter um bom contato;

b) O adesivo deve ser capaz de montar e formar uma alta resistência de coesão na linha de colagem.

Quimicamente, denomina-se uretano (ou uretana) o produtos da reação química entre um grupo isocianato e um grupo hidroxila (WULTZ *apud* CLARO NETO, 1997)). A polimerização dos poliuretanos ocorre quando um composto com dois ou mais isocianatos em sua estrutura reage com um poliol.

Segundo a ABIQUIM (2006), as matérias-primas dos poliuretanos, poliisocianatos e polióis podem variar de acordo com a necessidade de aplicação:

a) Polióis

- Poliéteres: são os polióis mais utilizados na indústria. São os hidroxilados dos polipropilenos glicóis e copolímeros polipropileno/etileno glicóis ou, ainda, os politetrametilenos glicóis.

- Poliésteres: normalmente são polióis obtidos de resíduos de resinas poliésteres de alto peso molecular à base de polietileno tereftalato (PET).

- Óleo de Mamona: líquido viscoso obtido da compressão das sementes da mamona. É um triglicerídeo derivado do ácido ricinoleico normalmente de funcionalidade próximo de 2,7.

- Polibutadieno líquido hidroxilado: obtido pela polimerização do butadieno catalisada pelo peróxido de hidrogênio em meio alcoólico. Obtém-se um polioliol muito reativo, com excelente resistência a hidrólise e grande capacidade de aceitação de cargas que barateiam seu custo final.

b) Isocianatos

- TDI ($C_9H_6O_2N_2$): 2,4 tolueno diisocianato ou 2,6 tolueno diisocianato. Podem ser usados puros ou misturados em vários percentuais diferentes.

- MDI ($C_{15}H_{10}O_2N_2$): 4,4 difenilmetano diisocianato; 2,4 difenilmetano diisocianato ou 2,2 difenilmetano diisocianato.

- HDI ($C_8H_{12}O_2N_2$): hexametileno diisocianato

- IPDI ($C_{12}H_{18}O_2N_2$): isoforona diisocianato

- HMDI ($C_{15}H_{22}O_2N_2$): 4,4 diciclohexilmetano diisocianato
- NDI ($C_{12}H_6O_2N_2$): naftaleno 1,5 diisocianato
- TPMTI ($C_{22}H_{13}O_3N_3$): trifenilmetano 4,4,4 triisocianato
- PDI ($C_8H_4O_2N_2$): 1,4 fenilenodiisocianato

Com exceção do MDI, esses isocianatos, na forma monomérica, têm pressão de vapor relativamente alta e, conseqüentemente, são voláteis. Uma pessoa exposta continuamente a vapores de isocianatos pode sofrer irritação nos olhos e mucosas. Por isso, normalmente eles são transformados em pré-polímeros, adutos ou biuretos, para aumentar seu peso molecular e diminuir ao máximo o teor de monômeros livres nesses poliisocianatos.

Para qualquer formulação ainda vão outros componentes como catalisadores, aditivos, inibidores, extensores de cadeia, formadores de ligações cruzadas, agentes de expansão, surfactantes, retardantes de chama, corantes, pigmentos e cargas sólidas e líquidas.

Além do desenvolvimento dos adesivos, pesquisas na década de 50, na Alemanha, apontaram para o melhoramento de uma configuração apropriada de uniões coladas para construções em madeira, que oferecessem resistência superior. Assim, foi desenvolvido um tipo de união, onde ao invés de utilizar uma cunha única mais larga, tornou possível a confecção de uma série de cunhas menores, com ângulos de inclinação idênticos, dispostos lado a lado, chamados “*reinforcement joint*” ou posteriormente “*finger joint*”, através do uso de máquinas adequadas que produziam o corte em zig-zag, o que aumentou significativamente a área de colagem e a pressão exercida sobre a

direção das fibras resultou em uma imobilização mecânica da união. (LOPES & GARCIA, 2004).

O emprego desta técnica de uniões *finger joint* tem expandido a área de aplicação das construções em madeira. Além dos elementos de madeira de uso estrutural e casas pré-fabricadas, estas uniões têm importantes aplicações em janelas, portas, painéis de madeira sólida, molduras, e móveis. Tanto madeiras moles quanto madeiras duras podem ser utilizadas neste último grupo de aplicações, a maior parte usando *mini-fingers* (comprimento do dente entre 4 e 10 mm) e em alguns casos dentes ainda menores (comprimento inferior a 4mm). O principal argumento a favor das uniões *finger joints* é a melhoria em termos de qualidade e rendimento da madeira, garantindo com confiança um padrão mínimo de qualidade.

O uso de adesivos PUR para a formação de produtos engenheirados de madeira (*glulam, I-beams, LVL, finger joint, etc*) surge no mercado como um produto inovador que oferece a linha de cola com excelentes características, entre elas: alta resistência mecânica, resistência à umidade e a alta temperatura, o produto não agride o meio ambiente, pois é livre de solventes e exige menor consumo de água, atende a normas internacionais de qualidade e resistência; assim torna-se uma nova tecnologia de colagem de estruturas de madeira para o mercado brasileiro.

3.5 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRAS

Atualmente, a caracterização das propriedades da madeira é feita por meio da avaliação destrutiva de corpos de prova amostrados e especificamente preparados para esse fim. Esta prática pode introduzir

variabilidade adicional nos resultados devido a fatores como uma amostragem inadequada ou problemas na confecção do corpo de prova.

De acordo com PLESSEY TELECOMMUNICATIONS (1973) citado por CARREIRA (2003), em 1958, institutos de pesquisas em madeira da Inglaterra, Austrália e América do Norte, descobriram que a resistência e a rigidez à flexão da madeira são altamente correlacionadas. Eles verificaram que a rigidez (Módulo de Elasticidade - MOE) de uma peça de madeira serrada pode ser um forte indicador de sua resistência (Módulo de Ruptura - MOR).

Sendo assim, faz-se possível uma caracterização eficaz por meio de métodos não destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos de prova, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura (ROSS *et al*, 1998). ROSS & PELLERIN (1994) definem como a avaliação de materiais através de métodos não destrutivos como uma ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas das peças sem alteração das suas propriedades. Tais avaliações devem fornecer informações precisas das propriedades e do desempenho do material.

Segundo a ABENDE (2006), os Ensaio Não Destrutivos - END são ensaios realizados em materiais acabados ou semi - acabados, para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, através de princípios físicos definidos sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, e sem interferir em seu uso posterior. Constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para garantir a qualidade, reduzir os custos e aumentar a confiabilidade da inspeção.

Segundo OLIVEIRA, CAMPOS & SALES (2002), os métodos não destrutivos apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais para a caracterização da madeira como: possibilidade de

avaliar a integridade estrutural de uma peça sem a extração de corpos de prova; maior a rapidez para analisar uma grande população e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produção.

De acordo com a NBR 7190/97, no dimensionamento de estruturas de madeira deve-se minorar os valores de resistência e rigidez, o que acaba propiciando um superdimensionamento da estrutura. Porém, conhecendo-se as propriedades específicas de cada peça, a norma citada permite a adoção de valores maiores de resistência, o que leva a uma melhor adequação do uso da madeira, resultando em estruturas mais seguras e econômicas.

Técnicas não destrutivas para madeira diferem muito daquelas utilizadas para materiais homogêneos e isotrópicos tais como metais, plásticos e cerâmicas, nos quais as propriedades mecânicas são conhecidas e rigorosamente controladas nos processos de fabricação. Nesses, a avaliação não destrutiva detecta descontinuidades, vazios ou inclusões. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente e podem ser induzidas por agentes degradantes. Portanto, neste material as técnicas não destrutivas são usadas para avaliar como as irregularidades naturais e induzida pelo ambiente interagem em uma peça de madeira para avaliar suas propriedades mecânicas (ROSS & PELLERIN, 1994).

A hipótese fundamental para avaliação não destrutiva de produtos de madeira foi inicialmente proposta por JAYNE em 1959, ao verificar que as propriedades de armazenamento e dissipação de energia da madeira, que podem ser medidas de forma não destrutiva, através de uma série de técnicas estáticas e dinâmicas, são controladas pelos mecanismos que determinam as propriedades mecânicas do material. Estas propriedades especialmente o módulo de elasticidade

(MOE) e o módulo de ruptura (MOR) são relacionados; nesta teoria, com a energia armazenada e com a dissipação de energia, respectivamente.

Desta forma, para a classificação estrutural de peças de madeira através de métodos não destrutivos, são utilizados dois métodos: método visual e método mecânico. Na classificação visual da madeira, o classificador examina cada peça e limita o tipo, localização e tamanho dos vários defeitos que podem afetar a resistência estrutural. A classificação mecânica consiste em determinar o módulo de elasticidade longitudinal das lâminas por um meio não destrutivo. Entre estes métodos pode-se destacar a flexão estática, MSR (*Machine Stress Rating*), método da vibração transversal, *stress wave* e ultrassom.

De acordo com GALLIGAN & MCDONALD (2000), em 1996, os sistemas de classificação mecânica por tensões alcançaram um nível comercial importante de uso na América do Norte. Aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos de tábuas de madeira classificadas pela máquina de tensões foram produzidos em 1996. A maior barreira para o crescimento do sistema de classificação mecânica por tensões é a competição comercial com a classificação visual. Os dois sistemas, que funcionam diferentemente podem “discordar” em qual classe a madeira deve ser alocada.

3.5.1 Classificação Visual da Madeira

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira diferem das propriedades mecânicas da madeira isenta de defeitos devido às características de crescimento, e que tais características podem ser

vistas e julgadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, as características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade.

De acordo com SHIMOYAMA (2005), o método visual é um dos mais simples, mais antigos e mais utilizados métodos não destrutivos para classificação de madeiras, permitindo identificar facilmente características como a cor e presença de defeitos, tais como podridões e nós, considerando-se o tamanho, número e localização dos mesmos. Esse método ainda é muito utilizado para uma classificação geral, com objetivo de eliminar problemas e defeitos graves da madeira que possam interferir significativamente nos processos de obtenção de produtos. Apesar de bastante útil, o mesmo apresenta algumas limitações, identificando apenas valores qualitativos, sendo que as reais condições do material podem não ser detectadas, uma vez que a avaliação fica limitada às faces externas da madeira, não garantindo sua performance durante o uso. Além disso, os parâmetros são bastante subjetivos, o que exige treinamento para realização das avaliações.

De acordo com a ASTM D245-93 (1998), a classificação visual da madeira é dividida em duas etapas distintas: atribuição de uma classe para cada peça de madeira a partir da identificação visual de certas características de crescimento, e a determinação das propriedades de resistência e rigidez para cada classe de uma determinada espécie.

As características de crescimento relacionadas aos critérios de medição estabelecidos na norma ASTM D245-93 (1998) e incorporados pelo SPIB (*Southern Pine Inspection Bureau*) para a elaboração de suas regras de classificação visual, assim como fazem as outras agências de classificação norte-americanas são: inclinação das fibras,

nós (em caibros e pranchas; em vigas e longarinas; em postes e colunas; em tábuas), Racha anelar e fenda, empenamento e densidade.

Segundo CARREIRA (2003), o sistema norte-americano de classificação visual estrutural foi desenvolvido como resultado da busca pelos projetistas por tensões admissíveis do material, que atendessem aos critérios de segurança e economia. Em 1923, o *USDA Forest Service* e o *Forest Products Laboratory* publicaram um conjunto de regras básicas de classificação, com alguns valores de resistência, os quais foram usados essencialmente sem alterações por mais de 20 anos. A partir de 1991, a norma norte-americana de dimensionamento de elementos estruturais, NDS (*National design specification for wood construction*) passou a adotar como valores de projeto para caibros e pranchas os resultados obtidos no programa “*In-grade*”.

MATSUNAGA (1995) cita que a norma brasileira que regulamenta os procedimentos de uso da madeira e de suas aplicações em estruturas é a NBR 7190 da ABNT de 1982, na qual não são estabelecidas ainda as especificações para a classificação visual, recomendando apenas que a classificação das peças deva ser feita provisoriamente de acordo com os critérios do boletim número 185 do *Forest Products Laboratory*.

A determinação das propriedades é baseada na resistência dos corpos de prova e na resistência dos elementos estruturais:

a) Baseado na resistência de corpos-de-prova

Nos Estados Unidos, a determinação das propriedades de dimensionamento da madeira foi baseada nas propriedades mecânicas de pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos (GREEN &

KRETSCHMANN, 1999). De acordo com GREEN (1998), os procedimentos para a determinação das propriedades mecânicas para o dimensionamento da madeira visualmente classificada foram estabelecidos inicialmente há 50 anos atrás. Eles envolvem os resultados de testes em pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos os quais são alterados por coeficientes de modificação para a derivação das propriedades de dimensionamento. Os ajustes são feitos para as dimensões dos nós e outros defeitos naturalmente decorrentes das características de crescimento.

Assim, cada propriedade de resistência de uma peça de madeira, visualmente classificada, é derivada do produto da resistência característica de corpos-de-prova isentos de defeitos (para cada espécie) pela razão de resistência da peça de madeira e pelos fatores de modificação.

b) Baseado na resistência de elementos estruturais

Uma nova filosofia de derivação das propriedades de dimensionamento foi desenvolvida para aplicação no programa norte-americano (*In-grade Test Program*) para a determinação das propriedades de resistência de peças estruturais. Para esta nova filosofia, de acordo com MADSEN (1992), os resultados dos testes devem, o mais fielmente possível, refletir as condições finais de uso das peças de dimensões estruturais. Assim, tomando-se como exemplo, elementos fletidos, se o pior defeito for posicionado na região tracionada da peça, na montagem da estrutura, então os piores defeitos devem ser propositalmente posicionados na região tracionada das peças, durante os testes; se não, um arranjo aleatório é o mais apropriado.

Conforme GREEN & EVANS (1987), o programa “*In-Grade*” foi composto por quatro partes principais: procedimentos de amostragem, determinação das características físicas e mecânicas, ajuste dos dados, e análise estatística.

3.5.2 Classificação Mecânica

GREEN & KRETSCHMANN (1999) descrevem que à classificação mecânica da madeira utilizando ensaios não destrutivos segue uma classificação visual para a determinação de certas características que a classificação mecânica não pode avaliar. A classificação mecânica permite a melhor classificação do material para determinadas aplicações em estruturas engenheiradas. Os componentes básicos do sistema de classificação mecânica são:

- classificação da resistência através de um sistema mecânico não destrutivo determinando as propriedades combinadas com as características visuais de crescimento;
- atribuição das propriedades baseadas na determinação da resistência;
- controle de qualidade para assegurar que as propriedades sejam obtidas de forma correta, sendo os procedimentos do controle de qualidade: adequação da operação da máquina utilizada na determinação não destrutiva, adequação da determinação do parâmetro resistência à flexão e, adequação as propriedades determinadas para tensão e compressão.

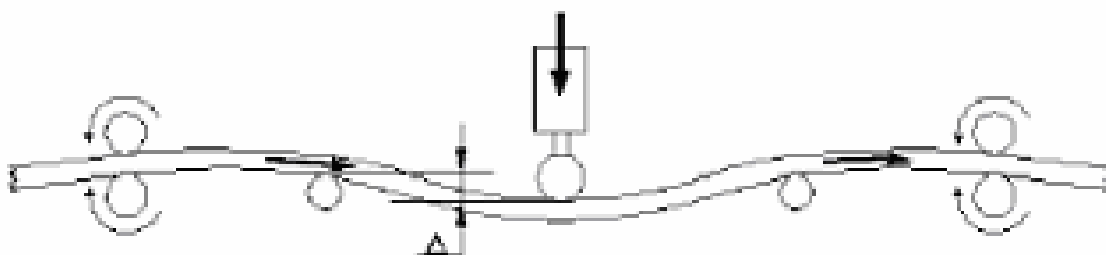
3.5.2.1 MSR (*Machine Stress Rating*)

O sistema de classificação pelo método MSR teve origem nos princípios que já eram conhecidos a mais de 20 anos. O maior empenho

trazido à cerca da praticidade do método industrial foi feito por empresas, associações e comunidade científica dos Estados Unidos e da Austrália. Cada uma das organizações produziu uma máquina de classificação comercial em anos anteriores a *machine stress grading* (1960 -1970), usando essencialmente o mesmo princípio da relação entre a dureza da peça e a resistência à flexão estática. Com o passar dos anos, o sistema mecânico de classificação foi reavaliado, de modo que o processo coexistiu com a análise visual primário devido a setor de classificação favorável da produção das empresas. (GALLIGAN & McDONALD, 2000).

O teste não-destrutivo utilizando a máquina MSR é altamente automatizado, e o processo requer pouco tempo. Ao entrar na máquina, a madeira passa por uma série de rolos. Neste processo, uma força provocando flexão é aplicada perpendicular ao eixo de menor inércia da seção transversal da peça e o módulo de elasticidade de cada peça é medido (Figura 6). Uma peça de madeira classificada desta maneira é conhecida como *MSR lumber*.

FIGURA 6 - CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS DE MADEIRA PELO SISTEMA MSR



Fonte: CARREIRA (2003)

Conforme GALLIGAN & MCDONALD (2000), alguns dispositivos medem o MOE e classificam a madeira, baseados no

deslocamento vertical que ocorre para um pequeno vão, inferior ao comprimento da peça de madeira; outros medem em relação a um pequeno vão, mas consideram a média dos resultados obtidos em todo o comprimento da peça. Como consequência, a maneira em que os dados são obtidos e a maneira com que eles são analisados e informados pelo dispositivo, influencia a especificação da classe de resistência. Por esta razão, a saída do dispositivo deve ser sempre calibrada com testes estáticos.

Segundo GALLIGAN & SNODGRASS (1970), devido ao fato da máquina de tensões selecionar a madeira em classes usando a medida mecânica de um estimador, o resultado são classes com menos variáveis na avaliação, se comparado com a classificação visual.

O MSR é um método pioneiro e um dos mais populares métodos não destrutivos utilizados para madeira. A avaliação das madeiras está baseada no princípio de correlação entre a resistência, representada pelo módulo de ruptura (MOR) e a elasticidade, obtida em teste de flexão estática, representada pelo módulo de elasticidade (MOE) (GORNIAK; MATOS, 2000). O parâmetro não destrutivo mais utilizado tem sido o MOE, algumas vezes associado à densidade aparente.

Segundo VÁSQUEZ (1996), o método de classificação através do MSR apresenta as seguintes limitações:

- o trabalho da máquina é restrito a seções transversais;
- os resultados podem ser afetados pela velocidade, tornando os resultados menos confiáveis;
- o seu uso não pode ser estendido ao controle de qualidade do material na floresta, sendo restrito a classificação de peças estruturais;
- é uma tecnologia complexa e cara.

Além do sistema MSR, tem-se o sistema MEL, os quais são diferenciados nos nomes das classes, controle de qualidade e coeficientes de variação ($MSR = 11\%$ e $MEL \leq 15\%$) para os valores do módulo de elasticidade (GREEN & KRETSCHMANN, 1999). Com relação ao controle de qualidade, o sistema MSR requer que uma amostra representativa do lote seja testada diariamente por no mínimo uma propriedade de resistência e o módulo de elasticidade a flexão na orientação de maior inércia da peça, sendo que o sistema MEL requer um controle diário da resistência à tração e testes para a determinação do MOR e da rigidez à flexão em relação ao eixo de maior inércia das peças.

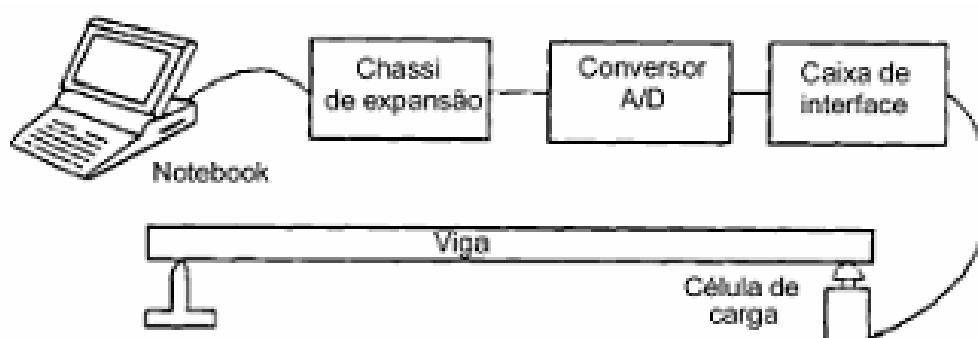
3.5.2.2 Vibração Transversal

A relação entre o módulo de elasticidade e a frequência de vibração de um teste não-destrutivo já é conhecida há quase 150 anos. Na primeira metade do século XIX, Savart, físico francês, foi o primeiro cientista a determinar o módulo de elasticidade de uma barra de ferro através de um teste de vibração. Algum tempo depois, Lager-Jhelm comparou o resultado obtido por Savart com valores obtidos através de ensaios de tração em barras de ferro. Acredita-se que esta foi à primeira tentativa de se comparar valores de constantes elásticas obtidas por meio de ensaios dinâmicos, com valores encontrados através de ensaios estáticos (TODHUNTER & PEARSON citados POR JAYNE, 1959). Para a madeira em particular, os trabalhos de KITAZAWA (1950) e BELL *et al.* (1950), citados por JAYNE (1959) demonstraram claramente a possibilidade do uso de características vibracionais para a estimativa do módulo de elasticidade estático.

Atualmente, o teste de vibração transversal é considerado uma técnica que apresenta valores confiáveis para o módulo de elasticidade e que pode ser usado em qualquer tipo de madeira, com qualquer seção transversal e, também, em madeira laminada colada ou, ainda, em painéis de madeira (MURPHY, 2000).

Uma vibração mecânica é produzida quando um sistema é deslocado de sua situação de equilíbrio estável. O sistema tende a retornar a esta posição sob a ação de forças restauradoras, mas geralmente atinge a posição original com uma certa velocidade, que o leva além desta posição. Em um sistema ideal e sem a presença de forças dissipativas, o sistema permaneceria indefinidamente em movimento oscilatório em torno de sua posição de equilíbrio. A Figura 7 ilustra um esquema de um equipamento para a determinação do Módulo de Elasticidade por meio da vibração transversal (CARREIRA *et al*, 2003).

FIGURA 7 - ESQUEMA DE UM EQUIPAMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DO MOE POR VIBRAÇÃO TRANSVERSAL



Fonte: ROSS *et al* (1996).

De acordo PAZ (1984) citado por CALIL & MINÁ (2003), a Equação 1 é usada para determinação do módulo de elasticidade e , a partir do conhecimento da frequência natural de vibração “ f ” (número de ciclos vibracionais por unidade de tempo), de uma viga simplesmente apoiada nas extremidades, submetida a vibração transversal livre.

Equação 1:

$$\text{MOE} = \frac{f^2 \cdot L^4 \cdot W}{(\pi/2)^2 \cdot I \cdot gL}$$

onde:

MOE - módulo de elasticidade

I - momento de inércia (m^4)

f - frequência natural de vibração (Hz)

L - comprimento da viga (m)

W - peso da viga (N)

g - aceleração da gravidade (m/s^2)

W/gL - massa por unidade de comprimento da viga

ROSS *et al* (2000) usaram o seguinte procedimento para a determinação do MOE para toras de pequeno diâmetro: as toras foram apoiadas, de um lado, por um suporte em forma de lâmina de faca e, do outro, por um suporte pontual. Um transdutor de deslocamento foi colado na parte superior do ponto médio da tora. Naquele local, a casca foi retirada ou lixada, para melhorar o contato entre o acelerômetro e a tora. Então, a peça foi colocada em movimento oscilatório através do impacto com um martelo de borracha no meio do vão. A vibração livre da tora foi observada em um osciloscópio. O sinal verificado foi uma série de pulsos com um gradual decrescimento

de amplitude. A frequência natural foi medida e o módulo de elasticidade foi determinado através da equação.

3.5.2.3 *Stress Wave*

Esta técnica vem sendo investigada há mais de 30 anos e tem sido utilizada para diversas aplicações na indústria de produtos florestais. É um método das ondas de tensão (*Stress Wave Method*) que consiste na aplicação de uma onda de tensão (impacto) no material e a análise do fenômeno de propagação desse estímulo. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesses casos (TARGA *et al*, 2005).

Segundo MATOS (1997), neste método, à aplicação e medição das ondas de tensão consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. Uma onda acústica é induzida ao material através do choque de um martelo, pêndulo ou outros materiais. Quando a onda alcança o acelerômetro de partida, uma contagem de tempo, em microssegundos, é iniciada no instrumento. Quando esta atinge o acelerômetro de parada, a contagem de tempo cessa e o aparelho registra e mostra o tempo decorrido de trânsito da onda de tensão, entre os acelerômetros, através do material.

A energia é dissipada como uma onda que passa através da barra; entretanto, embora a velocidade da onda seja constante, o movimento das partículas diminui com cada passagem sucessiva da onda. Eventualmente, todas as partículas da barra param de se movimentar.

Acompanhando o movimento de uma seção transversal próximo na extremidade, bem como em resposta a propagação da onda, resulta na formação da onda que consiste na vibração de espaços equivalentes

que decrescem exponencialmente com o tempo. A velocidade de propagação “C” bem como uma onda, pode ser determinada pela medição do tempo entre as vibrações Δt e o comprimento da barra L, conforme Equação 2:

Equação 2:

$$C = 2L / \Delta t$$

O Módulo de Elasticidade (Equação 3) pode ser calculado usando C e a densidade da barra ρ , ou seja, da peça de madeira que está sendo ensaiada;

Equação 3:

$$\text{MOE} = C^2 \rho$$

O decréscimo da onda calculada usando esta fórmula é altamente dependente das características de excitação do sistema usado. Desta forma, os resultados reportados por vários pesquisadores não podem ser diretamente comparados devido aos diversos sistemas de excitação que são utilizados. De forma geral, os resultados mostram que as características da energia perdida, medida pela técnica de *Stress Wave* fornecem informações pertinentes a performance do material a base de madeira.

A técnica de avaliação das propriedades da madeira, através de propagação de ondas de tensão, apresenta algumas vantagens sobre os outros métodos acústicos, especialmente no que diz respeito ao equipamento utilizado nas avaliações que é bem mais simples e portátil, facilitando a avaliação em qualquer local, inclusive no campo, com baixo custo, possibilitando a aquisição do mesmo por pequenas indústrias para avaliação não destrutiva de vários produtos de madeira.

Este método pode ser empregado para diferentes situações, desde a árvore em pé até os produtos finais obtidos (WANG *et al.*, 2001).

3.5.2.4 Ultrassom

Dentre as diversas técnicas empregadas de classificação de madeira por ondas acústicas, a técnica do ultra-som se destaca e se diferencia do sistema *Stress Wave* pelo maior controle das fontes emissoras de pulsos, sobretudo no que diz respeito às frequências das emissões. Além disso, pode ser considerada a mais promissora, na medida em que sua extensão à indústria se daria de uma forma mais imediata e direta, conforme mostram os exemplos internacionais (BALLARIN & GONÇALVES, 2001) e (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

A técnica de emissão ultra-sônica pode ser empregada de diversas maneiras, desde florestas até a avaliação de estruturas de madeira em serviço, (ROSS & PELLERIN 1994), inclusive na classificação e caracterização de peças de madeiras e materiais derivados durante o processo para obtenção dos mesmos.

O ultra-som, quando aplicado longitudinalmente em árvores torna possível uma primeira classificação mecânica. Aplicado radialmente o ultra-som pode detectar defeitos internos. SANDOZ (1994) citado por PELIZAN (2004) menciona que 80% a 90% da qualidade de toras medidas com ultrassom irão ser conservadas na madeira serrada. Logo este tipo de classificação interessa também à indústria de madeira laminada colada e madeira serrada, pois melhora a confiabilidade e o desempenho mecânico das vigas.

Entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento se comparado ao das máquinas de classificação automática, e o treinamento relativamente simples da

mão de obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados (OLIVEIRA, 2001).

Os aparelhos de ultra-som baseiam-se no geral, na relação entre a velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica na madeira e as propriedades mecânicas da peça. O equipamento pode ser usado para classificar lotes de madeira em diferentes categorias de rigidez e para estimar a resistência mecânica de uma peça individual. (OLIVEIRA et al, 2005).

A aplicação e medição de ondas ultrassônicas consistem no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda ultrassônica é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro transdutor, sendo a contagem de tempo realizada pelo próprio instrumento de ultra-som. O transdutor incorpora um elemento piezoelétrico que converte sinais elétricos em vibração mecânica. (OLIVEIRA et al, 2005). De acordo com CARREIRA et al (2003), a velocidade de propagação C pode ser determinada pela Equação 4.

Equação 4:

$$C = \frac{2 \cdot L}{\Delta t}$$

onde:

L = distância entre os pontos de emissão e recepção de onda;

Δt = tempo decorrido para onda atravessar a madeira (s).

O valor do MOE (Equação 5) pode ser determinado usando a velocidade de propagação C e a densidade do material ρ .

Equação 5:

$$\text{MOE} = C^2 \cdot \rho$$

onde:

C: velocidade de propagação da onda (m/s)

ρ = densidade da madeira (kg/m³)

De acordo com EMERSON *et al* (1998), a técnica de inspeção ultrassônica tem sido explorada para a detecção de características que reduzem a resistência da madeira tais como nós, inclinação de fibras e apodrecimento na madeira. Entretanto, a maioria das aplicações de inspeção ultrassônica para peças de madeira tem sido direcionada para estimar a qualidade de um produto no ambiente de produção, ao invés de condições locais de estruturas de madeira.

A Figura 8 apresenta um modelo de aparelho de emissão ultrassônica utilizado para avaliação não-destrutiva.

FIGURA 8 - EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO NÃO – DESTRUTIVA POR MEIO DE EMISSÃO ULTRA-SOM



Fonte: ROSS *et al* (1999).

De acordo com McDONALD et al (1990), altas correlações têm sido observadas entre o módulo de elasticidade obtido a partir das técnicas de ondas ultrassônicas e o encontrado no ensaio de flexão estática; sendo mais difícil de se relacionar o módulo de ruptura ao módulo de elasticidade obtido a partir da técnica. Como os defeitos na madeira afetam a inclinação das fibras, qualquer método que seja sensível a isso, terá alto potencial para determinar a resistência da madeira.

A propagação das ondas ultrassônicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular. A densidade da parede celular é razoavelmente constante, mas há variação do módulo de elasticidade devido a variações na estrutura da parede celular, e desse modo, pode-se esperar que os valores para a velocidade de propagação resultem em intervalos de acordo com as características anatômicas e presença de defeitos nas peças investigadas. (OLIVEIRA *et al*, 2005).

Entretanto, considerando-se o valor de umidade é constante ao longo da amostra. O aumento da densidade pode ser devido a maior deposição de celulose na face interna da parede celular. Esta deposição acarreta aumento mais significativo nos valores de rigidez do que nos valores de densidade da madeira. Dessa forma, mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo apreciável aumento da rigidez. A densidade da madeira, assim como a rigidez, é sensivelmente afetada pelo teor de umidade. Todavia, o efeito da umidade na rigidez é também muito mais expressivo do que na densidade. Portanto, as maiores velocidades ultrassônicas são geralmente alcançadas em espécimes de madeiras com maiores densidades e menores teores de umidade. (CARRASCO & AZEVEDO JÚNIOR, 2003).

A falta de homogeneidade da madeira limita a precisão da técnica do ultrassom. Se uma amostra apresentar fissuras internas, o pulso-sônico será atenuado por difusão nas interfaces, mas se a dimensão da descontinuidade for muito menor que o comprimento de onda, a alteração do pulso será pequena. A intensidade de uma onda ultrassônica diminui à medida que se afasta da fonte, sendo a diminuição da amplitude da onda no material denominada atenuação ou decréscimo acústico. (PELIZAN, 2004).

3.6 ASPECTOS TÉCNICOS DA CONSTRUÇÃO DE COMPOSTOS ESTRUTURAIS

3.6.1 Madeira Laminada Colada

O conhecimento da qualidade da madeira, desde as pesquisas iniciais foi considerado de grande importância, com influência significativa na resistência das madeiras laminadas coladas. A adoção de critérios de classificação e do posicionamento das camadas em uma peça laminada, de acordo com a qualidade da madeira foram as principais preocupações dos pesquisadores e objetivos de muitos estudos. Com a evolução das técnicas de confecção, para obter altas resistências e para o aproveitamento e madeiras de qualidades diferenciadas, foram desenvolvidos critérios de classificação por provas de carga associados ao processo de classificação visual e mecânica.

3.6.1.1 Escolha da Madeira

A madeira pode ser considerada um excelente material estrutural, reconhecida por sua resistência mecânica elevada e baixa densidade quando comparado com outros materiais como o aço.

Segundo BAUER (1985), o emprego da madeira de uma determinada espécie em uma determinada obra somente poderá ser conduzida, com economia e segurança, se forem conhecidos e levados em consideração os valores estatísticos e a dispersão que definem a variabilidade de suas propriedades. Esse conhecimento indispensável é adquirido dos resultados de numerosos ensaios de qualificação do material sobre amostras representativas do lote de madeira, da espécie ou do gênero. Tais ensaios de qualificação devem levar em consideração todos os fatores de alteração das características do material como:

- a estrutura anatômica e a constituição do tecido lenhoso, responsáveis pelo comportamento físico-mecânico da madeira, que varia de espécie para espécie;
- a densidade de massa, também variável dentro de espécies, a qual está estreitamente relacionada às demais propriedades da madeira;
- a localização da amostra na árvore, que diferenciam as suas direções radial e longitudinal;
- as variações que decorrem do procedimento desenvolvido na execução dos ensaios como a forma, dimensões dos corpos de prova, orientação das solicitações em relação aos anéis de crescimento, velocidade de aplicação das cargas nas solicitações mecânicas e as condições de vinculação dos corpos de prova à máquina de ensaio.

Na produção de peças laminadas coladas estruturais, os dois principais componentes são o adesivo e a madeira. Para o adesivo, são

necessárias diferentes classes e técnicas para assegurar alta resistência e durabilidade da linha de cola. Para a madeira, as propriedades gerais são conduzidas de acordo com a necessidade da engenharia e indústria, resumindo-se nas características básicas, como auxílio prático, para a melhor utilização da madeira como um material estrutural (FREAS & SELBO, 1954).

HELLMEISTER (1982) afirmou ser a densidade a propriedade física mais significativa para caracterizar madeiras destinadas à construção civil, à fabricação de chapas ou à utilização na indústria de móveis. Sendo assim, apresenta como conceito físico, o da quantidade de massa contida na unidade de volume. SHIMOYAMA & BARRICHELO (1991) apresentaram a densidade como um dos mais importantes parâmetros para avaliação da qualidade da madeira, por ser de fácil determinação e estar relacionada às demais características do material.

HUMPHREYS & CHIMELO (1992) afirmaram que todas as demais propriedades da madeira estão relacionadas à sua densidade, sendo esta o principal ponto de partida no estudo da madeira, para as mais diversas formas de utilização.

Pesquisas desenvolvidas mostram que para os elementos estruturais em Madeira Laminada Colada devem ser utilizadas espécies de madeira que apresentem densidade compreendida entre $0,40\text{g/cm}^3$ e $0,75\text{g/cm}^3$. As espécies mais indicadas são as madeiras do gênero *Pinus spp* que, segundo a norma NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira, apresentam densidade em torno de $0,5\text{ g/cm}^3$. Madeiras que apresentem coeficientes de retração muito diferentes segundo as direções radial e tangencial, não devem ser utilizadas na composição (FIORELLI, 2005).

Há um consenso entre os pesquisadores ligados à engenharia florestal que, na produção de celulose e chapa de madeira aglomerada, devem ser aproveitados os resíduos das serrarias, das laminadoras e dos desbastes florestais, em geral com diâmetro reduzido. Desta forma, as madeiras com melhores propriedades intrínsecas (físico-mecânicas) seriam utilizadas na construção civil e, dentro dela, na construção de estruturas. Esta posição é perfeitamente compatível com idéia de uso múltiplo dos produtos florestais, garantindo-se maior rentabilidade através da adoção de técnicas silviculturais e de manejo adequado. (PINHEIRO & LAHR, 1999).

3.6.1.2 Produção das Lâminas

As toras processadas na serraria passam por um processo de desdobro principal, o qual é composto geralmente por equipamentos que demandam muita energia como serras de fita e serras circulares, transformando em peças de menor dimensão, facilitando o processo no desdobro secundário que visa o dimensionamento final das peças através de resserras, refiladeira e destopadeiras. No final desta etapa, realiza-se o gradeamento que estabelece os espaços por onde a água será evaporada das peças, preparando as peças para a secagem.

Para se obter um alto grau de qualidade com espécies susceptíveis aos agentes biodegradadores, principalmente na produção de madeira serrada, laminados e compensados são necessários cuidados e técnicas de preservação, os quais têm início já no momento em que a árvore é derrubada. Porém, em função de uma série de dificuldades impostas pela própria floresta, muitos procedimentos que são recomendados, tornam-se operacionalmente impraticáveis (ROCHA, 2000).

Com relação às vigas de Madeira Laminada Colada, as tábuas empregadas no processo de fabricação devem ser tratadas antes da colagem, utilizando produtos como o CCA (Arseniato de Cobre Cromatado) ou o CCB (Borato de Cobre Cromatado), sendo os mesmos aplicados em autoclave sob a aplicação de pressão / vácuo.

3.6.1.3 Espessura das lâminas

O uso de tábuas de maior espessura é mais econômico porque se terá menor consumo adesivo, menor número de horas trabalhadas e economia do material. Por razões tecnológicas a espessura é limitada a 50 mm. A limitação no uso de tábuas de maior espessura deve-se a dificuldades de secagem, principalmente (MATOS, 2000). A AITC recomenda espessura de 19 a 38 mm. Peças com espessuras maiores que 50 mm podem apresentar problemas de secagem, com possível surgimento de rachaduras.

3.6.1.4 Umidade das Lâminas

A resistência da madeira varia com seu teor de umidade. Com o aumento do teor de umidade da madeira observa-se uma diminuição em sua resistência, esta diminuição de resistência é mais sensível para baixos teores de umidade, ou seja, abaixo do ponto de saturação das fibras, e é praticamente desprezível para elevados teores de umidade, onde as propriedades de resistência permanecem constantes.

A antiga norma brasileira, NBR 7190 - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas da ABNT (1982), baseada no método determinista das tensões admissíveis, simplificava este problema ao recomendar que durante o

projeto se considerasse a madeira verde, com umidade acima do ponto de saturação das fibras, situação em que a resistência fica praticamente constante. Com essa postura o dimensionamento subestimava a resistência da madeira, pois uma estrutura de madeira raramente estará em serviço como madeira verde, à exceção de estruturas submersas. No início da construção a madeira pode até estar verde, mas ela secará ao longo da construção, e em serviço terá um teor de umidade muito inferior ao da madeira verde, e portanto, apresentaria uma resistência bem superior. (LOGSDON & CALIL JÚNIOR, 2002).

A nova versão da norma brasileira, NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira, da ABNT (1997), baseada no método probabilista dos estados limites, a exemplo da maioria das normas internacionais, adota a umidade de referência de 12%. Uma espécie, ou peça, é considerada mais resistente que outra, a uma determinada solicitação, se sua resistência, ao teor de umidade de referência de 12%, for superior. (LOGSDON & CALIL JÚNIOR, 2002).

Alguns autores, como GREEN & PELLERIN (1991) e MADSEN (1992), mostram que a relação resistência-umidade pode ser diferente para propriedades diferentes ou para madeiras de qualidade diferente. A resistência à compressão paralela às fibras é, segundo MADSEN (1992), altamente sensível à variação do teor de umidade, já a resistência à tração paralela às fibras e o módulo de elasticidade são menos sensíveis, enquanto que a resistência à flexão dinâmica, praticamente não é afetada pela variação do teor de umidade. LIMA *et al.* (1986) observaram, para o *Eucalyptus saligna*, que não há dependência da resistência à tração normal às fibras com a variação do teor de umidade. MADSEN (1992), por sua vez, concluiu para o "*Southern pine*", que as propriedades de tração e compressão normal são altamente sensíveis à variação do teor de umidade. Outro ponto

importante a ser ressaltado é o desenvolvimento do processo de secagem. (LOGSDON & CALIL JÚNIOR, 2002).

Processos de secagem mais severos, segundo GREEN & PELLERIN (1991), causam maiores gradientes de umidade no corpo de prova e devem ser evitados.

De acordo com SZUCS (1992) a secagem das tábuas é necessária para se conseguir um melhor efeito na etapa de colagem. Neste sentido, é preciso que as tábuas para a composição da Madeira Laminada Colada estejam com um teor de umidade entre 7% e 14%. FREAS & SELBO (1954) consideram satisfatório um teor de umidade de 8 a 10% para colagem de vigas de uso interior e de 12 a 15% para uso exterior. Ambos salientam que é importante que não haja diferença entre teor de umidade de tábuas adjacentes de mais de 5%. Para CHUGG (1964) esta diferença não deve exceder 3%.

3.6.1.5 Classificação das Lâminas

Segundo ASTM D 3737/96 – *Standard TST Method for Establishing for Structural Glue Laminated Timber* (Glulam), da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1996) citada por FIORELLI (2005), a qualidade das lâminas influencia significativamente na resistência de vigas. A adoção de critérios para a classificação das lâminas e posterior posicionamento na viga, colocando as de melhor qualidade nas faces mais externas e as de qualidade inferior próximas à linha neutra, garante um aumento da resistência e da rigidez dos elementos estruturais. Deve-se evitar a disposição de lâminas orientadas em sentido radial e tangencial dentro da mesma viga em função da retratibilidade diferenciada das peças.

A classificação das lâminas que será utilizada na composição da viga de Madeira Laminada Colada deve ser realizada visualmente e mecanicamente através de métodos já descritos anteriormente como o Sistema MSR, Vibração Transversal, *Stress Wave* e Ultrassom.

Associando as informações das características visuais da madeira com as de módulo de elasticidade, pode-se melhorar substancialmente o desempenho das estruturas. Alguns dos trabalhos feitos no Brasil com classificação mecânica da madeira devem ser destacados. ARRUDA (1995) compararam dois grupos de seis vigas, construídas com madeira de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, cujas lâminas foram classificadas ou não pela rigidez. Eles encontraram valores de resistência e módulo de elasticidade de 24,47 MPa e 7.431 MPa nas vigas com lâminas não classificadas e 47,56 MPa e 13.646 MPa, nas vigas de lâminas classificadas. (NASCIMENTO et al, 2001).

FURIATI (1981) verificou ser possível classificar a madeira de acordo com a sua resistência, através do conhecimento do módulo de elasticidade. O MOE é determinado através de ensaio de flexão não destrutivo. Conforme MATOS (2000), a partir de uma distribuição normal, foram definidas as categorias:

- 1ª categoria: MOE \geq 10528 MPa
- 2ª categoria: 8496 MPa \leq MOE $<$ 10528 MPa
- 3ª categoria: 6666 MPa \leq MOE $<$ 8496 MPa
- Refugo: MOE $<$ 6666 MPa

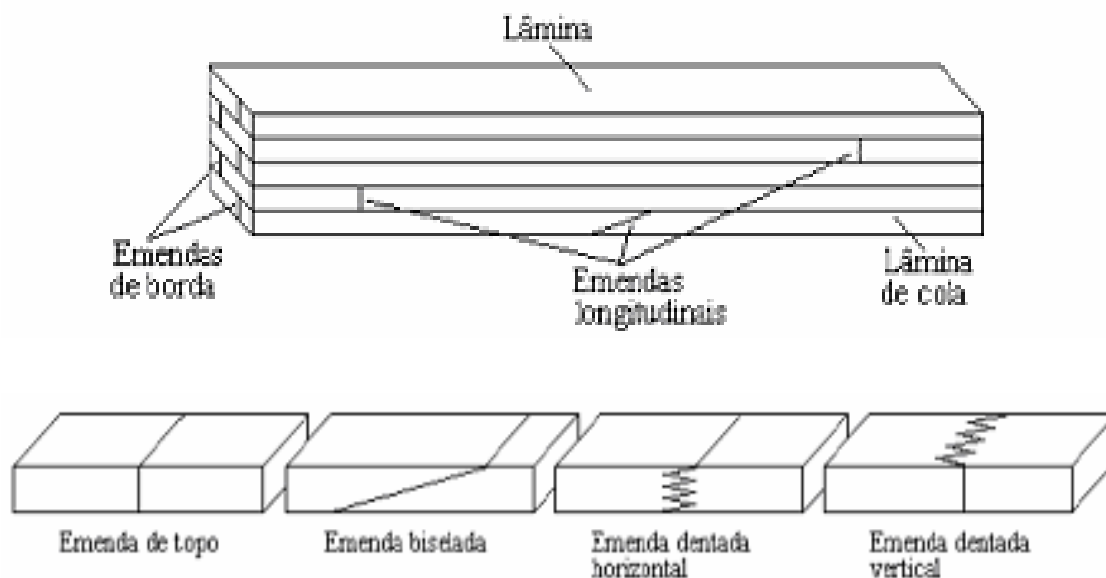
3.6.1.6 Fabricação das Emendas

Os elementos em Madeira Laminada Colada de dimensões consideráveis necessitam de comprimento suficientemente grande, que pode ser obtido por meio da união transversal de peças de dimensões

menores que a dimensão final do elemento. (FIORELLI, 2005). Essa técnica permite a construção de vigas com mais de 43 metros de vão livre (MOODY & HERNANDEZ, 1997).

As primeiras emendas a serem utilizadas foram às emendas de topo, de fácil execução, mas pouco eficiente na resistência, quando solicitadas. As emendas em bisel foram utilizadas amplamente, devido a sua grande eficiência como agente de ligação estrutural; mas hoje, em nível industrial, caíram em desuso, pois com o surgimento das emendas dentadas, estas representam um grande desperdício de madeira, principalmente para menores inclinações (Figura 9).

FIGURA 9 - EMENDAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA



Fonte: FIORELLI (2005)

Atualmente as emendas dentadas são as emendas mais utilizadas pelas empresas que produzem elementos estruturais de madeira em laminado colado. (NASCIMENTO *et al*, 2002).

As emendas apresentam uma descontinuidade do material e conseqüentemente são regiões consideradas potencialmente fracas. Deste modo, as emendas em MLC representam, entre outros, um dos mais importantes fatores das características de resistência e elasticidade dos elementos estruturais de MLC. Três são os tipos mais comuns de emendas longitudinais em MLC, cada um dos quais apresenta suas intrínsecas vantagens e desvantagens. Alguns dos fatores que regem a utilidade destas emendas são: a resistência, a facilidade e economia de produção, aparência e para o caso da MLC, principalmente e a uniformidade de desempenho. (MACÊDO E CALIL JÚNIOR, 1999).

a) Emendas de topo

As emendas de topo são de fácil execução, porém são as menos eficientes, e não devem ser empregadas no processo de fabricação de elementos estruturais em Madeira Laminada Colada.

As emendas de topo são as mais simples emendas longitudinais e, apesar de não desperdiçarem madeira, apresentam baixíssima resistência mecânica. Alguns autores consideram até que este tipo de emenda praticamente não transmite esforços, não sendo recomendáveis. (MACÊDO E CALIL JÚNIOR, 1999)

NORDSTROM (1995) estudou a resistência à flexão de madeira de *Picea sp* - unidas de topo utilizando adesivo resorcinol, a qual atingiu o valor de 17,8 MPa o que corresponde a 20% da resistência à flexão da madeira sólida. (NASCIMENTO et al, 2002).

b) Emendas biseladas

As emendas biseladas surgiram como uma boa alternativa para suprir as limitações de resistência das emendas de topo, sendo consideradas as mais resistentes emendas longitudinais. Contudo, do ponto de vista de produção, este tipo de emenda é muito dispendioso, uma vez que, para atingir uma boa proporção da resistência da madeira maciça, é necessário que o corte do bisel apresente uma baixa inclinação, da ordem de 1:10. Isto faz com que este processo gere um consumo excessivo de madeira e adesivo, além das dificuldades inerentes ao corte do bisel e montagem das lâminas, como alinhamento e prensagem, prejudicando a velocidade de produção (FREAS & SELBO, 1954).

A inclinação da emenda em bisel é o fator mais importante no que se refere à melhoria da resistência. Segundo o FOREST PRODUCTS LABORATORY (1999), juntas bem coladas, emendadas em bisel, solicitadas à tração ou à flexão, têm atingido os seguintes índices de resistência relativa: inclinação 1:12, 90%; 1:10, 85%; 1:8, 80% e 1:5, 65%. De acordo com pesquisas feitas com emendas em bisel, para uso estrutural, as resistências relativas médias à flexão oscilaram entre 77 e 90%. Essa variação depende de vários fatores, tais como o tipo de adesivo, a densidade da madeira, a temperatura de colagem, a qualidade da superfície, a inclinação da emenda, o tipo de madeira, etc.

MANTHIESSEN (1998) estudou emendas em bisel para madeira de baixa e alta densidade e obteve bons resultados de eficiência relativa. ABRAÃO (2001) fez uso de emendas de topo em vigas e colunas num estudo de redução de área colada. NASCIMENTO et al. (2001) encontrou bons resultados para inclinação do bisel em 1:10 para

madeira de pinus. O ressurgimento do interesse por estes tipos de emendas se dá devido à facilidade de execução, não necessidade de utilização de equipamentos dispendiosos e bons resultados encontrados em pesquisas preliminares. (NASCIMENTO et al, 2002).

c) Emendas dentadas

As emendas dentadas foram desenvolvidas com o objetivo de substituir as emendas biseladas. Atualmente, recomenda-se a utilização desse tipo de emenda por parte dos produtores de Madeira Laminada Colada, devido ao fato da mesma reunir condições de boa resistência e de praticidade de produção.

Quanto à geometria das emendas dentadas, deve ser compatível com o esforço solicitante e definida em função do seu comprimento, inclinação de seus flancos e espessura de sua extremidade. (FIORELLI, 2005).

Segundo SELBO (1963), para se atingir a mais alta resistência da emenda dentada, a ponta dos dentes deve ser tão fina quanto possível, isto é, dentro dos limites práticos dos cortadores. A relação comprimento/largura deve ser consideravelmente grande, de maneira a garantir uma adequada área de cola da emenda, desenvolvendo assim a resistência necessária ao cisalhamento.

Para MACEDO (1996) o comprimento de 20 mm, correspondente à especificação da DIN 68140 (1971), foi amplamente utilizado na fabricação de Madeira Laminada Colada.

De acordo com HERNANDEZ (1998), a emenda mais eficiente é a dentada e os perfis destes tipos de emendas são os mais utilizados na América do Norte pela Indústria de Madeira Laminada Colada, tanto os perfis verticais, quanto os horizontais.

A explicação para a grande aceitação das emendas dentadas justifica-se pela sua adaptação ao processo industrial, além de sua boa resistência mecânica. Segundo EBY (1968) mencionado por MACÊDO & CALIL JÚNIOR (1999), 90% das indústrias de MLC nos Estados Unidos já utilizavam as emendas dentadas na produção de seus elementos estruturais. O sucesso da emenda dentada se deve ao fato de que este tipo de emenda, mesmo necessitando de equipamentos específicos para sua produção, facilita a retirada de defeitos da madeira, a aplicação de adesivo e a pressão de colagem, otimizando deste modo, a produção dos elementos estruturais de MLC. Um outro ponto positivo das emendas dentadas é que estas apresentam resultados de resistência mais uniformes que as emendas biseladas.

De acordo com MATOS (2000) a resistência mecânica da emenda dentada é obtida pelo equilíbrio entre a resistência ao cisalhamento, no plano de colagem, e a resistência à tração da madeira.

Para garantir a eficiência das emendas dentadas é necessário um rigoroso controle no processo de produção. Além da execução correta dos dentes, que garantirão um perfeito encaixe das emendas, é necessário aplicar uma quantidade correta de adesivo, além do controle da pressão nas lâminas.

Outro fator que deve ser levado em consideração para garantir a qualidade do produto de Madeira Laminada Colada refere-se ao espaçamento entre as emendas. Para as emendas de lâminas adjacentes, SZUCS (1992) recomenda a seguinte distribuição.

a) as lâminas mais externas, ou seja, que se encontram na quarta parte externa da altura da seção transversal da peça, deve-se espaçar as emendas de lâminas vizinhas de no mínimo 20 vezes a espessura da lâmina.

b) na metade central da peça, o espaçamento entre emendas de lâminas vizinhas deve ser de no mínimo 12 vezes a espessura da lâmina;

HERNANDEZ (2002) recomenda um espaçamento entre emendas de uma mesma lâmina, superior a 1800 mm e para lâminas adjacentes um espaçamento mínimo de 150 mm.

A Norma Brasileira NBR 7190/97 estabelece como espaçamento mínimo entre emendas adjacentes, igual a 25 vezes a espessura da peça.

No caso de uso de emendas dentadas pode-se calcular o esforço admissível da emenda por tração e compará-lo com o esforço admissível na lâmina emendada. Pode-se admitir emendas dentadas nas lâminas internas da zona comprimida com uma resistência igual a 0,65 da resistência da lâmina. Na lâmina externa da zona comprimida a emenda deve ser de cunha ou dentada, e deve ter resistência igual a da própria lâmina. (MATOS, 2000).

3.6.1.7 Aplicação do Adesivo

Na colagem das peças de Madeira Laminada Colada deve-se levar em consideração a pressão a ser aplicada na viga para garantir uma eficiência na colagem das lâminas. Segundo HENRIQUE DE JESUS (2000), para madeiras de densidade inferior ou igual a $0,5 \text{ g/cm}^3$ deve-se utilizar uma pressão de colagem igual a 0,7 MPa e para madeira de densidade superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$ pressão igual a 1,2 MPa, ou então atender a recomendação do fabricante de cola.

SZCUS (1992) relata que para cola de caseína, a França e a Suíça recomendam uma pressão entre 0,5 MPa e 0,8 MPa. Para uréia-formol, a França recomenda 0,7 MPa à 1 MPa, para junta fina e 0,3 MPa à 0,5 MPa para junta espessa. Para cola de resorcina os norte americanos

recomendam uma pressão de 1,3 MPa e os franceses entre 1,5 e 1,7 MPa. Já o Canadá recomenda a aplicação de 0,7 MPa em todos os casos.

Segundo MATOS (2000), a pressão aplicada para Madeira Laminada Colada deve ser de 7 kgf/cm² a 14 kgf/cm² segundo recomendado pelo Forest Products Laboratory, de Madison. Estas recomendações têm como finalidade obter uma pressão mínima para colagem, evitando danos à madeira sob altas pressões.

Normalmente utiliza-se no processo o adesivo à base de resorcinol, em solução de álcool ou água, especialmente recomendado para colagens resistentes à água fria ou fervente, muitos solventes orgânicos, a fungos e mofo, ao calor seco ou úmido. Desta forma, é totalmente à prova d'água, indicado para colagem de madeira pelo processo de cura a frio. Dentre suas aplicações, destacam-se barcos, escadas, caixas d'água, hélices, vigas de MLC entre outros, onde a colagem ficará exposta temporária ou definitivamente à ação de intempéries (MACÊDO & CALIL JÚNIOR, 1999). Os tempos de montagem e prensagem variam em função da temperatura (Quadro 5).

QUADRO 5: TEMPO DE MONTAGEM E PRENSAGEM PARA MADEIRA LAMINADA E COLADA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Temperatura (°C)	Tempo de Montagem (minutos)	Tempo de Prensagem (horas)
20	75	8 a 10
24	----	6 a 8
27	50	4 a 6
32	32	4 a 5

Fonte: MATOS (2000)

Em não havendo outra indicação, para adesivo fenol-resorcinol, a prensagem deve ser mantida por um período mínimo de 12 horas, tomando-se por base um ambiente com temperatura de 20°C e teor de umidade relativa de 65%. Este valor pode variar dependendo do tipo de adesivo. Após o período de prensagem, a retirada da pressão deverá ser gradativa e alternada ao longo da peça.

Segundo experimentos desenvolvidos por CARRASCO (1989), têm-se as seguintes recomendações:

- tempo de penetração mínima: 10 minutos para madeira dura e 6 minutos para madeira mole.
- pressão mínima: 600 KPa (6,12 kgf/cm²);
- tempo de prensagem: 4 a 10 horas;
- quantidade: 350 g/m² a 400 g/m² com aplicação em ambas as faces;
- tempo requerido após a prensagem: 8 a 10 dias na temperatura ambiente para alcançar a máxima resistência na linha de cola.

3.6.1.8 Dimensionamento das Vigas de Madeira Laminada Colada

O dimensionamento de estruturas de madeira laminada considera uma série de fatores que não existem numa estrutura de peças maciças. Por outro lado, permite a montagem das vigas segundo a resistência das lâminas (tábuas) possibilitando a execução de projetos econômicos e versáteis. Devem ser considerados vários fatores ao se calcular os esforços de trabalho da peça laminada como as emendas transversais, altura da viga, forma da peça, curvatura, nós, e fibras irregulares. (MATOS, 2000).

Os critérios normativos para dimensionamento das Vigas de Madeira Laminada Colada são da NBR 7190-97 (1982) – Projetos de Estruturas de Madeira, da ASTM D 3737/96 – *Standard Practice for*

Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (Glulam) e do EUROCODE 5.

Segundo a NBR 7190/97 as peças de Madeira Laminada Colada devem ser dimensionadas segundo as recomendações estabelecidas para peças de madeira maciças, porém deve ser considerado um fator de redução da seção resistente das lâminas emendadas, utilizando coeficientes em função do tipo de emenda que a peça apresenta.

A norma D 3737/96 utiliza o conceito de seção transformada para avaliação da rigidez, considerando um comportamento elástico linear do material. Para a determinação da resistência, é utilizado o método empírico desenvolvido por FREAS & SELBO (1954). Este método considera um comportamento elástico linear da madeira, sendo a resistência à flexão (Equação 6) diminuída por meio de um coeficiente obtido em função da relação ($R = I_k / I_g$) como apresentado na equação. Os termos da relação (I_k e I_g) são, respectivamente, os momentos de inércia dos nós presentes na seção transversal crítica e da seção transversal total da viga.

Equação 6:

$$SMF_b = (1 + 3R) \times (1 - R)^3 \times (1 - R/2)$$

onde:

SMF_b : fator modificador da resistência à flexão;

R: I_k / I_g

Para a obtenção do índice de resistência à flexão é considerado o valor de resistência à flexão de corpos de prova isentos de defeitos, apresentado pela norma ASTM D2555-96 – *Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*, multiplicando-os pelos fatores de ajuste, de

acordo com o Quadro 6 e por 0,743 para relacioná-los às condições padrões de 30 cm de altura, viga bi-apoiada com carregamento uniformemente distribuído e com relação vão : altura igual a 21.

QUADRO 6 - FATORES DE AJUSTE DA RESISTÊNCIA DE CORPOS DE PROVA ISENTOS DE DEFEITOS

Propriedade	Coníferas	Dicotiledôneas	Fator de correção para teor de umidade de 12%
Flexão	0,476	0,435	1,35
Compressão paralela	0,526	0,476	1,75
Módulo de Elasticidade	1,095	1,095	1,20
Cisalhamento horizontal	0,244	0,222	1,13

Fonte: ASTM D 3737/96

Para a determinação da resistência à flexão de vigas de Madeira Laminada Colada, deve-se multiplicar o índice de resistência à flexão (BSI) pelo fator de modificação da resistência à flexão SMF, conforme apresentado na Equação 7.

Equação 7:

$$f_m = BSI_m \times SMF_m$$

onde:

f_m = resistência de cálculo à flexão para um elemento da MLC;

BSI_m = índice de resistência à flexão;

SMF_m = fator modificador da resistência à flexão.

O valor da rigidez à flexão de elementos laminados horizontalmente deve ser igual a 95% do valor calculado pelo método da seção transformada (ASTM D 3737/96).

Para o dimensionamento de vigas de Madeira Laminada Colada o EUROCODE 5, cita que estes elementos estruturais devem ser dimensionados como vigas maciças e para situações em que a viga apresenta altura menor que 600 mm, o valor da resistência característica à flexão ($f_{m,k}$), Equação 8, deve ser aumentado por meio da multiplicação da mesma pelo fator K_b , onde:

Equação 8:

$$K_b = \min(1,1(600/h)^{0,1})$$

onde:

h: altura da viga em mm

3.6.2 Vigas com Perfil em I

3.6.2.1 Aspectos Gerais

No entendimento dos projetistas das vigas com perfil I, o desenho da seção é favorável à economia de material, representada pelas pequenas espessuras das almas, uma vez que a distribuição das maiores intensidades das tensões sobre a altura das vigas se dá nas extremidades, onde estão posicionadas às flanges, evidentemente compostas por materiais que oferecem maior resistência às cargas transversais.

A disposição perpendicular do material da alma é mais um fator favorável, visto que há uma maior relação da resistência às cargas transversais com a altura da seção, que com a largura desta; e caso das

vigas em “I”, o aumento desta altura depende de uma quantidade menor de material (FISSETTE, 2007).

Diversos tipo e tamanhos de vigas “I”, fabricadas por grandes e pequenos produtores estão disponíveis comercialmente no mercado norte-americano, todas tratadas quanto à resistência ao fogo e ao ataque de organismos xilófagos. Cada um destes tipos apresentam uma combinação diferente de materiais para as flanges e almas, mas todos podem e devem atender às imposições do Comitê Nacional da Construção em Madeira (KRYGIER; BARNECUT, 2002 citados por PEDROSA, 2003).

3.6.2.2 Flanges

As flanges podem ser tanto de madeira sólida como de compostos estruturais como o PLP (Painel de Lâminas Paralelas). A superior e a inferior devem ser iguais e seu dimensionamento nominal depende do material, espécie e outros fatores de cada um destes materiais, como por exemplo o tipo de resina (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2006).

A importância das flanges está relacionada com o fato delas constituírem os dois extremos das alas da seção, que são as duas partes da viga que sofrem as maiores tensões proporcionadas pelas cargas incidentes. Na extremidade superior ocorre a maior taxa de compressão, enquanto que na inferior a de tração (FISSETTE, 2007).

3.6.2.3 Alma

A alma deve ser constituída de painéis estruturais, como é o caso do compensado e do OSB, que devem estar classificados como

Exposição 1 ou Exterior, e serem mais espessos que 3/8 pol (9 mm), segundo as normas de padronização destes materiais. Todas as vigas devem ser confeccionadas com a colagem por adesivos de uso exterior, resistentes à umidade e com alto grau de polimerização, como o fenol-formaldeído e a resorcinol-fomaldeído (ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2006)

A matéria-prima utilizada na fabricação de ambos é gerada diretamente a partir do corte de toras. Neste sentido o OSB leva vantagem, porque as toras para a geração das partículas “*strand*” não precisam responder a requisitos como diâmetro e forma, necessários para a laminação. A desvantagem do OSB se apresenta quando se trata da espécie desta matéria-prima, que por razões de formação dentro do processo não pode possuir densidade muito alta, o que não ocorre com o compensado (STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION, 2006)

O posicionamento vertical da alma é responsável pelo alcance da altura na viga, um dos fatores de maior importância na relação entre as dimensões e a resistência à deflexão entre outras características. Tal importância fica evidente quando a altura, relacionada com a distância entre os pontos de ação e reação nos testes, basta para a definição da dimensão do corpo de prova (ASTM, 1999). Este posicionamento também é responsável pela economia de material, quando comparada com vigas sólidas de seção retangular.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de confecção das vigas estruturais de Madeira Laminada Colada e Perfil I foi desenvolvido na BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, a qual está situada no município de Lages, estado de Santa Catarina. Já os ensaios tecnológicos foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Escola de Florestas da Universidade Federal do Paraná.

4.1 MATÉRIA - PRIMA

4.1.1 Madeira

Para a confecção das vigas estruturais foram utilizadas 1088 peças de madeira serrada provenientes de reflorestamentos da Empresa BATTISTELLA, as quais estavam divididas em 4 pacotes de 272 peças que apresentavam inicialmente 32 mm X 128 mm X 2050 mm de dimensões nominais e teor de umidade médio de 12%, conforme pode ser observado na Figura 10.

FIGURA 10 - MADEIRA PARA A PRODUÇÃO DAS VIGAS



FONTE: O autor

4.1.2 Adesivos

- Resorcina Fenol Formaldeído com catalizador (RFF - Cascophen RS 216-M), sistema líquido / pó da Hexion. O Cascophen RS-216-M é um adesivo sintético à base de resorcinol formol, em solução álcool/água, recomendado para colagens à prova d'água, fria ou fervente, diversos solventes orgânicos, fungos e calor. Formulado para colagens de madeira (inclusive alguns tipos tratadas com preventivos contra fogo), chapas duras e outros materiais semelhantes, proporcionando uma liga durável. Usada para trabalhos navais, hidráulicos, onde a colagem deverá ficar exposta à ação das intempéries e água.

- Melamina Uréia Formaldeído com catalizador (MUF 1242 / 2542), sistema líquido / líquido da Akzo Nobel. O adesivo Melamina Uréia Formaldeído é classificado como polímero termorrígido, produzido por uma reação de condensação entre a melamina, a uréia e o formaldeído. O MUF pode ser formulado para proporcionar vários graus de resistência à água e ao tempo para uso externo, interno e na presença de umidade. É utilizado em chapas de aglomerado que exijam maior resistência à água, MDF, portas, divisórias e outros painéis.

- Poliuretano (PUR - Purbond HB 222) sem catalizador da National Starch & Chemical Industrial Ltda. Segundo BUSTOS *et al.* (2003), os adesivos a base de isocianatos, tais como os poliuretanos, estão ganhando aceitação na América do Norte para uma variedade de aplicações estruturais e não estruturais. As ligações com estes adesivos apresentam melhor resistência à fluência, à umidade, aos tratamentos com exposição ao calor e, além disso, a cura pode ser feita em condições ambientais. Por estas razões, o adesivo poliuretano é uma alternativa viável para aplicações em madeira com emenda dentada.

4.1.3 Chapas de OSB

Para a alma das vigas em I foram utilizadas 8 chapas de OSB com dimensões de 18 mm X 1600 mm X 2500 mm, cedidos pela Empresa Masisa de Ponta Grossa - PR.

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

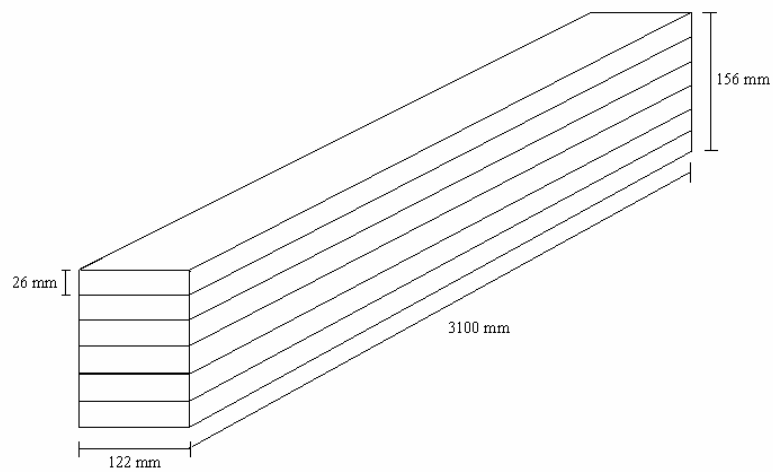
O delineamento experimental envolveu a confecção de 55 vigas estruturais distribuídas em 6 tratamentos, conforme apresentado no Quadro 7.

QUADRO 7 - TRATAMENTOS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO COM VIGAS ESTRUTURAIIS

Tratamento	Adesivo	Viga Estrutural	Número de Vigas
1	RFF	MLC	10
2	RFF	Viga em I	10
3	MUF	MLC	10
4	MUF	Viga em I	10
5	PUR	MLC	08
6	PUR	Viga em I	08

As vigas estruturais apresentavam 3100 mm de comprimento, 122 mm de largura e 156 mm de altura. As vigas de madeira laminada colada foram compostas por 6 peças de madeira serrada aplainadas e emendadas com o comprimento final desejado de 3100 mm, 122 mm de largura e 26 mm de espessura (Figura 11).

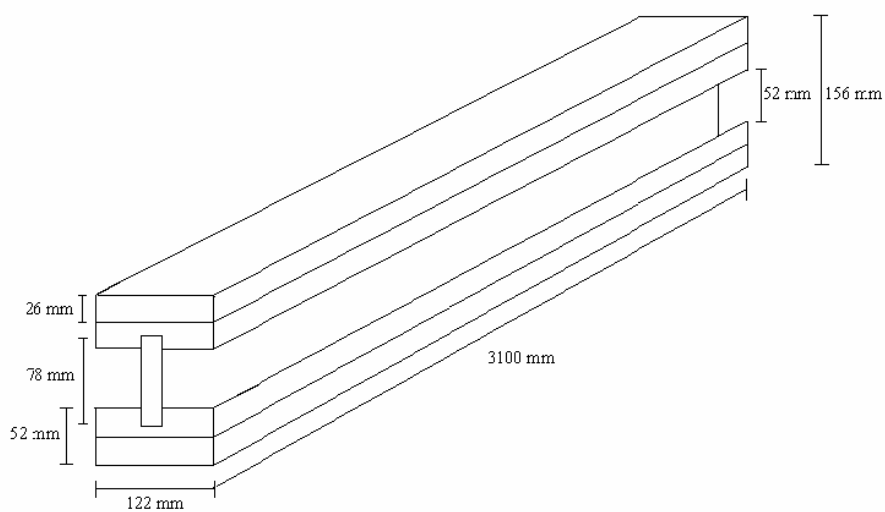
FIGURA 11 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DA MLC UTILIZADO NO EXPERIMENTO



FONTE: O autor

Já as vigas com perfil I foram formadas por duas peças de madeira serrada aplainadas, sendo coladas e perfazendo uma flange com 52 mm de espessura. A alma foi formada por três chapas de OSB com 1050 mm de comprimento individual, 78 mm de largura e 18 mm de espessura (Figura 12).

FIGURA 12 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE UMA VIGA COM PERFIL EM "I"



FONTE: O autor

A alma da viga foi fresada juntamente com a face interna da flange que estava voltada para dentro da peça, como pode ser observado na Figura 13.

FIGURA 13 - FLANGE FRESADA PARA ENCAIXE DA ALMA DE OSB



FONTE: O autor

A análise estatística dos dados coletados através dos ensaios foi realizada por meio da Análise da Variância e Teste de Tukey com 95% de significância; além da utilização da análise da regressão para o estabelecimento da equação de ajuste de correlação.

4.3 PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DAS VIGAS ESTRUTURAIS

A seqüência de operações durante a confecção das vigas estruturais foi iniciada pelo pré-bitolamento das peças de madeira serrada, passando pela classificação e destopo, processo de emenda *finger-joint* para a formação das lamelas, aplainamento, composição

das vigas de acordo com a distância mínima exigida entre as emendas, aplicação de adesivo, prensagem, embalagem.

4.3.1 Pré - Bitolamento

Todas as peças de madeira serrada que fizeram parte do estudo passaram inicialmente pelo processo de pré-bitolamento em uma plaina de 4 faces da marca WEINIG com velocidade de avanço de 25 metros por minuto (Figura 14). Este procedimento objetivou facilitar a visualização dos defeitos na classificação visual das peças que fizeram parte da composição das vigas. As peças que inicialmente apresentavam dimensões nominais de 32 mm X 128 mm X 2050 mm, passaram a ter 30 mm X 126 mm X 2050 mm.

FIGURA 14 - PRÉ – BITOLAMENTO DAS PEÇAS DE MADEIRA SERRADA



FONTE: O autor

4.3.2 Destopo e Classificação

Os processos de destopo e classificação foram feitos conjuntamente (Figura 15). A classificação das peças foi baseada na metodologia utilizada rotineiramente pela empresa para se ter resultados os mais próximos possíveis da realidade, evitando-se também que as peças fossem classificadas por métodos de difícil empregabilidade nas indústrias.

FIGURA 15 - DESTOPO E CLASSIFICAÇÃO DAS PEÇAS



FONTE: O autor

A metodologia de classificação utilizada na empresa é baseada em um estudo desenvolvido por CARREIRA (2003), que utilizou os métodos de classificação do SPIB, descrito com detalhes em SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994) e SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1999), os quais limitam a presença de defeitos como nós, rachaduras, esmoado e empenamentos; além de agrupar as peças em densas e não densas.

Desta forma, classificou-se visualmente as peças a serem utilizadas nas vigas observando-se as seguintes características:

- densidade: as peças foram classificadas em Densa (D) com 6 ou mais anéis de crescimento e mais de 1/3 da seção transversal contendo madeira de inverno, ou 4 ou mais anéis de crescimento e mais de 1/2 da seção transversal contendo madeira de inverno; e Não-Densa (ND) para as demais densidades (média e baixa). As peças classificadas como densas foram utilizadas nas camadas inferior e superior das vigas e as não densas foram utilizadas nas partes internas das vigas estruturais de MLC e Perfil I.

- presença de defeitos e a densidade das peças: na classe de madeira densa não foram permitidos defeitos como nó solto, nó tipo gravata, nó firme atravessando a peça em espessura, medula nos dois lados da peça, esmoado e rachaduras; já para a classe de madeira não densa não eram permitidos defeitos como nó gravata, nó atravessando a peça em espessura, rachaduras e esmoado (Figura 16).

- Comprimento das peças: além da classificação visual, as peças a serem utilizadas nas extremidades não poderiam ter comprimento inferior a 800 mm e as do miolo inferior a 300 mm.

FIGURA 16 - CLASSIFICAÇÃO DAS PEÇAS DE ACORDO COM A DENSIDADE E A PRESENÇA DE DEFEITOS. (A) Madeira para as Extremidades das Vigas; (B) Madeira para as Partes Internas da Viga; (C) Madeira para Descarte.



FONTE: O autor

4.3.3 Formação das Lamelas e Bitolamento

Com a etapa de classificação concluída, procedeu-se a etapa de emenda das peças, onde o objetivo era a obtenção de lamelas com 3100 mm de comprimento com o menor número possível de emendas. Obteve-se, então, cerca de 5 emendas por lamela, ou seja, a cada 520 mm de comprimento aproximadamente, uma emenda dentada vertical tipo *finger joint* com 26 mm de comprimento, conforme recomendação

da norma alemã DIN-68-140 que admite comprimento de dentes de 40 a 60 mm para peças submetidas a grandes cargas, 25 a 35 mm para cargas menores e 20 a 25 para peças não carregadas.

O procedimento de confecção das emendas foi realizado por uma fresadeira TOCHETO MODELO T-10 dotada de oito jogos de cinco facas, com movimento giratório contínuo, o qual era responsável pela formação dos dentes nas peças de madeira aplainadas. Para o adesivo PUR, além do equipamento efetuar os cortes, realizava também a transferência do adesivo da bomba aplicadora até os dentes através de um pente aplicador colocado após o jogo de facas. Já os outros dois adesivos, a RFF e a MUF foram aplicadas com auxílio de um pincel, tendo a desvantagem de não se ter o controle correto da gramatura.

Sendo assim, o processo de formação dos dentes nas peças foi realizado pela separação de 10 peças de madeira serrada e aplainada de comprimento semelhante, levando-se em consideração a espessura das peças e a facilidade da realização da etapa, posteriormente, as peças foram passadas pelo equipamento, sendo viradas e passadas novamente em sua outra extremidade (Figura 17).

O adesivo MUF foi preparado na proporção 100 partes de resina para 20 partes de catalisador, conforme recomendação da empresa fornecedora do material, e para a RFF, 100 partes de resina para 15 partes de catalisador, os quais foram misturados em um vasilhame no momento do início da aplicação nas peças.

O processo de emenda das peças para a formação da lamela foi realizado em uma emendadeira automática TOCHETO MODELO T-20 (Figura 18) que aplicava pressão necessária no ponto de encontro dos dentes de duas peças, a qual tinha o objetivo de fazer a penetração do adesivo na madeira e unir os dentes das extremidades de duas peças. Desta forma, ao final da união, a peça deslizava em uma esteira até a

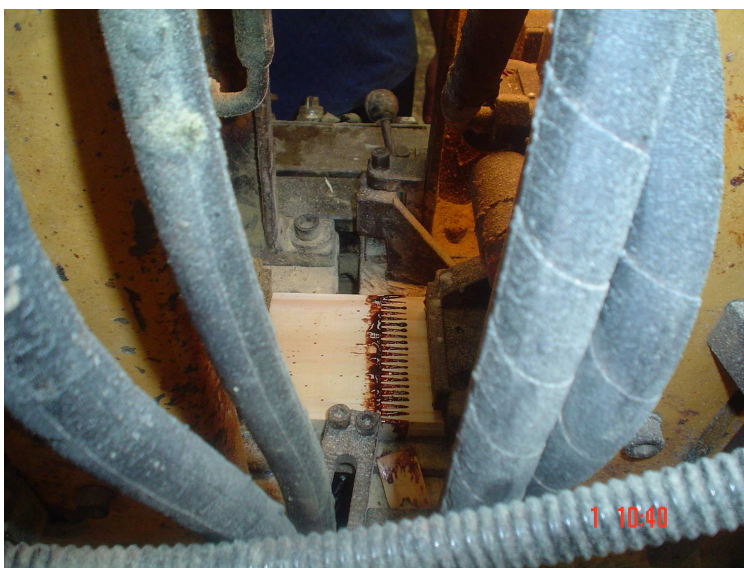
finalização do comprimento da lamela, sendo destopada em 3100 mm e colocada em uma grade com separadores, permanecendo em repouso para ocorrer a etapa de pós-catalização durante 5 dias, conforme recomendação.

Figura 17 - PROCESSO DE FRESAMENTO DAS PEÇAS DE MADEIRA SERRADA (A) Passagem das Peças pela Fresadeira; (B) Conjunto de Dentes.



FONTE: O autor

Figura 18 - PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS LAMELAS.



Fonte: O autor

4.3.4 Fresamento das Flanges das Chapas de OSB

Para as vigas com perfil I, foi necessário a realização do fresamento nas lamelas internas das flanges e nas peças de OSB que caracterizam a alma do produto. Juntamente com a operação de fresamento, as peças foram aplainadas nas quatro faces, regularizando as dimensões em 122 mm e 26 mm para largura e espessura, respectivamente. As lamelas internas foram fresadas verticalmente ao comprimento com 3 dentes com profundidade de 13 mm, perfazendo a metade da peça de madeira serrada da parte interna da flange.

As chapas de OSB foram inicialmente cortadas em uma serra circular nas dimensões de utilização, sendo também fresadas paralelamente ao comprimento em espessura com 4 dentes e uma profundidade de 13 mm, para que a junção da flange com a alma ocorresse da maneira mais regular possível (Figura 19).

FIGURA 19 - FRESAMENTO DAS FLANGES E MONTAGEM DAS VIGAS EM I. (A) Fresas para Face Interna da Flange; (B) Junção da Flange e Alma.



FONTE: O autor

4.3.5 Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico das Lamelas por Emissão de Ondas Acústicas

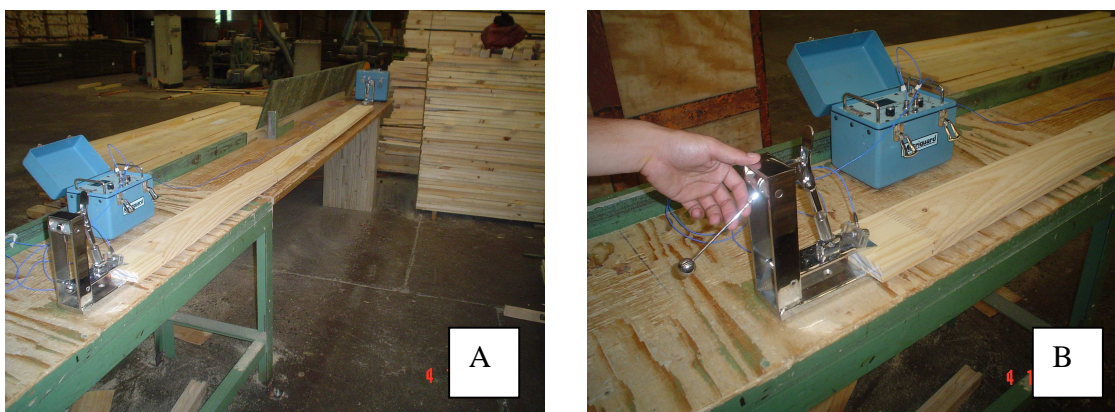
O método de classificação de madeiras pelo processo acústico baseia-se no princípio de propagação de ondas de tensão. Para a madeira, a onda de tensão é uma onda ultra-sônica de baixa frequência, que se propaga ao longo do eixo natural do material. A propagação das ondas acústicas no material depende principalmente das propriedades da parede celular da madeira, especialmente da cada S2, que é o maior constituinte da madeira (DUNLOP, 1981).

Antes da realização do ensaio, as peças foram identificadas conforme a classificação e tipo de adesivo, depois pesadas em uma balança e tomadas às dimensões para a determinação do volume. Desta forma, obteve-se a densidade das lamelas, que é uma variável de utilização para cálculo do Módulo de Elasticidade pelo processo dinâmico utilizado no estudo.

A Figura 20 mostra o equipamento *Stress Wave Timer*, Modelo 239A, da Metriguard, para a determinação do tempo de propagação da onda. O equipamento é composto por dois transdutores acelerômetros dispostos sobre o material a ser medido e um relógio registrador da velocidade da onda. O processo de medição deste equipamento consistiu na disposição da lamela entre os dois sensores com um vão livre de 3 metros; posteriormente o relógio registrador foi zerado, liberando-se um pêndulo metálico que chocava com o sensor que emitia a onda na face transversal da lamela, fazendo com que a onda percorresse a lamela longitudinalmente até o receptor. Após a estabilização do valor de velocidade da onda, cerca de 3 a 5 repetições do processo, anotava-se a velocidade e prosseguia-se com o processo na próxima lamela. Foi determinado o MOE dinâmico em todas as

lamelas que faziam parte do estudo, ou seja, 338 peças, através das Equações de número 9 a 11. Os dados de interesse foram registrados em uma planilha e o cálculo para a determinação do MOE dinâmico das lamelas está apresentado nas Equações 9 a 11.

Figura 20 - ENSAIO NÃO DESTRUTIVO DAS LAMELAS ATRAVÉS DO MSR. (A) Equipamento para a Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Acústica; (B) Emissor a Onda Acústica.



FONTE: O autor

Equação 9:
$$V = \frac{L}{T}$$

Equação 11:
$$MOEd = \frac{V \times ME_{12\%}}{A}$$

Equação 10:
$$ME_{12\%} = \frac{M}{V}$$

onde:

Equação 9: V = velocidade de propagação da onda (cm/s);
 L = vão, distância entre os sensores (cm);
 T = tempo propagação da onda na lamela entre os dois sensores (microsegundos $\times 10^6$);

Equação 10: $ME_{12\%}$ = densidade a 12% de umidade (g/cm^3);
 M = peso da lamela (kg);
 V = volume da lamela (cm^3);

Equação 11: $MOEd$ = módulo de elasticidade dinâmico (kgf/cm^2);
 A = aceleração da gravidade ($9,80 \text{ m}/\text{s}^2$).

4.3.6 Composição das Vigas

Antes da aplicação do adesivo sob as lamelas, as vigas foram montadas sobre cavaletes para se distribuir as lamelas quanto ao distanciamento entre as emendas, e a disposição da classe de madeira densa nas partes na zona de tração e compressão da viga, camada interior e superior, respectivamente.

4.3.7 Aplicação do Adesivo nas Lamelas

4.3.7.1 Adesivos Melamina Uréia Formaldeído e Resorcina Fenol Formaldeído

O equipamento para a aplicação destes dois tipos de adesivo foi o sistema de rolos (Figura 21), o qual opera pelo contato com dois

cilindros metálicos contendo ao seu redor uma capa de borracha com pequenas ranhuras em formato de “V” para facilitar a distribuição do adesivo na peça. Juntamente com os rolos maiores, têm-se dois outros rolos chamados de rolos doutores que tem a função de dosar a quantidade de adesivo a ser aplicado sobre a lamela.

FIGURA 21 - APLICAÇÃO DO ADESIVO MELAMINA URÉIA FORMALDEÍDO



FONTE: O autor

As quatro lamelas que compõem o miolo das vigas de madeira laminada colada receberam adesivo em ambos os lados, e as tábuas das extremidades da viga somente em um dos lados; desta forma obteve-se uma gramatura dupla de 400g/m^2 para a MUF e 500g/m^2 para a RFF, respectivamente, conforme a recomendação das empresas de adesivo.

Na homogeneização do adesivo de melamina uréia formaldeído foram utilizados 100 partes de resina para 20 partes de catalizador em uma temperatura ambiente de 25°C , podendo ficar em aberto, ou seja, com a cola aplicada e antes da prensagem no máximo 100 minutos e no mínimo de 10 minutos, proporcionando que sejam efetuadas as fases

iniciais da colagem como a fluidez, transferência, penetração na estrutura capilar, deixando para que a umidificação completa e a solidificação só ocorram durante a prensagem das vigas. Sendo assim, foram preparados 7600 g de adesivo, sendo 6300 g de resina e 1300 g de catalisador.

Quanto ao adesivo Resorcina Fenol Formaldeído foram preparados 9500 g de material, sendo 8261 kg de resina e 1240 kg de catalisador, tendo em vista que devem ser aplicadas 100 partes de adesivo para 15 partes de catalisador. O tempo em aberto do RFF é praticamente o mesmo da MUF, podendo ser aplicado pelo aplicador de rolos; montadas as peças na viga, todas as estruturas podem ser prensadas de uma única vez, sem a preocupação de pré-cura.

Nas vigas com perfil I, fez-se a aplicação do adesivo na fresa da peça interna da flange com auxílio de um pincel para se ter o direcionamento do adesivo no local desejado, ou seja, na junção da alma com a flange.

4.3.7.2 Adesivo Poliuretano

O sistema de aplicação do adesivo poliuretano é diferenciado em função da sua rápida solidificação, cerca de 8 minutos para madeira com 12% de teor de umidade e temperatura ambiente de 20°C. Desta forma a empresa fornecedora do adesivo disponibilizou o equipamento específico para aplicação do adesivo, o qual é composto por bombas ligadas diretamente ao aplicador de cortina que é dotado de bicos por onde passam o adesivo para ser aplicado nas lamelas (Figura 22). A gramatura indicada pela empresa foi de 200 g/m² para uma face sem a mistura de qualquer tipo de catalisador.

Figura 22 - APLICAÇÃO DO ADESIVO POLIURETANO



FONTE: O autor

Para a aplicação de adesivo nas vigas I, utilizou-se um bico aplicador ligado diretamente ao tambor e a bomba através de uma mangueira. Desta forma, fez-se a aplicação do adesivo diretamente na fresa da flange, sendo conectada posteriormente a alma da viga.

4.3.8 Prensagem

A Figura 23 apresenta o processo de prensagem das vigas estruturais em uma prensa da marca BAIONI PRESS MODELO BP/TR.

Na prensa, as vigas foram colocadas separadamente por tratamento, utilizando temperatura ambiente e uma pressão de 140 Bar e 120 Bar, para a parte superior e lateral do equipamento, respectivamente. Desta forma, o processo foi concluído após 12 horas de exposição as variáveis.

FIGURA 23 - CARREGAMENTO E PRENSAGEM DAS VIGAS NA PRENSA. (A) Disposição das vigas na Prensa; (B) Alimentação das Prensa com as Vigas; (C) Prensagem das vigas MLC; (D) Prensagem das vigas I.



FONTE: O autor

4.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA ESTRUTURAL

4.4.1 Estimativa do MOE Dinâmico das Vigas Estruturais de Madeira Laminada Colada pelo Método Não Destrutivo

O MOE dinâmico das vigas estruturais de MLC foi calculado com base na distribuição das lamelas ao longo do composto, compreendendo 6 camadas de lamelas, sendo cada uma com sua

respectiva identificação e valor de módulo de elasticidade dinâmico individual.

Sendo assim, procedeu-se o cálculo do Módulo de Elasticidade das vigas (Equação 14), de acordo com as fórmulas apresentadas por BODIG & JAYNE (1982).

Equação 14:

$$MOE_e = \frac{2}{I} \times \sum_{i=1}^n MOE_i \times I^i$$

onde:

MOE_e = Módulo de Elasticidade Efetivo (kgf/cm^2);

MOE_i = Módulo de Elasticidade da i -ésima lâmina na direção longitudinal (kgf/cm^2);

I^i = Momento de Inércia da Seção da i -ésima Lâmina, em relação a linha neutra da viga (cm^2);

I = Momento de Inércia de toda a seção da viga (cm^4);

n = Metade do Número Total de Lâminas.

A equação geral (Equação 15) para cálculo do momento de inércia de cada lâmina em relação à linha neutra, é obtida por:

Equação 15:

$$I^i = I_o^i + A^i \times (d^i)^2$$

onde:

I^i = Momento de Inércia da i -ésima lâmina em relação a linha neutra da vigas (cm^3);

I_o^i = Momento de Inércia da i -ésima lâmina em relação a sua linha neutra, baricentral (cm^4);

A^i = Área da seção transversal da i -ésima lâmina;

d^i = Distância entre o Plano Baricentral da Viga Laminada e a i -ésima lâmina.

Substituindo-se as Equações 14 e 15, tem-se a Equação 16:

$$\text{Equação 16: } MOE_e = \frac{2}{I} \times \sum_{i=1}^n MOE_i t^i \times (I_o^i + A^i \times (d^i)^2)$$

As lâminas externas, de acordo com BODIG & JAYNE (1982), contribuem mais sobre o valor do módulo de elasticidade efetivo da viga que aquelas lâminas colocadas próximas à linha neutra. Neste caso, o posicionamento das lâminas de maior resistência, ou de maior módulo de elasticidade próximas a superfície tornam-se mais eficientes.

4.4.2 Determinação do MOE e do MOR das Vigas pelo Método Destrutivo

Na realização do ensaio destrutivo das vigas para a obtenção dos valores de MOE e MOR foi utilizado como referência o método descrito pela seção 4 da ASTM D-198 (1996), o qual visa à determinação das propriedades de flexão para vigas estruturais feitas de madeira sólida ou laminada, ou ainda componentes estruturais. Este método é utilizado primariamente para vigas de seção retangular, mas também é aplicado para vigas com seções irregulares como as vigas com perfil I.

Para a realização deste ensaio foi utilizada uma máquina universal de ensaios (EMIC DL – 30000), com capacidade máxima de carga de 30.000 kg (Figura 24). Para a fixação dos pontos de reação, contou-se com uma barra de ferro de 15 cm de largura, 40 cm de altura

e 500 cm de comprimento, sendo os apoios de reação presos na barra de ferro com garras do mesmo material.

À distância entre os pontos de apoio foi de 2700 mm, sendo que à distância entre o ponto de reação até o ponto de aplicação de carga foi de 900 mm, conforme prescrito na norma; que determina para a avaliação de propriedade de flexão um comprimento da zona de cisalhamento na razão entre 5:1 a 12:1, o qual corresponde à razão entre a distância entre o ponto de aplicação da carga e o ponto de reação mais próximo, e a altura da viga; sendo assim, na razão 900 para 122 obtém-se 7,4:1. Calculada as distâncias na zona de cisalhamento, determinou-se a distância entre os pontos de aplicação de carga, que vem a ser a zona de flexão que foi também de 900 mm.

Para a determinação da deformação da viga ao longo do ensaio, utilizou-se um deflectômetro com capacidade de variação de deformação de 2,5 cm a partir do ponto inicial do ensaio. O deflectômetro foi posicionado na linha neutra no meio da viga, sendo fixado em uma barra de alumínio conhecida como YOKE (Figura 24), a qual estava fixado na linha neutra em dois pontos distanciados em 700 mm (L1), ou seja, 350 mm para cada lado do meio da viga.

Determinadas as distâncias entre os pontos de reação e os pontos de aplicação de carga, partiu-se para os ensaios que consistiram nos registros dos dados no programa TESC da EMIC como altura e largura da viga, além da velocidade de aplicação da carga, a qual deveria ser suficiente para obter-se a carga de ruptura em 10 minutos de acordo com a norma, não menos que 6 minutos e nem mais que 20 minutos.

Sendo assim, após algumas simulações determinou-se uma velocidade de 0,6 mm de deformação por minuto; sendo a carga no limite proporcional atingida em média de 7 minutos de ensaio e a carga máxima, no momento da ruptura, em aproximadamente 15 minutos.

FIGURA 24 - VIGAS DE MLC E PERFIL I ENSAIADAS EM UMA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS, DETALHANDO OS APLICADORES DE CARGA E O DEFLECTÔMETRO. (A) Máquina de Ensaios; (B) Aplicação da Carga; (C) Detalhe do YOKE na Viga com Perfil I; (D) Detalhe do YOKE posicionado na viga MLC.



FONTE: O autor

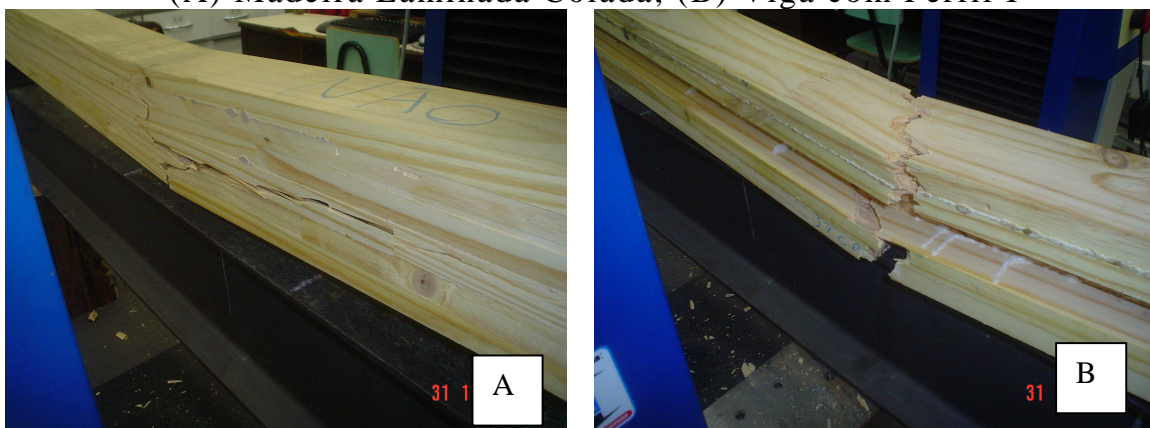
As Figuras 25 e 26 apresentam em uma seqüência de fotos o desenvolvimento dos ensaios destrutivos para obtenção do MOE e do MOR à flexão na Máquina Universal de Ensaios.

FIGURA 25 - VIGAS ESTRUTURAIS EM PROCESSO DE ENSAIO
(A) e (B) Aplicação de Carga nas Vigas Estruturais; (C) e
(D) Deformação das Vigas Estruturais.



FONTE: O autor

FIGURA 26 - VIGAS ESTRUTURAIS NO MOMENTO DA RUPTURA.
(A) Madeira Laminada Colada; (B) Viga com Perfil I



FONTE: O autor

O módulo de elasticidade da viga no ensaio destrutivo foi calculado levando-se em consideração a diferença de deformação entre 40% e 10% da força máxima, adotando-se para cálculo deste parâmetro como referência a Norma Européia EN 789 (1995). Desta forma aplicou-se a Equação 12.

Equação 12:

$$\text{MOE} = \frac{(F_{40\%} - F_{10\%}) \times L1^2 \times L2}{16 \times (\text{def}_{40\%} - \text{def}_{10\%}) \times I_o}$$

onde:

MOE = Módulo de Elasticidade (kgf/cm²);

F_{40%} = Carga correspondente a 40% da carga máxima (kgf);

F_{10%} = Carga correspondente a 10% da carga máxima (kgf);

L1 = Distância entre os pontos de apoio do YOKE (cm);

L2 = Metade do comprimento da zona de cisalhamento (cm);

def_{40%} = Deformação correspondente a 40% da carga máxima (cm);

def_{10%} = Deformação correspondente a 10% da carga máxima (cm);

I_o = Momento de inércia baricentral (cm⁴), sendo base X altura³ / 12

O módulo de ruptura (Equação 13) foi calculado com base na força máxima aplicada durante a realização do ensaio de flexão estática, incluindo no cálculo a zona de cisalhamento da viga e o módulo de rigidez, conforme a seguinte fórmula:

Equação 13:

$$\text{MOR} = \frac{F_{\text{MAX}} \times L2}{2 \times W}$$

onde:

MOR = Módulo de Ruptura (kgf/cm

L2 = Metade do comprimento da zona de cisalhamento (cm);

W = Módulo de Rigidez (cm^3), sendo base X altura² / 6.

4.5 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica do presente estudo foi focada na matéria-prima, sem considerar os custos do processo como mão-de-obra, instalações, depreciação de equipamentos, entre outros. Sendo assim, obteve-se a quantidade de material utilizado na formação dos compostos como madeira serrada e chapas de OSB em volume de material, e o adesivo através de sistema simples pesagem da resina e do catalisador. Posteriormente, fez-se uma pesquisa de mercado para a obtenção dos valores praticados pelos insumos, extrapolando-se para as quantidades utilizadas no experimento; desta forma efetuou-se as devidas comparações entre os modelos de viga e os tipos de adesivo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MADEIRA LAMINADA COLADA

5.1.1 Módulo de Elasticidade Dinâmico das Lamelas

A determinação das propriedades de resistência para uma determinada espécie com base em pequenos corpos de prova isentos de defeitos apresenta inconvenientes com relação à dispersão entre os valores encontrados em laboratório e na estrutura em uso; em função das peças apresentarem grandes variações de suas propriedades devido ao material trabalhado, que apresenta uma grande heterogeneidade de componentes na sua formação e distribuição, a ocorrência de defeitos naturais, a imprecisão na aplicação das cargas e o longo tempo de aplicação das mesmas. Sendo assim, há uma tendência de se determinar as propriedades de resistência da madeira por meio de ensaios não destrutivos com elementos de dimensões estruturais reais, classificando-a em grupos de qualidade, de forma a se direcionar as peças ao seu uso final de acordo com as suas propriedades.

O método não destrutivo de avaliação das propriedades de resistência da madeira através do *Stress Wave Timer* depende diretamente da velocidade de propagação da onda acústica ao longo da peça ensada e da densidade do material. Quanto à velocidade de propagação da onda, pode-se dizer que: quanto maior à velocidade, maior será o módulo de elasticidade da peça analisada, mantendo-se as demais variáveis inalteradas. Como pode ser observado no Quadro 8, a lamela denominada de 47SI (Superfície Inferior) da viga 1 e na 77M3 (Miolo) da viga 2, apresentam densidade igual a 420 kg/m^3 , velocidades de 462.250 cm/s e 410.397 cm/s e

conseqüentemente Módulos de Elasticidade diferenciados de 9.161 MPa e 7.2201 MPa, respectivamente.

Ao mesmo tempo, a velocidade de propagação da onda acústica também é influenciada pela quantidade de material lenhoso a ser atravessada no material que está sendo analisado, pois quanto maior a variável mencionada, menor é o tempo despendido deste o emissor até o receptor da onda. Sendo a velocidade, a relação entre distância e tempo, mantendo-se a primeira variável inalterada e aumentando-se a segunda, diminui-se a velocidade. Mas em contrapartida, de forma direta, quanto maior a densidade, maior é o módulo de elasticidade, tendo em vista que o módulo de elasticidade dinâmico é uma função do quadrado da velocidade de propagação da onda e da densidade.

Desta forma, pode-se atribuir os diferentes índices de velocidade a presença de defeitos naturais como a presença de nós, aos encaixes utilizados na emendas dentadas tipo *finger joint* e ao adesivo utilizado na junção.

Com relação à densidade, pode-se destacar a influência da espécie a ser utilizada, do teor de umidade que também influencia no desempenho do adesivo durante o seu processo de cura, da largura dos anéis de crescimento, da posição de retirada da peça ao longo do fuste da árvore, da porcentagem de lenho inicial e tardio, da diferenciação entre lenho juvenil e adulto, além de influências externas. Desta forma, evidencia-se no cálculo da densidade (Quadros 8 a 10) uma grande heterogeneidade de valores com amplitude entre as peças de 378 kg/m^3 e 560 kg/m^3 . Esta amplitude de variação é certamente derivada da origem das peças destinadas ao estudo, que contempla uma série de condições que já foram mencionadas, destacando-se a idade das árvores, a posição de retiradas das peças e as influências externas.

A idade das árvores reflete a diferenciação entre os lenhos juvenil e adulto, onde o segundo em madeira de *Pinus taeda* é formado geralmente a partir do 10º ao 12º de crescimento, caracterizando uma madeira mais densa, com traqueóides mais longos, paredes celulares mais espessas, alta porcentagem de lenho tardio, baixa porcentagem de nós, maior porcentagem de celulose, tornando a madeira mais flexível, menor ângulo fibrilar e conseqüentemente maior resistência mecânica. Considerando as características mencionadas, observou-se também que as peças foram retiradas em locais variados ao longo do fuste, próximo à casca ou medula e em árvores da base a de toretes mais superiores na árvore sem haver uma classificação da madeira direcionada ao uso estrutural.

Quanto às influências externas, destaca-se as condições de crescimento e os métodos silviculturais aplicados. O primeiro agrupa as variáveis de clima, solo (umidade e nutrientes), altitude, declividade, vento, espaçamento, entre outros; e o segundo adubação, poda, desbaste, composição de espécies, etc.

A forma de aplicação da onda poderia ser um fator que diferenciasse a sua propagação; mas durante a execução dos ensaios, manteve-se a mesma constante, colocando sempre o pêndulo de aplicação a uma mesma distância da peça, o que gera uma mesma intensidade de aplicação da onda em todas as peças ensaiadas.

Outro fator não analisado neste estudo que pode contribuir para a alteração da variável velocidade é o efeito das emendas entre duas peças coladas com adesivo, que pode vir a ser um obstáculo à passagem da onda ou um dissipador da onda ao longo da peça; este fator pode ser estudado em futuros experimentos.

QUADRO 8 - VALORES INDIVIDUAIS MOE DINÂMICO PARA AS LAMELAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE VIGAS COM ADESIVO RFF.

Viga	Lamela	Densidade (kg/m ³)	Velocidade(cm/s)	MOE (MPa)
01	45SS	469	402.145	7.738
	91M1	420	393.185	6.628
	71M2	418	411.523	7.225
	85M3	398	339.367	4.675
	102M4	398	400.534	6.512
	47SI	420	462.250	9.161
02	59SS	455	376.412	6.574
	106M1	396	394.737	6.292
	69M2	446	371.747	6.283
	77M3	420	410.397	7.221
	74M4	418	405.954	7.031
	46SI	422	427.960	7.890
03	48SS	483	335.196	5.540
	86M1	423	426.136	7.842
	107M2	427	418.410	7.633
	68M3	378	369.458	5.257
	73M4	389	386.598	5.927
	64SI	442	468.750	9.899
04	35SS	435	350.877	5.457
	75M1	381	388.098	5.848
	72M2	467	382.653	6.976
	101M3	407	389.105	6.287
	100M4	488	468.750	10.947
	41SI	443	402.145	7.302
05	27SS	477	389.610	7.390
	84M1	449	361.011	5.966
	90M2	394	413.793	6.879
	78M3	385	414.365	6.738
	81M4	388	373.134	5.507
	24SI	459	346.420	5.618
06	62SS	438	450.450	9.057
	108M1	422	404.313	7.042
	98M2	402	379.267	5.899
	110M3	418	330.033	4.647
	111M4	413	365.854	5.641
	66SI	438	427.960	8.175
07	31SS	495	332.594	5.580
	76M1	440	304.260	4.151
	93M2	431	396.825	6.931
	79M3	383	393.701	6.050
	87M4	404	389.105	6.240
	23SI	546	413.793	9.543

08	43SS	453	360.144	5.991
	103M1	419	369.458	5.838
	82M2	416	385.604	6.313
	105M3	449	334.076	5.109
	88M4	441	388.601	6.788
	33SI	467	444.444	9.410
09	65SS	452	425.532	8.345
	92M1	408	389.105	6.302
	95M2	425	340.522	5.031
	83M3	505	435.414	9.760
	97M4	428	404.858	7.163
	39SI	477	409.277	7.633
10	42SS	481	412.088	8.337
	89M1	430	364.520	5.828
	70M2	388	401.606	6.379
	104M3	398	406.504	6.707
	80M4	389	375.000	5.577
	63SI	473	405.954	7.954

O Quadro 8 apresenta os valores do MOE dinâmico para vigas produzidas com o adesivo Resorcina Fenol Formaldeído, de acordo com o sistema de classificação visual adotado pela empresa, onde observa-se que a lamela com maior resistência deveria estar posicionada na camada inferior da viga, a segunda na parte superior, a terceira na segunda posição sentido de baixo para cima e assim sucessivamente. Deste modo, observa-se que nas dez vigas analisadas, nenhuma apresentava uma distribuição correta das lamelas, o que pode diminuir potencialmente a resistência geral da viga. Este ponto será analisado no decorrer do estudo, comparando-se os valores de resistência com a distribuição das lamelas sem / com a classificação através de ensaio não destrutivo.

A distribuição das lamelas em dois grupos de resistência na viga de MLC pelo método não destrutivo é um fator determinante na resistência da viga inteira, tendo em vista que às lamelas com maiores valores de MOE deveriam ser colocadas nas regiões mais solicitadas da viga, ou seja, na zona de tração e compressão, que correspondem à

parte superior e inferior das vigas, respectivamente; pois somente com a análise visual baseada na contagem de anéis de crescimento e na ocorrência de defeitos naturais das lamela não foi suficiente para se alcançar os maiores valores de MOE na viga, como pode ser observado nos Quadros de número 8 a 10; sendo necessária a implementação de sistemas de classificação não destrutivo em todas as lamelas.

Os valores de MOE das lamelas apresentados nos Quadros 9 e 10, referentes aos adesivos MUF e PUR demonstram a mesma constatação de distribuição evidenciadas no Quadro 8 para o adesivo RFF, sendo insuficiente a classificação visual utilizada pela empresa para este fim, mas sim, apresentando-se como um método importante para uma pré-classificação no momento do destopo dos defeitos, e na escolha das peças que são unidas em cada uma das lamelas, evitando-se a efetivação dos ensaios não destrutivos em todas as peças destopadas, passando para esta atividade depois da lamela pronta, ou seja, depois das peças emendadas, evitando perda de tempo e aumento no rendimento da operação de classificação.

QUADRO 9 - VALORES INDIVIDUAIS MOE DINÂMICO PARA AS LAMELAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE VIGAS COM ADESIVO MUF

Viga	Lamela	Densidade (kg/m³)	Velocidade(cm/s)	MOE (MPa)
01	39SS	506	426.136	9.367
	106M1	467	414.365	8.180
	68M2	440	374.065	6.275
	79M3	419	361.011	5.574
	90M4	410	404.585	6.857
	110SI	424	396.825	6.816
02	65SS	539	424.929	9.933
	96M1	425	389.610	6.586
	76M2	430	382.166	6.405
	82M3	416	431.035	7.888
	85M4	404	353.774	5.158
	58SI	456	393.701	7.208

03	37SS	477	441.826	8.895
	97M1	443	397.878	7.148
	74M2	407	393.185	6.419
	92M3	439	371.747	6.183
	112M4	406	359.281	5.347
	61SI	560	396.302	8.965
04	41SS	473	465.839	10.474
	99M1	493	359.281	6.485
	77M2	404	345.622	4.923
	88M3	459	424.929	8.453
	103M4	413	382.166	6.155
	63SI	484	368.098	6.694
05	64SS	451	417.246	8.005
	100M1	428	371.287	6.024
	89M2	426	424.328	7.831
	104M3	426	386.598	6.501
	75M4	439	358.423	5.747
	34SI	495	441.177	9.818
06	66SS	447	468.019	9.981
	78M1	401	369.458	5.583
	84M2	463	376.884	6.708
	87M3	397	372.671	5.623
	111M4	435	348.028	5.369
	55SI	481	383.632	7.226
07	42SS	505	387.097	7.714
	105M1	491	426.136	9.104
	71M2	443	371.287	6.225
	107M3	446	355.872	5.758
	102M4	425	398.406	6.887
	67SI	459	368.098	6.343
08	25SS	557	414.246	9.884
	08M1	459	424.929	8.453
	70M2	426	374.532	6.101
	86M3	435	361.882	5.805
	91M4	439	394.218	6.961
	54SI	485	368.550	6.725
09	33SS	489	402.685	8.096
	94M1	426	381.194	6.320
	98M2	401	379.747	5.898
	108M3	441	398.936	7.153
	109M4	436	375.940	6.279
	57SI	463	335.196	5.306
10	50SS	439	413.793	7.660
	73M1	383	424.328	7.028
	69M2	436	395.257	6.941
	95M3	468	388.601	7.210
	93M4	423	386.598	6.454
	60SI	482	419.580	8.661

O sistema de classificação através do *Stress Wave Timer* é simples, prático e de resultado imediato, podendo ser utilizado em qualquer parte da empresa, seja na floresta ou na indústria, tendo em vista que é um equipamento leve e portátil, podendo determinar a velocidade de propagação tanto em árvores, quanto em peças de madeira serrada, alterando somente os dispositivos de emissão e recepção da onda. O conjunto destes fatores torna o sistema atraente frente a outros métodos não destrutivos que são de grande porte, alto investimento e manutenção, contanto com softwares sofisticados.

QUADRO 10 - VALORES INDIVIDUAIS MOE DINÂMICO PARA AS LAMELAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE VIGAS COM ADESIVO PUR

Viga	Lamela	Densidade (kg/m ³)	Velocidade(cm/s)	MOE (MPa)
01	51SS	488	358.423	6.400
	87M1	435	386.598	6.625
	88M2	437	400.000	7.125
	76M3	427	377.359	6.208
	69M4	415	357.143	5.402
	63SI	457	469.484	10.273
02	49SS	413	366.748	5.669
	94M1	437	386.100	6.638
	105M2	428	421.941	7.780
	79M3	389	344.432	4.705
	75M4	404	384.615	6.096
	68SI	491	449.775	10.142
03	66SS	440	343.643	5.302
	84M1	425	395.778	6.797
	73M2	426	390.625	6.637
	115M3	406	382.653	6.065
	72M4	415	397.351	6.687
	60SI	403	468.750	9.033
04	39SS	473	391.134	7.384
	98M1	445	365.854	6.072
	74M2	421	400.000	6.876
	78M3	404	416.667	7.155
	92M4	416	412.655	7.230
	61SI	441	400.000	7.191

05	23SS	450	443.132	9.009
	80M1	414	398.406	6.701
	70M2	453	434.153	8.707
	30M3	456	386.598	6.950
	25M4	465	364.964	6.318
	28SI	459	367.647	6.328
06	42SS	440	386.598	6.702
	103M1	455	382.653	6.794
	90M2	427	371.287	6.010
	111M3	409	414.365	7.165
	96M4	437	414.365	7.646
	47SI	521	458.716	11.182
07	54SS	447	342.466	5.344
	110M1	431	394.218	6.840
	95M2	437	360.144	5.776
	81M3	435	354.610	5.536
	83M4	405	375.940	5.839
	57SI	493	358.852	6.469

Em estudo realizado por FAGUNDES & SZÜCS (1998), nota-se que após a classificação estabeleceu-se 3 classes de vigas com módulo de elasticidade maiores, médios e menores, os quais foram distribuídos em 5 modelos de vigas; os resultados do experimento demonstraram que não houve diferença estatística na resistência das vigas analisadas, mas a dispersão dos valores de MOE foram pequenas variando de 7.581 MPa a 7.630 MPa. Entretanto, no presente estudo a dispersão dos valores de MOE dinâmico foi de 4.151 MPa a 11.182 MPa. A amplitude de valores de Módulo de Elasticidade dinâmico encontrados neste estudo certamente não apresentaria as mesmas considerações se fosse aplicado no estudo comparativo, reforçando a necessidade de uma classificação não destrutiva durante a composição das vigas estruturais de madeira laminada colada pelas lamelas emendadas.

Evidencia-se, portanto, a necessidade da classificação para peças estruturais, podendo-se dizer que quanto maior o número de grupos de resistência forem subdivididas a atividade, maior será a probabilidade de se aumentar a resistência da viga. Mas, deve-se

atender a questão de operacionalidade dentro das empresas, podendo dificultar o processo, diminuindo o rendimento.

5.1.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico das Vigas

A partir da determinação do MOE dinâmico individual das lamelas que fizeram parte a viga, foi estimado o módulo de elasticidade dinâmico da viga inteira com base na classificação visual realizada pela empresa, e também através da distribuição das lamelas de acordo com a qualidade de resistência desejada para a realização de comparações; pois de acordo com ZANGIÁCOMO (2003) as propriedades de rigidez de vigas de MLC, obtidas nos ensaios de flexão estática, podem ser influenciadas pela disposição das lâminas ao longo da altura da seção transversal. Vigas com distribuição não aleatória de lâminas podem apresentar propriedades de rigidez superiores às de vigas montadas com distribuição aleatória de lâminas.

Analisando-se o QUADRO 11, observa-se que em todas as vigas de madeira laminada colada com uma classificação e distribuição adequada das lamelas, obteve-se um ganho médio de resistência de 6%; mas podendo atingir 17% de ganho como na viga 4 colada com adesivo RFF, onde obteve-se um MOE de 6.912 MPa, separando-se as lamelas em duas classes de resistência através do método visual e 8.350 MPa com MOE estimado através do *Stress Wave Timer*, distribuindo-se as peças através da resistência encontrada pelo processo; tendo em vista que as regiões mais solicitadas da viga recebiam as lamelas com maior módulo de elasticidade e a região próxima a linha neutra as lamelas com menores valores. A distribuição das lamelas independe do

adesivo que está sendo utilizado, mas diretamente das dimensões e das características anatômicas das peças que estão sendo trabalhadas.

QUADRO 11 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DAS VIGAS ESTIMADO PELO SWT

Viga	MOE (RFF) MPa		MOE (MUF) MPa		MOE (PUR) MPa	
	Aleatório	Não Aleatório	Aleatório	Não Aleatório	Aleatório	Não Aleatório
1	7.870	7.949	7.863	8.166	7.672	8.025
2	7.054	7.309	7.818	8.272	7.445	8.141
3	7.455	8.196	8.137	8.257	7.027	7.507
4	6.912	8.350	7.927	8.573	7.112	7.241
5	6.316	6.714	8.063	8.347	7.375	8.238
6	7.902	7.931	7.702	7.741	8.408	8.670
7	6.908	7.570	7.241	7.841	6.010	6.391
8	7.267	7.497	8.062	8.446	-----	-----
9	7.642	8.498	6.590	7.206	-----	-----
10	7.453	7.640	7.753	7.837	-----	-----
Média	7.2780	7.765	7.716	8.069	7.293	7.745

* Aleatório: distribuição utilizada pela empresa

* Não aleatório: distribuição por resistência da lamela

Neste estudo, optou-se na divisão das peças em duas classes de qualidade, densa e não densa, sendo a primeira para as duas extremidades das vigas e a segunda para as quatro camadas internas da mesma, sem se ter a preocupação com os valores de resistência dentro das classes. Sendo assim, a resistência foi reduzida quando comparada com o que se poderia obter de resistência do material através da distribuição adequada das lamelas.

5.1.3 Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura Estático das Vigas

Os valores de módulo de elasticidade que expressam a rigidez das vigas foram determinados a partir da carga e deflexão da viga no

limite proporcional. Estes valores estão relacionados aos esforços de tensão dentro do estado de elasticidade até o limite de proporcionalidade. É, portanto, o ponto exato onde são iniciadas as deformações plásticas, as quais deixam resíduo de deformação na viga após a retirada da sua causa. Sendo assim, os valores obtidos para a variável Módulo de Elasticidade das vigas estruturais de Madeira Laminada Colada compostos pelos três diferentes adesivos estão apresentados no Quadro 12, onde observa-se nos valores obtidos pelos ensaios destrutivos na máquina universal de ensaios a superioridade do adesivo poliuretano (16.106 MPa) frente ao resorcinol (15.589 MPa) e ao melamínico (15.463 MPa), e a grande dispersão entre os valores encontrados nos três tratamentos; evidenciando a influência dos fatores relacionados à madeira. A dispersão dos resultados pode ser verificada, por exemplo, dentro do tratamento que é caracterizado pelo adesivo MUF, onde o menor valor representa 75% do maior valor.

QUADRO 12 - VALORES DE MOE ESTÁTICO DAS VIGAS DE MLC COMPOSTAS PELOS 3 ADESIVOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Viga	MOE (RFF) MPa	MOE (MUF) MPa	MOE (PUR) MPa
1	14.298	16.339	14.671
2	17.486	13.374	19.638
3	15.096	13.984	15.274
4	15.901	17.393	14.692
5	14.275	13.926	17.969
6	17.078	14.971	16.836
7	14.156	15.584	13.665
8	14.366	16.871	----
9	17.374	14.394	----
10	15.858	17.793	----
Média	15.589	15.4628	16.106

Contudo, através da análise do Quadro 13, que apresenta a Análise da Variância, observa-se que os resultados não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos, pois o F calculado (0,278) foi menor que o F tabelado (0,760) para o nível de significância utilizado no estudo. Observa-se também que o erro dentro dos tratamentos foi maior que entre os mesmos; este fato é devido as variáveis não controladas no experimento.

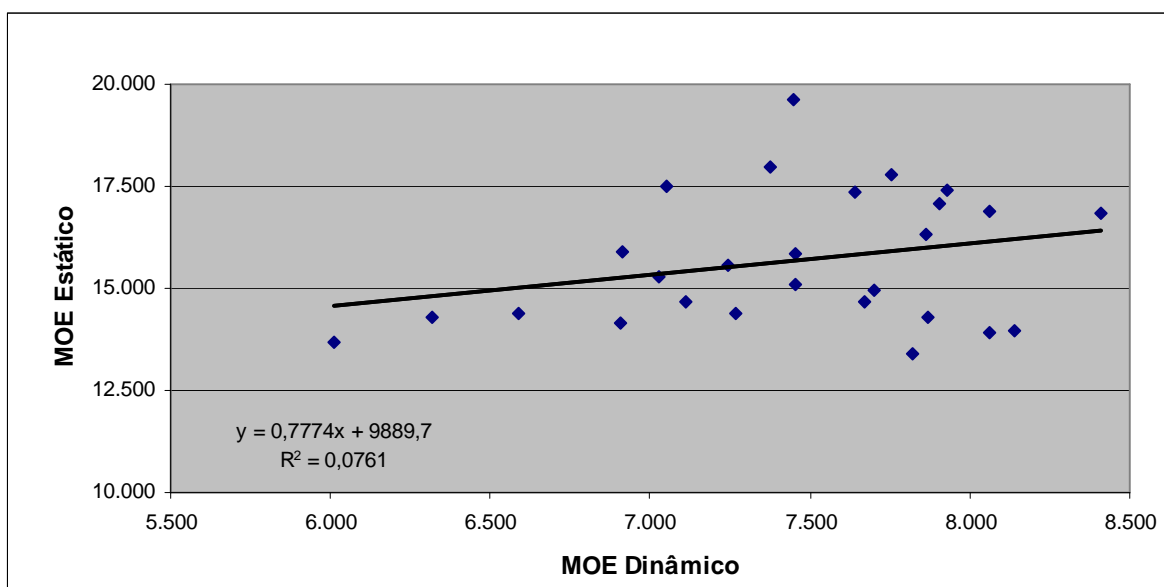
Sendo assim, salienta-se que o adesivo resorcinólico é tradicionalmente o mais utilizado no mercado para a confecção de vigas estruturais, principalmente por ter um alto tempo em aberto e ter a sua cura efetuada em temperatura ambiente. Recentemente foram incorporados o adesivo melamínico e o poliuretano que apresenta um grande poder de ligação a um reduzido tempo de cura; mas em contrapartida pouco tempo em aberto, o que vem a dificultar sensivelmente o manuseio deste produto, necessitando-se de equipamentos especiais para a sua aplicação e uma logística precisa para a prensagem do material, sem a ocorrência de uma pré-cura no sistema, o que acabaria prejudicando a linha de cola.

QUADRO 13 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA MOE DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Nível de Significância
Entre Grupos	2	$2,2754 \cdot 10^6$	$1,1377 \cdot 10^6$	0,278	0,760
Dentro Grupos	24	$9,8388 \cdot 10^7$	$4,0995 \cdot 10^6$		
Total	26	$1,0066 \cdot 10^8$			

Efetuada-se uma análise comparativa entre os métodos de obtenção do MOE de elasticidade dinâmico e estático, verificou-se que a correlação entre as variáveis foi muito baixa, pois o coeficiente de encontrado foi de 0,2758. Mesmo assim, desenvolveu-se uma análise de regressão (FIGURA 27), onde observa-se a dispersão dos valores encontrados em cada um dos ensaios.

FIGURA 27: GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO MOE.



Fonte: O Autor

Legenda: y = Módulo de Elasticidade Estático

x = Módulo de Elasticidade Dinâmico

Desta forma, evidenciou-se que MOE dinâmico explica somente 7,61% do MOE estático, sendo o restante da porcentagem até atingir 100% derivado de outras variáveis como matéria-prima, condições de confecção das vigas e procedimentos utilizados nos ensaios. Com relação aos procedimentos de ensaio, foram utilizadas formas

diferenciadas de obtenção do MOE; onde o dinâmico foi baseado na viga inteira e o estático com aplicação dupla de carga.

Nota-se também que no MOE estimado pelo processo dinâmico, os maiores valores de MOE nas vigas estruturais de madeira laminada colada encontram-se no grupo do adesivo MUF; já no ensaio estático, no adesivo PUR. Este fato é decorrente de que a análise dinâmica foi desenvolvida com base nos valores individuais de cada lamela, sem levar em consideração a composição da viga com o adesivo na colagem das faces. Na análise estática, tem-se a presença efetiva do adesivo entre as faces das lamelas. Desta forma, mesmo não havendo relação direta entre o MOE estimado da viga e o real, reforça-se a importância dos ensaios não destrutivos, pois classificando a madeira em grupos de resistência, privilegia-se o aumento da resistência das vigas durante a sua utilização na estrutura e/ou durante os ensaios mecânicos em laboratório, assegurando um melhor aproveitamento da madeira e a maior segurança das vigas em uso.

O valor do módulo de ruptura é apenas comparativo, não sendo influenciado pela relação vão e altura da viga. A análise dos valores do MOR está apresentada no Quadro 14, onde nota-se que os maiores valores se encontram nas vigas estruturais coladas com o adesivo melamínico com um média de 28 MPa, enquanto que os resultados menos expressivos são das vigas unidas com o adesivo resorcinólico, invertendo a situação encontrada na determinação do MOE, onde as vigas coladas com adesivo melamínico, apresentaram os menores valores de resistência. Mesmo assim, não houveram diferenças estatísticas entre os resultados de MOR, como pode ser observado na Análise da Variância, Quadros 15.

QUADRO 14 - VALORES DE MOR DAS VIGAS DE MLC COMPARANDO-SE OS TRÊS ADESIVOS UTILIZADOS NO ESTUDO.

Viga	MOR (RFF) MPa	MOR (MUF) MPa	MOR (PUR) MPa
1	18	19	26
2	25	37	23
3	27	21	21
4	23	29	24
5	33	32	28
6	22	31	33
7	23	31	28
8	29	19	----
9	30	30	----
10	34	35	----
Média	26	28	26

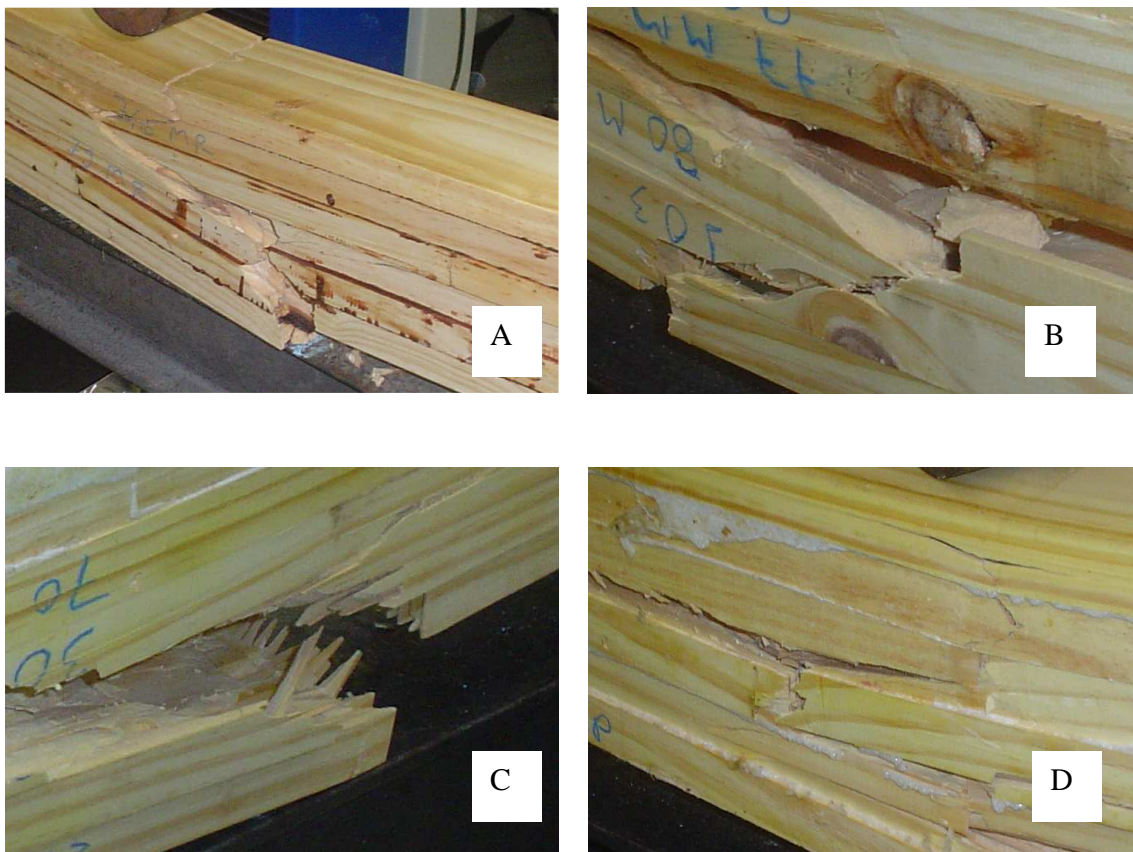
Os valores de carga máxima e módulo de ruptura são influenciados por fatores relacionados à madeira e a fatores externos como o processo de composição da viga. Entre estes fatores estão os encaixes dentados, que influenciam significativamente esses valores, seja no comprimento dos dentes, nas distâncias entre os dentes na viga ou a falta de pressão durante a efetivação do encaixe.

QUADRO 15 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA MOR DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Nível de Significância
Entre Grupos	2	27,90253	13,951266	0,477	0,6262
Dentro Grupos	24	701,45000	29,227083		
Total	26	729,35253			

No presente estudo foram observados três tipos de rupturas (Figura 28): por tração na camada inferior da viga, região oposta a aplicação da carga; nas regiões com a presença de agentes redutores de resistência como nos encaixes e na presença de nós; e em menor escala na região de cisalhamento na linha de cola ao longo do eixo longitudinal da viga, onde se tem a presença do adesivo.

FIGURA 28 - CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS DE RUPTURA NAS VIGAS DE MLC. (A) Ruptura na Parte Inferior da Viga; (B e C) Ruptura em regiões com a presença de agentes redutores de resistência); (D) Ruptura na zona de Cisalhamento.



FONTE: O autor

Salienta-se que as rupturas nas vigas ensaiadas foram observadas nos estágio finais da deformação plástica, sem grandes variações na proporção de deflexão, em relação ao limite proporcional.

ANDRIGHETO *et al* (2006) realizaram ensaios de flexão estática com dois pontos de aplicação de carga em Madeira Laminada Colada de *Pinus spp* com 3150 mm de comprimento e 315 mm de altura, sendo composta por 12 lâminas classificadas de acordo com análise visual e propriedades físicas / mecânicas da madeira. Os resultados demonstraram nas vigas com ¼ de lâminas com qualidade superior MOE médio de 12.695 MPa e MOR de 41 MPa; para as vigas com 1/6 de lâminas com qualidade superior MOE de 10.252 MPa e MOR de 38 MPa; já quando foram utilizadas lâminas invertidas nas regiões de maior esforço, o MOE foi de 11.685 MPa e o MOR de 33 MPa.

Em estudo realizado por NIELSEN (1998) com vigas laminadas coladas de *Eucalyptus spp*, com seção retangular de 10 X 23 cm e adesivo Resorcinol Formaldeído, demonstrou que as vigas formadas com peças de material genético de *Eucalyptus grandis* de árvores com idade média de 9 anos, de duas procedências distintas, um MOE de 10.885 MPa e MOR de 41 kgf/cm² para densidade média de 630 kg/m³; 11.607 MPa e 36 MPa para densidade média de 680 kg/m³; já o material da segunda procedência apresentou MOE e MOR de 10.171 MPa e 35 MPa, respectivamente para a primeira densidade e para a segunda densidade 12.730 MPa e 49 MPa.

Comparando-se os resultados do presente estudo com os estudos mencionados, verifica-se que quando comparado com os ensaios em MLC tanto de *Pinus spp* como de *Eucalyptus spp*, os resultados foram superiores na variável Módulo de Elasticidade, onde o menor valor do presente estudo 13.374 MPa obtido com o adesivo MUF foi superior aos encontrados pelos pesquisadores. Já o MOR foi inferior, com

média entre os três adesivos de 27 MPa, representando somente 82% do menor valor do estudo com madeira de *Pinus spp.* Esta inversão indica que a carga necessária para romper as vigas foram menores, refletindo diretamente nos valores da variável módulo de ruptura. Quanto ao módulo de elasticidade, pode-se dizer que as vigas apresentaram menor deformabilidade e maior resistência, conseqüentemente, melhores as características da madeira para uso estrutural. Assim, mesmo com os expressivos resultados, deve-se enfatizar que os valores de módulo de elasticidade encontrados para as vigas de MLC podem ser aumentados com o efetivo controle dos níveis de defeitos da madeira admitidos para a classificação.

5.2 VIGA PERFIL I

5.2.1 Módulo de Elasticidade e Módulo de Ruptura Estático das Vigas

Neste perfil de viga estrutural foram repetidos os mesmos ensaios destrutivos aplicados à madeira laminada colada, onde o Quadro 16 apresenta os valores de Módulo de Elasticidade encontrados como resultados dos ensaios. Observa-se novamente a superioridade das vigas que utilizaram o PUR como adesivo com MOE médio de 15.805 MPa, seguido das vigas com o adesivo RFF e finalmente as vigas com MUF. Esta superioridade não foi significativa dentro do tratamento e entre os tratamentos implantados, como pode ser verificado no Quadro 17 que apresenta a Análise da Variância.

QUADRO 16 - VALORES DE MOE ESTÁTICO DAS VIGAS COM PERFIL I COMPOSTAS PELOS TRÊS ADESIVOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Viga	MOE (RFF) MPa	MOE (MUF) MPa	MOE (PUR) MPa
1	13.939	15.935	15.788
2	17.850	11.288	15.921
3	14.732	17.751	19.220
4	18.820	14.566	17.208
5	16.020	14.967	11.207
6	15.280	11.531	15.306
7	17.900	21.106	16.585
8	12.500	11.957	15.203
9	10.757	18.656	-----
10	14.195	20.520	-----
Média	15.199	14.888	15.805

QUADRO 17 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA MOE DE VIGA PERFIL I

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Nível de Significância
Entre Grupos	2	$1,9745 \cdot 10^6$	$9,8726 \cdot 10^5$	0,106	0,9003
Dentro Grupos	25	$2,3389 \cdot 10^8$	$9,3558 \cdot 10^6$		
Total	27	$2,3587 \cdot 10^8$			

Em estudo realizado por PEDROSA (2003) com vigas de perfil I constituídas por PLP (Painel de Lâminas Paralelas), Compensado de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* e OSB de *Pinus spp*, encontrou como melhores resultados as vigas formadas com chapas de OSB como alma, e PLP de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp* como flanges, com módulos de elasticidade aproximados de 14.000 MPa e 20.000 MPa, respectivamente; enquanto que o valor médio de MOE entre os três tratamentos do presente estudo foi de 15.297 MPa, mesmo as flanges sendo compostas por duas peças de madeira serrada coladas face a

face; sendo que segundo especificações de fabricantes o material mais indicado para este fim seriam chapas de PLP. Quanto ao emprego de chapas de OSB em vigas com perfil I, pode-se afirmar que é o material mais adequado para a composição da alma, pois durante a confecção das vigas, tentou-se por algumas vezes o emprego de chapas de compensado, mas em virtude da necessidade de fresamento para a melhoria do desempenho dos encaixes, todos apresentaram imperfeições na sua formação devido à fragilidade das lâminas, comprometendo a sua utilização.

A fabricação das vigas estruturais com perfil I exige uma maior atenção, tendo em vista a necessidade da implementação de encaixes dentados tanto nas faces internas das flanges, como nas laterais das chapas que serão conectadas. Outro fator que dificulta a fabricação destas vigas é a falta de equipamento específico para este fim, como aplicadores de adesivo.

Caso o adesivo utilizado na composição seja o PUR, os cuidados devem ser redobrados, devido o pouco tempo em aberto, seu alto poder corrosivo e seu alto poder de adesão, podendo ficar aderida aos pratos da prensa, sendo necessário à aplicação de desmoldante na mesma para evitar esse problema.

Quanto ao tempo em aberto, observa-se que no Quadro 16, que foram apresentadas somente 8 vigas com adesivo PUR, este fato é devido a alta temperatura ambiente que estava no momento da montagem das vigas, o que reduziu o tempo de assemblagem do adesivo, impedindo a consolidação do adesivo durante a prensagem, ou seja, ocorreu uma pré-cura que poderia comprometer o desempenho das vigas durante os ensaios estáticos.

Da mesma forma, nos valores de MOE da madeira laminada coladas, evidencia-se uma grande dispersão dos valores dentro dos

tratamentos, como por exemplo no tratamento com adesivo melamínico que tem seu maior valor em 21.106 MPa e o menor valor em 12.288 MPa, correspondendo a quase a metade do primeiro valor de MOE mencionado. Esta dispersão é devido a constituição das flanges, pois o material utilizado na alma do composto, chapas de OSB.

Os valores encontrados para Módulo de Ruptura em Vigas com Perfil I são apresentados no Quadro 18, onde verifica-se que as vigas coladas com adesivo RFF e MUF apresentam 13 MPa de resistência nesta variável, enquanto as vigas que utilizaram o adesivo PUR 23 MPa, cerca de 42% superior as demais.

QUADRO 18 - VALORES DE MOR ESTÁTICO DAS VIGAS COM PERFIL I COMPOSTAS PELOS 3 ADESIVOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Viga	MOR (RFF) MPa	MOR (MUF) MPa	MOR (PUR) MPa
1	18	11	18
2	18	18	32
3	19	11	24
4	11	15	22
5	9	11	12
6	16	13	28
7	13	14	23
8	10	14	27
9	9	12	----
10	12	14	----
Média	13	13	23

Este fato fez com que houvesse uma diferença estatística, neste ensaio, ao contrário do que estava sendo apresentado nos ensaios anteriores. Esta diferenciação foi comprovada pela Análise da Variância e pelo Teste de Tukey a 5% de significância, que estão apresentados nos Quadros 19 e 20.

Na análise da variância observa-se que o F calculado (14,473) é superior ao F tabelado (0,0001), caracterizando a diferenciação entre os tratamentos. No teste de tukey evidenciou-se que a diferença está entre os tratamentos que utilizaram os adesivos resorcinólico e melamínico em relação ao poliuretano que apresentou desempenho superior, conforme as diferenças entre os tratamentos que se situaram acima dos limites de tolerância permitidos pelo teste realizado.

QUADRO 19 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA MOR DE VIGA PERFIL I

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Nível de Significância
Entre Grupos	2	524,43065	262,21532	14,473	0,0001
Dentro Grupos	25	452,93684	18,11747		
Total	27	977,36749			

QUADRO 20 - TESTE DE TUKEY A 95% DE SIGNIFICÂNCIA PARA MOR DE VIGA PERFIL I

Tratamento	Número de Repetições	Média	Grupos Homogêneos
2	8	22,954600	a
1	10	13,386590	b
3	10	13,362770	b
Contraste			Diferença +/- Limite
1 - 2			-95,6801 50,3055*
1 - 3			0,2382 47,4285
2 - 3			95,9183 50,3055*

A superioridade das vigas onde foi utilizado o adesivo poliuretano estava evidenciada em todos os ensaios, mas nunca de forma significativa. Este fato é decorrente das características da

madeira utilizada nas flanges, madeira serrada coladas face a face, que apresentaram vários fatores redutores de resistência como a presença de defeitos naturais, que pode ser eliminado durante a fase de classificação das peças e devido as junções através de dentes colados com os adesivos utilizados; neste caso destacando-se o adesivo PUR; tendo em vista que defeitos nas peças todas as vigas possuíam e os dentes das junções foram implementados de forma uniforme na fresadeira.

5.3 Análise Econômica

Na análise do desempenho dos adesivos no decorrer dos ensaios das vigas estruturais, não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos, com exceção somente do módulo de ruptura para vigas com perfil I, onde ocorreu a superioridade do adesivo poliuretano. O módulo de ruptura, como já mencionado anteriormente no decorrer deste capítulo, vem a ser uma variável de comparação de resistência máxima entre os tratamentos, tendo em vista que a variável utilizada para a classificação da madeira para uso estrutural vem a ser o módulo de elasticidade. Sendo assim, com base no presente estudo, evidencia-se que o ponto que deve ser abordado na escolha do adesivo vem a ser a quantidade do material a ser utilizado e o preço de aquisição do mesmo no mercado.

Observa-se nos Quadros 21 e 22, que a área a ser colada é sempre a mesma, ou seja, entre os encaixes e nas faces das peças, independe do adesivo a ser utilizado, mantendo sempre as mesmas condições de classificação; tendo em vista que pode variar o número de junções dependendo da qualidade da madeira utilizada para a fabricação das vigas. Observa-se que a gramatura utilizada para o

adesivo PUR é de 200 g/m² em linha simples, cerca de 50% menor que o adesivo MUF e 40% menor que o RFF, isto representa uma grande diminuição da quantidade de adesivo a ser utilizado por unidade de área.

Para Madeira Laminada Colada, utilizando-se as características das vigas do presente estudo, tem-se para o adesivo PUR 378,20 g de adesivo para a colagem face a face e 15,22 g para a colagem das 24 junções necessárias no composto, totalizando 383,42 g; quando faz-se um comparativo com as vigas coladas com o adesivo resorcinólico, tem-se 945,50 g para a colagem das faces e 38,06 g para as junções, totalizando 983,56 g; ou seja, aproximadamente 256% a mais de adesivo para se produzir o mesmo composto. Quando compara-se com o adesivo melamínico, tem 205% de acréscimo na quantidade de cola. Estas variações estão relacionadas diretamente a gramatura utilizada para aplicação dos adesivos, segundo a recomendação dos catálogos das empresas fornecedoras dos adesivos.

Quando relatá-se as vigas com perfil I, a situação não é diferenciada da madeira laminada colada, o adesivo poliuretano permanece com a aplicação de menores quantidades do produto, refletindo na diminuição dos custos de produção; tendo em vista que em termos líquidos, sem a incorporação dos impostos o adesivo PUR apresenta preço por quilograma de adesivo de R\$ 22,80, a MUF R\$12,51 e a RFF R\$40,00. Desta forma, para a produção de uma viga estrutural com perfil I utilizando o adesivo PUR seria gasto R\$ 4,19, para o MUF 4,60 e para o RFF, R\$ 18,38.

QUADRO 21 - QUANTIFICAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA PARA FABRICAÇÃO DAS VIGAS ESTRUTURAIS.

Vigas	Adesivo / viga				Madeira / viga	
	Formulação	Emenda (g)*	Face (g)	Fresa (g)	Madeira Serrada (m ³)	Painel OSB (m ³)
MLC	RFF	38,06	945,50	-----	0,059	-----
	MUF	30,45	756,40	-----	0,059	-----
	PUR	15,22	378,20	-----	0,059	-----
I-joist	RFF	25,38	378,20	56,00	0,039	0,0043
	MUF	20,30	302,56	44,80	0,039	0,0043
	PUR	10,15	151,28	22,40	0,039	0,0043

* 4 junções por lamela, totalizando 24 junções para MLC e 16 para I-joist

O fator que coloca o adesivo PUR em posição de destaque frente aos demais é o reduzido tempo de cura em temperatura ambiente; enquanto os adesivos tradicionais atingem o tempo de cura em 12 horas, o PUR atinge em 30 minutos, aumentando o rendimento do processo.

Desta forma, destaca-se com base no presente estudo, a utilização do adesivo PUR para a fabricação de vigas estruturais, salientando que devem ser tomados alguns cuidados na sua aplicação como na sua grande velocidade de cura e no poder corrosiva quando em contato com roupas e com a pele. Outro fator que deve ser exposto é a necessidade de equipamento específico para a aplicação do adesivo e a distribuição de desmoldante na prensa para que não ocorra um mecanismo de adesão entre a viga e os pratos da mesma.

O tempo em aberto, ou seja, o tempo desde a aplicação do adesivo até o momento da prensagem deve ser o menor possível para que não ocorra um aumento na viscosidade, passando do momento elástico máximo de aplicação; tendo como consequência a falha penetração do adesivo na madeira e a queda na qualidade da colagem.

Exemplifica-se que em condições de temperatura ambiente de 20°C e a madeira com 12% de umidade tem-se como tempo de início do processo da solidificação de aproximadamente de 8 minutos para o adesivo PUR, o que pode ser uma grande vantagem em processos que contam com equipamentos adequados e grande velocidade de produção, ou desvantagem em outros, pois deve-se aplicar o adesivo e na seqüência realizar a prensagem, caso contrário, perde-se todo o material que está sendo trabalhado. O tempo citado pode ser diminuído ainda mais com o aumento da temperatura ambiente.

Em termos de diferença de resistência entre os dois modelos de viga utilizados no estudo, não foram evidenciadas diferenças estatísticas entre os mesmos para o Módulo de Elasticidade, somente para MOR que apresentou valores médios de 26 MPa para MLC e 16 MPa para Perfil I; sendo assim, as vigas com perfil I apresentam algumas características de destaque frente à MLC como o seu peso em relação à resistência, a quantidade de madeira serrada utilizada, a utilização de chapas de partículas reconstituídas (OSB) e a menor quantidade de adesivo a ser utilizado na sua composição; em contrapartida, tem-se a necessidade de adotar maiores cuidados no decorrer do processamento das vigas como na montagem e o acréscimo de algumas operações como o fresamento das flanges e das chapas.

O Quadro 22 apresenta a quantidade de material utilizado para a fabricação das vigas estruturais com os respectivos custos de aquisição dos produtos sem a incorporação dos impostos como ICMS. Entre os valores relativos à matéria – prima madeira, tem-se conforme informações coletadas em empresas do município de Lages que um metro cúbico de madeira serrada, tem custo aproximado de R\$ 370,00 e uma chapa de OSB de 1,22 X 2,44 m, R\$36,00.

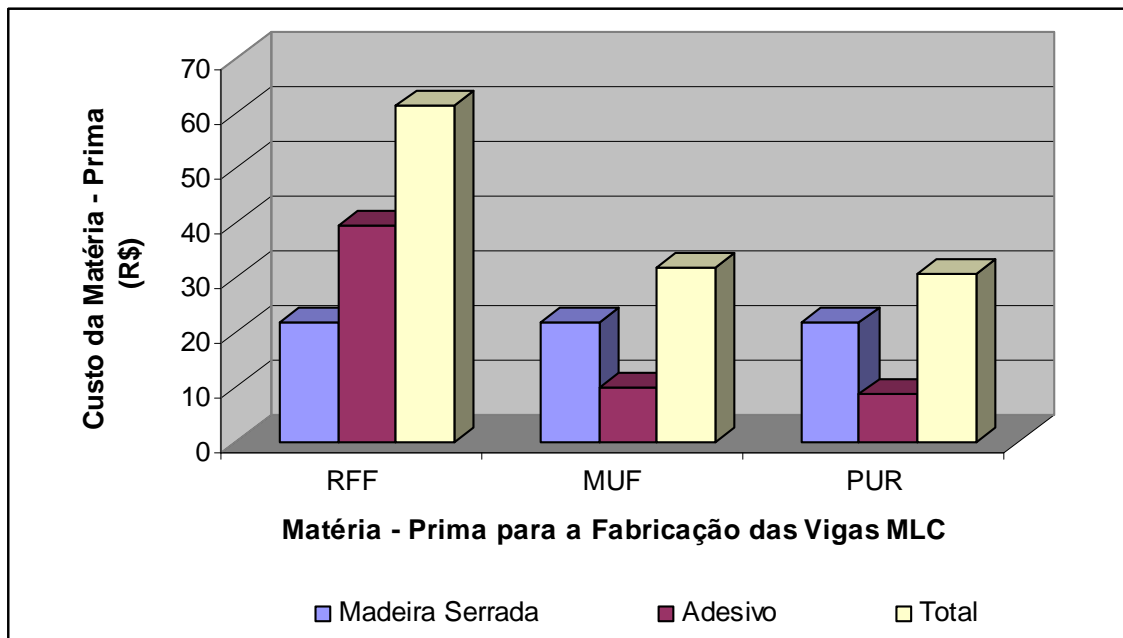
QUADRO 22 - CUSTO PARA A FABRICAÇÃO DAS VIGAS ESTRUTURAIS DE MLC E COM PERFIL I

Vigas	Adesivo / viga			Mad. /viga m ³	MOE MPa	MOR MPa	Custo (R\$ / viga)
	Adesivo	Gramatura (g/m ²)	Peso (g)				
MLC	RFF	500-dupla	983,56	0,059	15.589	26	61,17
	MUF	400-dupla	786,95	0,059	15.463	28	31,67
	PUR	200-simples	383,42	0,059	16.106	26	30,57
I- joist	RFF	500-dupla	459,58	0,043	15.199	13	35,68
	MUF	400-dupla	367,66	0,043	14.888	13	21,89
	PUR	200-simples	183,83	0,043	15.805	23	21,49

Desta forma, pode-se verificar que as vigas que apresentaram maior custo de produção foram as que utilizam o Adesivo Resorcina Fenol Formaldeído, independente do modelo de viga, tendo em vista o custo deste insumo. Sendo assim, observa-se que com a exceção destas vigas, o grupo de vigas estruturais que apresentou os maiores valores de matéria-prima foram as vigas de madeira laminada colada, devido a quantidade e o custo da madeira serrada no mercado nacional.

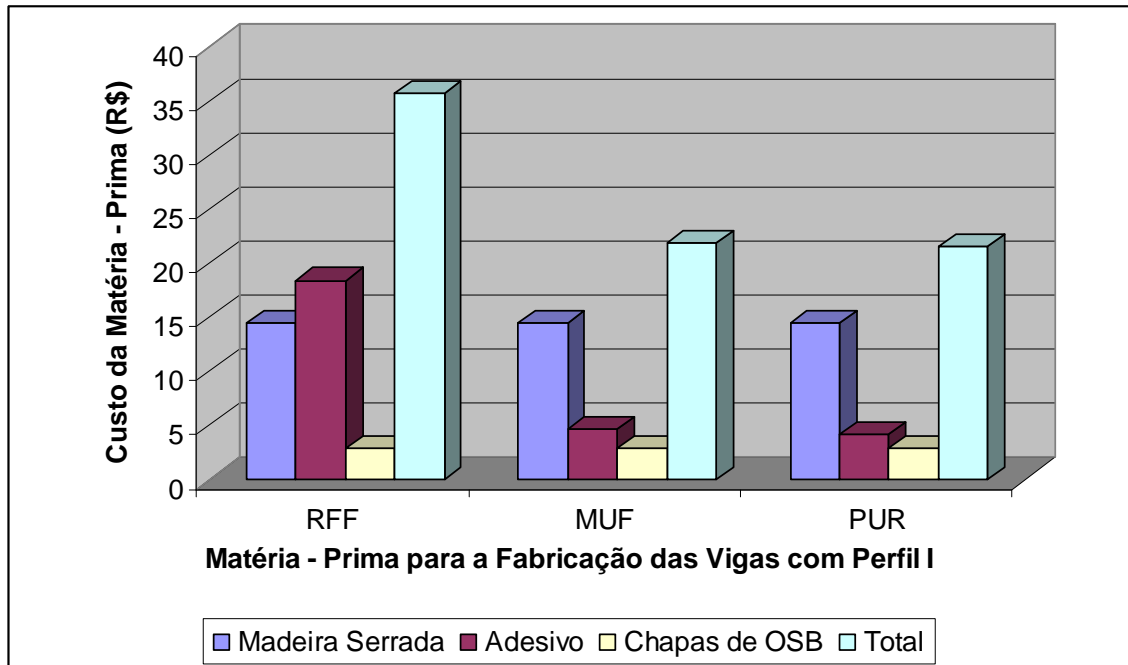
A Figura 29 apresenta os custos dos materiais utilizados para a produção das Vigas Estruturais de MLC, onde se destaca o custo da madeira, do adesivo e total. O maior custo, em termos de matéria-prima, na formação do composto foi a madeira, apresentando a mesma quantidade em todas as vigas produzidas durante o desenvolvimento do projeto. Dentro do grupo de adesivos, as vigas coladas com resorcina fenol formaldeído apresentam maior custo, seguido da melamina uréica formaldeído e com menor valor as vigas coladas com adesivo poliuretano.

FIGURA 29 - MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA PARA A PRODUÇÃO DAS VIGAS MLC.



Na composição das vigas estruturais com perfil I, mantém-se inalterável em termos de quantidade de matéria-prima as peças de madeira serrada e as chapas de OSB, conforme pode ser observado na Figura 30. A variável adesivo, quando comparada com as vigas MLC apresentam-se em menor quantidade e conseqüentemente com menor influência na composição do custo das vigas, da mesma forma pode ser citada a utilização das chapas de OSB que substituem duas camadas de lamelas da vigas de MLC, reduzindo o custo de produção.

FIGURA 30 - MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA PARA A PRODUÇÃO DAS VIGAS COM PERFIL I.



6 CONCLUSÕES

O sistema de classificação visual utilizado na seleção de peças de madeira para a confecção de vigas estruturais de Madeira Laminada Colada foi insuficiente para se atingir os valores máximos de módulo de elasticidade das vigas.

O processo visual e a contagem os anéis de crescimento (densidade) pode ser utilizada nas operações de destopo e pré-classificação das peças para a composição das lamelas, reduzindo o custo da classificação e aumentando o rendimento da operação.

As variações dos valores de módulo de elasticidade dinâmico das lamelas foram afetadas diretamente pela amplitude dos valores de massa específica e de velocidade de propagação da onda.

O posicionamento correto das lamelas através de métodos dinâmicos de classificação como o *Stress Wave Timer* teve como consequência o aumento do módulo de elasticidade.

Não foram evidenciadas diferenças significativas de módulo de elasticidade entre as vigas compostas pelos três tipos de adesivo.

O presente estudo evidenciou que não houve correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático das vigas de Madeira Laminada Colada, não sendo possível a elaboração de equação de correlação entre as diferentes formas de obtenção da variável.

As rupturas das vigas foram localizadas nas regiões tracionadas da viga, nas regiões que contém redutores de resistência como encaixes e nós e na área de cisalhamento na linha de cola.

As vigas com perfil I apresentaram diferenças estatísticas no módulo de ruptura entre os tratamentos que utilizaram adesivo resornólico e melamínico em relação ao poliuretano, que obteve coeficientes superiores aos dois tradicionalmente utilizados.

A quantidade de material utilizado para a produção das vigas de Madeira Laminada Colada foi de 0,059 m³ de madeira serrada,

enquanto que para as vigas com perfil I teve-se 0,043 m³, volume que foi composto de madeira serrada e chapas de OSB.

Em virtude da diferenciação das gramaturas utilizadas para cada adesivo, observou-se que o adesivo resorcinólico necessitou de mais adesivo para realizar o mecanismo de adesão; sendo assim, tem como consequência o maior custo de aquisição.

O adesivo melamínico, mesmo apresentando gramatura de 400 g/m², acabou se aproximando em termos de preço quando comparado com o adesivo poliuretano com gramatura de 200 g/m².

O fator de diferenciação de processo entre os adesivos melamínico e o poliuretano foi o tempo de cura e o tempo em aberto.

O custo da matéria prima utilizada nas vigas do presente estudo foi maior na produção das vigas de madeira laminada colada devido ao preço da madeira serrada.

Registra-se que estudos futuros com vigas estruturais de madeira utilizando as variáveis do presente estudo devem abranger:

- os valores de módulo de elasticidade dinâmico de todas as peças que fazem parte das lamelas;
- a interferência do adesivo na propagação da onda na determinação do MOE dinâmico das vigas;
- a resistência específica das emendas *finger joint* entre as peças que compõem as lamelas do composto;
- a influência dos produtos preservantes de madeira (CCA ou CCB) nas propriedades físicas e mecânicas das peças de *Pinus taeda*, pois as mesmas devem ser tratadas em autoclave.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDE. **Ensaio Não Destrutivo – END**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não – Destrutivo e Inspeção. Acessado em <http://www.abende.org.br> em 22/06/2006 às 10:06 h.

ABIMCI. **Estudo Setorial 2004 – Indústria de Madeira Processada Mecanicamente**. Curitiba: ABIMCI, 2005, p. 50.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7190: Projetos de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997, p. 107.

ABIPA. **Dados Setoriais de Produção, Consumo, Importação, Exportação e Faturamento da Indústria de Chapas de MDF, Chapas Duras e Aglomerado**. Acessado <http://www.abipa.org.br/fntab/numeros.php> em 18/04/2006 às 14:52 h.

ABIQUIM (2006) Associação Brasileira da Indústria Química. **Poliretano**. Disponível em <http://www.abiquim.org.br>. Acessado em 31 de maio de 2006 às 16:45 h.

ABRAHÃO, C.P. **Efeito da Redução da Área Colada no Comportamento de Vigas e Colunas de Madeira Laminada de *Eucalyptus grandis***. Viçosa – MG: Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, 2001, P. 61.

ALBUQUERQUE, Carlos Eduardo Camargo. **Processo de Produção de Chapas de Fibras**. Curitiba: Trabalho de Disciplina do Curso de Doutorado em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná. 1999, p. 71.

ANDRIGHETO, Rafael; SZÜCS, Carlos Alberto. **ESTUDO Comparativo Entre Madeira Laminada Colada e Madeira Laminada Colada Multicolada**. São Pedro (SP): Anais do 10º EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D245-93. **Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber**. Philadelphia, 1998.

ARRUDA, Humberto Alexandre Cabral. **Classificação e Triagem das Tábuas no Início do Processo de Fabricação de Elementos de Madeira Laminada Colada**, 1995. Dissertação de Mestrado Apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto de Estruturas de Madeira**. NBR 7190. Rio de Janeiro, 1997, p. 107.

ASTM D3737-96. **Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber**. West Conshohoken, PA: American Society of Testing and Materials, 1998.

ASTM D2525-96. **Standard Test Methods for Establishing Clear Wood Strength Values**. West Conshohoken, PA: American Society of Testing and Materials, 1998.

BALLARIN, A. W.; GONÇALVES, R. Ensaio Não - Destrutivo Aplicado aos Produtos à Base de Madeira: A Situação Brasileira. São Paulo: Anais em CD-ROOM do Congresso Nacional de Ensaio Não-Destrutivo, 2001.

BAUER, L.A. F. **Materiais de Construção: A Madeira como Material de Construção**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1985, cap. 14, p. 36 – 48.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

BOUVIER, D. **Une Nouvelle Génération de Polyuréthanes** Baytec RT et BAYDUR 110. Composites, Oxford. n. 20, p. 66-70, Mars-Avril.

BUSTOS, C.; BEAUREGARD, R.; MOHAMMAD, M.; HERNÁNDEZ, R. E. **Structural performance of finger-jointed black spruce wood lumber with different joint configurations**. Madison: Forest Products Journal, n. 53, ano 9, p. 72-76, 2003.

CALIL, Carlito Júnior; MINÁ, Alexandre J.S. **Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira**. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n. 2, 2003.

CARDOSO, M.A. SIMATEC/98. **Revista Madeira & Tecnologia**, Curitiba, v.2, n. 12, p. 16. 1999.

CARRASCO; Edgar V.M.; AZEVEDO JÚNIOR, Antônio P. **Avaliação Não - Destrutiva de Propriedades Mecânicas de Madeiras através de Ultra-Som – Fundamentos Físicos e Resultados Experimentais**. Lavras: Revista Cerne, v.9, n.2, 2003, p. 178 – 191.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo. **Critérios para Classificação Visual de Peças Estruturais de *Pinus sp.*** São Carlos: Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003, p. 182.

CARREIRA, Marcelo R.; CHEUNG, Andrés B.; OLIVEIRA, Fabiana G.R.; DIAS, Antônio A.; CALIL JÚNIOR, Carlito; SALES, Almir; STAMATO, Guilherme C. **Avaliação de Técnicas Não-Destrutivas Aplicadas a Madeira de *Pinus sp.*** Rio de Janeiro: III Pan American for Nondestructive Testing, 2003.

CESAR, Sandro Fábio. **Chapas de Madeira para Vedação Vertical de Edificações Produzidas Industrialmente - Projeto Conceitual**. Florianópolis: Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, p. 302.

CLARO NETO, S.C. **Caracterização Físico-Química de um Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona Utilizado para Implantes Ósseos**. São Carlos: Tese apresentada ao Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), p.ç 127, 1997.

CLOUTIER, A. **Oriented Strand Board (OSB): Raw Material, Manufacturing Process, Properties and Uses**. Belo Horizonte: Anais do Seminário Internacional sobre Produtos Sólidos de Madeira de Alta Tecnologia, p. 173 – 185), 1998.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NOMUNG. **DIN 68 140 – Wood Finger – Jointing**. Berlim – Alemanha, 1971.

DUNLOP, J.I. **Testing of poles by using acoustic pulse method**. Wood Science and Technology, v. 15, n. 04, p. 301-310, 1981.

ELEOTÉRIO, Jackson Roberto. **Propriedades Físicas e Mecânicas de Painéis MDF de Diferentes Densidades e Teores de Resina**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras, 2000, p. 121.

Emerson, N. R. ; Pollock, D. G. ; Kainz, J. A. ; Fridley, K. J. ; Mclean, D. L. ; Ross, R. J. (1998). **Ndestructive Evaluation Techniques for Timber Bridges**. In: 5TH World Conference on Timber Engineering. Montreux, Switzerland.

ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. Engineered Wood Systems. **Engineered Wood Construction Guide**. Disponível em: <http://www.apawood.org/pdfs/managed/E30rEWP.PDF> e Acessado em 14 de novembro de 2006.

EN 789:1995 **Estruturas de Madeira – Métodos de teste – Determinação das propriedades mecânicas de painéis derivados de madeira**. European Standard (versão portuguesa), Bruxelas 1995.

FAGUNDES, Glene Suely, SCÜCS, Carlos Alberto. **Composição Racional de Vigas de Madeira Laminada Colada de Pinus**. Florianópolis: Anais do VI EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, p. 277 – 288, 1998.

FIORELLI, Juliano. **Estudo Teórico e Experimental de Vigas de Madeira Laminada Coladas Reforçadas com Fibra de Vidro**. São Carlos: Tese apresentada a Área de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, 2005, p. 108.

FISSETTE, P. **The Argument for I-Joists: New Products and Increased Competition Make Superior I – Joist Performance Available at Solid – Lumber Prices**. Fine Homebuilding Magazine, n. 129, p. 70 – 73, 2000. Disponível em <http://www.taunton.com/finehomebuilding/pages/h00039.asp> e Acessado em 14 de janeiro de 2007.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook—Wood as an engineering material**. Madison: WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p., 1999.

FREAS, A. D.; SELBO M. R.. **Fabrication and Design of Glued Laminated Wood Structural Members**. Technical Bulletin n. 1069, Madison: US. Department of Agriculture, 1954.

FURIATTI, M.. **Classificação Estrutural de Peças de Madeira**. Dissertação de Mestrado Apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 1981.

GALLIGAN, L. W.; MCDONALD, K. A. **Machine grading of lumber – Practical concerns for lumber producers**. Madison: Department of Agriculture - Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000, p.39.

GALLIGAN, L. W.; SNODGRASS, D.V. Machine Stress – Rated Lumber: Challenge to Design. Madison, Wisconsin: American Society of Civil Engineering. Journal of Structural Division, 1970.

GREEN, D. W. (1998). **Strength of Visually Graded Structural Lumber**. Madison: Forest Products Laboratory, Department of Agriculture, Forest Service, 1998.

GLUED LAMINATED TIMBER ASSOCIATION. Disponível em <<http://www.glulam.co.uk>> Acesso em 20 de junho de 2007

GREEN, D. W.; EVANS J. W. (1987). **Mechanical Properties of Visually Graded Lumber: Volume1, A Summary**. Madison: Forest Products Laboratory, Department of Agriculture, Forest Service, 1987.

GREEN, D. W.; HERNANDEZ, R. *Codes and standards for structural wood products and their use in the United States*. In: **Proceedings of the Forest**. Mérida, Yucatán, México: Products Study Group Workshop, 1998, p. 11.

GREEN, D. W.; KRETSCHMANN, D.E. **Wood handbook—Wood as an engineering material - Chapter 6 - Lumber Stress Grades and Design Properties**. Madison: Forest Products Laboratory, Department of Agriculture, Forest Service, 1999.

GREEN, D. W.; EVANS, J. W.; PELLERIN, R.. **Moisture Content and the Flexural Properties of Lumber: Species Differences**. Londres, England: Proceedings - International Timber Engineering Conference, 1991.

HELLMEISTER, J.C. **Sobre a Determinação das Características Físicas da Madeira.** São Carlos: Tese apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1982, p. 119.

HERNANDEZ, R.. **Analysis of Strain in Finger-Jointed Lumber.** Montreux (Switzerland): 5th World Conference on Timber Engineering, Montreux, v. 1, 1998, p. 17-20.

HUMPHREYS, R.D.; CHIMELO, J.P. **Comparação entre Propriedades Físicas, Mecânicas e Estereológicas para Agrupamento de Madeiras.** Congresso Nacional Sobre Essências nativas. São Paulo: Anais, 1992, p. 480 – 490.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Disponível em <<http://www.niem.ipt.br/ipt/>>. Acesso em 20 de abril de 2007.

IWAKIRI, S. **Painéis de partículas orientadas OSB.** Revista da madeira: ABPM, edição n. 41, ano 7, 1999, p.52-53.

IWAKIRI, S., **Painéis de Madeira.** Curitiba: FUPEF/Série Didática n. 1/98, 1998, 128 p.

IWAKIRI, Setsuo; MENDES, Lourival Marin; SALDANHA, Leopoldo Karman; SANTOS, Juliano Cláudio. **Utilização da Madeira de Eucalipto na Produção de Chapas de Partículas Orientadas – OSB.** Lavras: Revista Cerne, vol. 10, n.1, 2004, p. 46 -52.

JANSENS, D.P. **The Increasing Recognition of Oriented Strand Board (OSB) as a Preferred Structural Panel.** In: Seminário Internacional sobre Produtos Sólidos de Madeira de Alta Tecnologia. Belo Horizonte. Anais... Viçosa: SIF, UFV, DEF, 1998, p. 169 – 172.

JAYNE, B.A. **Vibrational Properties of Wood as Indices of Quality.** Forest Products Journal, v.9, n. 11, 1959, p. 413 – 416.

JESUS, J.M.H.. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC).** Tese Apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos - Instituto de Física de São Carlos - Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2000, 106p.

KRETSCHMANN, David E.; David W. **Lumber Stress Grade and Design Properties – Wood Handbook – Wood as an Engineering Material**. Madison, Wisconsin: United States Department Agriculture / Forest Service / Forest Products Laboratory, 1999, 6-1 a 6-15.

KRETSCHMANN, David E.; MOODY, Russel C.; PELLERIN, Roy F.; BENDTSEN, B. Alan; CAHILL, James M.; McALISTER, Robert H.; SHARP, Donald W. **Effect of Various Proportions of Juvenile Wood on Laminated Veneer Lumber**. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1993, 31 p.

LAHR, F.A.R. **Sobre a Determinação de Propriedades de Elasticidade da Madeira**. São Carlos: Tese apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1983.

LAROCA, Christine. **Habitação Social em Madeira: uma Alternativa Viável**. Curitiba: Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, 2002, p.

LOGSDON, Norman Barros; CALIL JÚNIOR, Carlito. *Cadernos de Engenharia de Estruturas - **Influência da Umidade nas Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira***. São Carlos: EESC-USP, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Estruturas, n. 18, 2002, p. 77 – 107.

LOPES, Merielen; GARCIA, Álvaro. Adesivos para Colagem de Madeira para Fins Estruturais. Revista da Madeira. Curitiba: CR Design & ABPM, n.86, ano 14, dez. 2004.

MACÊDO, Alcebíades Negrão. **Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC): Avaliação de Método de Ensaio**. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1996.

MACÊDO, Alcebíades N.; CALIL JÚNIOR, Carlito. **Caderno de Engenharia de Estruturas - Estudo de Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC): Avaliação de Método de Ensaio – NBR 7190/1997**. São Carlos: EESC-USP, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Estruturas, n. 7, 1999, p. 23.

MADSEN, B. ***Structural Behaviour of Timber***. Vancouver, Canadá: Timber Engineering Ltd, 1992.

McDONALD, K.A.; FALK, R.H.; PATTON MALLORY, M. **Nondestructive Testing of Wood Products and Scruture, state of the art and research needs**. Madison: USDA / Forest Service / Forest Products Laboratory, 1990, p. 137 – 147.

MALONEY, T.M. **The Family of Wood Composite Materials**. Forest Products Journal, v. 46, n. 2. p. 19-26, Feb. 1996.

MATOS, Jorge L. M. **Produção de Vigas de Madeira Laminada Colada e sua Utilização**. Apostila da Disciplina de Produção de Vigas Laminadas do Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, 2000, p.54.

MATOS, Jorge L. M. **Estudos sobre a Produção de Painéis Estruturais de Lâminas Paralelas de *Pinus taeda* L.** Curitiba: Tese apresentada ao Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, 1997, p. 117.

MATSUNAGA, Dirce Kinue. **Avaliação da Utilização de madeira Comercial de *Pinus taeda* L. e da Adequabilidade da Norma Européia Unificada (CEN), à Construção de Vigas Laminadas Coladas**. Curitiba: Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, 1995, p. 155.

MATHIESEN, J.A. **Estudo das Emendas Biseladas em Madeira Laminada Colada**. Florianópolis (UFSC): Anais do Encontro Brasileiro em Madeira e em Estrutura de Madeira, v.1, 1998, p. 345 – 356.

MENDES, Lourival Marin. ***Pinus spp* na Produção de Painéis de Partículas Orientadas (OSB)**. Curitiba: Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, 2001, p.

NAHUZ, M.R.A.; FRANCO, N.; FIGUEIROA, F.M.Z. **Uso Estrutural da Madeira de Eucalipto: A Experiência do IPT**. Belo Horizonte: Anais do 1º Seminário Internacional de Produtos Sólidos de Madeira de Alta Tecnologia, p. 126 – 133, 1998.

NASCIMENTO, Alexandre M.; OLIVEIRA, José T.S.; DELLA LUCIA, Ricardo M. **Classificação e Propriedades da Madeira de Pinus e Eucalipto**. Revista Floresta e Ambiente. Seropédica (RJ): Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, v. 8 , n. 1, jan-dez, 2001, p. 27 - 35.

NASCIMENTO, Alexandre M.; DELLA LÚCIA, Ricardo M.; BAETA, Fernando da Costa. **Comportamento de Vigas Retas em MLC com Emendas de Topo e Bisel – Parte 1**. Revista Floresta e Ambiente. Seropédica (RJ): Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, v. 9 , n. 1, jan-dez, 2002, p. 63 – 71.

NATTERER, J. (1991). *Quality criteria for timber design*. In: International Timber Engineering Conference, London. Proceedings, v.2, 1991, p.19-26.

NIELSEN, Ingrid Raquel. **Utilização da Madeira Comercial do Híbrido de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake X *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na Confecção de Vigas Laminadas Coladas**. Curitiba: Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. 1998, p. 109.

NIEM /IPT – Núcleo de Inteligência Econômica de Mercado do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Disponível em <http://www.niem.ipt.br/ipt> e Acessado em 22 de março de 2007.

NORDSTROM, J.E.P. **Bending Strenght Of Spruce End-Grain Butt – Joint Using Formaldehyde Based Adhesives**. Forest Products Journal, v. 45, n. 6, 1995, p. 77 – 83.

OLIVEIRA, F.G.R. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Dicotiledôneas por meio de Ensaio Não – Destrutivos Utilizando Equipamento de Ultra-som**. São Carlos: Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2001.

OLIVEIRA, F.G.R.; CAMPOS, J.A.; PLETZ, A; SALES, A. **Evaluation of Mechanical Properties of Wood Using Ultrasonic Measurements**. Malasya (Shad Alam): World Conference on Timber Engineering, WCTE`2002. The Proceedings of WCTE`2002, v. 4, 2002, p. 110 – 117.

OLIVEIRA, Fabiana G.V.; MILLER, Karla P.; CANDIAN, Marcela; SALES, Almir. **Influência da Seção Transversal na Velocidade Ultra-Sônica na Madeira de *Eucalyptus citriodora***. Lavras: Revista Cerne, v.11, n. 2, 2005, p. 197 – 203.

OLIVEIRA JÚNIOR, S.F.; AZAMBUJA, Maximiliano A.; DIAS, Antonio A. **Análise da Viabilidade de Aplicação de Adesivos Alternativos em Emenda Dentada Estrutural para Espécie *Eucalyptus Grandis***. São Pedro(SP): CEVEMAD – UNESP. Anais do 10º EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de MADEIRA, 2006.

PEDROSA, Alexandre de Luna. **Desempenho Estrutural de Vigas "I" Constituídas por PLP e Compensado de *Pinus taeda L.* e *Eucalyptus dunnii Maiden* e OSB de *Pinus spp.*** Curitiba: Dissertação de Mestrado Apresentada ao Setor de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Paraná, 2003.

PELIZAN, Tatiana R. **Estudo de Propriedades Mecânicas de Peças Roliças de *Eucalyptus citriodora* Utilizando a Técnica de Ultra-som**. São Carlos: Dissertação Apresentada a Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos, 2004, p.61.

PIZZI, A. **Wood adhesives, chemistry and technology**. Nova York: Marcel Dekker Inc., 1983. 364p.

RECH, Clóvis. **Painéis Laminados Estruturais, LVL's**. Revista da Madeira. Curitiba: nº 71 - ano 12 - maio de 2003.

ROCHA, Márcio P. **Biodegradação e Preservação da Madeira**. Apostila do Curso de Preservação de Madeiras, promovido pela Fundação Hugo Simas – Curitiba, 2000, p.85.

ROSS, Robert J. et al. **Nondestructive Evaluation of Wood**. Madison: Forest Products Laboratory, v. 48, n.1, 1998, p. 14 – 19.

ROSS, R.J.; WANG, X.; MATTSON, J.A.; EICKSON, J.R.; FORSMAN, J.W.; GESKE, E.A.; WEHR, M.A. **Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs**. Sopron: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, v. 12, 2000, p. 155 – 163.

ROSS, Robert J.; PELLERIN, Roy. **Nondestructive testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review**. Madison: Department of Agriculture - Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994, p.28.

SANDOZ, J. **Ultrasound Applications to Structural Timber**. Gold Coast - Austrália: Pacific Timber Engineering Conference, 1994, p. 740 – 744.

SELBO, M.L. **Effect of Joint Geometry on Tensile Strength of Finger Joints**. Forest Products Journal. , 1963, p. 390-400.

SELLERS, T. **Wood adhesive: Innovations and Applications in North America**. Forest Products Journal, v. 51, n. 6, june 2001, p. 12-22.

SHIMOYAMA, Vanilda R. de Souza. **Estimativas de Propriedades da Madeira de Pinus taeda através do Método Não-Destrutivo Emissão de Onda de Tensão, visando a Geração de Produtos de Alto Valor Agregado**. Curitiba: Dissertação apresentada ao Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, 2005, p. 151.

SHIMOYAMA, V.R.; BARRICHELO, L.E.G. **Influência de Características Anatômicas e Químicas sobre a Densidade Básica da Madeira de Eucalyptus spp**. In: Congresso Anual de Celulose e Papel, 24. São Paulo: ABTCP, 1991.

SMULSKI, S. **Engineeres Wood Products: A Guide for Specifiers Designers and Users**. Madison, Wisconsin: PFS Research Foundation, 1997.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994). **Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber**. Pensacola, Fla.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1999). **Graders Manual for Boards and 2 Dimension**. Pensacola, Fla.

STAMATO, Guilherme C.; ANDRADE JR.; Jairo Ro.; PEREIRA, Mauro C. M.; OLIVEIRA JR., Aires C.; OLIVEIRA, Frederico S.; **Cuidados com a Utilização de Coníferas nas Estruturas de Madeira.** São Pedro (SP): Anais do 10º EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2006.

STRUCTURAL BOARD ASSOCIATION. **Comparison of Oriented Strandboard (OSB) and Construction Plywood (CDX).** Technical Bulletin. Disponível em <http://www.osbguide.com/pdfs/TB116.PDF> e Acessado em 13 de novembro de 2006.

SZUCS, C. A. **Influência da Variação da Densidade da Madeira sobre o seu Módulo de Elasticidade.** In: IV EBRAMEM, 1992, São Carlos / SP. Anais do IV EBRAMEM. São Carlos / SP : IBRAMEM, 1992. v. 01. p. 13-18.

SZÜCS, Carlos Alberto. **Artigo de Painéis – Madeira Laminada Colada (MLC).** Departamento. Engenharia Civil/Laboratório de Experimentação em Estruturas. Disponível no site <http://www.remade.com.br/madeiras/paineis/mlc.php> em 07/03/06 às 10:15 h.

TARGA, Luiz A.; BALLARIN, Adriano W.; BIAGGIONI, Marco A.M. **Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal.** Jaboticabal: Engenharia Agrícola, v.25, n.2, mai/ago 2005, 291 – 299.

TOMASELLI, I. **A indústria de painéis no Brasil e no mundo: tendências de mudanças do perfil de produção e usos.** In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., 1998, Belo Horizonte-MG. **Anais...**Viçosa-MG: SIF/UFV/DEF, 1998. p. 55-64.

TRADA – Timber Research and Development Association. Disponível em <http://www.trada.co.uk> e Acessado em 22 de março de 2007.

TSOUMIS, G. **Science and Technology of Wood: Structure, Properties, Utilization.** USA: Chapman & Hall, 1991. 494p.

VÁSQUEZ, Íris C. **Lãs Técnicas de Evaluación No Destructiva y Su Aplicación En El Area Forestal.** Bogotá, Colombia: Revista Forestal Latinoamericana, n.19, 1996, p. 11.

VILAR, W.D. **Química e Tecnologia dos Poliretanos**. Grupo Pronor 1993.

UNITED NATIONS ECONOMIC COMISION FOR EUROPE / FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS.- UNECE/FAO **Timber Bulletin: Forest Products Annual Market Review**. Geneva, Suíça: United Nations, v. 58, p. 95 – 106., 2006.

ZANGIÁCOMO, André Luiz. **Emprego de Espécies Tropicais Alternativas na Produção de Elementos Estruturais de Madeira Laminada Colada**. São Carlos: Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2003, p. 82.

WALKER, J.C.F. **Primary wood processing: principles and practice**. London: Chapman & Hall, 1993. p. 377-416.

WANG, X.; ROSS, R. J.; McCLELLAN, M.; BARBOUR, R. J.; ERICSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; McGINNIS, G. D. **Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method**. Madison: Wood and Fiber Science, v. 33, n. 4, 2001, p. 522-533.