

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 *Southerns 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.

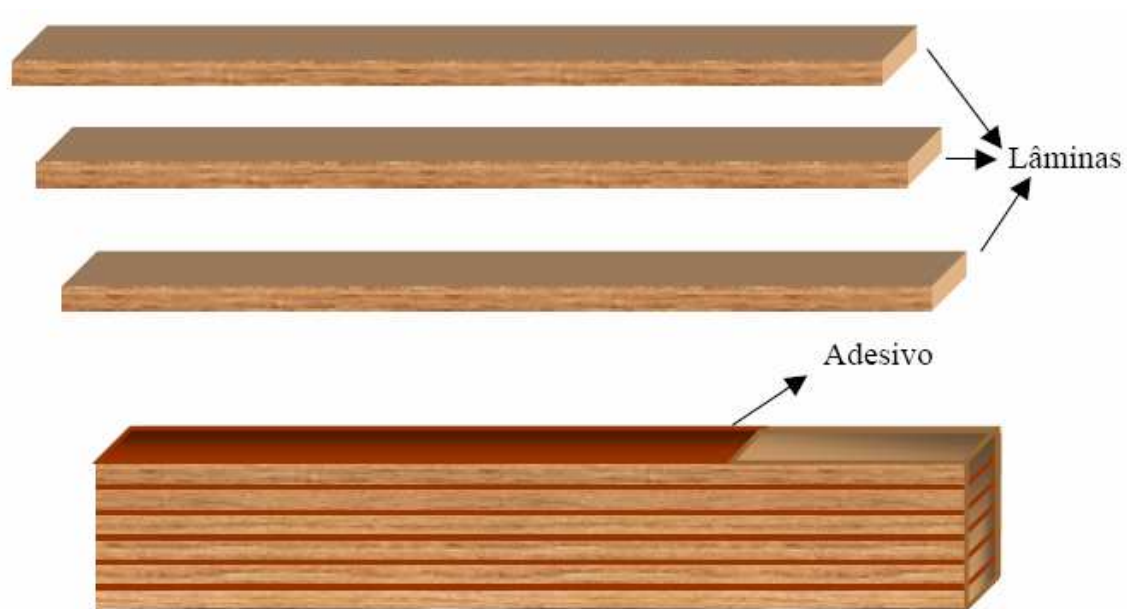
A fabricação da madeira laminada colada (MLC) reúne duas técnicas bastante antigas. Como o próprio nome indica, a mesma foi concebida a partir da técnica da colagem aliada à técnica da laminação, ou seja, da reconstituição da madeira a partir de lâminas (tábuas).

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.

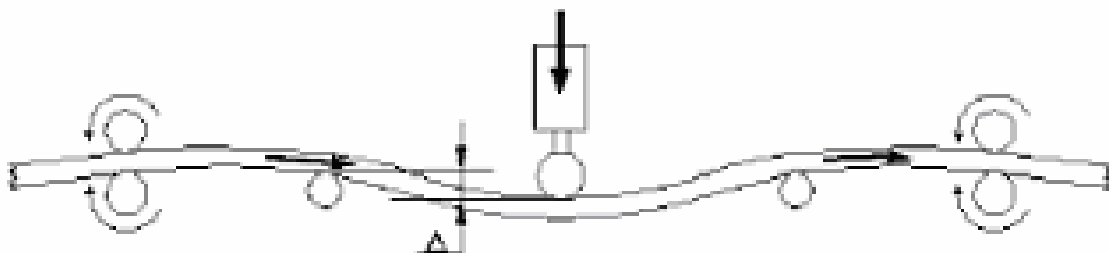
3.5.2.1 MSR (*Machine Stress Rating*)

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 conseqüência, 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.

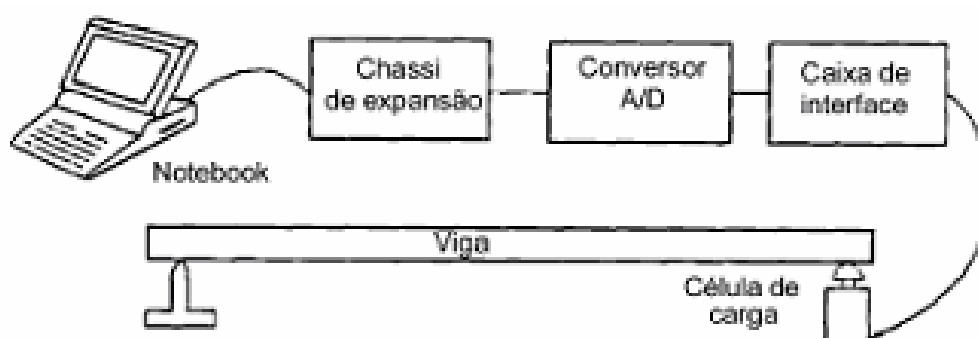
3.5.2.2 Vibração Transversal

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:

$$MOE = C^2 \rho$$

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/m^3)

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

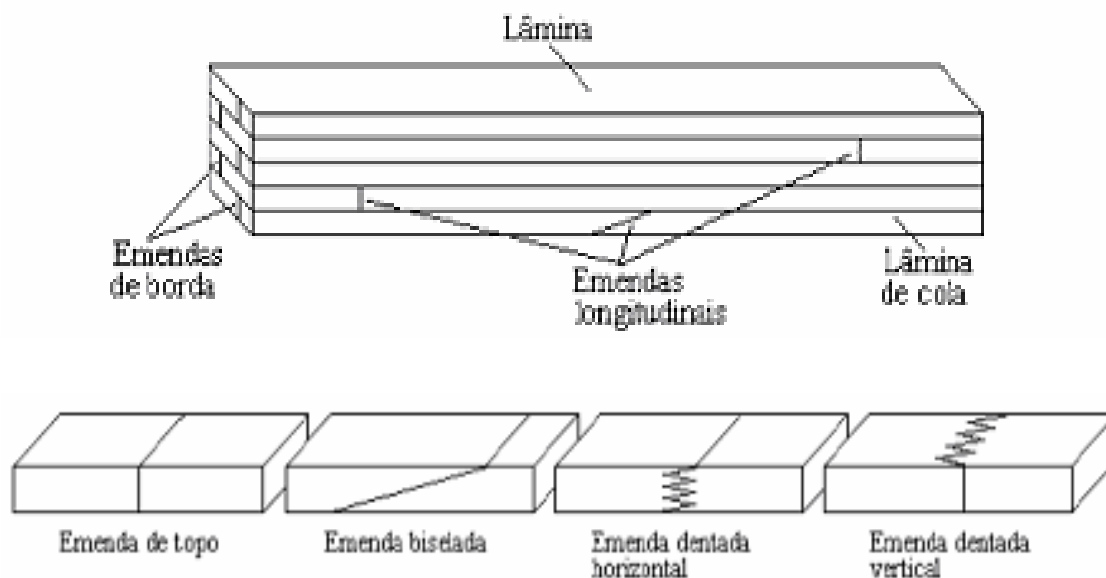
3.6.1.6 Fabricação das Emendas

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 consequentemente 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 transvesais.

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.