

ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE COMPOSTOS DE MADEIRA

Rafael Rodolfo de Melo¹

Resumo: Uma das características mais problemáticas da madeira sob o ponto de vista prático é a sua capacidade de contrair e inchar quando exposta a variações ambientais. Essa característica é inerente a todos os tipos de madeira e aos compostos que a utiliza como matéria-prima. Tal comportamento tem feito com que a estabilidade dimensional da madeira e de seus compostos venha sendo objeto de estudos em diversos centros de pesquisas, os quais buscam alternativas para minimizar o efeito da higroscopicidade desses produtos. Com base nisso, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão a respeito da estabilidade dimensional de compostos à base de madeira, destacando causas, consequências e possíveis formas de prevenção.

Palavras-chave: Propriedades físicas; retratibilidade; variação dimensional.

DIMENSIONAL STABILITY OF WOOD COMPOSITES

Abstract: The shrinking and swelling of wood when exposed to environmental conditions are among its most problematic aspects concerning practical use. Those properties, which are inherent in all kinds of wood and wood composites, have lead to studies focusing on dimensional stability of wood and wood composites in several research centers, where alternatives to minimize the hygroscopic effect in those products are sought. Based on that, the present study aimed to conduct a review on the dimensional stability of wood composites, highlighting causes, consequences and possible means of prevention.

Keywords: Physical properties; shrinkage; dimensional variation.

1 INTRODUÇÃO

Por ser um sólido poroso com estrutura capilar, a madeira e/ou seus derivados são capazes de absorver ou perder água para o meio em que se encontram. Como resultado, surgem as variações dimensionais e de constituição, as quais interferem significativamente em

¹ Engenheiro Florestal, Doutor, Professor Adjunto da Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Av. Alexandre Ferronato, 1200, Distrito Industrial, 78557-267, Sinop - MT – Brasil, <rrmelo2@yahoo.com.br>.

suas propriedades físico-mecânicas. Essa característica torna a madeira um material higroscópico, fazendo com que a mesma tenha constantes alterações no teor de umidade de equilíbrio em consonância com a umidade relativa do ambiente em que se encontra. Essa característica é explicada por sua constituição química, que é formada basicamente por polímeros de celulose, hemicelulose e lignina. Dentre estas, a hemicelulose é a mais hidrófila, e conseqüentemente a que mais contribui para alterações dimensionais.

Ao absorver água, as dimensões da madeira e de seus compostos aumentam, fenômeno conhecido por inchamento, e, ao liberar água, as dimensões diminuem, fenômeno denominado retração. Tais variações dimensionais estão relacionadas com inúmeros fatores, tais como: espécie, teor de umidade, direção estrutural (radial, tangencial ou longitudinal), posição dentro da árvore, massa específica, temperatura, grau de estresse de secagem causada pelo gradiente de umidade, entre outros. O aumento do volume ou inchamento da madeira deve-se, principalmente, à inclusão de moléculas de água nos espaços sub-microscópicos localizados entre as micro-fibrilas, tendo como consequência o afastamento das mesmas. De forma semelhante, porém em sentido contrário, a redução do volume explica-se pela saída de moléculas de água dos espaços mencionados, ocasionando a aproximação das micelas e conseqüentemente, a retração da madeira.

A contração e o inchamento da madeira e derivados constituem, juntamente com a anisotropia, características indesejáveis da madeira, limitando seu uso ou exigindo técnicas específicas para sua utilização. Uma alternativa para minimizar problemas decorrentes da retratibilidade é utilizar-se do conhecimento sobre a estabilidade dimensional que cada espécie apresenta. Nesse sentido, o objetivo do presente estudo foi fazer uma revisão bibliográfica a respeito da estabilidade dimensional de compostos à base de madeira, destacando causas, conseqüências e possíveis formas de prevenção.

2 ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS COMPOSTOS DE MADEIRA

Os painéis suprem uma reconhecida necessidade da madeira serrada (proporções geométricas que se caracterizam normalmente por maior comprimento que largura), ampliando a sua superfície útil por meio da expansão de uma de suas dimensões (largura), para assim otimizar a sua aplicação. Além dessa, outras vantagens dos painéis que podem ser destacadas são: menor exigência na escolha da matéria-prima, maior homogeneidade ao longo das peças, redução da anisotropia e eliminação de defeitos como nós, grã irregular, defeitos provenientes da secagem, entre outros. Entretanto, apesar de aumentar a homogeneidade e os

limites dimensionais do material, alguns tipos de painéis, como os aglomerados convencionais, tendem a ampliar sua higroscopicidade, quando comparado à madeira maciça, necessitando assim de aditivos para minimizar este efeito. Outros, a exemplo do compensado, diminuem significativamente esse aspecto.

Segundo Silva et al. (2006), o teor de umidade de equilíbrio para produtos reconstituídos de madeira é diferente em relação à madeira maciça. Além da menor anisotropia, esses produtos geralmente estabilizam-se a uma umidade inferior, quando comparados à madeira sólida, expostos em condições de temperatura e umidade semelhantes. Para Wu (1999), isto se deve a níveis de higroscopicidade diferentes, que segundo o autor é causado pela transformação da madeira em lâminas, partículas com posterior incorporação de aditivos, como resinas, parafina, entre outros. Além desses, outro aspecto que contribui para a redução da higroscopicidade destes produtos é a utilização de altas temperaturas e pressão na consolidação final do painel.

Del Menezzi (2006) destaca que essa diferença ocorre principalmente pela ação do calor e da pressão a que são submetidos esses compostos. O calor influencia por meio da degradação de componentes químicos da madeira. A hemicelulose, que dentre os constituintes da madeira é a mais hidrófila, é a primeira a sofrer com a degradação da sua estrutura com ação do calor. Em sequência é degradada a celulose e por último a lignina. Já a pressão, é responsável pela compactação das camadas externas dos painéis (maior densificação), o que diminui a permeabilidade e, conseqüentemente, torna os sítios de adsorção menos disponíveis.

Para Kelly (1977) o aumento da densidade do painel promove a redução do teor de umidade de equilíbrio do mesmo. Outro aspecto mencionado pelo autor trata-se da utilização de adesivos e parafinas que podem bloquear parcialmente os sítios de adsorção, melhorando a estabilidade. Na Figura 1 pode ser observada a relação entre a umidade de equilíbrio e a umidade relativa do ar para madeira sólida e painéis de madeira com diferentes densidades. Verifica-se que o teor de umidade de equilíbrio dos painéis é inferior ao da madeira sólida para uma mesma condição ambiental. Já entre os tipos de painéis, os de menor densidade apresentaram maior teor de umidade de equilíbrio.

Em estudos realizados por Mendes et al. (2006), avaliando a influência das variáveis de processamento no teor de umidade de equilíbrio de painéis aglomerados, os autores observaram que o aumento da temperatura de prensagem, de 160°C para 180°C, reduziu significativamente o teor de umidade de equilíbrio dos painéis. Já para a prensagem a 160°C, o aumento do tempo de prensagem, de 6 para 10 minutos, proporcionou o aumento desse parâmetro. Para o teor de resina, com a variação de 3 para 6%, não foi verificada influência.

Diferente disso, Murakami et al. (1999) estudaram os efeitos do tipo e teor de resina, os quais observaram uma redução do teor de umidade de equilíbrio com o aumento do teor de resina.

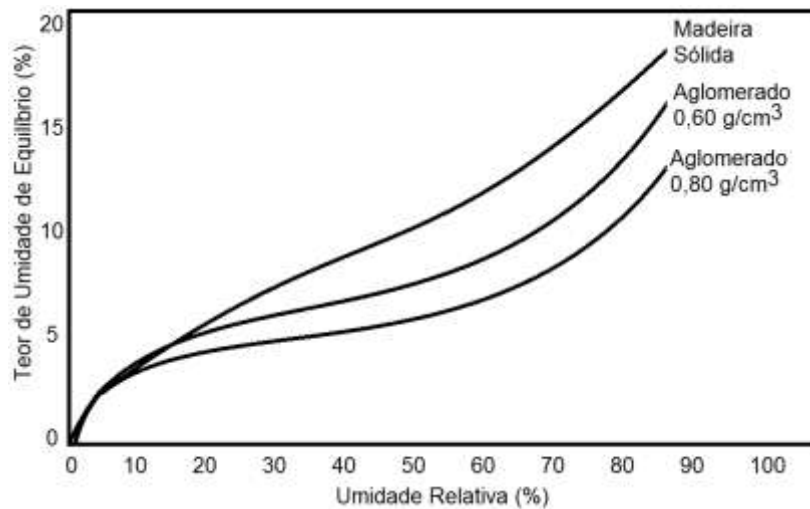


Figura 1. Isotermas de madeira sólida e painéis reconstituídos (Fonte: KELLY, 1977).

Figure 1. Isotherms of wood and wood panels (Source: KELLY, 1977).

Uma das desvantagens dos painéis reconstituídos, quando comparados à madeira, trata-se da taxa de não-retorno em espessura (TNRE), a qual pode ser observada detalhadamente na Figura 2. Isso ocorre, porque o inchamento em espessura total (IE_T) desses compostos é dado pela soma de dois fatores principais, um relacionado à natureza higroscópica da madeira (IE_H), e outro relacionado à liberação de tensões de compressão (IE_{TC}). Após a secagem, apenas o IE_H desaparece, sendo o IE_{TC} definitivo e irreversível (DEL MENEZZI, 2004). Esse processo geralmente é acompanhado pela perda de resistência do painel, já que este, após a secagem apresentará maior área e massa semelhante à antes da exposição – o que proporciona uma redução considerável da densidade (LEE; WU, 2002).

Em contrapartida, uma das vantagens que os compostos de madeira apresentam sob a madeira maciça do ponto de vista de estabilidade dimensional, trata-se da compensação de tensões. Melo et al. (2008) destacam que a madeira por ser um material anisotrópico, possuindo estruturas desuniformes em relação aos planos de corte, as retrações e contrações decorrentes das alterações dimensionais da madeira manifestam-se de forma diferenciada em seus planos, sendo a maior alteração no plano tangencial, seguido pelo plano radial. As alterações que ocorrem no plano longitudinal geralmente são mínimas, não oferecendo empecilhos quanto ao uso prático da madeira.

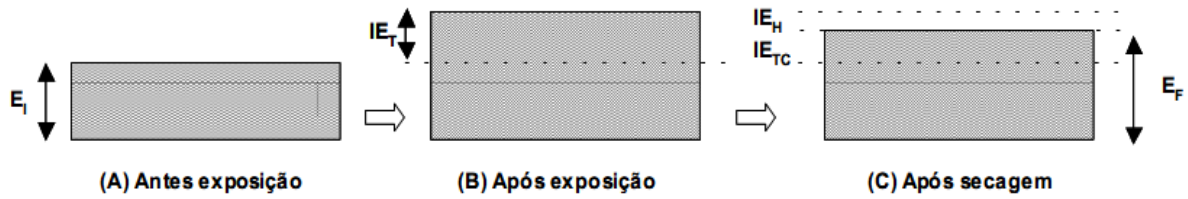


Figura 2. Mecanismo de inchamento em espessura de painéis de madeira. E_I = espessura inicial; IE_T = inchamento em espessura total; IE_H = inchamento em espessura higroscópico; IE_{TC} = inchamento em espessura pelas tensões de compressão; E_F = espessura final (Fonte: DEL MENEZZI, 2004).

Figure 2. Thickness swelling mechanisms in wood panels. E_I = initial thickness; IE_T = total thickness swelling; IE_H = hygroscopic thickness swelling; IE_{TC} = thickness swelling of compressive stress; E_F = final thickness (Source: DEL MENEZZI, 2004).

Visando minimizar os efeitos dessas tensões, nos painéis compensados e OSB, as lâminas/*strands* são dispostas perpendiculares entre si, ou seja, em camadas, perfazendo ângulos de 90° em relação à grã (Figura 3). Desse modo, a instabilidade proporcionada no eixo tangencial, que é a mais acentuada, é restringida pela ocorrência no eixo longitudinal, que é mínima. Del Menezzi (2006) relata que, embora esse método não previna a contração e o inchamento, ele muda as direções de ocorrência e reduz sua intensidade. De acordo com Stamm (1964), a eficiência desse método em chapas compensadas promove uma melhoria significativa em sua estabilidade, podendo chegar a $1/10$ do que ocorreria em lâminas desenroladas que foram utilizadas na produção do composto.

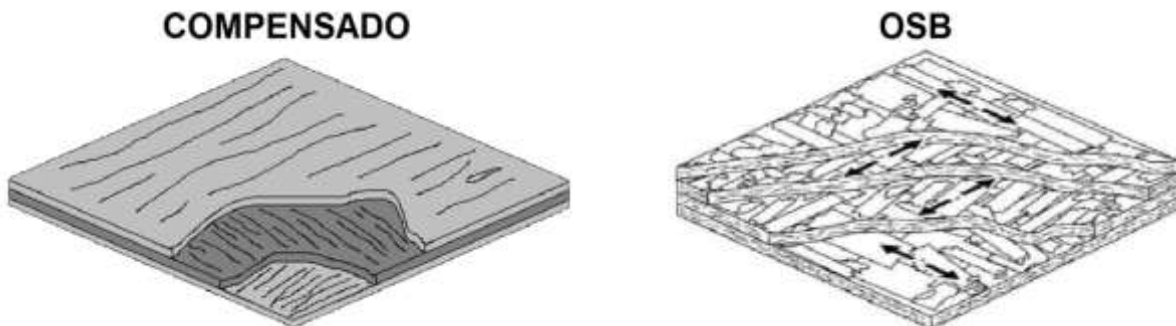


Figura 3. Princípios de montagem cruzada aplicados em painéis compensados e OSB.
Figure 3. Cross manufacture principles in plywood and OSB.

Comparativamente, painéis compensados apresentam estabilidade dimensional superior a painéis OSB. Como explicação, podem ser citadas as elevadas tensões internas presente em painéis OSB, as quais são geradas durante a prensagem e liberadas quando os painéis são expostos a elevados teores de umidade (CAI; ROBERT, 2010). Na manufatura de

painéis compensados, a força de prensagem para colagem das lâminas é mínima, sendo necessária apenas para que haja um íntimo contato entre as lâminas e o adesivo. Além disso, a área superficial das lâminas é inferior a das partículas *strands* do OSB. Contudo, por se tratar de um composto particulado, os painéis OSB, diferentes dos compensados, apresentam menor exigência quanto à qualidade de sua matéria-prima, o que acaba reduzindo os custos de produção dessa classe de painéis em relação aos compostos laminados. Na Figura 4, observa-se as variações de absorção de água e inchamento em espessura para compensados e painéis aglomerados encontrados por Medved et al. (2006).

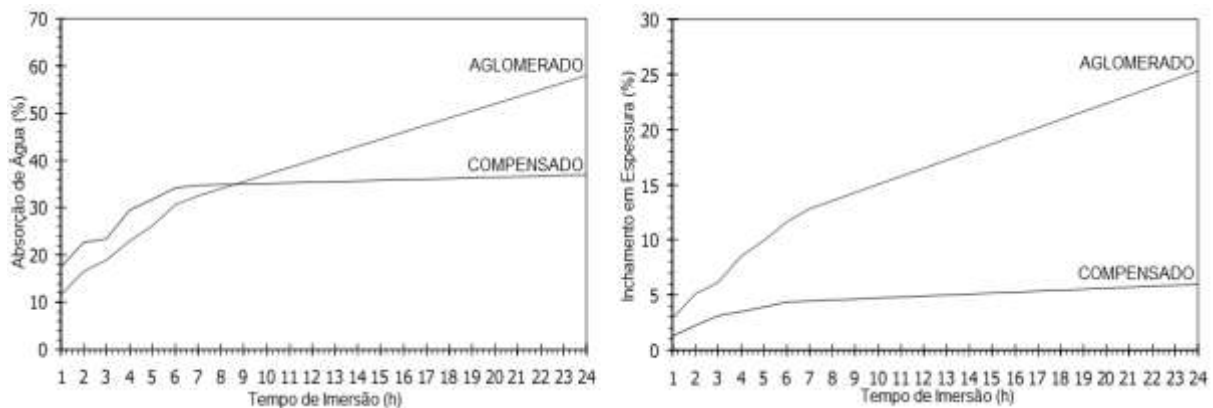


Figura 4. Absorção de água e inchamento em espessura em painéis aglomerados e compensados ao longo de 24 horas de exposição (Fonte: MEDVED et al., 2006).

Figure 4. Water absorption and thickness swelling for particleboard and plywood in 24 hours (Source: MEDVED et al., 2006).

Segundo Suchsland (2004), um dos aspectos que pode interferir significativamente na estabilidade dimensional de painéis OSB é a sua proporção de capa em relação ao miolo e vice-versa. Diferente do *United States Department of Agriculture – USDA* (1999), que descreve a relação ideal face-miolo do ponto de vista da expansão linear em $1/2$, Suchsland (2004) encontrou a melhor relação com uma camada menos espessa nas bordas, com aproximadamente 40% da espessura dos painéis distribuídos entre as faces superiores e inferiores, e o restante (60%) no miolo (Figura 5).

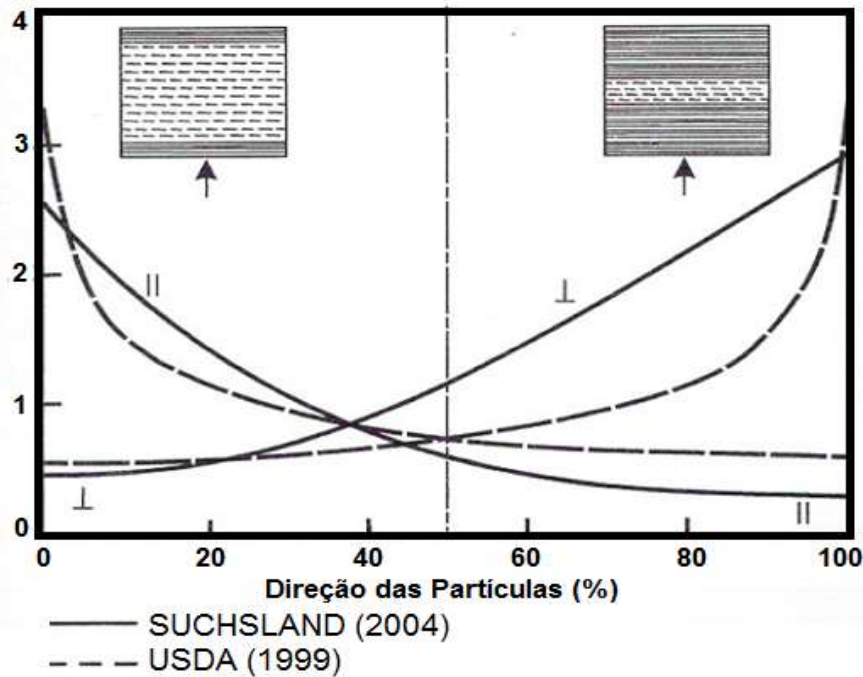


Figura 5. Expansão linear em painéis OSB em função da orientação de suas camadas (Fonte: SUCHSLAND, 2004).

Figure 5. Linear expansion in OSB in relation to layers orientations (Source: SUCHSLAND, 2004).

3 FATORES INFLUENTES NA ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE PAINÉIS

3.1. Matéria-prima

A matéria-prima utilizada para manufatura de painéis pode ser dividida em três grupos principais, fonte de fibras, adesivos e aditivos, sendo que todos eles influenciam na estabilidade dimensional dos painéis. A seguir, cada um desses parâmetros será detalhado.

3.1.1. Madeira

A indústria de painéis aglomerados no Brasil surgiu com o propósito de aproveitamento de resíduos. No entanto, atualmente são utilizados preferencialmente cavacos originados de madeira de florestas plantadas, principalmente de pinus e eucaliptos, o que confere ao país uma matéria-prima de elevada qualidade. Além da madeira e de seus resíduos, outras fontes de fibras podem ser utilizadas na manufatura de painéis aglomerados, tais como bagaço de cana-de-açúcar, bambu, casca de arroz, palha de arroz, aparas de papel reciclado, dentre outros (MELO et al., 2009). Entretanto, neste tópico serão abordados apenas produtos derivados de madeira, por serem a principal matéria-prima utilizada e por não ser possível o

uso desses outros materiais para a produção de alguns tipos de painéis, como painéis laminados e compostos estruturais.

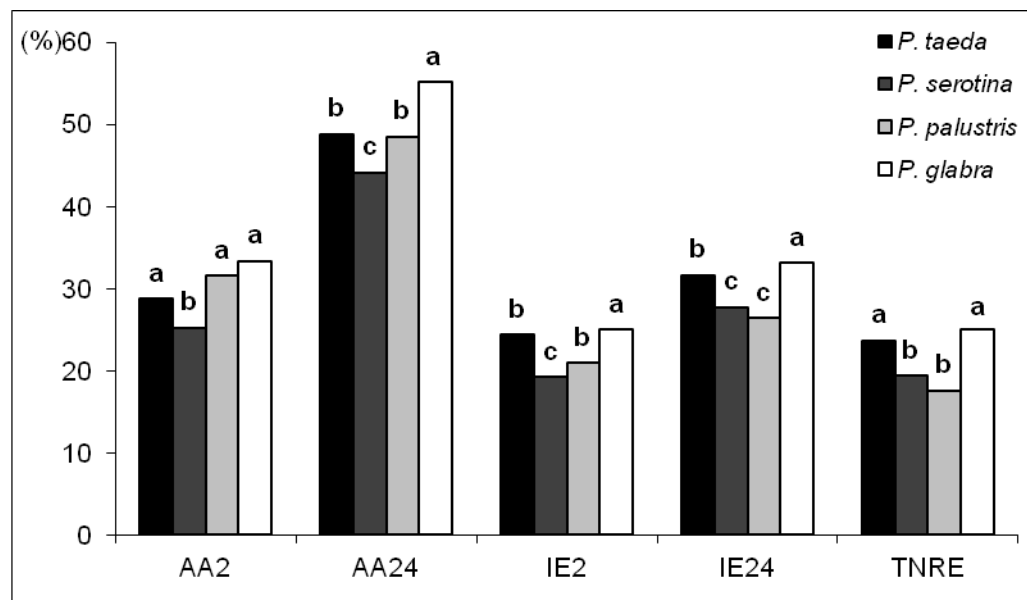
A escolha da matéria-prima adequada é fundamental e determinante na manufatura de painéis de qualidade. As variações entre espécies ou tipos de madeira produzem diferentes efeitos nas chapas de partículas. As variáveis densidade, compressibilidade, dureza, propriedades de colagem, pH, tipos de fibras, teor de extrativos, dentre outras, variam entre espécies, o que pode afetar significativamente as propriedades da chapa (HILLIG et al., 2004).

Dentre os principais parâmetros da madeira que podem vir a influenciar na qualidade do produto final, a densidade apresenta-se com grande destaque (MOSLEMI, 1974; KELLY, 1977; MALONEY, 1993). Na produção de compostos aglomerados, por exemplo, é possível obter-se uma maior taxa de compactação com uma madeira de menor densidade, o que produz um painel fisicamente mais resistente. Em contrapartida, a sua estabilidade dimensional é afetada por um maior inchamento em espessura e uma maior TNRE, que são ocasionados pela maior quantidade de material higroscópico e pela liberação de mais tensões de compressão (KELLY, 1977; HILLIG et al., 2004). Para painéis laminados, as utilizações de lâminas de madeira de maior massa específica produzem painéis mais resistentes mecanicamente e a estabilidade dimensional é caracterizada principalmente pelo grau de higroscopicidade de cada espécie.

Em inúmeros estudos, Iwakiri; Keinert Jr. (1990) observaram a utilização de diferentes espécies de *Pinus* na produção de painéis *waferboard* (Figura 6). Embora fossem espécies diferentes, três das quatro estudadas apresentavam densidade próxima e apenas uma delas, o *Pinus palustris*, apresentou massa específica superior. Mesmo para as espécies de características semelhantes, foram observadas variações significativas entre os parâmetros estudados. No geral, painéis que utilizaram como matéria-prima a espécie *Pinus glabra* foram os que apresentaram a maior estabilidade dimensional.

Hillig et al. (2004) estudaram a estabilidade dimensional de painéis aglomerados estruturais (*waferboard*) constituídos por diferentes espécies (*Acacia mearnsi*, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*). Para a absorção de água, os autores verificaram que espécies com maior densidade obtiveram menor densificação do painel, devido à baixa razão de compactação, absorvendo menos água. Para o inchamento em espessura, os autores verificaram que apenas a *Acacia mearnsi* demonstrou tendência semelhante àquela observada na absorção de água, ou seja, quanto maior a taxa de compressão, menor os valores obtidos para este parâmetro. As chapas aglomeradas produzidas com *Pinus* foram as que

apresentaram os maiores valores de inchamento em espessura, o que pode estar relacionado a uma maior taxa de compressão desses painéis. Outro aspecto que pode ter influenciado esse resultado é a menor quantidade relativa de adesivo para um maior número de partículas.



Espécie	Dm (g/cm ³)	Dc (g/cm ³)	Rc	ASE	DR
<i>P. taeda</i>	0,47	0,79	1,69	67,09	10,64
<i>P. serotina</i>	0,48	0,79	1,65	65,69	10,87
<i>P. palustris</i>	0,54	0,80	1,48	58,39	12,23
<i>P. glabra</i>	0,48	0,79	1,65	65,69	10,87

Figura 6. Caracterização das propriedades físicas de chapas *waferboard* produzidas com diferentes espécies de *Pinus*. Dm = densidade da madeira, Dc = densidade da chapa, Rc = razão de compactação, ASE = área superficial específica e DR = disponibilidade de resina (Fonte: IWAKIRI; KEINERT JR., 1990).

Figure 6. Physical properties characterization for *Pinus* waferboard's. Dm = wood density, Dc = panel density, Rc = compression ratio, ASE = specific surface area and DR = resin availability (Source: IWAKIRI; KEINERT JR., 1990).

A influência da matéria-prima não ocorre apenas entre espécies, mas também pode ser verificada entre indivíduos de uma mesma espécie, ou ainda, em um mesmo indivíduo, variando em função das regiões da árvore. A exemplo disso, ao estudar as características de painéis aglomerados produzidos com clones de *Populos euroamericano*, Nourbakhsh (2008) verificou diferenças significativas para o inchamento em espessura dos painéis. Ao estudarem a influência do tipo de lenho utilizado na fabricação de painéis tipo *flakeboards*, Geimer et al. (1997) observaram que tanto a absorção de água como o inchamento em espessura foram estatisticamente menores para chapas fabricadas com lenho juvenil, quando comparadas

àquelas que utilizaram lenho adulto. Já Ayrilmis (2007), avaliando a influência da utilização do lenho de compressão produzido por *Pinus nigra* em painéis MDF, concluiu que o aumento da proporção desse tipo de lenho nesses painéis diminui sua estabilidade dimensional.

Quanto à composição química da madeira, Niekerk; Pizzi (1994), relataram a dificuldade de fabricação de chapas aglomeradas estruturais quando utilizada madeira de *Eucalyptus grandis* e resinas fenólicas. Os autores destacaram que extrativos presentes nessa espécie promovem um rápido decréscimo no pH do adesivo durante o processo produtivo, o que por sua vez dificulta a colagem. Haselein (1989) também encontrou dificuldade ao trabalhar com essa espécie para a produção de chapas aglomeradas, tendo os painéis produzidos apresentado colagem deficiente e inchamento excessivo.

3.1.2. Adesivos

Os principais adesivos atualmente empregados nas indústrias de painéis são: Ureia-Formaldeído (UF), Fenol-Formaldeído (FF), Melamina-Formaldeído (MF) e Difenil Metano Di-isocianato (MDI). Entre esses, UF é a que apresenta maior higroscopicidade, não sendo indicado para painéis de uso exterior; MF apresenta moderada resistência e os demais apresentam elevada resistência à umidade. Adesivos à base de UF são os mais utilizados nas indústrias de painéis de madeira, principalmente pelo baixo custo, rápida reação em prensa quente e fácil manuseio. Estima-se que cerca de 90% de todos os painéis aglomerados produzidos no mundo utilizam esse tipo de resina.

Dentre as principais vantagens da utilização da UF, além das já citadas, podem ser acrescentados o fato de não ser uma substância inflamável e de ser incolor e solúvel em água, o que a torna satisfatória para produções em grande escala. Como principais desvantagens, apresenta uma baixa resistência à umidade e proporciona a liberação de formaldeído após a cura, o que pode ocasionar problemas à saúde humana. Uma das alternativas para melhoria da estabilidade dimensional seria a adição de fenol, melamina ou até tanino na composição do adesivo. Já a liberação de formaldeído pode ser reduzida baixando a sua proporção em relação à quantidade de uréia utilizada (PIZZI, 1994).

Uma combinação de adesivos comum nas indústrias de móveis é a Melamina-UF (MUF). Esse composto é adequado quando se deseja um painel com maior resistência à umidade e é preferivelmente utilizado pela coloração clara, não interferindo na beleza estética do material, diferente do que ocorreria se fosse utilizado o FF. Ao estudarem chapas aglomeradas coladas com UF e MUF em diferentes proporções, Çolak et al. (2007) verificaram que o aumento da proporção de adesivo, assim como a adição de melamina na UF

para constituição de um novo adesivo, proporcionaram um ganho significativo no inchamento em espessura.

Ao estudarem o comportamento de painéis aglomerados de alta densificação confeccionados com diferentes composições de adesivo, por meio da aplicação da UF, MUF, Fenol-MUF (FMUF) e FF, Iwakiri et al. (2005) observaram que os painéis confeccionados com FF foram mais estáveis que os demais. Já a adição do fenol na resina MUF proporcionou uma redução do inchamento em espessura, mas que não foi estatisticamente significativa quando comparada aos painéis que utilizaram apenas MUF. Outros pesquisadores, como Yusoff; Horie (1997) e Murakami et al. (1999) observaram em seus estudos sobre o desempenho de painéis OSB produzidos com MDI, FF e MF um melhor desempenho da resina MDI em relação às resinas FF e MF.

Outra resina sintética que vem ganhando destaque nos últimos anos com a crescente conscientização ambiental e conseqüente busca por matérias renováveis é o tanino-formaldeído (TF), o qual já é utilizado industrialmente na África do Sul, Austrália, Zimbábue, Chile, Argentina, Brasil e Nova Zelândia (DUNKY; PIZZI, 2002). O TF é obtido pela reação de flavonóides poliméricos naturais (taninos condensados) que reagem com o formaldeído e polimerizam-se. Além de reagirem facilmente com o formaldeído, os taninos são substâncias renováveis, cuja extração pode incorporar maior retorno econômico às atividades florestais e minimizar o problema de descarte de cascas pelas indústrias madeireiras (PIZZI, 1994).

Os taninos são ricos em fenóis e polifenóis e, quando misturados ao formaldeído, produzem reconhecidamente adesivos com boa resistência à umidade. No entanto, apesar de Pizzi et al. (1981) afirmarem que adesivos de TF apresentam propriedades similares aos de FF, a qualidade desses adesivos depende muito de sua formulação, do material de origem e de tratamentos para melhoria de sua eficiência. Geralmente, adesivos à base de tanino apresentam eficiência intermediária entre as resinas ureicas e fenólicas. Melo et al. (2009) observaram um ganho considerável em estabilidade de aglomerados produzidos com TF em comparação com aqueles confeccionados com UF.

Além do tipo de adesivo, a quantidade em que ele é aplicado também tem influência sob a estabilidade das chapas. Lehmann (1970), estudando o efeito de três níveis de resina fenólica (3%, 6% e 9%) sobre o inchamento em espessura, observou uma redução acentuada do mesmo com o aumento do nível de resina de 3% para 6%. Na faixa de 6% a 9%, a redução foi menor. Nos estudos realizados por Dacosta et al. (2005) e Albuquerque (2002), embora tenha sido utilizado um adesivo reconhecidamente de baixa resistência à umidade (UF), o aumento de seu teor de 8% para 12% também proporcionou maior estabilidade. Para Lehmann

(1970), o aumento no conteúdo de resina melhora não só a estabilidade dimensional dos painéis, mas também suas propriedades de resistência e durabilidade nas condições de exposição à alta umidade relativa. Entretanto, deve-se buscar o equilíbrio, já que o aumento da quantidade de adesivo a partir de certo nível não influi necessariamente em ganho de estabilidade dos painéis.

A influência do aumento do teor e do tipo de resina no inchamento em espessura pode ser observado na Figura 7. Verifica-se que o aumento do teor de adesivo de 8% para 12% proporcionou uma tendência de redução no inchamento em espessura dos painéis. Segundo Murakami et al. (1999), isso ocorre porque o adesivo utiliza as hidroxilas livres das partículas como um dos meios de adesão, assim ocupando os espaços mais hidrofóbicos da madeira. Observa-se ainda a influência do tipo e da quantidade de adesivo (UF = 4% e 8%; FF = 3% e 6%) no inchamento em espessura ao longo do tempo, exposto em um ambiente de elevada umidade relativa. Mesmo após três anos de exposição, o inchamento para painéis colados com FF foram relativamente baixos, enquanto que painéis colados com UF apresentaram inchamentos elevados. Após a exposição, as amostras foram testadas mecanicamente, mas apenas as chapas que utilizaram FF obtiveram consistência suficiente para a realização dos ensaios.

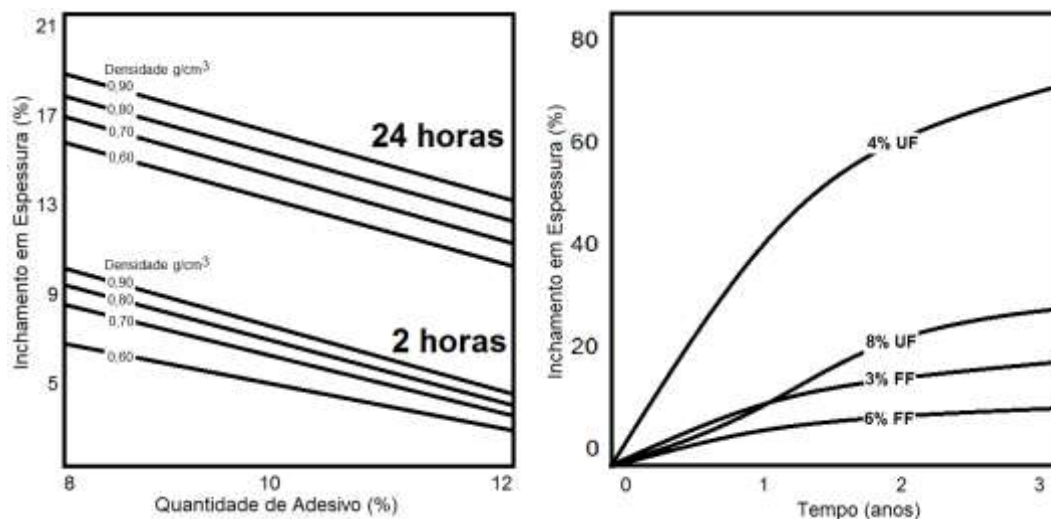


Figura 7. Efeito da densidade e do tipo e teor de resina no inchamento espessura (Fonte: MOSLEMI, 1974).

Figure 7. Effect of density and of type and resin content in thickness swelling (Source: MOSLEMI, 1974).

3.1.3. Aditivos

Para os painéis particulados, juntamente com o adesivo, alguns aditivos podem ser adicionados às partículas. Comumente são utilizados inseticidas, fungicidas e repelentes de umidade. Dentre esses, o aditivo que apresenta influência sobre a estabilidade dimensional dos painéis é o repelente de umidade, sendo a parafina o mais utilizado, a qual é aplicada com o objetivo de reduzir a higroscopicidade das partículas de madeira e melhorar a estabilidade dimensional dos painéis.

Moslemi (1974) destaca que a quantidade de parafina a ser aplicada deve ser menor ou igual a 1%, pois, segundo o autor, quantidades superiores a esse percentual não proporcionam melhoria na estabilidade dimensional das chapas (Figura 8) e, por outro lado, podem trazer problemas de colagem e reduzir a resistência mecânica. Nessa mesma linha, Cloutier (1998) afirma que, em quantidade superior a 1,5%, o uso de parafina não traz contribuição alguma para a estabilidade dimensional de painéis.

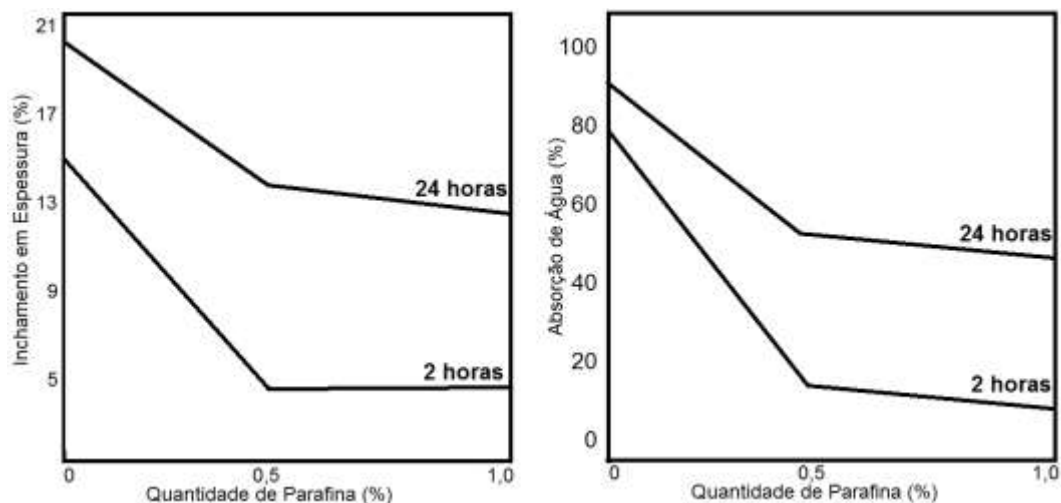


Figura 8. Efeito do percentual de parafina sobre o inchamento em espessura e a absorção de água (Fonte: MOSLEMI, 1974).

Figure 8. Effect of wax content in thickness swelling and water absorption (Source: MOSLEMI, 1974).

Xu et al. (2009), analisando a influência da aplicação de parafina na estabilidade dimensional e nas propriedades mecânica de painéis aglomerados colados com MDI, observaram que, para o intervalo de 0% a 2,5% de parafina, o aumento do percentual desse aditivo até 1,75% proporcionou menor absorção de água. Entretanto, isso não se refletiu para o inchamento espessura, em que valores superiores a 1% não proporcionaram ganho significativo de estabilidade. Os autores também observaram uma considerável perda de resistência na ligação interna com aumento do teor de parafina nos painéis.

3.2. Densidade do painel

A densidade do painel está relacionada com inúmeros fatores, desde a densidade da matéria-prima (madeira), até parâmetros relacionados ao processo de manufatura, tais como taxa de compressão, teor de umidade do colchão, tempo de fechamento da prensa, dentre outros. Após a sua confecção, assim como na madeira, a densidade do painel é um dos parâmetros de melhor eficiência na predição da qualidade dos painéis produzidos. Segundo Iwakiri (2005), os painéis aglomerados comerciais são produzidos geralmente com densidade entre 0,60 e 0,70 g/cm³. De acordo com Kelly (1977), madeiras de maior densidade produzem painéis de maior resistência mecânica. Em contrapartida, painéis mais densificados geralmente demonstram menor estabilidade dimensional, o que pode estar relacionado às liberações das tensões de compressão.

Iwakiri (2005) destaca que a densidade final do painel não depende apenas da quantidade de partículas no colchão, mas também das variáveis de processamento e de prensagem, tais como: matéria-prima (espécie); umidade das partículas; quantidade de adesivos e aditivos (parafina e preservantes). Além da densidade média do painel, a forma que esta se distribui (gradiente vertical de densidade) também pode ser influenciada por variáveis de processamento, as quais ocorrem durante o processo de prensagem, tais como: tempo de prensagem; tempo de fechamento da prensa e pressão exercida durante a prensagem. Para Vignote; Jiménez (1996), a variação entre a densidade interna e externa pode ser superior a 100%, aspecto que pode influenciar significativamente as propriedades dos painéis.

A influência da densidade final do painel sob a sua resistência mecânica possui uma relação diretamente proporcional (MOSLEMI, 1974; KELLY, 1977; MALONEY, 1993; IWAKIRI et al., 2008), no entanto, a relação com as propriedades físicas aparentemente não é bem definida (SUCHSLAND, 1973; AVRAMIDIS; SMITH, 1989; HASELEIN, 1989). Apesar disso, Zhou (1990), encontrou altas correlações entre a densidade das chapas com a absorção de água e o inchamento em espessura. Em estudos realizados por Melo; Del Menezzi (2010), foi observada uma tendência de redução da absorção de água com o aumento da densidade, enquanto, no inchamento em espessura, foi observado comportamento inverso (Figura 9).

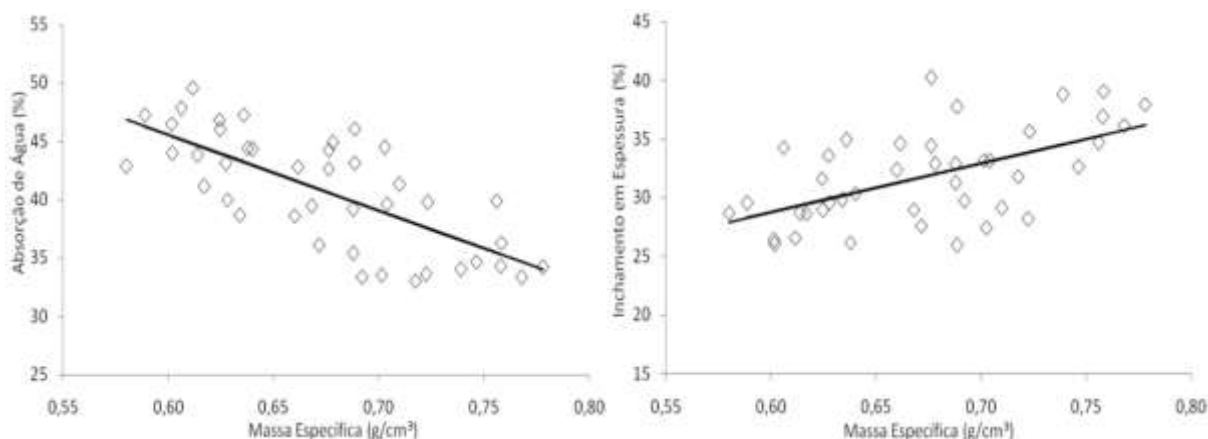


Figura 9. Equações ajustada para a absorção de água e o inchamento em espessura em função da massa específica (Fonte: MELO; DEL MENEZZI, 2009).

Figure 9. Models adjusted for water absorption and thickness swelling as a function of panel density (Source: MELO; DEL MENEZZI, 2009).

Albuquerque (2002) e Dacosta et al. (2005) também observaram que o aumento da densidade dos painéis proporcionou uma menor absorção de água e um maior inchamento em espessura. Desse modo, supõe-se que a maior absorção de água em painéis de menor densidade tenha ocorrido por haver um maior volume de espaços vazios que possam ser ocupados por água. Já para o inchamento em espessura, um maior volume de material madeira apresenta uma maior quantidade de sítios higroscópicos disponíveis. No entanto, Suchsland (1973) destaca que diferente do que ocorre na madeira sólida, que geralmente apresenta inchamento superior em madeiras mais densas, o mesmo não ocorre necessariamente para chapas. Vital; Wilson (1980) evidenciaram que o efeito da densidade da chapa na estabilidade dimensional do painel depende do nível de umidade a que o painel é exposto. Em condições de baixa umidade relativa, o inchamento em espessura independe da densidade, enquanto que em exposição a altas umidades relativas esse parâmetro tende a aumentar nos painéis de maior densidade.

Em estudos realizados por Ayrilmis (2007), para chapas de fibras de alta e média densidade (MDF e HDF) também foi observado que o aumento da densidade das chapas proporcionou um incremento na expansão linear e inchamento em espessura. Resultados semelhantes também foram observados por Suzuki; Miyamoto (1998) para painéis de partículas.

3.3. Geometria das partículas

A geometria das partículas é um dos parâmetros importantes no controle da estabilidade dimensional das chapas. A literatura disponível é praticamente unânime ao

afirmar que uma maior estabilidade dimensional é obtida para chapas produzidas com partículas finas, quando comparadas àquelas confeccionadas com partículas mais espessas (Figura 10). Isso ocorre porque com uma maior quantidade de partículas por área aumenta também o número de interfaces entre as partículas, o que ocasiona uma maior dispersão no inchamento higroscópico (KELLY, 1977).

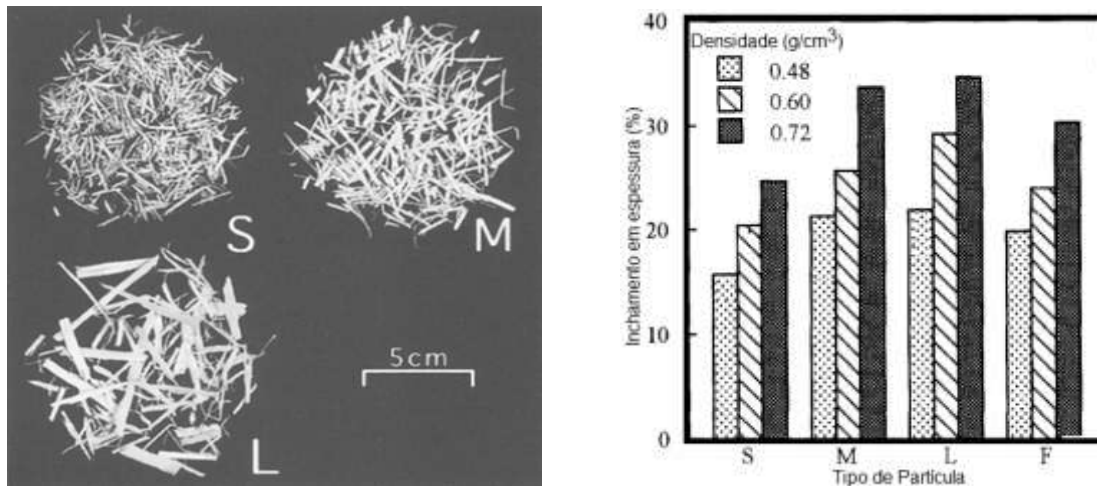


Figura 10. Partículas em diferentes dimensões e comportamentos dos painéis produzidos a partir dessas quanto ao inchamento em espessura (Fonte: MIYAMOTO et al., 2002).

Figure 10. Different dimensions of particles and related panel performances concerning thickness (Source: MIYAMOTO et al., 2002).

Ao estudar diferentes dimensões de partículas (*silver*; *flake*; *wafers*), Iwakiri (1989) verificou que chapas do tipo *silver* apresentaram maior absorção de água do que as demais. Para o autor, uma vez que a espessura nominal das partículas utilizadas no estudo foi a mesma e as demais variáveis de manufatura das chapas foram constantes, pode-se afirmar que uma maior área superficial das partículas e uma menor disponibilidade de resina por unidade de área ocasionou esse resultado. Kelly (1977) destaca ainda que, quando se altera a geometria ou a granulometria das partículas, há a necessidade também de se averiguar a melhor proporção de adesivos a ser utilizada, entre outras variáveis relacionadas ao processo produtivo.

Os elementos dimensionais das partículas de diferentes geometrias são o comprimento, a largura e a espessura. A razão entre o comprimento e a espessura é denominada de esbelteza, parâmetro que influencia significativamente no desempenho das chapas de composição. Para Moslemi (1974), as partículas das superfícies das chapas devem apresentar razão de esbelteza entre 120 e 200. Segundo o autor, partículas com essa razão são finas e longas, possuindo alto grau de flexibilidade, particularmente quando obtidas de

madeiras de média à baixa densidade; já, para o miolo, o autor recomenda valores em torno de 60.

Alberto (1992), ao estudar o efeito da geometria em painéis aglomerados verificou que acima de 120 vezes a razão de esbeltez não influenciou significativamente as propriedades dos painéis confeccionados. Na Figura 11 podem ser observadas as influências da razão de esbeltez nas propriedades físico-mecânicas dos painéis. Verifica-se que, após certo ponto, aproximadamente 150 vezes, o aumento desse parâmetro não influencia significativamente o ganho em estabilidade, permanecendo praticamente constantes os valores de absorção de água, inchamento em espessura e expansão linear.



Figura 11. Efeito da razão de esbeltez nas propriedades de painéis (Fonte: MOSLEMI, 1974).
Figure 11. Slenderness ratio effect in the panel properties (Source: MOSLEMI, 1974).

4 FORMAS DE CONTROLE DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL

Del Menezzi (2006) cita cinco formas para melhorar a estabilidade dimensional da madeira e derivados, dentre as quais citam-se: laminação cruzada, revestimento, preenchimento, alteração química e redução da higroscopicidade termicamente (termorretificação). O autor esclarece que as duas primeiras classes de tratamento estão relacionadas à forma como o que o produto é manufaturado e/ou utilizado (relativos à tecnologia de produto). Já as demais maneiras estão relacionadas com alterações proporcionadas à madeira, por serem formas de tratamento pelas vias química ou térmica que, em última análise, alteram a composição química da madeira.

A laminação cruzada já foi razoavelmente discutida no presente trabalho. No caso dos revestimentos, estes agem como uma barreira para a umidade, sendo que os mais utilizados são a fórmica, papel melamínico, compostos à base de polietileno, dentre outros. Quanto ao preenchimento (*bulking treatments*) é realizado por meio da impregnação de produtos químicos na parede celular ou no lume, substituindo ou impedindo a movimentação de parte da água.

Pela modificação química é possível a substituição dos grupos hidroxilas presentes nos componentes das zonas amorfas nas paredes celulares, proporcionando uma redução na higroscopicidade da madeira. Segundo Del Menezzi (2004), os melhores resultados são obtidos quando se utiliza compostos que são capazes de reagir com os grupos hidroxila da madeira em condições neutras ou levemente alcalinas. Imamura et al. (1989), ao avaliarem o efeito da modificação química (acetilização) em painéis produzidos com FF e MDI, utilizando partículas acetiladas ou não, observaram que, antes do processo de modificação química, houve maior inchamento para ambos os tipos de resinas avaliadas; já, após a acetilização, o inchamento foi significativamente reduzido e variações entre as resinas não foram mais observadas.

Del Menezzi (2004), avaliando a influência do tratamento térmico de painéis OSB por meio de diferentes tempos (12, 16 e 20 minutos) e temperaturas (190°C e 220°C), verificou que a estabilidade dimensional dos painéis aumentou significativamente com o aumento da temperatura. Com relação ao tempo de aplicação, no geral, não se observou influência, embora em alguns casos tenha sido observada uma melhora estatisticamente significativa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o avanço tecnológico na área de produção de painéis de madeira, foi possível a manufatura de compostos de elevada estabilidade dimensional, como o compensado, dentre outros compostos estruturais de madeira.

Embora muitos avanços tenham sido dados em relação à melhoria da estabilidade dimensional de compostos de madeira, essa característica ainda é um problema para alguns tipos de compostos, principalmente os particulados, a exemplo do aglomerado convencional, das chapas de fibras e, em menor proporção, das chapas de partículas estruturais.

A estabilidade dimensional não deve ser considerada como um problema isolado, pois, com ela também vêm outros prejuízos aos painéis, tais como a perda de resistência e a severa diminuição da vida útil. Assim sendo, a busca de maneiras de prevenção ou redução da

estabilidade dimensional de compostos de madeira ainda apresenta a necessidade de maiores estudos, para que a estabilidade desses produtos possa ser melhorada cada vez mais.

6 REFERÊNCIAS

ALBERTO, M.M.M. **Efeito da geometria das partículas e da densidade sobre as propriedades de painéis estruturais waferboard**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 1992, 122p.

ALBUQUERQUE, C.E.C. **Interações de variáveis no ciclo de prensagem de aglomerados**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), UFPR, Curitiba-PR, 2002, 150p.

AVRAMIDIS, S.; SMITH, L.A. The effect of resin content and face-to-core ratio on some properties of oriented strand board. **Holzforschung**, v.43, n.2, p.131-133, 1989.

AYRILMIS, N. Effect of panel density on dimensional stability of medium and high density fiberboards. **Journal of Material Science**, v.42, p.8551-8557, 2007.

CAI, Z.; ROBERT, J.R. Mechanical properties of wood-based composite materials. In: Wood handbook—Wood as an engineering material. Edited by Forest Products Laboratory. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508p. 2010.

CLOUTIER, A. Oriented strandboard (OSB): raw material, manufacturing process, properties of wood-base fiber and particle materials. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON SOLID WOOD PRODUCTS OF HIGH TECHNOLOGY, 1, 1998. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, p.173-185, 1998.

ÇOLAK, S.; ÇOLAKOĞLU, G.; AYDIN, I.; KALAYCIOĞLU, H. Effects of steaming process on some properties of eucalyptus particleboard bonded with UF and MUF adhesives. **Building and Environment**, v.42, p.304-309, 2007.

DACOSTA, L.E.; HASELEIN, C.R.; SANTINI, E.J.; SCHNEIDER, P.R.; CALEGARI, L. Propriedades físicas de chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos de

processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, v.15, n.4, p.421-429, 2005.

DEL MENEZZI, C.H.S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), UFPR, Curitiba-PR, 2004, 226p.

DEL MENEZZI, C.H.S. **Instabilidade dimensional da madeira e de seus subprodutos: causas, conseqüências e prevenção**. Brasília-DF: UnB, 2006. 37p. (Comunicações Técnicas Florestais, v.8, n.2).

DUNKY, M.; PIZZI, A. Wood adhesives. In: Chaudhury, M. and Pocius, A.V. (Eds.), **Adhesive Science and Engineering**. Amsterdam: Elsevier, chap. 23, p.1039-1103, 2002.

GEIMER, R.L.; HERIAN, V.L.; XU, D. Influence of juvenile wood on dimensional stability and tensile properties of flakeboard. **Wood and Fiber Science**, v.29, n.2, p.103-120, 1997.

HASELEIN, C.R. **Análise de parâmetros para a fabricação de chapas de partículas aglomeradas de madeira de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden) e embaúva (*Cecropia* sp.)**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), UFV, Viçosa-MG, 1989. 75p.

HILLIG, E.; HASELEIN, C.R.; SANTINI, E.J. Estabilidade dimensional de chapas aglomeradas estruturais (flakeboards) fabricadas com madeiras de pinus, eucalipto e acácia-negra. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.65, p.80-94, 2004.

IMAMURA, Y. et al. Dimensional stability and biological resistance of particleboard from acetylated Abizzia wood particles. **Wood Research**, n.76, p.49-58, 1989.

IWAKIRI, S. **Influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 1989, 130p.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247p.

IWAKIRI, S.; CAPRARA, A.C.; SAKS, D.C.O.; GUI SANTES, F.P.; FRANZONI, J.A.; KRAMBECK, L.B.P.; RIGATTO, P.A. Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resinas. **Scientia Forestalis**, n.68, p.39-43, 2005.

IWAKIRI, S.; KEINERT JR., S. Utilização de diferentes espécies do gênero *Pinus* para produção de painéis waferboard. **IPEF**, v. 43/44, p. 65-69, 1990.

IWAKIRI, S.; STINGHEN, A.B.M.; SILVEIRA, E.L.; ZAMARIAN, E.H.C.; PRATA, J.G.; BRONOSKI, M. Influência da massa específica na resistência mecânica de painéis aglomerados. **Floresta**, v.38, n.3, p.487-493, 2008.

KELLY, M.R. **Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard**. USDA/FS: Madison, 1977. 10p. (General Technical Report FPL-10).

LEE, J.N.; WU, Q. In-plane dimensional stability of three-layer oriented strandboard. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 34, n. 1, p. 77-95. 2002.

LEHMANN, W.F. Resin efficiency in particleboards as influenced by density, atomization and resin content. **Forest Products Journal**, v.20, n.11, p.48-54, 1970.

MALONEY, T.M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2. ed. San Francisco: M. Freeman, 1993. 689p.

MEDVED, S.; SERNEK, M.; SEGA, B. Thickness and swelling pressure of wood-based panels. In: **Wood resources and panel properties**, junho de 2006.

MELO, R.R.; DEL MENEZZI, C.H.S. Influência da massa específica nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados. **Silva Lusitana**, v.18, n.1, p.59-73, 2010.

MELO, R.R.; SANTINI, E.J.; HASELEIN, C.R.; STANGERLIN, D.M. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. **Ciência Florestal**, v.19, n.4, p. 449-460, 2009.

MELO, R.R.; STANGERLIN, D.M.; SUSIN, F.; SANTINI, E.J.; DOMINGUES, J.M.X.; MÜLLER, M.T.; ROCHA, C.B.; GATTO, D.A. Avaliação das propriedades físicas de *Pouteria pachycarpa*. **In: X CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL**, Nova Prata-RS, 2008, 6p.

MENDES, L.M. et al. Influencia do teor de resina, temperatura e tempo de prensagem na umidade de equilíbrio de painéis de partículas de madeira. **Cerne**, v.12, n.4, p.329-335, 2006.

MIYAMOTO, K.; NAKAHARA, S.; SUZUKI, S. Effect of particle shape on linear expansion of particleboard. **Journal of Wood Science**, v.48, p.185-190, 2002.

MOSLEMI, A.A. **Particleboard: materials**. Vol. I. London: Southern University Press, 1974. 244p.

MURAKAMI, K.; MINORU, U.; HIDEAKI, M.; ZHANG, M.; TAMAMI, K.; SHUICHI, K. Manufacture and properties of three-layered particleboards with oriented face strands of veneers: 1. **Japan Wood Science**, Tokyo, v.45, n.5, p.395-402, 1999.

NIEKERK, I.A.; PIZZI, A. Characteristic industrial technology for exterior *Eucalyptus* particleboard. **Holz als Roh und Werkstoff**, v.52, n.2, p.109-112, 1994.

NOURBAKHS, A. Mechanical and thickness swelling of particleboard composites made from three-year-old poplar clones. **Journal of reinforced and composites (Online First)**, p.1-10, 2008.

PIZZI, A. (Ed.) **Advanced wood adhesives technology**. Marcel Dekker: New York, 1994, 289p.

PIZZI, A., SCHARFETTER, H., KES, E.W. Adhesives and techniques open new possibilities for the wood processing industry. 1. Experience with tannin based adhesives. **National Timber Research Institute**, v.39, n.3, p.85-89, 1981.

SILVA, G.A. ; MENDES, L.M.; CALEGÁRIO, N.; MORI, F.A.; SILVA, J.R.M.; SANTOS, I.F. Estimativa de umidade de equilíbrio de painéis de madeira. **Scientia Forestalis**, n.70, p.23-29, 2006.

STAMM, A.J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.

SUCHSLAND, O. Hygroscopic thickness swelling and related properties of selected commercial particleboards. *Forest Products Journal*, v.23, n.7, p.26-30, 1973.

SUCHSLAND, O. **The swelling and shrinking of wood**. Madison: Forest Products Society, 2004, 189p.

SUZUKI, S.; MIYAMOTO, K. Effect of manufacturing parameters on the linear expansion and density profile of particleboard. **Journal of Wood Science**, v.44, n.6, p.444-450, 1998.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Wood handbook: wood as an Engineering Material**. Agric. Handb. 72. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture; rev. 1999.

VIGNOTE P.S.; JIMÉNEZ P.F.J. **Tecnología de la madera**. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1996. 602p.

VITAL, B.R.; WILSON, J.B. Efeito da geometria dos flocos e partículas, da densidade da chapa e do tipo de adesivo nas propriedades mecânicas das chapas de madeira aglomerada. **Revista Árvore**, v.4, n.2, p.179-187, 1980.

WU, Q. Application of Nelson's sorption isotherm to wood composites and overlays. **Wood and Fiber Science**, v.28, n.2, p.227-239, 1999.

XU, X.; YAO, F.; WU, Q.; ZHOU, D. The influence of wax-sizing on dimension stability and mechanical properties of bagasse particleboard. **Industrial Crops and Products**, v.29, p.80-85, 2009.

YUSOFF, M.N.M.; HORIE, H. The manufacture of oriented strand boards from rubberwood. **Journal of Tropical Forest Products**, Malaysia, v.3, n.1, p.43-50, 1997.

ZHOW, D.A. Study of oriented structural board made from hybrid poplar. Physical and mechanical properties of OSB. **Holz Als Roh-und Werkstoff**, v.48, n.7/8, p.293-296, 1990.