5 - Fatores de produção que influenciam a qualidade

Vinicius Gomes de Castro

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

CASTRO, V. G. Fatores de produção que influenciam a qualidade. In: *Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro* [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 79-90. ISBN: 978-65-87108-26-1. <https://doi.org/10.7476/9786587108612.0006>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença [Creative Commons Atribuição 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia [Creative Commons Reconocimiento 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

5 | FATORES DE PRODUÇÃO QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE

5.1 Relação Madeira/Cimento

Comercialmente a relação da quantidade de cimento-madeira dos painéis comerciais produzidos pelo método *BISON* incorporam 2,75 a 3,0 partes de cimento para 1 parte de madeira, com base no peso seco da madeira. Este método envolve o uso de prensas hidráulicas de pratos durante a fase de pega de compósitos em forma de painéis formados pela mistura cimento, partículas de madeira e 10% de água, o que resulta em painéis com massa específica em torno de 1.250 kg m⁻³. O método *BISON* ainda é o mais utilizado na produção de compósitos madeira-cimento. Foi em 1973 que a empresa suíça *Durisol* desenvolveu o processo de produção de painéis madeira-cimento de alta massa específica. Um ano depois, a empresa decidiu oferecer licenças internacionais para produção deste tipo de painel com um acordo com a empresa alemã *Bisonwerke* que manufaturava e vendia plantas de fábricas. E desde então o processo vem sendo estudado e replicado como o padrão para fabricações deste material.

Contudo, o custo de produção dos compósitos é diretamente correlacionado com a relação madeira/cimento usada na mistura. Embora o preço de mercado do cimento seja inferior ao da madeira, ao utilizarmos tais relações, o cimento torna-se a parte mais cara do processo, por ser utilizado em maior quantidade (SIMATUPANG, 1989). Além disso, a grande quantidade de cimento também é responsável por compósitos mais pesados, que resultam no aumento do custo de transporte e manuseio (MOSLEMI; PFISTER, 1987).

Por outro lado, quanto maior a quantidade de cimento envolvida no processo, melhor será a resistência mecânica do compósito. Existe uma correlação linear entre a razão cimento/madeira e a resistência à flexão (SIMATUPANG, 1979). A relação ideal depende de algumas outras variáveis, como, por exemplo, o tipo de partícula utilizada. Quando partículas tipo *Excelsior* (tiras de madeiras com comprimento médio de 500 mm, espessura entre 0,15 e 0,38 mm e largura média variando entre 0,50 a 0,42 mm) são utilizadas, o ótimo de propriedades estruturais do compósito é atingido ao utilizar uma relação de 2 partes de cimento para 1 de madeira. Se uma relação menor for usada, a madeira não é recoberta suficientemente pelo cimento e resulta em uma baixa ligação interna. Por outro lado, se a relação for maior, aumentando a quantidade de cimento, a taxa de compactação será reduzida resultando em uma baixa flexão estática (LEE, 1985).

Para partículas tipo *Strand* (40 x 5 x 0,5 mm), tradicionalmente usadas para produção de painéis tipo OSB, as propriedades mecânicas de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) tendem a melhorar com o aumento da quantidade de madeira de 30% para 40%. Porém, se for misturado 60% de madeira, os valores médios destas propriedades diminuem. Já a ligação interna teve seu valor máximo com a mistura de 30% de madeira. Quanto maior a quantidade de madeira, maior foi as ligações madeira-madeira, e conseqüentemente, menor a área de conectividade entre madeira e cimento. Já a propriedade de resistência ao impacto apresentou uma correlação direta com o aumento de madeira na mistura (ASHORI; TABARSA; SEPAHVAND,

2012). Porém, tradicionalmente, a partícula utilizada na produção de compósitos é a tipo *Flake* (partículas com comprimento médio entre 2 e 20 mm, espessura com menos de 1 mm e largura média entre 0,2 e 2,5 mm). Marzuki et al. (2011) analisaram o efeito de quatro diferentes proporções de cimento e madeira de *Leucaena leucocephala* (1,75:1; 2:1; 2,25:1; e 2,5:1) nas propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados de multicamada com densidade nominal de 1,3 g/cm³. Foi concluído que, quanto maior a quantidade de cimento, menores foram os valores de inchamento em espessura e maiores foram os valores de absorção de água. Os melhores resultados de MOR foram encontrados para a relação madeira/cimento de 1,75:1. Todavia, o MOE apresentou comportamento oposto, sendo seus melhores resultados obtidos na relação 2,5:1. Já a ligação interna apresentou seu ótimo na relação 2:1.

Comportamento semelhante também foi observado em pesquisa com compósitos produzidos com *Picea abies* (OYAGADE, 1990). Quando a densidade do compósito foi mantida constante, a quantidade de cimento tendeu a melhorar as propriedades de flexão, mas o efeito foi mais forte no MOR e na carga máxima do que na propriedade de MOE. Ou seja, antes de se tomar a decisão por qual quantidade de cimento será aplicado em um compósito, é importante conhecer seu uso final, para que seja sabido qual a propriedades será mais requisitada.

O efeito da quantidade de cimento também é influenciado pelo tipo de cimento utilizado na mistura. O efeito da relação madeira/cimento de 1:1,5 para 1:3 não foi observado na propriedade MOR quando o cimento Portland tipo I foi utilizado. Por outro lado, para o cimento Portland tipo III, a relação ideal foi 1:2 (MOSLEMI; PFISTER, 1987). Já a espécie de madeira utilizada passa a ter pouca influência na propriedade resistência à compressão, por exemplo, quando a relação madeira/cimento é avaliada. Isso ocorre quando a propriedade é função da densidade do compósito e esta é linearmente proporcional à quantidade de cimento utilizado (LEE et al., 1987).

5.2 Quantidade de água

Conhecer a exata quantidade de água adicionada na mistura é extremamente importante quando se prepara um compósito madeira-cimento. Ao mesmo tempo em que é necessário oferecer água o suficiente para que a reação de pega do cimento ocorra, também deve ser levada em consideração a capacidade higroscópica da madeira. Em um dos estudos pioneiros sobre o tema, Simatupang (1979) considerou o efeito da quantidade de água (variando entre 25 e 75% do peso seco do cimento usado) em compósitos de madeira de *Picea* sp. O autor concluiu que a quantidade de água ideal para o compósito depende da relação entre madeira-cimento. Em uma relação cimento/madeira de 3,5, o valor máximo para resistência à flexão foi de 35% de água. Se essa relação baixar para 3, 2,5 ou 2, a resistência é maior para a proporção de 45% de água. Já uma relação cimento/madeira de 1,5 necessita de mais água e atinge melhores resultados com 55%.

Uma vez que a variação da quantidade de água é razão da capacidade de absorção da madeira, a relação água/cimento também depende da geometria das partículas de madeira. Partículas menores e mais finas possuem uma maior área superficial e, por consequência, uma maior superfície de absorção de água. É importante ressaltar que índices mais elevados de água são menos prejudiciais à mistura do que uma baixa relação. Assim, na fabricação de compósitos madeira-cimento, pode-se acrescentar uma quantidade extra de água sem risco (SIMATUPANG, 1979).

Outra questão prática para indústrias deste tipo de compósito é o fato de que as partículas de madeira não precisam ser secas antes de serem usadas nas misturas com o cimento. No processo de prensagem, a água presente na madeira sai dos poros e reage com o cimento. Por isso, é necessário considerar o ponto de saturação das fibras médio da madeira (30%) no cálculo da quantidade ideal de água na mistura.

$$H_2O = (C \times 0,35) + (M \times (0,3 - TU\%))$$

Legenda: Em que: H₂O, quantidade de água a ser acrescentada na mistura (mL); C, o peso do cimento (g); M, o peso das partículas (g); e TU% o teor de umidade das partículas (%).

Fonte: Simatupang (1979).

Por se tratar de uma fórmula geral, foi considerada a relação de água-cimento efetiva (35%) ao invés da relação água-cimento total, uma vez que essa relação depende da razão madeira-cimento. Na relação total, a quantidade de água considera toda a água livre e a absorvida pelos agregados, enquanto a relação efetiva leva em consideração apenas a água que reage com o cimento. Assim, concretos mais porosos exigem uma quantidade de água total maior do que concretos densos, embora ambos utilizem basicamente a mesma quantidade de água efetiva. Por exemplo, tanto compósitos que usaram uma razão cimento/madeira de 1,5, quanto de 3, apresentaram uma mesma razão de água efetiva de 35%, diferente das proporções de água total, 55 e 45% respectivamente (SIMATUPANG, 1979).

Ao considerar que a capacidade de absorção de cada espécie e de partículas de diferente tamanho será diferente, uma nova adaptação da fórmula foi sugerida (KARADE, 2005):

$$W_w = 0,35W_c + \frac{A_w W_g}{100}$$

Legenda: Em que: W_w, quantidade de água a ser acrescentada na mistura (mL); W_c e W_g, o peso do cimento (g) e peso seco das partículas de madeira(g); e A_w, a capacidade de absorção da partícula em porcentagem pelo peso (%).

5.3 Geometria das partículas de madeira

Vários fatores contribuem para as propriedades dos compósitos madeira-cimento e, entre estes, a geometria das partículas é uma das variáveis mais importantes, pois afeta a liberação de extrativos, a quantidade de água necessária e até mesmo a ligação mecânica entre as matérias-primas. A geometria da partícula envolve não só o formato, mas também as dimensões. Por exemplo, o tamanho da partícula contribui com o grau de ligação entre as partículas de madeira e o cimento, e consequentemente a resistência à flexão do compósito (OLORUNNISOLA, 2009). Em compósitos madeira-cimento produzidos com partículas de madeira de espécies tropicais mais longas, foi observada melhor estabilidade dimensional em relação à absorção de água, inchamento de espessura e maiores valores de MOR e MOE (BADEJO, 1988).

Trabalhos mais antigos indicam que o tamanho e geometria da partícula teria efeito semelhante tanto em madeira-cimento quanto em painéis tradicionais de resina, porém trabalhos recentes sugerem uma importante diferença. Frybort et al. (2008), em sua revisão de literatura sobre o estado da arte na produção de compósitos madeira-cimento, relataram trabalhos que apontam a necessidade de partículas maiores do que as usadas em painéis tradicionais, isso porque existem custos da redução das dimensões do material que interferem na viabilidade no produto, tanto na mecanização necessária para fragmentar as partículas, quanto pela quantidade maior de material aglutinante que incorpora o painel com maiores superfícies de contato de seus componentes.

Para compósitos de madeira de *Alnus subcordata* e *Populus deltoides*, com uma relação madeira-cimento de 1:3, foi encontrada uma forte correlação negativa entre o tamanho da partícula e os resultados de MOR e ligação interna. Também foi encontrado uma correlação positiva entre tamanho da partícula, absorção de água e inchamento de espessura (NAZERIAN; GHALEHNO; GOZALI, 2011).

O tamanho ideal da partícula depende também do método de densificação utilizado na produção do compósito. Tradicionalmente os compósitos são produzidos sob pressão em prensas hidráulicas, mas um novo método alternativo de vibro compactação vem sendo estudado. Neste método, o compósito não é adensado por pressão, e sim por vibração. Assim, o tamanho da partícula pode passar a ser um fator limitante, pois partículas grandes têm dificuldade de vibrar e assentar, gerando compósitos menos densificados. Por outro lado, partículas pequenas possuem maior área superficial e necessitam de maior quantidade de cimento para o revestimento total (AZAMBUJA et al., 2017).

Painéis do tipo OSB, que utilizam partículas do tipo *Strands* (75 mm de comprimento, 20 mm de largura e 0,75 mm de espessura) maiores do que a tipo *Flake* tradicionalmente utilizadas para aglomerados, são mais complicados de se produzir quando o cimento é o aglomerante. Isso porque não há um entrelaçamento das partículas, o que tende a enfraquecer a ligação interna do compósito. Porém, embora difícil, não é impossível a produção deste compósito, sendo que alguns autores inclusive chamam a atenção para este tipo de partícula, a relação cimento/madeira pode até ser menor do que a tradicionalmente usada no processo BISON (PAPABOPOULOS; NTALOS; KAKARAS, 2006; DEL MENEZZI; CASTRO; SOUZA, 2007).

5.4 Presença de casca

A utilização de casca de essências florestais geralmente não é aconselhável devido aos altos teores de matéria orgânica que influenciam a hidratação do cimento. Por exemplo, o índice de inibição da madeira de *Eucalyptus grandis* é em torno de 11,75, valor que a classifica como material de inibição moderada. Já para casca desta espécie, o índice de inibição é de 168,26, considerado um material de inibição extremamente alta. A justificativa para esse comportamento pode ser a quantidade de extrativos totais, que varia de 4 para 20% quando se compara a madeira com a casca. Porém, se as cascas forem tratadas

com extrações em água fria e NaOH, o seu índice de inibição pode ser baixado para 8,3 que é considerado um índice extremamente baixo (MORI et al., 2007). A produção de compósitos madeira-cimento com incorporação de 25% de casca tratada de *Eucalyptus grandis* apresentou valores de compressão paralela maiores dos que os apresentados por painéis produzidos sem adição de casca. A ligação interna, o MOE, absorção de água e inchamento em espessura também não foram alteradas com a adição de 25% de casca tratada, mas a adição de casca sem tratamento prévio mostrou-se inviável para a produção de painéis madeira-cimento (LOPES et al., 2005).

Silva et al. (2006) analisaram o efeito da presença de casca nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de madeira de *Eucalyptus urophilla* e cimento Portland ARI. O uso de 5 ou 10% de casca em relação ao peso da madeira afetou negativamente tanto as propriedades mecânicas (MOR, MOE e ligação interna) quanto as propriedades físicas (inchamento em espessura e absorção de água). As propriedades de MOE e inchamento em espessura apresentaram diferenças significativas para painéis com 5 ou 10%. Porém, o efeito negativo nas propriedades foi contornado com a adição de 20% de microssílica na composição dos painéis.

A mesma espécie foi estudada em outro experimento e apresentou resultados diferentes, mas com comportamentos semelhantes. A adição de 10% de casca de *Eucalyptus urophilla* na composição dos compósitos não foi o suficiente para alterar as propriedades de ligação interna, MOE e inchamento em espessura após 2 horas. O acréscimo de 20% de casca não alterou o resultado a absorção de água após 2 horas. Nem mesmo a adição de 25% de casca em relação ao peso da madeira foi o suficiente para alterar os valores de MOR (SILVA et al., 2005b).

5.5 Fatores de prensagem

A temperatura ideal para prensa varia entre 40 e 80oC e é influenciada pela composição química da madeira, o tipo do cimento e o uso de

aditivos. Após a prensagem, o painel deve ser mantido por volta de 6 a 8 horas grampeados (SIMATUPANG et al., 1991). O tempo de grampo reduz a produtividade em uma empresa de painéis madeira-cimento. Entre os métodos estudados para se diminuir esse tempo, há a exposição dos painéis ao CO_2 na fase inicial do processo. O dióxido de carbono abaixa o pH da mistura através da formação de ácido carbônico, que é neutralizado pelo silicato de cálcio presente no cimento que resulta em CaCO_3 mais insolúveis. Os carbonatos são os responsáveis pela ligação interna inicial que permite a liberação da prensa em questões de minutos. Contudo, a concentração do gás deve ser controlada. Uma quantidade excessiva pode provocar um endurecimento muito rápido da superfície que impediria a penetração do gás no interior do painel. O aquecimento excessivo da mistura devido à aceleração exotérmica também pode gerar uma instabilidade dimensional e, assim, ocasionar micro rachaduras (SOROUSHIAN et al., 2003).

Ashori et al. (2012) testaram o uso de madeira reaproveitada de dormentes de estrada de ferro para a produção de compósitos madeira-cimento. Usando uma pressão de 40 kg/cm² por 5 minutos, eles variaram apenas a temperatura entre 25 e 60°C. Foi observado que as propriedades mecânicas diminuíram com o aumento da temperatura, enquanto a absorção de água e o inchamento de espessura aumentaram. Porém, neste caso, como havia a possibilidade de os dormentes serem tratados com creosoto, uma possibilidade para os valores ruins em compósitos tratados em alta temperatura foi a difusão do produto químico para a superfície reduzindo assim a interação entre madeira e cimento.

Um método alternativo, chamado de vibro compactação ou vibro densificação, vem sendo proposto para se produzir compósitos madeira-cimento sem o uso de prensa hidráulica de pratos (OMONIYI; AKINYEMI; OLAYIWOLA, 2013; PARCHEN et al., 2016). Este método usa uma mesa vibratória, tradicionalmente utilizada na produção de blocos de concreto, para adensar os compósitos sem a aplicação de pressão. A maior vantagem deste processo é que uma mesa vibratória

é mais simples e barata do que uma prensa hidráulica e pode, ainda, ser facilmente montada pelo próprio operador no local de utilização do produto. Com a vibração, há a eliminação do ar presente na mistura, o que força uma acomodação das partículas. O problema mais comum que pode ocorrer nos casos de vibração é a compactação não uniforme. Isso pode ser resultado de uma vibração inadequada ou excessiva, que causa segregação na mistura (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Outra vantagem do método é que os compósitos podem ser produzidos de diversos formatos definidos pelo molde submetido à vibração. Todavia, é importante levar em consideração que a forma do molde pode afetar o resultado final do produto, uma vez que o espaçamento para a movimentação e consolidação das partículas é afetado. Castro, Parchen e Iwakiri (2018) observaram que o tamanho do molde pode ser uma variável para se controlar a densificação de um painel vibro-compactado. Quanto menor o espaço físico para movimentação da madeira, maior será a densidade final do painel. E, uma vez ajustada a densidade, painéis vibro-compactados podem apresentar propriedades físico-mecânicas semelhantes aos painéis tradicionalmente prensados.

5.6 Umidade de equilíbrio

A relação entre a umidade de equilíbrio e a umidade relativa (UR) e temperatura (oC) é denominada isoterma de sorção e afeta a resistência mecânica e a estabilidade dimensional de produtos compostos de madeira. Silva et al. (2005a) determinaram a umidade de equilíbrio de diversos tipos de painéis de madeira, inclusive de dois tipos de painéis de madeira-cimento sem revestimento. Os valores médios encontrados na temperatura de 30oC e umidade relativa de 40, 50, 60, 70, 80 e 90% encontraram-se entre 9,54 e 11,14. Também foi calculada a histerese através da razão entre as umidades de equilíbrio de absorção e dessorção e os valores médios encontrados foram de 0,89 e 0,95. Essa diferença foi atribuída à possível variação da granulometria dos painéis.

Também foi comprovado que o teor de umidade afeta a performance de compósitos madeira-cimento produzidos com adição de CO₂ no processo de cura. Um teor de 30% apresentou melhores valores de ligação interna, MOR e MOE em painéis madeira-cimento produzidos com *Chamaecyparis obtusa* e *Cryptomeria japonica*. Teores de umidades mais baixos apresentaram resultados piores do que os painéis de controle porque a reação de carbonatação não é bem sucedida por causa da quantidade de água insuficiente (MAAIL et al., 2012).

5.7 Tempo de cura

Compósitos madeira-cimento irão atingir sua resistência máxima no tempo necessário para ocorrer a cura do cimento utilizado na mistura, sendo que, para os cimentos Portland, são geralmente necessários 28 dias (com exceção do CP V -ARI, que atinge sua cura em 7 dias). Este período de cura pode ser uma desvantagem em um processo de produção do ponto de vista logístico e de custo de armazenamento. E, uma vez que as partículas de madeira podem vir a retardar a cura do cimento, este período pode ser ainda mais longo.

O efeito da cura do compósito madeira-cimento é variável entre as propriedades mecânicas requisitadas. Por exemplo, o módulo de elasticidade do compósito realmente depende do período de 28 dias, porém o módulo de ruptura e a estabilidade dimensional já apresentaram valores máximos dentro dos primeiros 14 dias (MOSLEMI; PFISTER, 1987).

Blankenhorn et al. (1994) analisaram o efeito de 7, 14, 28 e 56 dias de cura na resistência à compressão de cinco tipos diferentes de corpos de prova de madeira-cimento produzidos com *Quercus rubra*, *Acer sacharum*, *Populus tremuloides*, *Acer rubrum* e *Pinus taeda*. A resistência à compressão aumentou de acordo com o maior tempo de cura para todos os casos. Porém, aos 28 dias, os corpos de prova com *Pinus taeda*, já haviam atingido cerca de 96% da sua resistência

final, enquanto os de *Quercus rubra* apenas aproximadamente 53% do seu potencial. Assim, o tempo de cura depende também da espécie utilizada no compósito.

Savastano Jr. et al. (2000) estudaram compósitos de cimento reforçado com diversos tipos de fibras, entre elas a de *Pinus radiata* e a de sisal (*Agave sisalana*). Os autores não encontraram diferença significativa para compósitos testados com 28 e 42 dias para as propriedades de MOR, MOE e resistência à fratura.

Da mesma forma que há técnicas para reduzir o tempo de pega do cimento, também pode se encurtar o tempo de cura dos compósitos sem afetar suas propriedades finais. Por exemplo, Latorraca e Iwakiri (2001) testaram a cura de painéis de madeira de *Eucalyptus urophylla* e cimento em câmara vaporizada. Painéis que foram submetidos à cura a vapor apresentaram valores de MOE e compressão paralela, respectivamente, após 7 e 14 dias equivalentes aos painéis curados em câmara climática após 28 dias. Porém, o método não apresentou resultado para a redução de tempo necessária para alcançar valores máximos de MOR e ligação interna.

O período de cura de 28 dias também pode ser acelerado para poucos minutos pela utilização de dióxido de carbono, CO₂, durante o processo de prensagem dos painéis madeira-cimento. O gás acelera a formação de C-S-H e CaCO₃. As propriedades mecânicas dos painéis aumenta de acordo com o aumento da concentração de CO₂, porém, a injeção de apenas 10% do gás a uma pressão de 7,5MPa é o suficiente para que painéis com 10 minutos de cura apresentem resultados semelhantes a painéis madeira-cimento tradicionais após 14 dias de cura (HERMAWAN et al., 2002).