4 - Pré-tratamentos

Vinicius Gomes de Castro

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

CASTRO, V. G. Pré-tratamentos. In: *Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro* [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 63-77. ISBN: 978-65-87108-26-1.
<https://doi.org/10.7476/9786587108612.0005>.

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/).

4 | PRÉ-TRATAMENTOS

Embora se reconheça o efeito deletério da madeira na pega e cura do cimento, há formas de minimizá-lo. Reduzir o problema da compatibilidade é o caminho para o desenvolvimento de compósitos madeira-cimento como uma indústria, pois afetaria o gargalo criado pela limitação de matéria prima. Há basicamente duas formas de se trabalhar a seletividade das espécies:

- a) Através da extração de componentes químicos presentes na madeira. Como visto anteriormente, é reconhecido que tanto a quantidade quanto a composição de extrativos e açúcares presente na madeira afetam a pega do cimento. Eliminar ou reduzir essas ameaças poderia gerar, na teoria, compósitos de melhores qualidades fisicomecânicas. Porém, a eficiência deste método só poderá ser completa quando se compreender totalmente quais são exatamente os componentes inibidores, para que haja uma extração seletiva e que não afete a estrutura da madeira.

- b) A segunda forma é a adição de acelerados da pega do cimento. Neste método, o foco da atenção deixa de ser a compatibilidade da madeira e passa a ser no processo de pega do cimento. Se esse processo pode ser melhorado através de produtos químicos, o efeito inibidor da madeira pode ser sobrepujado, e as propriedades dos compósitos não serão afetadas. O uso de aceleradores é uma prática comum nas indústrias de concreto. Porém, quando há mistura de madeira, certas limitações devem ser levadas em consideração, como a reação entre a madeira e o acelerador.

4.1 Métodos de extração

Os componentes químicos da madeira muitas vezes são classificados de acordo com sua solubilidade, e não de acordo com sua estrutura química. Por exemplo, o termo hemiceluloses envolve um conjunto de polissacarídeos de baixo peso molecular solúveis em solução alcalina. Já extrativos é um termo geral que compreende toda uma gama de materiais orgânicos solúveis em água ou solventes orgânicos, tanto que, para a determinação do chamado extrativos totais de uma madeira, faz-se necessária uma série de extrações em diferentes solventes. Não existe um solvente único que possa retirar todos os extrativos da madeira.

Cada solvente irá conseguir extrair um conjunto de componentes químicos. Por exemplo, éter é um produto relativamente não-polar e é capaz de extrair ácidos graxos, resinas, óleos, esteróides e terpenos. Já o álcool/tolueno é mais polar e extrai a maioria dos extrativos solúveis em éter além dos componentes orgânicos não solúveis em água. A água quente consegue extrair alguns sais inorgânicos e polissacarídeos de baixo peso molecular, como açúcares e amido. Água também remove certas hemiceluloses como a arabinogalactose (PETTERSEN, 1984).

Submeter as partículas de madeiras a diversos métodos de extração antes de utilizá-las na produção de compósitos madeira-cimento é uma prática comum. Contudo, nem sempre essa correlação direta existe. Por exemplo, não foi relatada diferença significativa entre a inibição

da madeira *in natura* ou após extração com substâncias apolares, como etanol e éter etílico, para a espécie *Pinus* sp (PEREIRA et al., 2012), o que indica que cada método de extração deve ser avaliado separadamente.

4.1.1 Água fria

A madeira de *Populus hybrid* possui teor de extrativos solúveis em água fria de 2,15%. Para se chegar a este valor, foram realizadas extrações entre 1 e 24 horas, até que a perda de peso da amostra fosse constante. Pelo método de condutividade elétrica, foi constatado que existe um efeito da água com estes extrativos na pega do cimento. A formação do mineral Portlandite passou a sofrer um atraso de 1,8 horas. Porém, o tempo de imersão da madeira não afetou a curva (GOVIN et al., 2005).

A solução resultante de uma imersão em água de madeira de *Populus hybrid* por 1 hora consiste em vários ácidos carboxílicos com baixa concentração (< 1 mg/l), com exceção dos ácidos fórmico, acético, málico, benzóico e *p*-salicílico (GOVIN et al., 2005). Outro estudo também realizado com extrativos de madeira de *Populus* sp. em água fria mostrou que o único pico presente na análise de cromatografia foi o relativo ao ácido acético. Embora o extrativo tenha afetado negativamente a hidratação do C-S-H, o ácido acético isolado não reproduziu este resultado, o que leva a crer que o elemento inibidor não pode ser detectado no teste (BOUSTINGORRY et al., 2005).

A extração com água removeu 85% dos extrativos retardantes da cura do gesso da *Hevea brasiliensis*. Este extrativo era constituído por uma mistura de aminoácidos (glutamina, arginina, alanina e asparagina) com concentração estimada em 1% (SIMATUPANG; SCHMITT, 1992). Outra pesquisa também analisou o efeito inibidor de extrativos solúveis em água fria de outras 52 espécies de madeira tropical na cura do gesso. Destas espécies, 5 apresentaram inibição extremamente forte, e outras 10 foram consideradas com forte poder inibitório. Entre os extrativos prováveis de inibir a cura do gesso, foram apontados os

compostos fenólicos, incluindo os taninos e aminoácidos hidrolisáveis. Também não foi possível encontrar uma correlação entre o pH da madeira e seu efeito inibidor neste caso (KASIM; SIMATUPANG, 1989).

O efeito da extração com água fria não é constante, pois a constituição química e quantidade dos componentes solúveis varia de espécie para espécie. Por exemplo, a compatibilidade entre o cimento e as madeiras tropicais *Pterocarpus angolensis* e *Erythrophleum suaveolens* melhorou consideravelmente após a imersão das partículas por 48 horas. Contudo, o mesmo pré-tratamento não surtiu o efeito benéfico nas espécies *Albizia adianthifolia*, *Sterculia appendiculata* e *Khaya nyasica* (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000).

Outra variável no processo que também depende da espécie vegetal que será usada como matéria prima do compósito é o tempo de extração. Os extrativos solúveis em água fria das fibras de *Cajanus cajan* são quase que totalmente removidos após 3 horas, devido a uma baixa concentração quando comparados aos valores típicos de madeira. Contudo, mesmo em pequenas quantidades, se extrativos desta fibra representam 2% da mistura do cimento, o atraso na pega pode chegar a 130% (AGGARWAL et al., 2008). Já quando a madeira de *Tectona grandis* foi testada, foram necessários 3 dias de imersão para que os extrativos fossem removidos e, assim, a resistência à flexão do compósito madeira-cimento pudesse aumentar de 2,81 para 12 kg/cm² (SUTIGNO, 2002).

4.1.2 Água quente

Os extrativos solúveis em água quente são apontados como um dos principais inibidores do cimento. Por esta razão é reportado que a extração com água quente tende a ser mais eficiente do que com água fria (AGGARWAL et al., 2008; NA et al., 2014). Por exemplo, os extrativos retirados pelo método de água quente de *Populus simonii* apresentaram uma inibição consideravelmente maior do que os extraídos

de água fria (fator C_A de 26,8 para água quente e 72 para água fria) (WANG; YU, 2012).

Entre os extrativos que afetam a pega do cimento, pode-se destacar a presença de taninos hidrolisáveis. Este composto é caracterizado por uma molécula central de glucose que é esterificada com ácidos gálico ou elágico (SALMINEM et al., 2001). Esses extrativos podem reagir com os íons de hidróxido de cálcio do cimento, levando à inibição de sua cura. A quantidade presente na madeira também é considerada um fator limitante no critério de inibição. Madeiras que apresentam uma quantidade de extrativos em água quente acima de 7% normalmente são consideradas inaptas para a produção de compósitos (HACHMI; MOSLEMI, 1989).

O efeito positivo da extração com água quente não é universal. Partículas de *Eucalyptus grandis* lavadas com água quente não apresentaram diferença significativa sobre a resistência à compressão axial (BERALDO; CARVALHO, 2004). Também não houve melhoras na resistência para as espécies *Acer saccharum* e *Quercus rubra*, sendo que, na verdade, valores de compressão diminuíram à medida que a porcentagem de perda de peso da madeira aumentou devido ao método de extração com água quente (BLANKENHORN et al., 1994). A compatibilidade entre a madeira de *Azalia quarzenzis* também não foi afetada com tratamentos em água fria ou água quente (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000).

A quantidade e composição dos extrativos varia significativamente não só entre espécies, mas também entre indivíduos de uma mesma espécie, dependendo da idade da árvore, genética e condições de crescimento. Dentro de um único indivíduo também há variação em diferentes partes. Extrativos são mais frequentes na base, galhos ou topo da árvore do que quando comparados à região central do tronco. Também há diferença clara entre alburno e cerne. O cerne é formado por células mortas e por isso o teor de umidade tende a ser muito menor do que do alburno, o que torna a madeira mais vulnerável ao ataque de fungos. Para evitar a deterioração, em algumas espécies,

durante a formação do cerne (antes de secar), as células do parênquima aumentam a produção de resina e componentes fenólicos e, em muitas espécies de folhosas, pode haver a identificação visual pela mudança da cor, originada da formação de polifenóis. A reação principal é que gorduras e outros ésteres são hidrolisados, formando ácidos graxos e esteróis (JANSSON; NILVERBRANT, 2009).

Por isso, o efeito da extração tende a ser diferente entre alburno e cerne. A extração de componentes solúveis em água quente é mais eficiente no combate à inibição à pega do cimento pela madeira do cerne de *Pinus* sp. do que no alburno. Sem tratamento, o cerne é mais inibidor do que o alburno por apresentar maior quantidade de açúcar. O concentrado da extração pode inibir completamente a cura do cimento por até 66 horas (BIBLIS; LO, 1968).

4.1.3 Solvente orgânico: Acetona

O tipo e polaridade do solvente utilizado na extração são fundamentais para solubilizar diferentes compostos químicos da madeira. A maior parte dos compostos extraíveis com acetona possui caráter polar, com apenas uma pequena porcentagem de características lipofílicas (SILVÉRIO et al., 2006).

O uso da extração com acetona na madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*) removeu apenas uma pequena parte (cerca de 5%) dos retardantes da cura do gesso. Dentre os componentes solúveis em acetona, a fração lipossolúvel continha traços de retardantes do gesso. Sendo estes encontrados em elementos neutros e ácidos livres. Na seringueira, os ácidos graxos, livres e estratificados, são basicamente ácidos palmítico oleico e linolênico. A porcentagem de ácido graxo saturado nos ácidos livres foi maior do que na parte neutra (SIMATUPANG; SCHMITT, 1992).

4.1.4 Solvente orgânico: Metanol

Alnus japonica é uma espécie nativa do Japão, nordeste da China e Coréia e conhecida pelo seu efeito inibitório na pega do cimento. Os componentes inibitórios desta madeira foram separados, utilizando-se inicialmente a extração por metanol e na sequência com *n*-hexano, benzeno, acetato de etilo, metanol e 75% de metanol. Isso porque a polaridade destas soluções é diferente. Por consequência, a solução extraída por cada processo também será diferente. Porém, apenas a extração com metanol apresentou uma quantidade significativa de componentes inibitórios. Como este solvente é polar, conclui-se que os extrativos que inibem a cura do cimento possuem alta polaridade. A identificação destes elementos mostrou que os extrativos com mais poder de inibição são as glucoses e sacaroses. Porém, estes mesmos elementos inibitórios afetam pouco a pega do cimento se a quantidade for abaixo de 1% na madeira (YASUDA; IMA; MATSUSHITA, 2002).

Um processo semelhante foi utilizado para se isolar os elementos inibidores de outra espécie japonesa conhecida por sua baixa compatibilidade com o cimento, a *Zelkova serrata* Makino. Os resultados foram semelhantes aos encontrados para a *Alnus japonica*. Os extrativos que inibem a cura do cimento também apresentaram alta polaridade e também não afetaram a cura quando em porcentagens abaixo de 1. A análise da estrutura química do material isolado indica que tanto o C-glicosídeo com quatro grupos hidroxila e a cetona α -hidroxilada encontradas na região alifática da molécula podem se ligar aos íons inorgânicos e contribuir para a inibição da pega do cimento (MATSUSHITA; MIYAWAKI; YASUDA, 2003). Inclusive, a baixa concentração de elementos tidos como inibitórios como glucose e tanino já foi apontada como um acelerador na cura do cimento. A cura de cimento Portland com plastificante a 80°C foi acelerada com a mistura de 0,27, 0,55 e 1,09% de glucose, e, em menor intensidade, com a mistura de 0,3, 0,6 e 1,2% de tanino hidrolisáveis (SIMATUPANG, 1990).

4.1.5 Solução alcalina

Soluções alcalinas são capazes de extrair carboidratos de baixo peso molecular. As hemiceluloses são os principais componentes da parede celular que podem ser classificados nesta categoria e são solúveis em soluções concentradas de hidróxido de sódio ou de potássio, ou seja, soluções alcalinas. Porém, deve-se atentar para o fato de que certas hemiceluloses, especialmente de coníferas do gênero *Larix*, são parcialmente extraíveis com água (TELEMAN, 2009). A solubilidade da madeira em meio alcalino também pode indicar o grau de deterioração por fungos ou agentes abióticos, como luz e calor. Isso porque os agentes deterioradores são capazes de quebrar o polímero da celulose e reduzir seu peso molecular.

A fração de extrativos solúveis em meio alcalino também possui influência adicional na cura do cimento. O aumento de componentes solúveis em meios alcalinos diminui o valor de compressão do compósito (SIMATUPANG, 1989). A compatibilidade à pega do cimento também pode ser melhorada quando as partículas utilizadas nas misturas são previamente lavadas em soluções de NaOH. Por exemplo, madeiras de *Milettia stuhmannii* e *Julbernardia globiflora* não apresentaram diminuição do efeito inibitório à pega do cimento quando sofreram extrações em água quente ou fria. Porém, após extração em solução de NaOH (10 g/L ou 1%), apresentaram uma boa compatibilidade (ALBERTO; MOUGEL; ZOULALIAN, 2000). Partículas de *Eucalyptus benthamii*, após 2 horas de imersão em solução de NaOH 1%, também apresentaram melhor compatibilidade no teste de índice de inibição em comparação com outros métodos de extração. Porém, o mesmo pré-tratamento resultou em compósitos com menor valor de compressão axial após 28 dias de cura (CASTRO et al., 2014).

Outra substância, de fácil acesso, que pode ser usada como pré-tratamento da madeira é a cal (hidróxido de cálcio). A imersão da madeira em uma solução calcária foi testada para estudar o efeito na inibição da madeira no cimento. A madeira de *Populus hybrid* submersa em tal

substância por um período de 1 a 24 horas sofreu uma perda de massa entre 2,2 e 3,9%. Quanto maior o tempo de imersão, maior foi a perda de massa. Quando se usa a solução calcária ao invés da água, ocorre, além da retirada dos extrativos, a degradação alcalina de produtos. Pelo teste da condutividade elétrica, a madeira alcalina mudou significativamente o comportamento da hidratação da mistura. Comparado com o cimento puro, o pico de condutividade foi atrasado entre 9,6 a 13,8 horas, dependendo do tempo de imersão da madeira. Assim, pode-se observar que produtos degradados causam mais inibição à hidratação do cimento do que os extrativos (SIMATUPANG; SCHMITT, 1992).

A extração em solução de CaO também foi maior do que a em água para fibras de coco e de sisal (*Agave sisalana*), isso porque, neste meio, a decomposição das hemiceluloses e lignina é mais rápida. A taxa de extração também diminuiu com o tempo, embora ainda fosse presente mesmo após 30 dias. Análise química indicou a presença de carboidratos, aldeídos e hidroxilas nos extrativos de ambos os tipos de fibra. A estrutura das fibras e da madeira são semelhantes, sendo a maior diferença a quantidade e composição da lignina e da hemicelulose. No caso da fibra, estes elementos estão na maioria na lamela média e por isso são mais fáceis de ser removidos. Desta forma, passam a ser a maior parte dos extrativos (AGGARWAL; SINGH, 1990).

Para se entender o que pode ter afetado a hidratação do cimento, é importante que se observem as mudanças químicas da madeira após imersão. Para *Populus hybrid*, a imersão em solução alcalina não afetou a lignina Klason ou a solúvel em ácido. O efeito do meio alcalino aumenta os carboidratos, exceto pela quantidade de celobiose que é constante. Por ser uma folhosa, não apresentou quantidade significativa de arabinose e galactose. A média de xilose diminuiu em quase 2% após imersão em solução calcária. Este açúcar, sendo o representante da glicuronoxilana na espécie, indica que a hemicelulose foi hidrolisada em condições alcalinas. E isso também pode ser confirmado pela

diminuição de manose e glicose, representante dos glucomananos. Por outro lado, o índice de cristalino da celulose aumentou neste tipo de tratamento (SIMATUPANG; SCHMITT, 1992).

Resultado semelhante foi encontrado ao se estudar cinco diferentes espécies de madeira lituana. Pesquisadores observaram que a madeira em forma de pó se diluiu de 5 a 10 vezes mais em solução alcalina do que em água. A explicação para esse fenômeno foi que, sob a influência de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a hemicelulose sofreu degradação e tornou-se um açúcar solúvel (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2003).

O pré-tratamento da madeira com cal pode ser de duas formas:

- a) Partículas podem ser tratadas com hidróxido de cálcio antes do processo de secagem da madeira. Durante este período, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reage naturalmente com o CO_2 presente na atmosfera e forma o carbonato de cálcio (CaCO_3). Este processo é chamado de carbonatação da madeira.
- b) A cal é acrescentada diretamente na mistura madeira-cimento.

As duas formas de aplicação minimizam o efeito inibidor da madeira, sendo que a aplicação direta do hidróxido de cálcio pode ainda ter um efeito positivo nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos após a cura (AZAMBUJA et al., 2017).

4.2 Aceleradores

4.2.1 Aditivos químicos

O uso de aditivos químicos na produção de compósitos madeira-cimento apresenta um princípio diferente dos procedimentos de extração de substâncias inibidoras presentes na madeira. Aditivos químicos agem como aceleradores da cura do cimento. O uso de aditivos químicos para este fim varia tanto em formulação quanto em concentração.

Aditivos químicos podem ser classificados em dois tipos de acordo com o padrão da curva exotérmica das 24 horas iniciais da pega do cimento. Os aditivos do tipo I são aqueles em que a curva de hidratação apresenta dois picos, semelhantes à curva de hidratação do cimento puro. Já os aditivos do tipo II são aqueles que apresentam apenas um pico exotérmico, a reação atinge uma temperatura máxima rapidamente, mas passa a diminuir durante o resto do período. Porém, a classificação do tipo de aditivo é dependente da espécie usada na mistura. Ou seja, cada fórmula de aditivo pode ser considerada tipo I para um tipo de madeira, mas apresentar comportamento de tipo II para outra espécie (WEI; ZHOU; TOMITA, 2000b).

Semple e Evans (2002) estudaram o efeito de 137 substâncias como aditivo químico para a diminuição do efeito de inibição que a madeira da *Acacia mangium* causa na pega do cimento. Entre as substâncias, havia cloretos, sulfatos, nitratos, acetatos, óxidos, carbonatos e fluoreto dos cátions Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr e Zn. Os autores encontraram diversas substâncias mais eficientes do que o CaCl_2 , que é o aditivo mais conhecido e usado como acelerador da cura do cimento, como por exemplo SnCl_4 , AlCl_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ e FeCl_3 . Estas substâncias possuem cátions que formam quelatos insolúveis ao reagirem com o extrato alcalino da madeira, diminuindo seu efeito inibidor.

Pereira et al. (2012) compararam as propriedades de painéis madeira-cimento produzidos com duas espécies (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) com e sem adição de 2% de cloreto de cálcio. Para as duas espécies, o uso do cloreto mostrou-se benéfico tanto para as propriedades físicas quanto mecânicas.

Badejo et al. (2011) testaram o uso de cloreto de alumínio na produção de painéis com serragem de 8 espécies tropicais da Nigéria e cimento. Foi observada uma relação direta entre a melhora das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos e o aumento da quantidade de cloreto usado de 1 a 3% da massa do cimento.

Matoski et al. (2013) estudaram a influência do uso de dois tipos de cloreto (CaCl_2 e MgCl_2) e de dois outros tipos de aceleradores (Na_2SiO_3 e Al_2SO_4) nas propriedades de compósitos madeira-cimento produzidos com pó de *Pinus* sp e cimento Portland tipo V ARI. A adição de cloreto, independente do tipo, resultou em compósitos com melhores propriedades físicas e mecânicas. Entre os demais aceleradores, o Al_2SO_4 foi melhor do que o Na_2SiO_3 .

A eficiência de diferentes tipos de cloretos está em sua reação inicial com o C_3A presente no cimento formando hidrocloroaluminato de cálcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), que é mais solúvel em água do que o C-S-H, resultando em um primeiro pico exotérmico. Alguns cloretos, como o CaCl_2 , ainda aumentam a presença de alcalinos dissolvidos no cimento. Assim, há uma precipitação de sulfoaluminato de cálcio, acompanhado de cloro-aluminato resultando em um aumento de temperatura observado no segundo pico (WEI; ZHOU; TOMITA, 2000b). Porém, os benefícios do cloreto nas propriedades mecânicas dos painéis são relativos e dependem do tipo e estado da madeira. Compósitos madeira-cimento com partículas de *Pinus resinosa* tratada com CCA que utilizaram de 3% CaCl_2 tiveram uma redução do índice de inibição de 30,70 para 8,74. Contudo, essa melhoria não foi refletida para as propriedades mecânicas do compósito após período de cura. A adição de 5% de CaCl_2 resultou em compósitos com valores de ligação interna e MOR menores (HUANG, 1999).

Embora o cloreto seja considerado um acelerador eficiente, seu uso em excesso vem sendo questionado uma vez que esta substância causa corrosão de metais, o que pode acabar limitando sua aplicação final. Assim, pesquisadores cada vez mais buscam o limite máximo de cloreto que poderia ser adicionado na mistura sem comprometer o uso. Este fenômeno ainda não é completamente compreendido e não há uma norma universal sobre a quantidade aceitável. Países europeus e norte-americanos limitam o uso em apenas 0,4% de cloreto com base no peso do cimento (ANGST et al., 2009).

4.2.2 Aditivos minerais

Aditivos minerais, como microssílica, metacaulim ou cinzas, foram testados em compósitos madeira-cimento de diferentes espécies em substituição de parte do cimento Portland como uma técnica para aumentar a resistência dos painéis em contraposição ao possível efeito pernicioso da madeira.

Após a hidratação do C_3S e C_2S presentes no cimento, há formação de $Ca(OH)_2$ livre. Quando materiais podizólicos são adicionados à mistura, a sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio, formando uma quantidade extra do gel C-S-H, responsável pela resistência do cimento (BIRICIK et al., 1999). Além disso, o SiO_2 pode criar uma camada entre as partículas assim como penetrar parcialmente nos poros da madeira, com isso o contato direto entre o cimento e material inibidor presente na madeira é reduzido (SIMATUPANG; LANG; NEUBAUER, 1987).

Del Menezzi, Castro e Souza (2007) utilizaram 10 e 20% de microssílica na produção de um painel de *Pinus taeda* e cimento Portland tipo II com partículas orientadas. A adição de 10% do material podizólico mostrou-se eficiente na melhoria das propriedades mecânicas do compósito, sendo que o uso de microssílica em proporções abaixo de 25% exige a aplicação simultânea de outros aditivos, como por exemplo o $CaCl_2$ (SIMATUPANG; LANG; NEUBAUER, 1987).

Contudo, Silva et al. (2006) não observaram um aumento significativo das propriedades mecânicas de painéis de *Eucalyptus urophylla* e cimento Portland tipo ARI ao adicionar 20 e 30% de metacaulim ou de microssílica. Porém, as propriedades físicas, inchamento de espessura após 24 horas e absorção de água após 2 horas, foram melhoradas, principalmente com a adição de 20% de microssílica. A redução das propriedades mecânicas em compósitos com alta concentração de metacaulim pode estar relacionada com o efeito do aditivo mineral de redução de pH e na quantidade livre de $Ca(OH)_2$ na reação (SIMATUPANG, 1998).

Além disso, o uso de metacaulim parece não estar relacionado diretamente com a inibição da madeira quanto à cura do cimento. A substituição gradativa de 10% do peso de cimento por metacaulim (variando de 0 à 50%) levou a uma diminuição da temperatura de hidratação da mistura de *Larix* sp., *Populus* sp. e cimento portland PZ 45F de 76,5oC para 39oC. O tempo para se atingir a temperatura máxima também foi alterado, sendo que misturas com 50% de aditivo mineral levou o dobro do tempo de hidratação do que sem o aditivo (SIMATUPANG, 1998).

Outra possibilidade é a substituição parcial do cimento Portland por cinza volante e escória de alto-forno na confecção de compósitos. O uso de 5% de cinza resulta em compósitos com melhores propriedades mecânicas mesmo sem a adição do acelerador CaCl_2 . Já para o uso de escória de alto-forno o teor ótimo de substituição é de 25% (LIMA; IWAKIRI, 2012).

4.2.3 Injeção de CO_2

Dióxido de carbono é neutralizado pelo carbonato de sílica presente no cimento e resulta na formação do carbonato de cálcio (CaCO_3), que é altamente insolúvel. O CaCO_3 formado passa a ter a capacidade de se ligar com o CSH e a superfície da madeira (HERMAWAN et al., 2002). A maior vantagem do método de injeção de CO_2 é o tempo de cura do compósito. Geralmente o cimento Portland necessita de 28 dias para que sua resistência mecânica máxima seja obtida, porém, neste método, o compósito é totalmente curado em até 2 semanas em temperatura ambiente. No caso específico de madeira-cimento, partículas consideradas incompatíveis com o cimento passam a poder ser usadas sem demonstrar o efeito inibidor.

Entre as variáveis que envolvem o sucesso deste método, pode-se citar (SIMATUPANG et al., 1995):

Influência da pressão de injeção do CO₂: O aumento da pressão do gás aumenta a temperatura máxima de hidratação e diminuí o tempo de pega. A concentração de carbonato de cálcio também irá ser maior.

Influência da relação água/cimento: A quantidade de água adicionada na mistura irá influenciar a temperatura e o tempo de hidratação, além do teor de carbonato de cálcio. Deve haver água suficiente para a reação, mas se a quantidade for excessiva, a permeabilidade do gás passa a ser baixa e não há penetração e carbonatação suficiente.