

# **1 COMPÓSITOS BIOMASSA VEGETAL-CIMENTO (CBC)**

**Autor: ANTONIO LUDOVICO BERALDO**

## **I - INTRODUÇÃO**

Nos países em desenvolvimento, de um modo geral, não ocorre a divulgação adequada dos conhecimentos científicos, principalmente para aqueles que atuam no meio rural. Construções rurais, por exemplo, não têm despertado grande interesse junto à comunidade científica, sendo muito limitado a quantidade de pesquisas que priorizem esse setor. Na maioria das vezes, construções rurais ou materiais alternativos para construções são associados, erroneamente, a obras temporárias ou a materiais de baixa durabilidade. No entanto, a adoção de técnicas apropriada pode viabilizar a fabricação de componentes construtivos obtidos a partir da utilização de biomassa vegetal diversificada e de aglomerantes inorgânicos.

Além de apresentarem propriedades importantes, tais como, leveza e uso de matéria prima renovável e disponível, os compósitos à base de cimento Portland e biomassa vegetal (CBC) podem desempenhar um papel fundamental na substituição de materiais convencionais de construção.

Um dos temas mais polêmicos discutidos na atualidade refere-se aos inconvenientes advindos da utilização indiscriminada do cimento-amianto. Tais fibras minerais, se por um lado têm se mostrado imbatíveis sob o ponto de vista tecnológico, apresentam, por sua vez, desvantagens importantes devido ao impacto potencial causado ao meio ambiente. Nesse contexto, situa-se a biomassa vegetal como uma alternativa promissora às fibras minerais, desde que sejam neutralizados seus maiores inconvenientes: a ação nociva de certas substâncias contidas na biomassa vegetal em presença do cimento Portland e variações dimensionais excessivas dos compósitos quando expostos às intempéries.

## **II -GENERALIDADES**

Define-se compósito biomassa vegetal-aglomerantes minerais à associação de um aglomerante mineral qualquer (cimento Portland, cimento magnésiano, gesso, etc...) e partículas de origem vegetal, e em certos casos, de diversos aditivos (aceleradores, cargas minerais, plastificantes, incorporadores de ar, etc...). De acordo com a proporção dos diferentes constituintes, e a granulometria das partículas utilizadas, pode-se obter uma larga faixa de produtos.

Na literatura especializada não se nota diferença na terminologia empregada para designar as diferentes partículas vegetais, adotando-se de forma incorreta o termo "fibras" para designar os diversos fragmentos da desintegração da madeira. A expressão "wood fiber reinforced cement" designa os produtos à base de cimento reforçados por fibras (COUTTS, 1982). Ora, as fibras são elementos primários individuais, que não se encontram, por exemplo, em madeiras coníferas. A denominação mais correta seria "partículas", visto se tornar muito difícil a obtenção de fibras isoladas por métodos mecânicos.

Por "béton de bois" (concreto de madeira) deve-se entender um material compósito de matriz cimento recebendo, eventualmente, adjuvantes e cargas vegetais de forma granular, ou até mesmo, cargas minerais (PIMIENNA et al., 1994).

### **III - INTERESSES NA FABRICAÇÃO DO CBC**

O sucesso comercial dos produtos à base de cimento e madeira data dos anos 30. Inicialmente, foram fabricados painéis leves "madeira e cimento" onde se utilizava como aglomerante a magnésita. Os painéis eram conhecidos sob a denominação de "Excelsior" (USA) e "Heraklit" (Europa). Em meados dos anos 50, várias patentes foram registradas pela indústria Elmendorf. A grande maioria das fábricas atuais de painéis utilizam processos derivados dessas patentes (DINWOODIE & PAXTON, 1984). No entanto, nos 40 últimos anos, o desenvolvimento de compósitos à base de raspa de madeira ("excelsior") foi muito mais lento do que aquele observado na fabricação de compósitos associando a madeira à aglomerantes orgânicos.

O "porquê" de uma possível utilização da madeira encontra-se ligado às mudanças na tecnologia de fabricação, em decorrência dos problemas causados pelo emprego de fibras de amianto. Em alguns países caminha-se para a proibição do emprego do amianto no setor de construção, como por exemplo, na França a partir de 1997. Dentre um grande número de possibilidades de substituição das fibras de amianto, podem ser citadas as fibras de jornais reciclados e de celulose, cujos custos são largamente inferiores àqueles da maioria das fibras artificiais. Uma concorrência acirrada será travada entre os fabricantes de fibras metálicas, de vidro, de plástico, buscando ocupar esse importante mercado. Fibras de origem natural podem, igualmente, colocarem-se como possíveis alternativas.

Além disso, a evolução no setor de técnicas construtivas além de aspectos ambientais aceleraram o consumo do CBC na Europa (HOLDERNESS, 1990). No entanto, uma pesquisa realizada na Grã-Bretanha mostrou que o sucesso potencial de um novo painel à base de madeira dependia da opinião dos arquitetos em relação às propriedades de base do material (KALAFATIS et al., 1989). Os CBC conservam sempre um aspecto negativo ligado à pré-fabricação, geralmente associado à noção de materiais provisórios e de pequena durabilidade (BUGNA et al., 1981).

Junto aos industriais o CBC suscita um interesse crescente (MOSLEMI, 1988 a). As matérias primas-cimento e madeira (ou uma biomassa vegetal qualquer), geralmente encontram-se disponíveis localmente, podendo as fábricas serem instaladas nas proximidades dos recursos vegetais. Isto permite uma redução considerável nos custos de transporte. Contrariamente, no caso de utilização de aglomerantes orgânicos, os custos relativos ao transporte são geralmente muito significativos em relação ao custo do produto acabado.

### **IV - UTILIZAÇÕES DO CBC**

O CBC pode ser utilizado em obras externas (telhados, paredes pré-fabricadas, móveis, fôrmas perdidas, revestimento de túneis, pisos, vedação de instalações industriais, painéis anti-ruído, estádios, etc...), e em obras internas (vedação com isolamento acústico e resistência ao fogo, revestimento de moradias construídas com esqueleto de madeira, tetos resistentes ao fogo, painéis, dutos de ventilação, dentre outros (DIX, 1988).

A leveza, o isolamento térmico e a resistência mecânica não desprezível constituem os principais atrativos técnicos que direcionam o uso do CBC para obras de reparação, a exemplo de outros concretos leves.

PIMIENTA et al. (1994) apresentaram várias possibilidades de utilização do CBC:

- Muros de alvenaria: construídos com blocos vazados ou para enchimento (lã mineral comprimida ou isopor) são muito atraentes devido à facilidade de se efetuar o corte. O principal inconveniente apontado refere-se à necessidade de um longo período de cura antes da utilização dos blocos (3 a 6 semanas);
- Muros em painéis: tratam-se de painéis sanduíche- CBC na região central, eventualmente armado, protegido por duas placas de concreto ou argamassa;
- Muros anti-ruído: recobrem-se peças de concreto com camadas de CBC (20 cm) nervuradas, para assegurar o isolamento acústico. Certas indústrias utilizam produção automatizada desse material comercializando-o colorido;
- Vedações: miolo em CBC, revestido por concreto fino na parede externa e argamassa de cimento na parede interna. A montagem é realizada através de parafusos ou por colagem;
- Forros: miolo em CBC sobre o qual é aplicado uma camada de concreto ou argamassa (1 a 2 cm);
- Abrigos: painéis de 45 mm de espessura são utilizados na construção de abrigos para cães. Os fabricantes destacam as propriedades isolantes e hidrófugas do CBC;
- Casas de veraneio: apesar da viabilidade técnica a demanda não tem sido significativa;
- Elementos de cave: o CBC pode ser adequado por permitir a estabilidade da temperatura ambiente, regularizar o grau de umidade e, principalmente, absorver vibrações;
- Pisos: miolo de CBC protegido por argamassa convencional para melhorar a resistência à abrasão;
- Placas: a facilidade de se efetuar o corte do CBC permite viabilizar diversas montagens como, por exemplo, proteções de relógios de leitura de água e de energia elétrica;
- Bloquetes: podem ser fabricados da mesma forma que os convencionais em concreto. Dependendo da dosagem em biomassa vegetal devem receber acabamento de proteção;
- Quadras: contra-piso fabricado em CBC e protegido por cacos de tijolos compactados;
- Recifes artificiais: proteção contra rêdes de arrastão e abrigo da fauna marinha. O CBC comportou-se adequadamente em presença da água do mar.

## **V - FABRICAÇÃO DO CBC**

A exemplo de diversos produtos à base de cimento, o CBC pode ser fabricado de duas formas clássicas: moldagem (deposição da mistura em fôrmas sem exercer pressão) e prensagem (combinada ou não com extrusão). A eficiência dos processos é fortemente correlacionada com as características próprias das partículas vegetais (módulo de finura, diâmetro máximo e morfologia) e, evidentemente, do traço adotado (sobretudo da relação água/materiais secos). MOSLEMI & PFISTER (1987) recomendam a razão cimento/madeira de 1/0,5, com cerca de 170 kg de partículas vegetais por metro cúbico de CBC.

As partículas vegetais sendo altamente higroscópicas, vários autores recomendam que as mesmas sejam pré-molhadas, para que não absorvam excessivamente a água de amassamento do cimento. Por outro lado, de grande interesse se mostra a possibilidade de que as partículas vegetais, sobretudo quando apresentarem vasos de grande diâmetro, possam absorver a nata de cimento, o que favoreceria a obstrução desse elementos anatômicos e diminuiria, provavelmente, as variações dimensionais do CBC após a fabricação.

As partículas vegetais podem, portanto, serem adicionadas à pasta (ou à argamassa) de cimento, previamente homogeneizada. A colocação da mistura na fôrma deve ser executada rapidamente para evitar o ressecamento, ocasionado pela perda de água para o meio ambiente, ou por sua absorção excessiva pelas partículas vegetais.

A desmoldagem deve ser efetuada após um tempo relativamente mais longo do que aquele que seria necessário para desmoldar outros artefatos à base de cimento. O uso de espécies vegetais adequadas, de cimento especial, ou de adjuvantes, permite contornar esse que é o maior problema na industrialização do CBC.

Com respeito à cura do CBC, ela não parece necessitar de maiores cuidados quanto à perda prematura da água, visto que, as partículas vegetais funcionam como reservatório de água, e a liberam à medida que a matriz vai secando. Experimentos realizados por BERALDO (94) evidenciaram a importância de se efetuar, de forma alternada, a secagem e umidificação do CBC. Os efeitos sobre a estabilidade dimensional do CBC são significativos.

Aparentemente, o CBC é mais susceptível à falta do que ao excesso de água. Evidentemente, valores excessivamente elevados da razão água/materiais secos provocarão a segregação da mistura, o que pode ser mais agravado, ainda, pela falta de estanqueidade das fôrmas. Por sua vez, quantidades limitadas de água de amassamento dificultam a compactação e ocasionam heterogeneidade da mistura.

#### ***Resíduos Agrícolas***

A utilização de resíduos e de sub-produtos vegetais permite a obtenção de novos produtos de qualidade superior podendo, ao mesmo tempo, economizar a energia e preservar o meio ambiente (RASHWAN et al., 1992). Certas regiões geográficas são parcialmente ou totalmente desprovidas de agregados naturais necessários à fabricação do concreto. Além disso canteiros de obras podem se situar em plena floresta ou em locais longínquos em relação aos centros de comercialização de agregados (AROLA, 1992). Nos dois casos precedentes pode-se substituir parcialmente ou totalmente os agregados minerais por aqueles obtidos a partir de resíduos de madeiras, objetivando atingir a fabricação de um "concreto" de média resistência.

Os processos de exploração agrícola geram quantidades consideráveis de resíduos, sendo avaliados em 12 milhões de toneladas de palha de cereais na Grã-Bretanha (IRLE & SIMPSON, 1992); de 5 milhões de toneladas de resíduos de "pallets" nos EUA (AROLA, 1992); de 54 milhões de toneladas de bagaço de cana em diversos países (ROWELL et al., 1986).

Em certas regiões brasileiras a proibição da queima de resíduos vegetais tem levado os industriais a procurar alternativas visando uma utilização mais racional dos resíduos. Os volumes liberados são impressionantes: 200 t/mês de casca de arroz (de um único fabricante); 75 t/mês de resíduos de indústria de fabricação de vassouras de piaçava. Pode-se imaginar o transtorno ambiental causado pelo depósito ao ar livre de tais quantidades de materiais.

## **VI - PROPRIEDADES DOS CBC**

As características do CBC dependem fortemente da biomassa vegetal empregada. Os granulados vegetais apresentam diferenças considerando-se suas propriedades intrínsecas, tais como: constituição anatômica (% dos elementos anatômicos, tamanho dos

vasos), características físicas (absorção, tamanho das partículas), e sobretudo da constituição química (açúcares, fenóis, resinas).

De acordo com diversos pesquisadores, dentre as vantagens do CBC em relação aos demais materiais de construção podem ser citadas:

- disponibilidade de matéria prima: teoricamente pode-se fabricar o CBC a partir de diversas matérias primas vegetais, tais como bagaço, bambu, madeira e inúmeros resíduos agrícolas ou agroindustriais. No entanto, deve ser ressaltado o comportamento inadequado de certas espécies vegetais em presença do cimento;
- massa específica reduzida: geralmente os CBC pertencem à categoria de concretos leves, pois apresentam massa específica de 400 a 1500 kg/m<sup>3</sup>. Uma série de propriedades tornam-se inerentes ao CBC: comportamento mecânico, porosidade, resistência ao fogo, isolamento termo-acústico, comportamento em presença de ciclos de gelo-degelo;
- resistência aos agentes biológicos: a alcalinidade da matriz cimento assegura a proteção da biomassa vegetal contra o ataque de fungos e insetos. No entanto, a exposição dos compósitos a ciclos de umidificação e secagem pode ocasionar a presença de fissuras, e favorecer em seguida o ataque das partículas vegetais. As fibras longas de sisal (*A. sisaleana*) se subdividem e perdem sua capacidade de reforço, quando são expostas ao ataque alcalino do cimento (GRAM, 1986). Os CBC podem sofrer modificações no comportamento mecânico, após ciclos alternados de umidificação e secagem (LEMPFER & SATTLER, 1988);
- estabilidade dimensional: contrariamente aos painéis à base de resinas orgânicas, os CBC apresentam uma boa estabilidade dimensional. No entanto, tais valores são ainda insuficientes para permitir seu emprego em obras externas sem revestimento;
- trabalhabilidade: os CBC apresentam uma fluidez suficiente para serem bombeados e eventualmente injetados sob pressão. Os CBC são mais facilmente serrados do que o concreto comum. O desgaste das ferramentas de corte é menos intenso do que aquele observado em painéis à base de resinas orgânicas (DINWOODIE & PAXTON, 1984). Outro aspecto importante refere-se ao tempo necessário para montagem de peças em CBC, que por serem leves podem ser fabricados em dimensões mais importantes.
- características mecânicas: a velocidade de endurecimento e a resistência mecânica de produtos à base de cimento dependem de vários fatores: composição química e finura do cimento, traço da mistura, adjuvantes (aceleradores ou retardadores), temperatura, dimensões da peça, cura, dentre outros.

Pode-se afirmar, para o concreto convencional, que a resistência mecânica seja proporcional à dosagem em cimento. Considera-se, igualmente, que a partir do 90° dia após a fabricação cesse o crescimento da resistência, devido às condições desfavoráveis à hidratação do cimento. Para o CBC, no entanto, a cinética da evolução da resistência mecânica não é perfeitamente conhecida. Trata-se de um material muito mais poroso do que o concreto convencional e, portanto, mais disponível à penetração de gás carbônico, que ao encontrar condições favoráveis de umidade, carbonata-se com mais intensidade.

A resistência mecânica do CBC em compressão, qualquer que seja sua massa específica, é sensivelmente inferior àquela de outros concretos leves, podendo se situar entre 0,5 e 4,0 MPa. Evidentemente essa característica, a exemplo do concreto convencional, é função crescente da massa específica e da dosagem em cimento.

Depende, dessa forma, das propriedades do granulado (resistência mecânica e granulometria), do traço adotado e da compactação da mistura.

A característica mais notável do CBC é a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão. Enquanto que, para o concreto convencional esse valor é da ordem de 1/10, para o CBC situa-se entre 1/2 e 1/4.

Em definitivo, os CBC têm grande possibilidades de utilização, considerando-se sua versatilidade e seu baixo custo. Pode-se afirmar, inclusive, que a utilização do CBC é limitada apenas pela imaginação do usuário (HOLDERNESS, 1990).

Dentre os inconvenientes apresentados podem ser destacados: compatibilidade química com o cimento depende de forma estreita da espécie utilizada; tempo de pega relativamente longo, durabilidade reduzida da biomassa vegetal na matriz; instabilidade dimensional e presença de eflorescências (SIMATUPANG & HABIGHORST, 1992).

## **VII - COMPATIBILIDADE QUÍMICA ENTRE A BIOMASSA VEGETAL E O CIMENTO**

A qualidade fundamental que deve possuir um agregado de biomassa vegetal é de que não seja nocivo ao aglomerante utilizado. O comportamento particular de cada espécie de madeira em presença do cimento é denominado "compatibilidade química entre a madeira e o cimento". A priori não se pode adicionar qualquer biomassa vegetal ao cimento, pois os constituintes vegetais são muito sensíveis ao meio alcalino formando durante a reação de hidratação do cimento. Um grande número de pesquisadores estudou os mecanismos de inibição do cimento pela biomassa vegetal, e mais especificamente, pelos efeitos da madeira.

Durante a interação entre a pasta de cimento e a madeira, uma parte das hemiceluloses começa a se solubilizar e retarda o endurecimento do cimento (SIMATUPANG, 1986; SIMATUPANG et al., 1988). O ataque da madeira pelos álcalis do cimento pode converter parcialmente as hemiceluloses em polímeros de açúcar, o que provoca problemas na pega do cimento (READING, 1985). Os açúcares solúveis presentes na madeira afetam o processo de hidratação do cimento (RASHWAN et al., 1992). No caso do "mélèze", a causa principal de sua incompatibilidade com o cimento é a presença de arabinogalactam nos extrativos solúveis em água (YAMAGISHI et al., 1980).

Em certos casos um teor de açúcares superior a 0,5% provoca fissuras de inchamento, acarretando uma queda significativa na resistência mecânica de corpos-de-prova de CBC (LIEBER & RICHARTZ, 1972). A glicose (1%) inibe completamente a pega do cimento (SIMATUPANG, 1986). Glicose, sacarose e frutose, presentes em partículas de bambu, são responsáveis pelo fraco desempenho de CBC (BERALDO, 1994).

Durante a reação de hidratação do cimento em presença de partículas vegetais, os grãos de  $C_3A$  produzem íons  $Ca^{++}$  e  $OH^-$ , que aumentam para 12 o pH da solução. As concentrações dos íons continuam aumentando até atingir um valor crítico que reduz a cristalização dos silicatos de cálcio hidratados. Os constituintes da madeira, tais como os açúcares, os ácidos derivados, os gluconatos, etc..., reagem com os íons  $Ca^{++}$  e  $OH^-$  formando complexos. Os grãos de  $C_3A$  são envolvidos por uma película de compostos orgânicos, o que reduz ou impede a difusão dos íons (HACHMI & CAMPBELL, 1988).

As reações inibidoras podem se desenvolver na interface madeira-cimento ou na matriz, e enfraquecem as ligações mecânicas e químicas entre a madeira e o cimento. Terpenos, resinas e substâncias graxas podem migrar para a superfície da madeira durante a secagem. A formação de uma camada superficial hidrófoba reduz as pontes de hidrogênio entre a madeira e o cimento, o que implica em redução da resistência na interface (MILLER & MOSLEMI, 1991).

A hipótese de atraso da pega do cimento devido à presença de membrana envolvendo as partículas de cimento surgiu nos anos 60 (SANDERMANN et al., 1960). No entanto, não foi apresentada uma explicação racional quanto à formação e natureza dessa membrana. Análises das interações do cimento com aluminatos, carboidratos e aldonatos evidenciaram a formação de complexos estáveis em solução, que precipitam e envolvem os grãos de C<sub>3</sub>A (CASU et al., 1980).

A película de glicose ou de diversos complexos de cálcio, não é impermeável à água e aos íons hidratados. A hidratação do cimento não termina, mas apenas é retardada. A resistência mecânica dos corpos-de-prova geralmente aumenta ao longo do tempo (JOISEL, 1967).

Da mesma forma, os compostos fenólicos, tais como os taninos, apresentam também a capacidade de se combinar com os íons metálicos do cimento, o que pode impedir as reações de hidratação. A incompatibilidade da madeira *A. mangium* com o cimento deve-se à presença de substâncias fenólicas, sobretudo de taninos condensados. Os extrativos obtidos dessa espécie de madeira impregnados na madeira *C. obtusa* (compatível com o cimento), proporcionaram o aparecimento de incompatibilidade dessa última espécie com o cimento (TACHI et al., 1988).

Procedimento semelhante, adotado por BERALDO (1994), evidenciou o papel nefasto desempenhado pelos açúcares contidos em solução aquosa de partículas de bambu. A água de amassamento da pasta de cimento foi gradualmente substituída por aquela originária da solução precedente. Os efeitos foram notáveis sobre a resistência à compressão da pasta de cimento, que reduziu-se à décima parte quando a substituição foi de 100%. Outro experimento confirmou a incompatibilidade química das partículas de bambu com o cimento. CBC fabricado com partículas de madeira "sapin" (*Abies* sp), compatível com o cimento, tornou-se inadequado quando a madeira absorveu previamente a solução de partículas de bambu, como mostra a Figura 1.1.

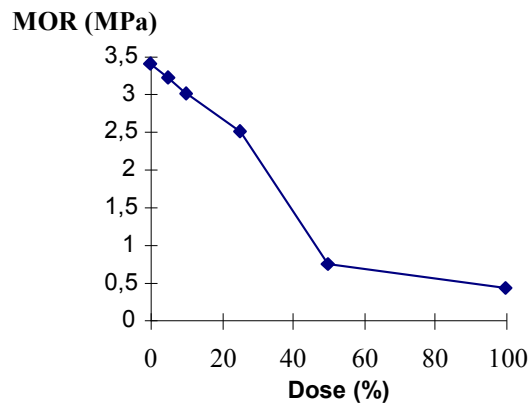




FIGURA 1.1 - Efeito da dosagem da solução de partículas de bambu na resistência à compressão (em MPa) de CBC à base de partículas de "sapin".

A seringueira (*Hevea brasiliensis*), introduzida na Malásia, mostrou grande incompatibilidade com o cimento. SCHWARZ (1988) constatou que essa espécie apresenta quantidades expressivas de açúcares (1,0 a 2,3%) e de amido livre (7,5 - 10,2%).

FISCHER et al. (1974) afirmaram que as substâncias nocivas ao cimento são os carboidratos solúveis obtidos por difusão dos açúcares presentes na madeira, e a conversão desses açúcares em ácidos sacarídicos. KENNERS & RICHARDS (1954), no entanto, afirmaram que ocorre predominância de formação do ácido láctico sobre o ácido sacarídico, quando a glicose e a frutose são degradadas em presença do álcalis, concordando com SIMATUPANG (1986).

Análises efetuadas por cromatografia em camada fina e por determinação espectrofotométrica evidenciaram que os elementos perturbadores da pega do cimento eram os açúcares e os ácidos lignosulfônicos (BROKER & SIMATUPANG, 1973). A análise da pasta de cimento em contato com a madeira realizada por cromatografia (troca de íons) evidenciou a presença de quantidade importante de oligosacarídeos na madeira "hêtre" (*Fagus sylvatica*), enquanto que, no caso da madeira "bouleau", o pico predominante é da glicose (SIMATUPANG, 1986).

Os açúcares ácidos e seus derivados são cerca de dez vezes mais inibidores à hidratação do  $C_3A$ , do que a glicose, O glucoheptato de cálcio é um dos maiores retardadores da pega do cimento (MILESTONE, 1977).

A qualidade final do CBC depende fortemente das interações entre a biomassa vegetal e o cimento. Pré-tratamentos físico-químicos da biomassa vegetal minimizam essas interações e permitem a obtenção de CBC de adequada resistência mecânica (HACHMI & CAMPBELL, 1988).

Na análise da compatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento, não se deve apenas considerar a quantidade de extrativos, mas também, o tipo de extrativo (terpenos, ácidos graxos, taninos, carboidratos, etc). As substâncias solúveis em água apresentam um efeito inibidor mais destacado (HACHMI & MOSLEMI, 1989).

As consequências da escolha de biomassa vegetal inadequada podem ser catastróficas sob o ponto de vista industrial. Propõe-se, mesmo, a eliminação sistemática do emprego de madeiras ricas em taninos, ou o descarte total de madeiras tropicais na fabricação de CBC (LIGNUM, 1960). Essa última conclusão inviabilizaria, por exemplo, a fabricação de CBC na região amazônica.

De forma sucinta pode-se afirmar que os efeitos nocivos da incompatibilidade química biomassa vegetal-cimento sejam de mais fácil verificação, do que formular teorias que expliquem esse fenômeno complexo. De acordo com PIMIENTA et al. (1984) nenhuma teoria simples pode ser aplicada ao efeito de todos os açúcares em presença de todos os constituintes do cimento.

## VIII - FATORES QUE AFETAM A COMPATIBILIDADE QUÍMICA ENTRE A BIOMASSA VEGETAL E O CIMENTO

Além da constituição química da biomassa vegetal, que foi abordada precedentemente, outros fatores influem de forma decisiva no comportamento da biomassa vegetal em presença do cimento:

Natureza da biomassa vegetal: As folhosas, devido ao seu teor mais importante em hemicelulose, são geralmente mais inibidoras do que as coníferas (SIMATUPANG et al., 1978), exceção feita ao "western larch" (HOFFSTRAND et al., 1984). O teor máximo em açúcares tolerado pelo cimento situa-se de 0,4 a 0,5% para madeiras coníferas, e de 0,20 a 0,25% para as folhosas (SCHWARZ & SIMATUPANG, 1984 b). As gramíneas, em geral, parecem ser mais susceptíveis à lavagem do que as madeiras (BERALDO, 1994).

Estado fitosanitário: De acordo com WEATHERWAX & TARKOW (1964, 1967) a madeira "southern pine" atacada por organismos xilófagos mostrou-se altamente inibidora da pega do cimento. O efeito inibidor pôde ser reduzido pela mistura de madeira atacada com a madeira sã. No entanto, BIBLIS & LO (1968) encontraram resultados contraditórios ao dos autores precedentes. A ação de agentes biológicos sobre a madeira permite reduzir o efeito inibidor, após a transformação dos açúcares em substâncias menos problemáticas ao cimento.

Anatomia: A casca do "southern pine" é cerca de 9 vezes mais inibidora do que o albúrnio e 2,5 vezes mais inibidora do que o cerne (WEATHERWAX & TARKOW, 1967; BIBLIS & LO, 1968). Este último apresenta maior quantidade de extrativos (HOFSTRAND et al., 1984). A celulose não apresenta incompatibilidade química com o cimento, enquanto que as hemiceluloses solúveis e os açúcares simples, ao se combinarem com íons metálicos, provocam a incompatibilidade entre a madeira e o cimento (HACHMI & CAMPBELL, 1988).

Abate: A época de abate das árvores pode desempenhar um papel importante sobre a pega do cimento, pois os teores de açúcares livres não são constantes durante o ano.

Amostragens realizadas por FISCHER et al. (1974), em três níveis de alturas de coníferas alemãs (1/10, 5/10 e 8/10), mostraram diferenças significativas na distribuição dos três açúcares (sacarose, glicose e frutose) de acordo com a época de abate e o período do ano considerado. Observaram que o teor de açúcares é mais elevado no mês de abril, e o mais baixo teor ocorre, para uma espécie, no mês de agosto, e no mês de maio, para as outras espécies. Para a madeira "peuplier" os teores de açúcares, sempre foram mais importantes na parte superior da árvore (8/10), e reduzem-se na primavera. O efeito mais notável foi observado sobre a frutose, que desaparece totalmente na primavera.

O tempo de pega de mistura de albúrnio da madeira "southern pine" e cimento foi mais longo quando a mesma havia sido cortada na primavera, do que em condições idênticas da madeira cortada no inverno (BIBLIS & LO, 1968); no caso do "western larch" constatou-se maior concentração de amidos durante a primavera. Certos produtos inibidores tendem a se concentrar na superfície das fôrmas de madeira, o que provoca imperfeições na superfície do concreto (READING, 1985).

A instabilidade dimensional do CBC é mais pronunciada quando se utiliza a madeira proveniente de árvores juvenis (PUGEL et al., 1980). Isso indica que, maiores cuidados deverão ser tomados na fabricação de CBC à base de madeiras de rápido crescimento.

Estocagem: Os teores em açúcares e produtos inibidores podem evoluir durante a estocagem da madeira. De acordo com SCHWARZ & SIMATUPANG, (1984 a) para a

madeira "hêtre", o teor em açúcares passa de 0,2% (madeira pouco protegida) a 0,1% (secagem ao ar em ambiente protegido). Obtiveram uma redução importante no teor de açúcares e de amido da seringueira (*H.brasiliensis*) durante estocagem de 10 semanas. O teor de açúcares torna-se reduzido devido à uma ação enzimática. Essas transformações dos açúcares conduzem a constituintes não inibidores ao cimento (SCHWARZ et al., 1988). LEE et al. (1987) não encontraram diferenças sistemáticas entre a estocagem de partículas de madeira a 7 °C ou ao ar livre.

A estocagem da madeira pode reduzir o teor em amido, sacarose, glicose e frutose (SIMATUPANG et al., 1978). Observou-se que a estocagem do "bouleau" durante 32 semanas melhora sua compatibilidade com o cimento, pois ocorre o ataque da madeira por microrganismos (SIMATUPANG et al., 1988). O envelhecimento natural da madeira pode melhorar a resistência mecânica do CBC, pois certos constituintes da madeira são eliminados pelas águas pluviais (READING, 1985).

Embora tenham sido observados efeitos benéficos da estocagem sobre a diminuição na concentração de açúcares da madeira, constatou-se que o mesmo efeito não ocorre para o caso de compostos fenólicos (SIMATUPANG, 1986; VALENZUELA, 1989). Verificou-se que, após três meses de estocagem, o teor de açúcares da madeira foi reduzido de forma significativa, enquanto que, o teor em taninos não apresentou variação.

Partículas de bambu, estocadas durante dois anos, continuaram inadequadas para a fabricação de CBC. Apesar de se constatar queda significativa no teor de açúcares (sacarose, glicose e frutose), a concentração dos mesmos mostrou-se ainda suficiente para anular a pega do cimento (BERALDO, 1994). O período de armazenagem das partículas de bambu (um ou dois anos) e o tempo de extração (uma ou duas horas) não influenciaram de forma significativa os resultados obtidos por cromatografia em fase líquida- HPLC, como mostra a Figura 1.2.

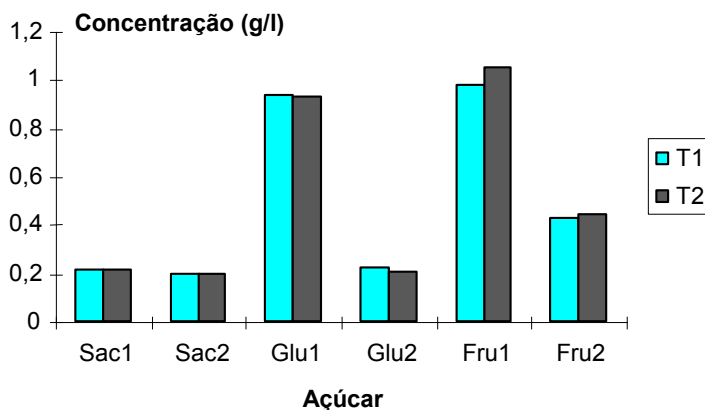


FIGURA 1.2 - Efeito da duração de estocagem (anos) e do tempo de tratamento das partículas de bambu (horas)

Análises realizadas através de HPLC de soluções aquosas de partículas de diferentes espécies de bambu: BT (*Bambusa tuldoides*), DG (*Dendrocalamus giganteus*), PV (*Phyllostachys viridis*) indicaram diferença quantitativa nos teores de açúcares. Enquanto que, as espécies de bambus originárias de climas tropicais (BT e DG) apresentaram maior porcentagem de glicose, aquela proveniente de clima temperado (PV), apresentou mesma concentração de glicose e frutose. A análise da solução aquosa de partículas originárias das

camadas externas de colmos de *P. viridis* indicou, contrariamente aos casos precedentes, menor concentração nos açúcares totais e, principalmente, predominância da sacarose sobre os demais açúcares, mostrado na Figura 1.3. Talvez essa diferença na concentração e tipo de açúcar possa explicar a maior durabilidade natural da casca do bambu.

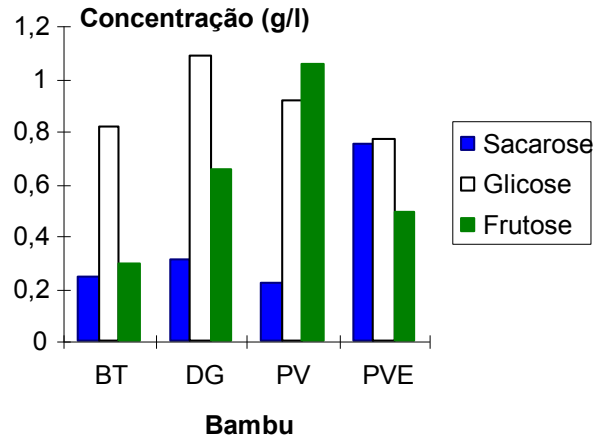


FIGURA 1.3 - Concentração de açúcares de diferentes espécies de bambu

#### *Avaliação da Incompatibilidade Química entre a Biomassa Vegetal e o Cimento*

O método mais utilizado para avaliar o comportamento da biomassa vegetal em presença do cimento, consiste na medida da temperatura da mistura ao longo do tempo. Foi proposto por SANDERMANN et al. (1960), modificado por WEATHERWAX & TARKOW (1964), e utilizado por diversos pesquisadores.

A madeira é desintegrada, adotando-se partículas de dimensões compreendidas entre as peneiras 20 e 40 ("mesh"). As quantidades normalmente utilizadas são 15 g de madeira anidra, 200 g de cimento e 90,5 ml de água. A mistura é colocada em calorímetro, e segue-se a evolução da temperatura ao longo do tempo, mostrado na Figura 1.4.

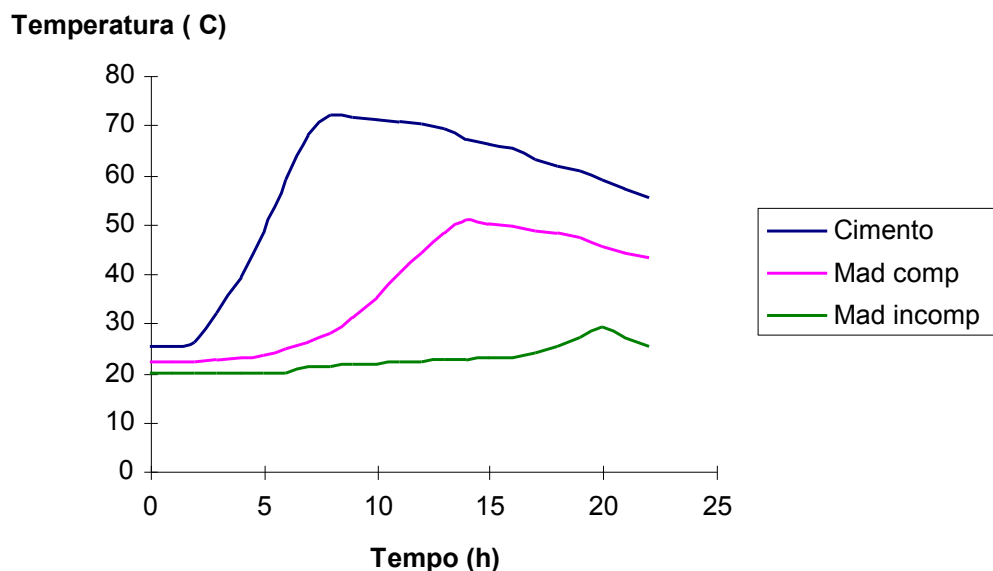


FIGURA 1.4 - Curvas de hidratação da pasta de cimento e de compósitos madeira-cimento

Os parâmetros mais importantes no estudo da compatibilidade química madeira-cimento são:

- tempo necessário para a pega ( $t_c$ );
- temperatura máxima de hidratação ( $\theta_c$ );
- inclinação da curva de hidratação ( $s_c$ ).

Para uma espécie compatível com o cimento, a diminuição na temperatura deve-se à introdução da madeira no lugar do cimento, e portanto, à diminuição da massa e do calor específico do meio. Para espécies incompatíveis com o cimento o ensaio pode não se mostrar adequado, visto que, o longo tempo necessário para a observação do pico máximo de temperatura, pode mascarar o valor da temperatura devido à falta de isolamento térmico.

BERALDO (1994) estudou o efeito da adição de 0,1% de açúcares (sacarose, glicose e frutose) sobre a curva de hidratação de pasta de cimento. O efeito mais acentuado foi verificado para a sacarose, tendo sido observado pico de temperatura (42,8 °C) após 38 horas do início da mistura, como mostra a Figura 1.5.

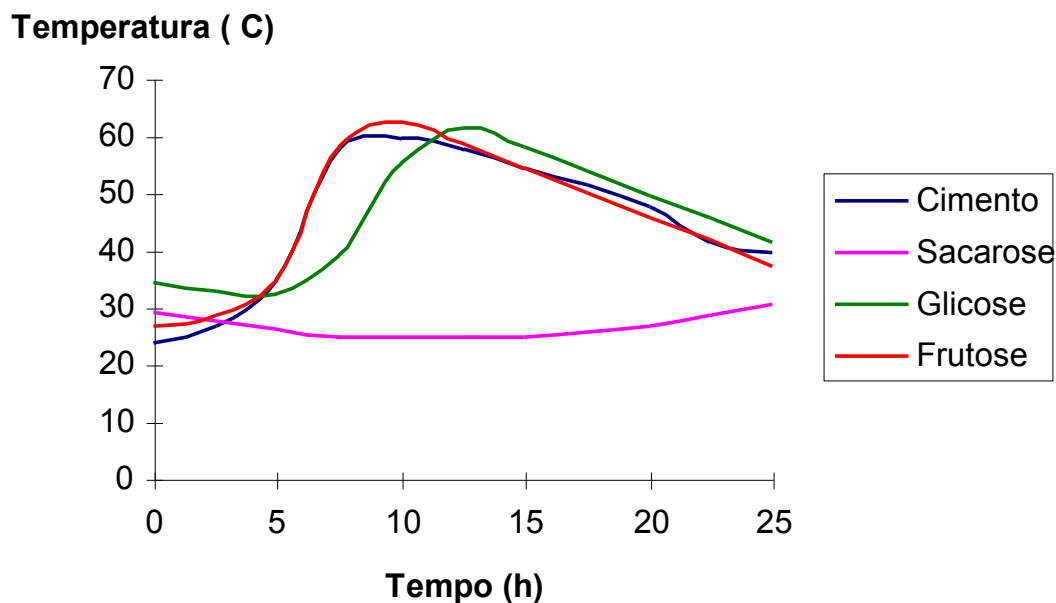


FIGURA 1.5 - Efeito da adição de 0,1% de açúcares na curva de hidratação da pasta de cimento

Embora a pasta de cimento tenha se mostrado mais tolerante à presença de 0,1% de frutose, dosagens mais elevadas desse açúcar mostraram-se extremamente perturbadoras à hidratação do cimento, mostrado na Figura 1.6. Conforme apresentado nas Figuras 1.2 e 1.3 a concentração de açúcares e, em especial, a de frutose, ultrapassam largamente o valor adotado.

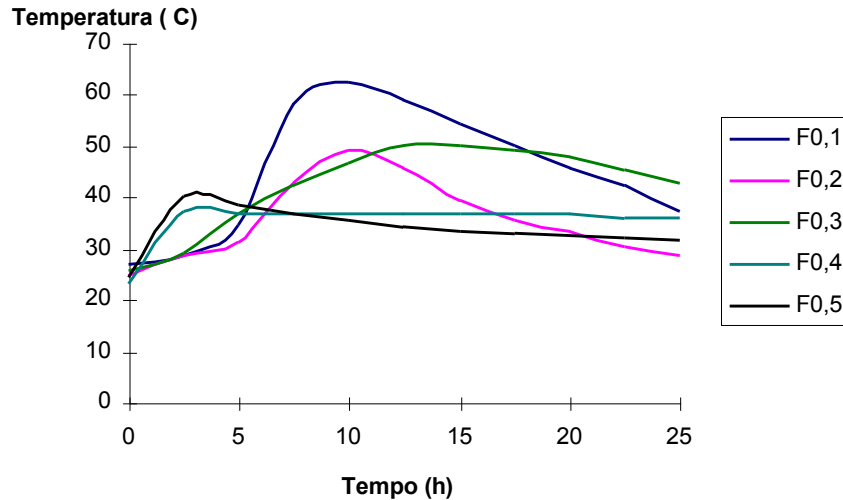


FIGURA 1.6 - Efeito de adições de frutose na curva de hidratação da pasta de cimento

Embora o método calorimétrico seja o mais adotado, foram propostas diversas possibilidades visando quantificar o fenômeno da incompatibilidade madeira-cimento. Certos autores (WEATHERWAX & TARKOW, 1964; 1967; MOSLEMI & LIM, 1984; VALENZUELA, 1989) propõem para a obtenção de um coeficiente de inibição (I), uma comparação entre o tempo de pega do cimento ( $t_c$ ) e aquele correspondente à pega da mistura ( $t_m$ ). Outros utilizam as temperaturas correspondentes ( $\theta_c$  e  $\theta_m$ ), ou a inclinação das curvas ( $s_c$  e  $s_m$ ). Dentre as fórmulas mais utilizadas podem ser citadas:

$$I = \frac{t_m - t_c}{t_c} \dots\dots\dots (1.1)$$

$$I = \frac{t_m}{t_c} \dots\dots\dots (1.2)$$

$$I = 100 \cdot \frac{(\theta_c - \theta_m)}{\theta_c} \cdot \frac{(t_m - t_c)}{t_m} \cdot \frac{(s_c - s_m)}{s_c} \dots\dots\dots (1.3)$$

A razão mássica utilizada madeira-cimento (1/13) encontra-se longe da realidade da fabricação de painéis. Em utilizações industriais adotam-se, geralmente, razões próximas de 1/2. O índice de inibição pode tornar-se, nesse caso, até 4 vezes superior àquele obtido em laboratório (WEATHERWAX & TARKOW, 1964).

O tempo de pega da mistura pode ser determinado facilmente, salvo quando a espécie utilizada apresenta um alto grau de inibição ao cimento. Nesse caso, não se observa a existência de um pico de elevação de temperatura bem definido. A temperatura da mistura, por sua vez, depende fortemente da capacidade de isolamento térmico do calorímetro, não permitindo, na maioria das vezes, comparar os resultados dos diversos pesquisadores. Em certos casos a energia liberada pela reação ultrapassa 145 J/g, enquanto que, em outros, não atinge 10 J/g (JAIN et al., 1989).

Uma alternativa proposta por MILLER & MOSLEMI (1991) leva em consideração a comparação das superfícies sob as curvas de hidratação. Concluíram que, a diferença entre as superfícies das curvas de hidratação da pasta de cimento e da mistura madeira-cimento, permite uma melhor explicação da influência do tipo de cimento e do efeito de diversos aditivos. O limite de integração proposto foi de 48 horas.

A compatibilidade química madeira-cimento pode ser correlacionada com o comportamento mecânico do CBC (LEE et al., 1987; LEE & SHORT, 1989; VALENZUELA, 1989; MILLER & MOSLEMI, 1991). De um modo geral, se houver compatibilidade química entre a madeira e o cimento, a hidratação do cimento atinge um nível significativo, permitindo a formação de uma rede de silicatos ligando as partículas. Em caso contrário, as partículas inibidoras encontram-se soltas na matriz, cujas características foram modificadas pela presença dos extrativos da madeira, não apresentando, portanto, a formação de estrutura mínima de resistência.

No entanto, para outros autores, as características da curva de hidratação da mistura madeira-cimento (tempo de pega e temperatura máxima) não parecem estar correlacionadas com a resistência em flexão, ou em compressão diametral (LEE & SHORT, 1989; MILLER & MOSLEMI, 1991). Para espécies de comportamentos similares (curva de hidratação), podem ser obtidos resultados diferentes em ensaios mecânicos, visto que, a anatomia da partícula (dimensão dos vasos) pode favorecer, em certos casos, a aderência com a matriz.

A constatação do efeito de substâncias inibitórias ao cimento pode ser verificada fazendo-se variar a concentração das mesmas em relação à massa de cimento, na confecção de corpos-de-prova (BERALDO, 1994). Experimentos realizados constataram que a adição de 0,5% de açúcares reduzem a resistência à compressão das amostras em até 90%, mostrado na Figura 1.7.

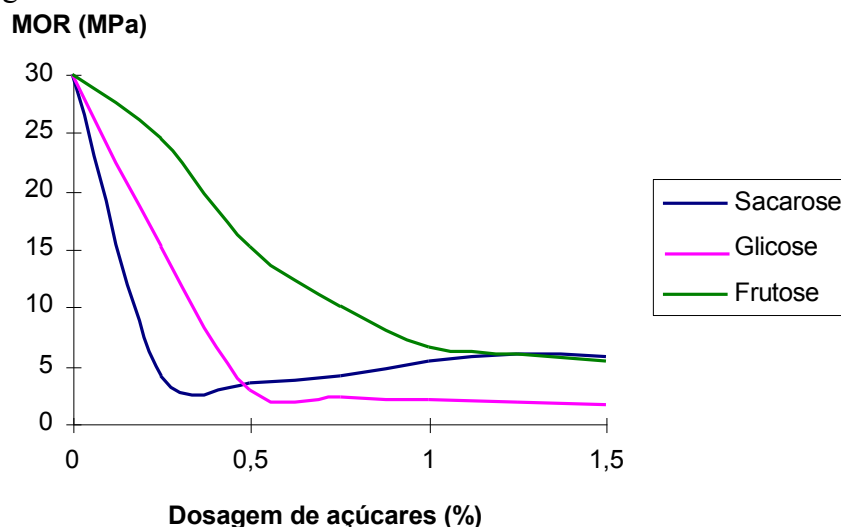


FIGURA 1.7 - Efeito da adição de açúcares sobre a resistência à compressão da pasta de cimento

A evolução do arranjo parcial dos componentes do CBC pode ser acompanhada através de métodos não-destrutivos, tais como, velocidade de propagação de onda ultrasonora e da frequência de ressonância. Verifica-se o aumento na velocidade de

propagação da onda através do CBC, até que, em torno do 7º dia, ocorre tendência à estabilização (BERALDO, 1994).

## **IX - TRATAMENTOS VISANDO MELHORAR A COMPATIBILIDADE MADEIRA-CIMENTO**

Razões de natureza econômica ou geográfica, impedem, às vezes, de se escolher espécies compatíveis com o cimento, ou de estocá-las em locais adequados. Os tratamentos a serem realizados com a madeira, ou uma biomassa vegetal qualquer, devem conciliar aspectos econômicos, buscando a adoção de técnicas simples e confiáveis (SIMATUPANG et al., 1978). O processo ótimo depende da natureza da biomassa vegetal disponível regionalmente, devendo cada caso, merecer um estudo separado.

De acordo com SIMATUPANG et al. (1988) as técnicas mais utilizadas para melhorar a compatibilidade entre a madeira e o cimento podem ser:

- maturação da madeira ou das partículas;
- extração dos componentes inibidores em meio aquoso;
- recobrimento das partículas com produtos limitando a difusão dos constituintes em direção ao meio exterior;
- secagem em forno;
- adição da "fumaça" de silício (microsilica) ou de cinzas volantes;
- utilização de cimento de alta resistência inicial (ARI);
- utilização de cimento aluminoso;
- tratamentos de carbonatação acelerada.

Experiências realizadas por SCHUBERT et al. (1990) sobre as interações entre 18 tipos de cimento e diversas espécies de madeira, mostraram que os melhores resultados foram obtidos utilizando-se cimentos de baixo teor em álcalis e madeiras coníferas (resinosas).

WIENHAUS (1979) propôs o emprego de cimento de alta resistência inicial (ARI), tratamentos de impregnação da madeira, e mais particularmente, o envolvimento das partículas vegetais por metasilicato de sódio ("water glass").

BERGSTROM & GRAM (1984) notaram o comportamento positivo de CBC à base de sisal, substituindo 45% de cimento (em peso) por microsilica. Os autores atribuíram a maior durabilidade do CBC à redução do pH da mistura. LANGE et al. (1988) recomendaram, igualmente, a substituição parcial de cimento (até 50%) por microsilica e cinzas volantes na fabricação de painéis à base de "mélèze" ou de madeiras folhosas. No entanto, o preço da microsilica é mais elevado do que o do cimento. A alternativa proposta pelos autores foi a substituição de cinzas volantes por cinzas originárias da queima controlada de casca de arroz (contém até 90% de sílica).

PAZNER & KLEMAREVSKI (1988) concluíram que o cimento Sorel (magnésiano) é praticamente insensível aos açúcares eliminados pelas madeiras. De acordo com os autores um cimento à base de oxifosfato de magnésio é a melhor alternativa para a fabricação de CBC a partir de qualquer matéria prima vegetal. Ressaltaram, entretanto, alguns inconvenientes ligados à cura e ao comportamento do CBC quando exposto à umidade.

De um modo geral, na grande maioria dos casos não se dispõe de possibilidade de escolha do cimento mais apropriado. A biomassa vegetal disponível localmente raramente se encaixa na faixa ótima de compatibilidade com o cimento. Desse modo devem ser



adotadas medidas coerentes que viabilizem a fabricação de CBC, atuando-se isoladamente ou em conjunto sobre os dois constituintes principais - a biomassa vegetal e o cimento.

#### **X - EXTRAÇÃO E LAVAGEM DA MADEIRA POR SOLUÇÃO AQUOSA**

Trata-se de uma técnica econômica. Pode-se utilizar apenas a água, ou em solução aquosa com álcool (metanol), ou com sais solúveis ou parcialmente solúveis (hidróxido parcial de cálcio e de sódio). Os resultados obtidos são bem contraditórios pois dependem da biomassa vegetal utilizada. Desse modo, a influência do tratamento de lavagem das partículas vegetais sobre o tempo de pega do CBC, não atinge consenso entre os pesquisadores (BIBLIS & LO, 1968; MOSLEMI & LIM, 1984; SCHWARZ & SIMATUPANG, 1984 b; RASHWAN et al., 1992).

A utilização de água quente, apesar de permitir a extração de maior quantidade de produtos, implica na elevação dos custos de fabricação, além da necessidade de se efetuar o tratamento dos rejeitos (HACHMI, 1988; YASIN & QURESH, 1989).

A lavagem em água de partículas das madeiras "hêtre" (*Fagus silvatica*) e "chêne" (*Quercus* sp) melhora de forma sensível a pega do cimento (MOUGEL, 1992). Em certos casos esse tratamento se mostra suficiente, não devendo se buscar extrações mais intensas, que podem provocar a degradação de certos constituintes (por exemplo a hemicelulose) e conduzir a um efeito contrário daquele procurado (IRLE & SIMPSON, 1992).

#### **XI - TRATAMENTO TÉRMICO ENTRE 180°C E 270°C**

Tratando-se a madeira além de 180 °C, elimina-se a água e certos produtos voláteis mas, provoca-se a degradação térmica das hemiceluloses produzindo a madeira "retificada" ou "torrada". A madeira "torrada" perde sua higroscopicidade devido à eliminação de 80% das pentosanas.

A utilização de madeiras secas ou "torradas" conduz à obtenção de CBC de propriedades mecânicas melhoradas (LANGE & SIMATUPANG, 1984), embora não se observe um efeito similar sobre a estabilidade dimensional do CBC (MOUGEL, 1992).

#### **XII - TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE DAS PARTÍCULAS DA MADEIRA POR PULVERIZAÇÃO OU IMPREGNAÇÃO**

Para limitar a liberação de produtos inibidores devido ao ataque das partículas da madeira pela suspensão básica de cimento, procura-se reduzir as trocas hídricas entre a madeira e o cimento, envolvendo ou impregnando as partículas com produtos químicos adequados.

Dentre os produtos utilizados para o tratamento de superfície das partículas de madeira destaca-se, de acordo com SIMATUPANG et al. (1978), o metasilicato de sódio -  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ("water glass" ou vidro solúvel).

A associação do metasilicato de sódio, de hidróxido de sódio e de cloreto de cálcio acarreta, no entanto, em diminuição da resistência mecânica do CBC (LEE & SHORT, 1989). A fabricação de CBC após tratamento de mineralização das partículas vegetais

(associação de metasilicato de sódio e sulfato de alumínio), recomendada por FURUNO et al. (1991), mostrou resultados interessantes para várias espécies vegetais estudadas.

No Quadro 1 são apresentados os resultados da resistência à compressão, obtidos por BERALDO et al. (1996), de CBC à base de quatro espécies vegetais, a saber, EC (*Eucalyptus citriodora*), CV (*Myroxylon balsamum*), PO (*Pinus oocarpa*) e PR (*Aspidosperma polyneuron*). Foram testados, igualmente, dois tipos de cimento (CP II E 32 e CP V ARI), e quatro tratamentos das partículas vegetais: N (natural), M (mineralizada), L (lavada) e LM (lavada e mineralizada). A mineralização consistiu na colocação das partículas vegetais em soluções de silicato de sódio (5%), seguido da imersão em solução de sulfato de alumínio (30%).

QUADRO 1- Efeito do tratamento das partículas vegetais e do tipo de cimento sobre a resistência à compressão de CBC

	CP II E 32				ARI			
	N	M	L	LM	N	M	L	LM
EC	0,80	4,41	1,72	4,41	5,44	8,32	5,09	8,79
CV	0,68	2,67	0,46	8,89	0,68	10,06	5,22	12,48
PO	1,23	2,59	0,85	3,82	2,72	7,26	3,77	7,05
PR	0,89	1,53	1,31	3,82	3,35	5,69	2,97	4,54

Pode ser verificado que o cimento CP V ARI é menos sensível à presença das partículas vegetais. Com efeito, exceção feita à espécie CV, as demais passam a demonstrar comportamento adequado em compressão. Essa espécie vegetal é a que melhor responde, no entanto, à operação de lavagem. A mineralização das partículas vegetais mostra-se, sem sombra de dúvida, aquela que produz os resultados mais interessantes. Resta, no entanto, a necessidade de se efetuar a análise econômica dessa operação, visando-se a aplicação industrial desse procedimento.

A impregnação de pó-de-serra com "leite" de cal age favoravelmente sobre o comportamento mecânico do CBC. Resíduos depositados na superfície das partículas vegetais, ou que tenham penetrado nos elementos anatômicos das mesmas, favorecem a ancoragem da matriz, e aumentam a eficiência da carbonatação, desde que ocorram condições satisfatórias para a sua ocorrência.

O tratamento de fibras de sisal por agentes hidrófobos (formina e ácido esteárico) aumenta a vida útil do CBC em comparação com o emprego de fibras não-tratadas (BERGSTROM & GRAM, 1984; GRAM, 1986).

A impregnação da madeira por taninos pode melhorar a estabilidade dimensional do CBC. No caso do emprego da madeira "hêtre", os resultados obtidos foram interessantes (LEE, 1984). Deve salientar, no entanto, que taninos são apontados como problemáticos em relação à pega do cimento.

Pode-se substituir a impregnação pela pulverização e recobrimento das partículas da madeira por diversos produtos (óleos, emulsões, polímeros). Tratamento de pulverização de óleo de lubrificação sobre partículas de "mélèze" não afetou significativamente a pega do cimento, visto ser o óleo de lubrificação estável quimicamente em presença do cimento (YAMAGISHI et al., 1980). Pode-se utilizar a mesma técnica de pulverização para

depositar sobre as partículas de madeira, por exemplo, constituintes minerais (KAVVOURAS, 1987).

O tratamento das partículas vegetais com "leite" de cal, cimento, produtos orgânicos ou minerais pode preencher o lúmen das células, tornando as partículas vegetais mais estáveis dimensionalmente. A penetração de certas substâncias no interior das paredes celulares impede o inchamento e a retração das partículas vegetais. A estabilidade dimensional pode ser melhorada pela obstrução dos orifícios das partículas vegetais, e pelo recobrimento das mesmas por substâncias não-prejudiciais ao cimento.

Na Figura 1.8 pode ser verificado o efeito na resistência à compressão do CBC após a pulverização de solução aquosa de cimento sobre partículas de bambu (BERALDO, 1994). A resistência à compressão (MOR, em MPa) foi obtida ao 7º dia, enquanto que, a variação dimensional (Cy 2, em mm/m) foi obtida após dois ciclos consistindo de secagem (21 dias em ambiente controlado- 50% de umidade relativa e temperatura de 33 °C) e umidificação (4 dias de imersão em água a temperatura de 20 °C).

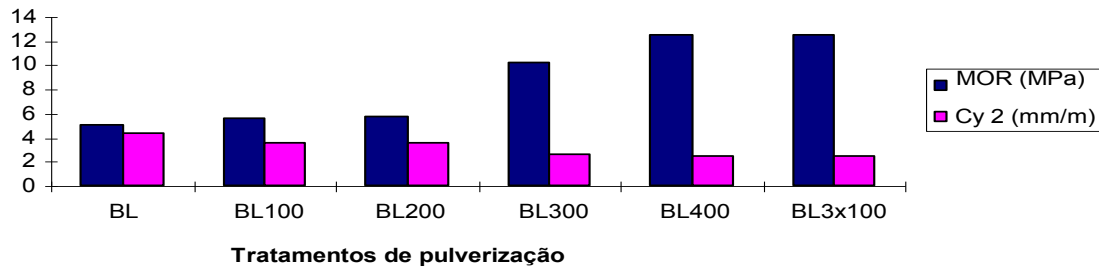


FIGURA 1.8 - Efeito da pulverização de solução de cimento sobre partículas de bambu

Verifica-se que à medida que se aumenta a concentração da solução aumenta a resistência à compressão. No entanto, as variações dimensionais tendem a se estabilizar em torno de 2,5 mm/m. A principal vantagem desse tratamento consiste na criação de região de maior aderência entre a matriz e as partículas vegetais, que se encontram parcialmente mineralizadas.

A estabilidade dimensional das partículas vegetais pode ser melhorada através da acetilação (ROWELL et al., 1991); no entanto, razões de ordem econômica impedem tais tratamentos em escala industrial.

Na Figura 1.9 são apresentados os resultados obtidos ao pulverizarem-se partículas de "sapim" com substâncias oleosas. Os tratamentos comparados foram: SN ("sapim" natural); SOV (óleo de vinhaça); SOQ (óleo queimado) e SPEG (polietilenoglicol 400).

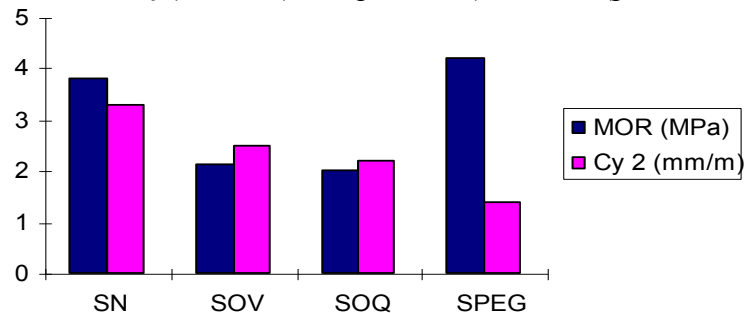


FIGURA 1.9- Efeito da pulverização de óleos sobre partículas de "sapim".

O uso de polietilenoglicol (PEG) e do betume, em pequenas quantidades (10 a 15%) sobre as partículas vegetais diminuem a retração do CBC. A deposição sobre as partículas vegetais de quantidades excessivas de produtos, tais como o betume, provoca um efeito adverso; verifica-se aumento nas variações dimensionais e diminuição na resistência mecânica do CBC (MOUGEL, 1992; BERALDO, 1994).

Na Figura 1.10 são apresentados os resultados de CBC, após tratamento das partículas de "sapim" através de pulverização com três tipos de betume: emulsões (B1 e B2) e solução diluída em querosene (B3). Esse último produto mostrou-se mais eficaz no envelopamento das partículas vegetais, além de apresentar a particularidade de não obstruir o bico pulverizador (BERALDO, 1994). As variações dimensionais do CBC estabilizam-se em torno de 2 mm/m.

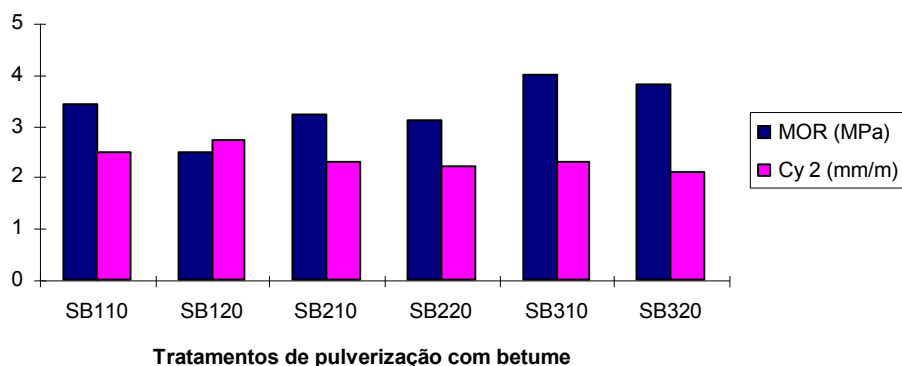


FIGURA 1.10 - Efeito da pulverização de três tipos de betume sobre partículas de "sapim".

### XIII - UTILIZAÇÃO DE ACELERADORES

A presença da biomassa vegetal prolonga, ou até mesmo impede, a pega do cimento. A ação das substâncias inibidoras ao cimento, presentes na biomassa vegetal, pode ser contrabalanceada pela adição de produtos (geralmente sais minerais) denominados de aceleradores (cloretos, sulfatos, carbonatos, silicatos, etc...). A patente de utilização do cloreto de cálcio data de 1888.

Alguns autores tentam explicar os mecanismos da ação dos aceleradores sobre o cimento. Os cloretos reagem com o  $C_3A$  para formar o hidrocloroaluminato de cálcio. Os grãos de cimento são recobertos por uma camada mais permeável do que o cimento propriamente dito, o que intensifica as reações. Além disso, no caso do CBC, pode ser constituída uma camada sobre a superfície das partículas vegetais, o que reduz a liberação das substâncias solúveis em água.

A utilização de aceleradores permite antecipar a pega e o endurecimento dos CBC. As resistências iniciais ultrapassam de forma significativa àquelas de CBC de pega normal. No entanto, a resistência final não parece ser afetada.

Dentre os inconvenientes da ação dos aceleradores destaca-se a diminuição no pH da solução, e em consequência, a maior vulnerabilidade das armaduras em aço (LEE & SHORT, 1989).

Outro agravante pode estar relacionado com o aumento nas variações dimensionais dos produtos à base de cimento quando se utilizam aceleradores. A retração do concreto dobra para uma adição de 2% de  $CaCl_2$ , e é multiplicada por dez para adição de 5%,

enquanto que, aumenta de 20 a 40% no caso de adição de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e de outros sais minerais.

Os cloretos, de um modo geral, são os produtos mais eficazes para acelerar a pega do cimento. Na fabricação de painéis de CBC, KAVVOURAS (1987) propõe o uso de  $\text{CaCl}_2$  (1%) ou de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (3%); outra indicação de KAYAHARA et al. (1979) refere-se ao uso do  $\text{AlCl}_3$  (3%).

A eficiência da ação dos aceleradores depende da biomassa vegetal empregada. A pega de CBC a base de "epicea" (*Picea* sp) melhora após a ação da mistura de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (3%); os mesmos aceleradores foram indicados para a fabricação de painéis ocós na Indonésia.

Em certas situações nem o emprego de aceleradores elimina as barreiras que impedem a adequada reação do cimento em presença da biomassa vegetal. Os aceleradores  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  não se mostraram eficazes em presença das madeiras "southern red oak" e "white oak".

Estudos desenvolvidos por ZHENG TIAN & MOSLEMI (1985) sobre o efeito de 30 aceleradores para reduzir a incompatibilidade química da madeira "larch" com o cimento, selecionaram certos cloretos ( $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) em dosagens de 5,0 a 6,5% em relação à massa de cimento. Outro experimento de YASUDA et al. (1992) mostrou que o  $\text{MgCl}_2$  é mais eficaz em presença da madeira *A. mangium*, do que o  $\text{CaCl}_2$ ; o  $\text{CaCl}_2$  foi escolhido por razões econômicas para acelerar CBC a base de "white spruce", pois apresentou um desempenho inferior ao  $\text{MgCl}_2$  (RASHWAN et al., 1992).

A compatibilidade de uma espécie de madeira pouco inibidora ("lodgepole pine") melhora pela adição de 5% de  $\text{CaCl}_2$  e de  $\text{NaOH}$  (MOSLEMI et al., 1983). Os mesmos produtos foram ineficazes para espécie de madeira altamente inibidora ("western larch"), necessitando se efetuar tratamento preliminar de lavagem das partículas antes da fabricação do CBC.

Resultados semelhantes foram obtidos por BERALDO (1994), ao verificar a ineficiência da ação do  $\text{CaCl}_2$  sobre partículas de bambu. Na Figura 1.11 são apresentados os resultados do efeito combinado da lavagem das partículas de bambu e adição de  $\text{CaCl}_2$  (3%) à matriz. Constatou-se que, para as madeiras "hêtre" e "pin maritime" (*Pinus maritima*), o efeito do acelerador foi benéfico. O CBC à base de partículas de bambu mostrou-se mais susceptível à operação de lavagem do que ao uso do acelerador.

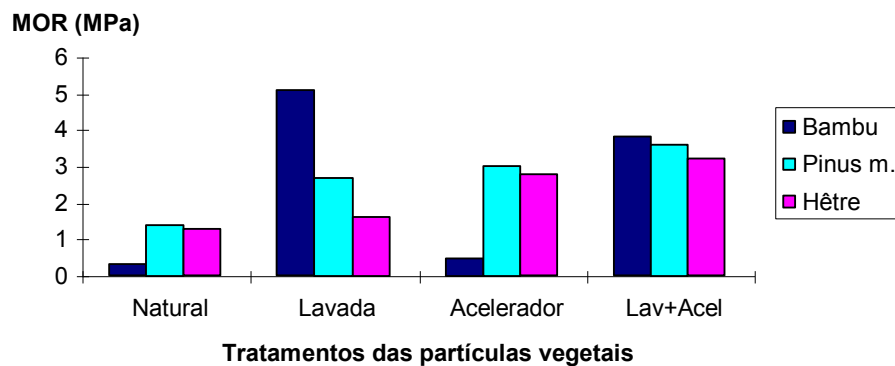


FIGURA 1.11 - Efeito da lavagem das partículas vegetais e uso de acelerador sobre a resistência à compressão de CBC.

De acordo com YAMAGISHI et al. (1980) o sulfato de alumínio associado à cal aumentou a velocidade de endurecimento de CBC à base de "sapin" sendo, no entanto, ineficaz para CBC à base de "peuplier".

Conclue-se, portanto, que os aceleradores devem ser utilizados com bastante precaução e, provavelmente, deva ser buscado o par ideal espécie vegetal-acelerador eficaz.

#### **XIV - TRATAMENTOS MODIFICADORES DAS CARACTERÍSTICAS DA MATRIZ**

A adição de determinados sais, em pequena quantidade, favorece a pega e o endurecimento da matriz e melhora as características mecânicas iniciais dos compósitos. No entanto, após um certo período, as propriedades mecânicas restam similares às de um compósito cuja matriz não tenha sido modificada. Para melhorar as propriedades da matriz, e particularmente, suas propriedades mecânicas, dois tratamentos principais têm sido considerados:

- adição à matriz de agregado mineral de granulometria adequada;
- carbonatação da matriz pela adição de carbonatos ou em presença de anidrido carbônico.

##### **a) Adição de Cargas Minerai s e Microsilica**

Nos CBC, as partículas de biomassa vegetal são geralmente maiores do que os grãos de cimento. Na ausência de prensagem intensa (caso dos blocos) o compósito obtido torna-se "cavernoso" apresentando importante porosidade. A ligação entre as partículas vegetais é assegurada pelas "pontes" de cimento, restando espaços vazios entre as mesmas, que podem ser preenchidos por adições de minerais (MOUGEL, 1992; BERALDO, 1994).

A resistência à compressão e a estabilidade dimensional dos CBC melhoram significativamente com a adição de minerais. Apesar de melhorar a estabilidade dimensional, no entanto, essa modificação na matriz implica em aumento na massa específica do CBC.

Na Figura 1.12 pode ser observado o efeito combinado da lavagem das partículas vegetais e do reforço da matriz por cargas minerais (1:1) sobre a resistência à compressão e a estabilidade dimensional do CBC. Para todas as espécies estudadas, o tratamento combinado permitiu atingir valores de 5 MPa em compressão e de 1,0 mm/m em variações dimensionais.

A adição de partículas minerais, de dimensões próximas às do cimento, pode ser substituída por microsilica ("fumée de silice"), que apresenta dimensões nitidamente inferiores às do aglomerante. Observa-se igualmente, neste caso, melhora acentuada nas características mecânicas. Desse modo, a adição de micropartículas e de partículas minerais sólidas permite diminuir a macroporosidade do compósito, e de aumentar a massa específica e, em consequência, as características mecânicas do CBC. Deve-se, no entanto, salientar que a presença de sólidos minerais implica em modificação da quantidade de água adicionada ao cimento. A massa de água adicionada ao CBC, correlaciona-se diretamente com a massa específica do compósito, devendo adotar-se a razão ótima água/cimento para cada tipo de fabricação do CBC (SIMATUPANG, 1979; LANGE & SIMATUPANG, 1985).

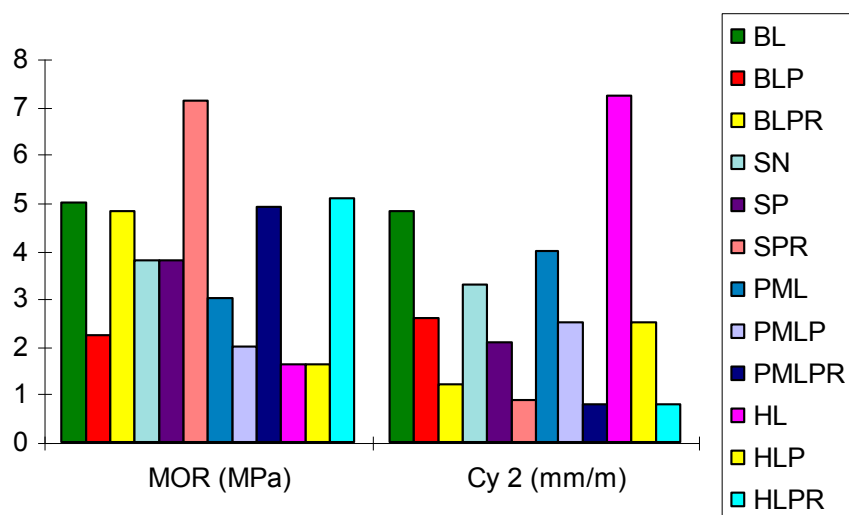


FIGURA 1.12 - Efeito do tratamento combinado- lavagem e pulverização das partículas vegetais; reforço da matriz por adição de cargas minerais

#### b) Carbonatação

Um dos grandes inconvenientes na fabricação de artefatos à base de misturas entre a biomassa vegetal e o cimento é o longo tempo necessário para a pega. Certas matérias primas vegetais podem, dependendo de sua constituição química, retardar consideravelmente ou, até mesmo, anular completamente a reação de hidratação do cimento. Dentre as alternativas adotadas para minimizar o fenômeno da incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento pode ser adotada a carbonatação artificial da mistura.

BESSEY (1933), citado por MEYERS (1949), estudou certos parâmetros que influenciam as características das reações de carbonatação. O autor concluiu que a carbonatação em presença de atmosfera saturada de água provoca a formação superficial de  $\text{CaCO}_3$ , que impede a penetração do  $\text{CO}_2$ . No entanto, se a quantidade de água presente nos poros for reduzida, os mesmos serão mais acessíveis e será mais fácil a penetração do  $\text{CO}_2$ . Além disso, se as amostras forem colocadas em vácuo parcial para eliminar a água formada durante a reação de carbonatação, verifica-se que a taxa de carbonatação aumenta mais rapidamente, do que se a amostra tivesse sido colocada em meio úmido.

O teor de umidade é considerado pelos autores precedentes como sendo o fator de maior influência sobre a retração do concreto ocorrida durante a carbonatação (ou pré-carbonatação). Dois outros parâmetros que agem de forma importante sobre a eficiência da carbonatação são a concentração de  $\text{CO}_2$  e o tamanho da amostra.

VERBECK (1958) propôs o estudo da carbonatação sobre as pastas e as argamassas. Com efeito, torna-se mais fácil a fabricação de tais materiais e mais simplificada a observação do comportamento dos mesmos em carbonatação. MEYERS (1949) afirmou que a adição de areia ao cimento permite melhor penetração do gás, pois ocorre aumento da porosidade do material. Além disso, o autor concluiu que a ausência de carbonatação completa devia-se, na maior parte dos casos, à baixa porosidade dos materiais, e à hidratação incompleta dos constituintes do cimento.

O estudo da influência desses diferentes parâmetros sobre a velocidade de carbonatação, constitui uma análise complexa. SCHMIDT (1992) afirmou que um concreto normalmente hidratado apresenta quantidades consideráveis de cal e de clínquer. No entanto, um concreto que tenha sofrido um tratamento com CO<sub>2</sub> apresenta uma quantidade considerável de calcita (carbonato de cálcio) e uma quantidade reduzida de clínquer. O autor concluiu que um tratamento com CO<sub>2</sub>, durante 10 a 15 minutos, seria equivalente à uma hidratação normal de várias horas.

VERBECK (1958) constatou que certos corpos-de-prova apresentam retração considerável devido à carbonatação, e igualmente, um aumento em massa. Dentre as quatro situações de umidade relativa estudadas, o autor pôde mostrar que em dois casos (100% e 25%), os resultados eram desfavoráveis à adequada carbonatação, concluindo que o grau máximo de carbonatação ocorre nas vizinhanças de 50% de umidade.

YOUNG et al. (1974) concluíram que uma pressão de CO<sub>2</sub> compreendida entre 1 e 2 atm favorecia a reação entre os principais componentes do cimento (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S) e a sílica (1:1), enquanto que uma pressão de 4 atm não provocava um efeito considerável. Os autores estudaram dois sistemas de tratamento dos corpos-de-prova com CO<sub>2</sub>: um sistema denominado "dinâmico" ou "aberto" (o gás atravessava um recipiente contendo nitrato de magnésio, de forma a manter a umidade de 50%), e um segundo sistema denominado "estático" ou "fechado" (colocavam-se inicialmente os corpos-de-prova em sacos plásticos, preenchendo-os, em seguida, com CO<sub>2</sub>). O tempo de tratamento foi compreendido entre 3 e 81 minutos. Pôde ser observado que a reação, fortemente exotérmica, é muito rápida (cerca de 10 minutos), o que provoca liberação significativa de vapor de água, o qual se condensa sobre as paredes dos sacos plásticos. Essa condensação tem a particularidade de reduzir a velocidade da reação.

O sistema aberto permitiu o desenvolvimento mais lento da resistência mecânica do corpo-de-prova, que depende fortemente do tempo de exposição. Contrariamente, no sistema fechado os corpos-de-prova apresentaram microfissuras, provocadas pela elevação muito rápida de temperatura.

YOUNG et al. (1974) recomendaram a imersão em água dos corpos-de-prova que sofreram carbonatação para favorecer a hidratação. Uma carbonatação de 9 minutos seguida de permanência dos corpos-de-prova em água durante 7 dias mostra a aparição de um gel C-S-H\* de forma acicular (em forma de agulha), que é diferente do silicato obtido em condições normais de hidratação.

Embora seja evidente a constatação do efeito macroscópico da carbonatação, por pesagem dos corpos-de-prova, o mesmo não se pode afirmar sob o ponto de vista da microscopia. O carbonato de cálcio, sob forma de cristais microscópicos, se encontra disperso nos poros da matriz e das partículas vegetais, em regiões onde tenha encontrado condições ótimas para seu desenvolvimento. Sob microscopia eletrônica de varredura (10000 X) BERALDO (1994) constatou, em lâminas petrográficas, a presença de grupos de cristais achatados, no caso de amostras carbonatadas, e de grupos de cristais aciculares, no

---

\* C=CaO S=SiO<sub>2</sub> H=H<sub>2</sub>O



caso de amostras submetidas a ciclos de umidificação e secagem, como é apresentada na Figura 1.13.

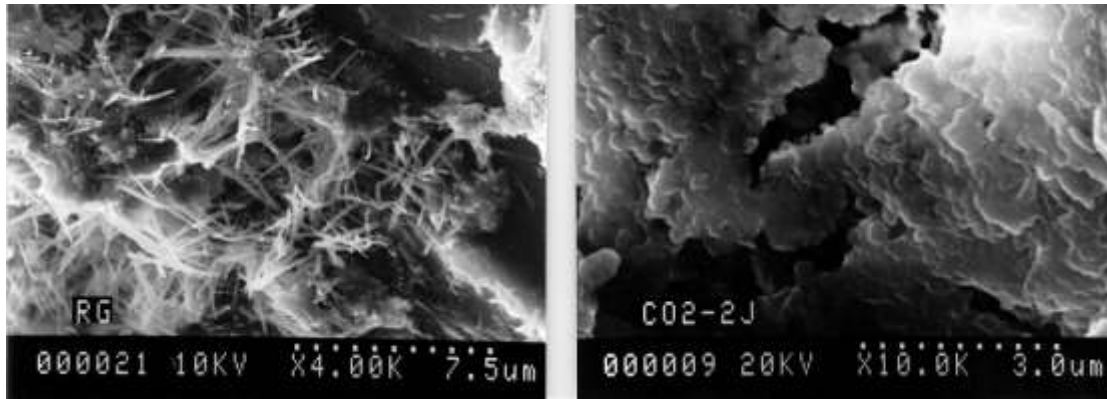


FIGURA 1.13 - Fotografias de CBC obtidas em microscópio eletrônico de varredura.

#### ***b) Influência da carbonatação na estabilidade dimensional***

MEYERS (1949) estudou o efeito da carbonatação na estabilidade dimensional de compósitos a base de cimento. Concluiu que o cimento sob sua forma coloidal é responsável pela variação dimensional dos corpos-de-prova em presença da umidade. A substituição do gel por uma estrutura cristalina constituída de  $\text{CaCO}_3$  reduziria de 60 a 70% as variações dimensionais, e ao mesmo tempo permitiria melhorar as propriedades físico-mecânicas do concreto. O autor acredita que se fosse possível a instalação de fábricas de produtos à base de cimento nas proximidades de fontes interessantes de  $\text{CO}_2$  (gases residuais de combustão ou da secagem da cal), seria muito vantajoso se efetuar a carbonatação após o período inicial da hidratação dos compósitos.

VERBECK (1958) afirmou que corpos-de-prova colocados em diferentes atmosferas, com baixa concentração de  $\text{CO}_2$ , apresentam retração irreversível após um certo número de ciclos de umidificação e de secagem. Isto ocorre, à medida que incrementos adicionais de pasta de cimento são carbonatados durante a fase de secagem.

Torna-se interessante, sob o ponto de vista industrial, de antecipar a retração dos corpos-de-prova a longo prazo. A pré-carbonatação de um compósito à base de cimento, se for efetuada antes da colocação do mesmo em serviço, é de fundamental importância para a execução correta das obras. Com efeito, SHIDELER (1955), citado por VERBECK (1958), mostrou que corpos-de-prova que sofreram uma pré-carbonatação (a 25% de umidade relativa) apresentaram variações dimensionais duas vezes inferiores àquelas apresentadas por corpos-de-prova testemunhas (colocados em ambiente isento de  $\text{CO}_2$ ).

Em resumo, a carbonatação deve ser efetuada em condições onde a umidade relativa do ar seja próxima de 50%. O tamanho do corpo-de-prova e a concentração de  $\text{CO}_2$  influem de forma importante na velocidade de carbonatação.

#### Carbonatação de CBC

A quantidade de artigos sobre a carbonatação de compósitos biomassa vegetal-cimento (CBC) ainda é muito limitada. No entanto, durante as últimas conferências

"Inorganic-Bonded Wood & Fiber Composites", realizadas em Spokane (USA), nota-se a aparição de alguns trabalhos (LAHTINEN, 1992; SIMATUPANG et al., 1992; SIMATUPANG e HABIGHORST, 1992; GEIMER et al., 1992). Trabalhos sobre a carbonatação de painéis de CBC foram conduzidos recentemente na Universidade de Idaho (USA) sob orientação de A. MOSLEMI.

A carbonatação foi testada pelos autores retrocitados para diminuir o tempo de prensagem de painéis madeira-cimento, normalmente compreendido entre 6 e 8 horas. A carbonatação adequada pode reduzir o tempo de prensagem para alguns minutos.

Na hidratação do clínquer obtém-se o hidróxido de cálcio. Esse hidróxido pode ser carbonatado pelo ar ao longo do tempo, e muito rapidamente, em presença de adições de carbonatos ou de hidrogenocarbonatos. Os produtos resultantes constituem aglomerantes da matriz e pode-se obter, nessas condições, uma estrutura sólida cujas características são melhoradas notavelmente em comparação com matrizes não-tratadas.

A carbonatação pode ser obtida pela adição de carbonatos e dentre os vários que foram testados, o carbonato de potássio forneceu resultado melhor do que o carbonato de sódio (SIMATUPANG et al., 1992).

BERALDO (1994) não observou efeitos favoráveis na adição de carbonato e de bicarbonato de sódio na fabricação de CBC à base de "sapim". As variações dimensionais aumentaram, enquanto que, reduziu-se a resistência do CBC em compressão, como mostra a Figura 1.14.

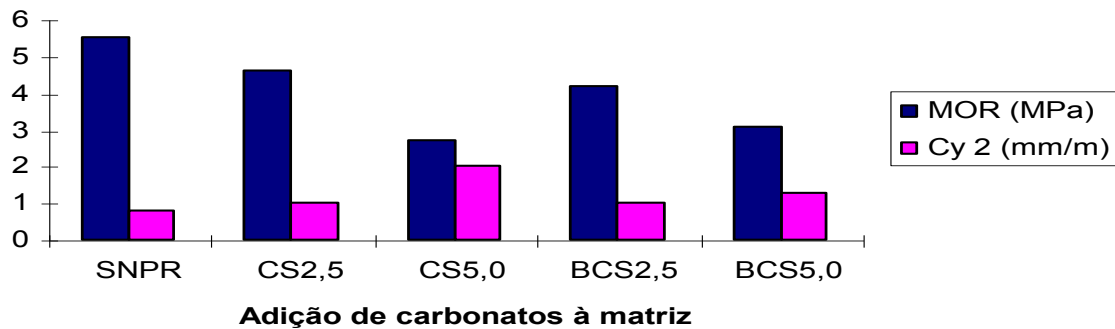


FIGURA 1.14 - Efeito da adição de carbonatos

A exemplo de outros autores SHIGEKURA (1989) utilizou o  $\text{CO}_2$  gasoso para realizar a carbonatação. Uma patente britânica (MOOREHEAD & DAVIS, 1979) e duas patentes húngaras (SCHMIDT & CARPATI, 1986) foram registradas sobre a carbonatação.

A reação de carbonatação de painéis foi estudada por SIMATUPANG et al. (1992) através da medida de condutividade elétrica da pasta de cimento. Durante a alimentação do  $\text{CO}_2$  observa-se diminuição intensa da condutividade elétrica e em seguida, um período de estabilização, seguido de uma segunda redução que corresponde à pega do cimento.

A utilização do  $\text{CO}_2$  na fabricação de painéis adota várias técnicas. Efetua-se um vácuo parcial sobre o painel antes de sua colocação em ambiente de  $\text{CO}_2$ . LAHTINEN (1992) apresentou resultados interessantes obtidos sobre painéis carbonatados a partir de método desenvolvido pela empresa RAUMA-REPOLA OY (Hungria). O tempo de pega reduziu-se para 5 minutos e a resistência mecânica do painel na desmoldagem foi de 50% de sua resistência mecânica final.

A velocidade de carbonatação depende da porosidade do painel e da razão água/cimento e madeira/cimento. GEIMER et al. (1992) analisaram a influência desses parâmetros e sugeriram a substituição parcial do cimento (5% em massa) pela cal para aumentar a velocidade de carbonatação.

A exemplo do concreto, SIMATUPANG & HABIGHORST (1992) mostraram que existe uma umidade ótima para a carbonatação do CBC, e que a massa de água ótima para a fabricação de painéis CBC depende de sua massa específica.

O tratamento de compósitos com CO<sub>2</sub> parece ser representativo do envelhecimento natural do CBC. Com efeito, no caso de CBC à base de fibras de celulose AKERS & STUDINKA (1989), BENTUR & AKERS (1989), mostraram que o tratamento por carbonatação conduz à uma evolução similar àquela do envelhecimento natural; os produtos de hidratação podem ser observados no lúmen das fibras. Para os autores, um tratamento de 3 a 4 meses em atmosfera de CO<sub>2</sub> equivaleria a 5 anos de envelhecimento natural. Em definitivo, a carbonatação dos painéis CBC permite reduzir a duração de prensagem e os diferentes trabalhos sobre esse assunto não evidenciam melhorias sensíveis nas propriedades finais dos painéis.

BERALDO & ZOULALIAN (1996) estudaram a carbonatação de três tipos de CBC: corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, corpos-de-prova cúbicos de 10 cm de aresta, e blocos vazados 9x19x39 cm (espessura das paredes de 2 cm).

Embora os reatores utilizados apresentassem diferentes dimensões, adotou-se o mesmo procedimento operacional. Após a colocação do CBC, introduzia-se o gás carbônico e, transcorrido um intervalo de tempo suficiente para preencher o reator, liberava-se o gás carbônico para que expulsasse o ar.

Para corpos-de-prova cilíndricos testou-se o efeito da pressão (0,5 a 1,5 bar), da duração do tratamento (1 a 15 h), e da pré-secagem (0 a 15 h). Verificou-se que:

Efeito da pressão do gás carbônico: A resistência à compressão do CBC não foi afetada pela pressão do gás. Por se tratar de reator fechado, a penetração do gás carbônico realiza-se por difusão e dissolução lenta na umidade presente no corpo-de-prova. O efeito da pressão seria evidente no caso em que houvesse a passagem forçada do gás carbônico através do corpo-de-prova, conforme adotado na fabricação de painéis de CBC através de extrusão.

Efeito da duração do tratamento: A reação de carbonatação pode ser extremamente rápida, desde que encontre situações favoráveis para sua realização. O monitoramento da temperatura da reação evidenciou o ponto máximo em torno de uma hora. Embora a reação de carbonatação continue, torna-se prejudicada pela presença de vapor d'água no reator e pela obstrução dos poros do CBC pela deposição periférica de carbonato de cálcio.

Efeito da pré-secagem do corpo-de-prova: O momento ideal para se efetuar a carbonatação do CBC depende de uma série de fatores (geometria do corpo-de-prova, traço adotado, granulometria dos agregados, etc). Embora a desmoldagem precoce do CBC possa acarretar no aparecimento de fissuras, e conseqüente perda de resistência mecânica, corpos-de-prova

carbonatados após 4 horas de fabricação, e imediatamente ensaiados, suportaram carga 10 vezes superior àquela suportada por testemunha. A secagem, no entanto, favorece a eficiência da carbonatação. À medida que ocorre a secagem o CBC aumenta sua porosidade, favorecendo a penetração do gás carbônico, até que seja atingida a umidade ótima, abaixo da qual diminui a taxa de carbonatação.

Para os corpos-de-prova cúbicos tornou-se menos evidente o efeito da carbonatação, devido à dificuldade na penetração do gás carbônico, tendo em vista a espessura das amostras (100 mm). Embora tenha sido verificada a presença de camada periférica endurecida nos corpos-de-prova, o que permitiria antecipar a manipulação dos mesmos em ambiente industrial, recomenda-se que, posteriormente, seja efetuada a cura em meio úmido, para aumentar a taxa de hidratação.

Blocos vazados, recém-fabricados, mostraram-se inadequados para carbonatação devido ao risco de sofrerem danos estruturais durante o transporte entre a máquina de fabricação e o reator. Desse modo, a exemplo de outros corpos-de-prova, deve-se buscar a idade ótima para a realização da carbonatação. A eficiência do tratamento pôde ser avaliada através da pesagem dos blocos vazados antes e após a carbonatação. O ganho médio, em massa, foi de 1,3%, 1,5% e 2,0% para blocos com, respectivamente, um, dois e quatro dias de secagem.

## **XV - VARIAÇÕES DIMENSIONAIS DE COMPÓSITOS BIOMASSA VEGETAL-CIMENTO (CBC)**

Existem dois tipos de variações dimensionais do CBC:

- irreversíveis: consequência das reações de hidratação durante a pega do cimento. Pode ser minimizado pela estocagem do produto (4 a 6 semanas);
- reversíveis: consequência da alternância das condições atmosféricas. Não pode ser totalmente evitado.

A pequena quantidade de trabalhos voltados para o estudo das variações dimensionais dos CBC contrasta com o interesse acentuado no estudo das propriedades mecânicas desses compósitos. De acordo com BROKER & SIMATUPANG (1974 b) a origem da retração do CBC ainda não é bem compreendida, e a magnitude das variações dimensionais tem impedido o uso intensivo da biomassa vegetal na fabricação do CBC (ROWELL et al., 1991).

As variações dimensionais do CBC podem ser atribuídas em grande parte ao comportamento da matriz. A quantidade de biomassa vegetal utilizada no CBC não parece influenciar significativamente a estabilidade dimensional (BROKER & SIMATUPANG, 1974 a). As fibras da madeira controlam o comportamento da pasta ou argamassa úmidas de cimento de acordo com SARJA (1989).

A retração final de um concreto leve depende inversamente de sua massa específica e diretamente da dosagem em cimento (PIMIENTA et al., 1994). Para um CBC de massa

específica 1000 kg/m<sup>3</sup> e umidade inicial de 40%, a retração estimada é da ordem de 5 mm/m. Painéis CBC de 1500 kg/m<sup>3</sup> apresentam variações dimensionais da ordem de 2 mm/m.

Os painéis CBC são considerados mais estáveis dimensionalmente do que aqueles à base de resinas orgânicas (DINWOODIE & PAXTON, 1984). O inchamento de painéis CBC é nitidamente inferior ao de painéis de madeira aglomerada. Certos autores relatam inchamento de painéis CBC de 1 a 57 mm (BADEJO, 1989); outros relatam inchamento em espessura e em largura de, respectivamente, 8,4 e 1,9 mm/m (LEE, 1984).

Para reduzir as variações dimensionais do CBC buscou-se estudar a influência de diferentes parâmetros envolvendo os componentes primordiais (biomassa vegetal e matriz cimento), assim como o processo de fabricação, tendo sido evidenciado:

- geometria das partículas:  
quanto mais longas as partículas utilizadas maior será a estabilidade dimensional do CBC (BROKER & SIMATUPANG, 1974 a; BADEJO, 1988; MOSLEMI 1988);
- massa específica:  
quanto intensa a compactação maior será a massa específica do CBC e maiores serão sua estabilidade dimensional e sua resistência mecânica (BADEJO, 1988);
- fator a/c:  
quanto maior o fator a/c menor será a estabilidade dimensional do CBC (BROKER & SIMATUPANG, 1974 a; SARJA, 1989);
- tratamento:  
a cura realizada em estufa melhora a estabilidade dimensional (HANNANT, 1984; KUROKI et al., 1988);
- MOE:  
quanto maior o MOE menor será a retração do CBC. Torna-se, então, interessante a substituição parcial do cimento por agregados minerais miúdos (maior MOE do que da pasta de cimento).

## **XVI - CURA DO CBC**

Embora não sejam plenamente conhecidas as razões para o comportamento inadequado de certas biomassa vegetais em presença do cimento, diversas técnicas permitem minimizar esse inconveniente. Da mesma forma, diversos estudos tem evidenciado a importância do uso de partículas vegetais que preencham determinados requisitos quanto à distribuição granulométrica, além de preconizar o traço mais adequado para a fabricação de determinados produtos. No entanto, ainda pouco se conhece sobre o procedimento ideal para a execução da etapa de cura.

Experimentos realizados por BERALDO (1994) evidenciaram a importância de se combinar ciclos alternados de umidificação e secagem, para promover a retração do CBC antes de sua aplicação em obras. A Figura 1.15 representa as variações dimensionais de CBC à base de partículas de "sapin" após ciclos alternados de umidificação e secagem. Verifica-se que o corpo-de-prova sofre variações dimensionais irreversíveis, e que a distancia entre as dimensões máximas e mínimas reduz-se a cada ciclo, evidenciando a estabilidade dimensional do CBC.

### Variações dimensionais (mm/m)

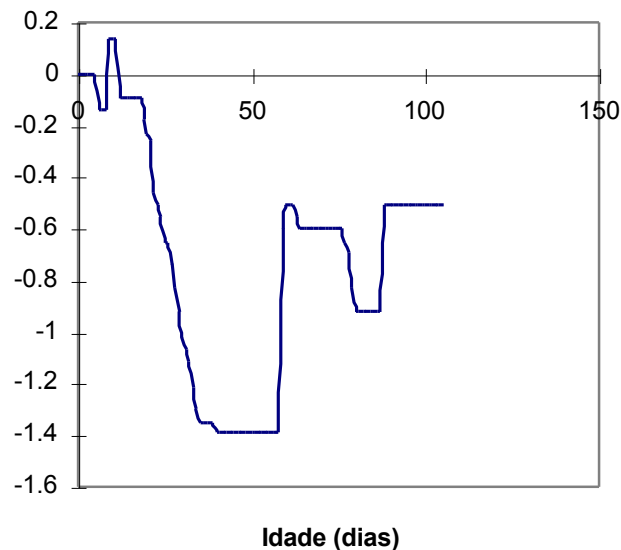


FIGURA 1.15 - Variações dimensionais do CBC após ciclos de umidificação e secagem

Por sua vez, a estocagem ao ar livre durante 7, 28, 42 dias não evidenciou ganhos em estabilidade dimensional do CBC, assim como, no caso da adoção de períodos prolongados de cura em ambiente saturado. Embora tenha sido evidenciado a importância de se efetuar a cura, consistindo em alternância nas etapas de umidificação e secagem, deve ser levado em consideração a constituição da mistura e a geometria das amostras, para que se possa obter a duração ótima de cada etapa.

## XVII - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, o CBC é um sistema complexo constituído de biomassa vegetal (de preferência compatível quimicamente com o cimento), por uma matriz (modificada ou não pela presença de aditivos e cargas minerais), por certa quantidade de água (sempre superior àquela necessária para a confecção de argamassa e concreto), e por considerável volume de ar incorporado. Esse sistema dinâmico recebe influências do meio ambiente, hidratando-se e liberando cal, que por sua vez, reage com o gás carbônico da atmosfera, acarretando modificação na matriz, e mesmo, na estrutura das partículas vegetais, provocando a cicatrização de fissuras.

Embora se conheça adequadamente os procedimentos a serem adotados, resta ainda um longo caminho a ser percorrido até que seja possível sensibilizar o setor industrial para a viabilidade técnica de fabricação de artefatos à base de CBC. Vários preconceitos deverão ser derrubados até que se possa evidenciar as inúmeras vantagens no uso de resíduos vegetais em construções, principalmente para países em desenvolvimento.

Iniciativas desenvolvidas na Unicamp desde 1994 tem evidenciado a viabilidade técnica na utilização do CBC. Uma modesta linha de produção de blocos vazados tem

suprido as necessidades para a construção de muretas e de abrigos para animais. Do mesmo modo, tem se buscado disseminar o uso do CBC, quer seja na forma de pisos para instalações agrícolas, na fabricação de bloquetes para pavimentação e de floreiras ornamentais, e de pequenos canais para condução de água. Experimentos realizados por BERALDO (1996) mostraram, igualmente, a possibilidade de se reduzir o custo da matriz empregada, substituindo parcialmente o cimento Portland por gesso, cal e calcário dolomítico. Os resultados de compressão de CBC (blocos vazados), fabricados com substituição de 20% de cimento Portland por calcário dolomítico, mostraram-se interessantes, pois melhora-se a trabalhabilidade da mistura, sem que ocorra redução importante na resistência à compressão.

Um desafio mais ousado vem sendo direcionado para a fabricação de telhas, buscando-se uma alternativa técnica e economicamente viável, além de ecologicamente correta, para a substituição das fibras de amianto.

## XVIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKERS S.A.S., STUDINKA J.B. Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests. *The International Journal of Cement Composites and Lighthweight Concrete*, 1989, **11**(2), p. 93-97.
- AROLA R.A. Chunkrete: an alternative to concrete. In : *Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference*, Moscow, Idaho, 1992, Vol 3, p. 121-131.
- BADEJO S.O.O. Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwoods. *Wood Science and Technology*, 1988, **22**, p. 357-370.
- BADEJO S.O.O. New trends in wood-cement board research in Nigeria. In : *IUFRO Seminar of Project Group p 5.01 "Properties and utilisation of tropical woods"*, Côte d'Ivoire, 1989, 19 pp.
- BENTUR A., AKERS S.A.S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment. *The International Journal of Cement Composites and Lighthweight Concrete*, 1989, **11**(2), p. 99-109.
- BERALDO A.L. Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composites biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité. Thèse de Doctorat. Université de Nancy 1, ENSTIB, 1994, 222 p.
- BERALDO A.L., BARTHOLOMEU A., BATISTA A.M., FAGUNDES A.C., ROLIM M.M., SEGANTINI A. Viabilidade de fabricação de compósitos resíduos de madeira e cimento Portland (CBC). In: *Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como materiais de construção civil*, ANTAC, EPUSP, 1996, p. 79-84.
- BERALDO A.L., ZOULALIAN A. Carbonatação de compósitos biomassa vegetal-cimento. In: *XXV CONBEA*, Bauru, 1996, CD-ROM, 6 pp.
- BERALDO A.L. Wood-cement hollow blocks for rural utilization. In: *ASAE Annual Meeting*, Phoenix, Arizona, 1996, Paper nº 9644112, 6 pp.
- BERGSTRÖM S.G., GRAM H.E. Durability of alkali-sensitive fibres in concrete. In: *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1984, **6**(2), p. 75-80.

- BIBLIS E.J., LO C. Sugars and others wood extractives: Effect on the setting of southern-pine cement mixtures. *Forest Products Journal*, 1968, **18**(8), p. 28-34.
- BRÖKER F.W., SIMATUPANG M.H. Dünnschichtchromatographischer Nachweis zementerhärtungsstörender Stoffe. *Zement-Kalk-Gips* № 5, 1973, p. 245-247.
- BRÖKER-F.W., SIMATUPANG M.H. Dimensionsstabilisierung zementgebundener Holzwerkstoffe. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1974 a, 32, p. 188-193.
- BRÖKER-F.W., SIMATUPANG M.H. Ursachen der Dimensionsänderung zementgebundener Holzwerkstoffe. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1974 b, 32, p. 150-155.
- BUGNA J., VASEY P., VETSCH T. Le bois-ciment: un substitut possible à l'amiantement?. *Chantiers/Suisse*, 1981, Vol 12, p. 37-42.
- CASU B., CHIRUZZI M., TEGIACCHI T., ZOPPETTI G. Interaction of aluminates with carbohydrates and aldonates. In: 7<sup>th</sup> International Symposium of Chemical Cement, Paris, 1980, Vol IV, p. 558-563.
- COUTTS B. Wood fiber inorganic composites-The Australien scene 1970' s-1990's, In : Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference, 1992, Vol 3, p. 26-27.
- DINWOODIE J.M., PAXTON B.H. Wood-Cement Particleboard: A technical assessment. *Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium*, 1984, 40, p. 217-227.
- DIX R.J.H.R. The principles of cement-bonded particleboards manufacture. In: International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, 1988, Vol 1, p. 136-139.
- FISCHER V.F., WIENHAUS O., RYSSEL M., OLDBRECHT J. The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lighthweighth wood-wools boards. *Holztechnologie*, 1974, **15**(1), 12-19.
- FURUNO T., UEHARA T., JODAI S. Combinations of wood and silicate. I- Impregnation by water glass and application of aluminum sulfate and calcium chloride as reactants. *Mokuzai Gakkaishi*, 1991, Vol 37, n° 5, P. 462-472.
- GEIMER R.L., SOUZA M.R., MOSLEMI A.A., SIMATUPANG M.H. Carbon dioxide application for rapid production of cement particleboard. In: Inorganic bonded wood and fiber composite materials conference, 1992, Vol 3, p. 31-41.
- GRAM H.E. Durability studies of natural organic fibres in concrete, mortar on cement. In: RILEM Symposium on developments in fibre reinforced cement and concrete. 1986, Vol 2, p. 13-17.
- HACHMI M., CAMPBELL A.G. Wood-cement chemical relationships. In: International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, 1988, Vol 1, p. 43-47.
- HACHMI M., MOSLEMI A.A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest Products Journal*, 1989, **39**(6), p. 55-58.
- HANNANT D.J. Fibre reinforced cement and concrete. Part 2: Practical composites. *Concrete*, March, 1984, p. 21-22.
- HOFSTRAND A.D., MOSLEMI A.A., GARCIA J.F. Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement. *Forest Products Journal*, 1984, **34**(2), p. 57-61.



- HOLDERNESS S. Marketing and opportunities for cement-bonded particleboards: lesson from great Britain and North America. In: Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference, 1990, Vol 2, p. 129-132.
- IRLE M., SIMPSON H. Agricultural residues for cement-bonded composites. In: Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference, 1992, Vol 3, p. 54-58.
- JAIN V.K., SHUKLA K.S., KUMAR S. Heat of hydration studies on cellulosic materials and cement systems. J. Timb. Develop. Assoc. (Inde), 1989, Vol. XXXV(2), p. 19-32.
- KALAFATIS P., COOPER R.J., SMITH C. The promotion of a new type of particleboard to architects- the case of COMPAK. Journal of the Institute of Wood Science, 1989, 11(5), p. 86-192.
- KAVVOURAS P.K. Suitability of *Quercus conferta* wood for the manufacture of cement-bonded flakeboards. Holzforschung, 1987, 41(3), p. 159-163.
- KAYAHARA M., TAJIKA K., NAKAGAWA H. Increase of strength of cement-wood composites. Mokuzai Gakkaishi, 1979, 25(8), p. 552-557.
- KENNER J., RICHARDS G.N. The degradation of carbohydrates by alkali. Part IV. 1-0-Methylfructose, Glucose, and Fructose. Journal of Chemical Society, London, 1954, Vol IV, p. 1784-1789.
- KUROKI Y., NAGATOMI W., YAMADA J. Manufacture of light-weight cement-bonded particleboard in Japan. In: Inorganic bonded wood and fiber composite materials, 1988, Vol 1, p. 136-142.
- LAHTINEM P.K. Experience with cement-bonded manufacturing when using a short-cycle press line. In : Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference, 1992, Vol 3, p. 32-34.
- LANGE H., SIMATUPANG M.H. Der Einfluß des Trocknungsgrades der Holzpläne auf die Festigkeit zementgebundenen Spanplatten. Holz als Roh-und Werkstoff, 1984, 42, p. 421-423.
- LANGE H., SIMATUPANG M.H. Herstellung von zementgebundenen Fichten-und Pappelspanplatten: Wechselwirkungen von fünf Einflußfaktoren und ihre Wirkung auf die Plattenfestigkeit. Holz als Roh-und Werkstoff, 1985, 43, p. 229-236.
- LEE A.W.C. Physical and mechanical properties of cement bonded southern pine excelsior board. Forest Products Journal, 1984, 34(4), p. 30-34.
- LEE A.W.C., HONG Z., PHILLIPS D.R., HSE C.Y. Effect of cement/wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures. Wood and Fiber Science, 1987, 19(3), p. 262-268.
- LEE A.W.C., SHORT P.H. Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board. Forest Products Journal, 1989, 39(10), p. 68-70.
- LEMPFER K., SATTLER H. Long-term performance of cement-bonded particleboard and fireboard. In: Inorganic fiber and particleboard bonded with inorganic binders, 1988, Vol 1, p. 125-132.
- LIEBER V.W., RICHARTZ W. Einfluß von Triäthanolamin, Zucker und Borsaure auf das Erstarren und Erhärten von Zementen. Zement-Kalk-Gips, 1972, n° 9, p. 403-409.
- LIGNUM. Bases technologiques/Matériaux dérivés du bois/Matériaux à base de particules de bois et de liant mineral. Zurich, 1960, 9 pp.
- MEYERS S. L. Effects of carbon dioxide on hydrated cement and concrete. Rock Products, Jan, 1949, p. 96-98.

- MILESTONE N.B. The effect of glucose and some glucose oxidation products on the hydration of tricalcium aluminate. *Cement and Concrete Research*, 1977, **7**(1), p. 45-52.
- MILLER D.P., MOSLEMI A. A. Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood and Fiber Science*, 1991, **23**(4), p. 472-482.
- MOSLEMI A.A. Inorganically bonded wood. *CHEMTECH*, 1988 a, Aug, p. 504-510.
- MOSLEMI A.A. Wood-cement panel products: coming of age. In: *Inorganic fiber and particleboard bonded with inorganic binders*, 1988 b, Vol 1, p. 12-18.
- MOSLEMI A.A., GARCIA J.F., HOFSTRAND A.D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems. *Wood and Fiber Science*, 1983, **15**(2), p. 164-176.
- MOSLEMI A.A., LIM Y.T. Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. *Forest Products Journal*, 1984, **34**(7/8), p. 22-26.
- MOSLEMI A.A., PFISTER S.C. The Influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. *Wood and Fiber Science*, 1987, **19**(2), p. 165-175.
- MOUGEL E. Mise au point d'un composite ciment-bois dont les variations dimensionnelles vis-à-vis des variations d'humidité sont contrôlées. Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, ENSTIB, 1992, 160 pp.
- PAZNER L., KLEMAREVSKI A. New developments in wood bonding with magnesium oxyphosphate cement. In: *International Conference on fiber and particleboards bonded with inorganic binders*, Idaho, USA, 1988, Vol 1, p. 26-30.
- PIMIENTA P., CHANDELLIER J., RUBAUD M., DUTRUEL F., NICOLE H. Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. *Cahiers du CSTB*, 1994, 2073, 45 pp.
- PUGEL A.D., PRICE E. W., HE C.Y. Composites from southern pine juvenile wood. Part 2. Durability and dimensional stability. *For. Prod. Journal*, 1990, **40**(3), p. 57-61.
- RASHWAN M.S., HATZINIKOLAS M., ZMAVC R. Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue. *For. Prod. Journal*, 1992, 42, p. 57-64.
- READING T. J. Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces. *Concrete International*, 1985, Nov, p. 57-62.
- ROWELL R.M., TILLMAN A.M., ZHENGtian L. Dimensional stabilization of flakeboard by chemical modification. *Wood Science Technol*, 1986, 20, p. 83-95.
- ROWELL R.M., YOUNGQUIST J.A., ROWELL J.S., HYATT J.A. Dimensional stability of aspen fiberboard made from acetylated fiber. *Wood and Fiber Science*, 1991, **23**(4), p. 558-566.
- SANDERMANN W., PREUSSER H. J., SCHWIENS W. The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials. *Holzforschung*, 1960, 14(3), p. 70-77.
- SARJA A. Structural wood-fiber concrete. *Concrete International*, 1989, 07, p. 45-49.
- SCHUBERT.B., WIENHAUS.O., BLOBFELD O. Untersuchungen zum System Holz-Zement. Einfluß unterschiedlicher Zementarten auf das Abbindeverhalten von Holz-Zement-Mischungen. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1990, 48, p. 185-189.

- SCHWARZ H.G. Cement-bonded boards in Malaysia".In: International Congress on fiber and particleboard bonded with the inorganic binders, 1988, Vol 1, p. 91-92.
- SCHWARZ H. G., SIMATUPANG M.H. Einfluß der chemischen Zusammensetzung von Portlandzement auf die Druckfestigkeit von Versuchskörpern aus Zement und Fichten- oder Buchenspänem. Holz als Roh-und Werkstoff, 1984 a, 41, p. 65-69.
- SCHWARZ H.G., SIMATUPANG M.H. Eignung des Buchenholzes zur Herstellung zementgebundener Holzwerkstoffe.Holz als Roh-und Werkstoff, 1984 b, 42, p. 265-270.
- SHIGEKURA Y., TAKAHASI K.Study on the improvement of excelsior board-A trial of gypsum excelsior board. Science University of Tokio, 1979, p. 258-260.
- SIMATUPANG M.H. Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebundener Holzspanplatten. Holz als Roh-und Werkstoff, 1979, 37, p. 379-382.
- SIMATUPANG M.H. Abbaureaktionen von Glucose, Cellobiose und Holz unter dem Einfluß von Portlandzementmörtel". Holzforschung, 1986, 40(3), p. 149-155.
- SIMATUPANG M.H., SCHWARZ H.G., BRÖKER F.W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: 8<sup>th</sup> World Forestry Congress, 1978, Vol 6, Jakarta, October, p. 98-120.
- SIMATUPANG M. H., LANGE H., KASIM A., SEDDIG. N. Influence of wood species on the setting of cement and gypsum. In: International Congress on fiber and particleboard bonded with the inorganic binders, 1988, Vol 1, p. 33-42.
- SIMATUPANG M. H., HABIGHORST C. The carbon dioxide process to enhance cement hydration in manufacturing of cement-bonded composites-comparison with common production method. In: Inorganic bonded wood and fiber composite materials Conference, 1992, Vol 3, p. 114-120.
- TACHI. M., NAGADOMI W., TANGE J., YASUDA S., TERASHIMA N. Manufacture of wood-cement boards II. Cement-bonded particles boards from Malaysian fast-growing trees. Mokuzai Gakkaishi, 1988, Vol 34, p. 761-764.
- VALENZUELA W. A. Contribution à la détermination de l'aptitude d'essences forestières pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique, 1989, 135 pp.
- VERBECK G. Carbonation of hydrated Portland cement. ASTM Special, 1958.
- WEATHERWAX R.C., TARKOW H. Effect of wood on setting of Portland cement. Forest Products Journal, 1964, 14(2), p. 567-570.
- WEATHERWAX R.C., TARKOW H. Effect of wood on the setting of Portland cement: Decayed wood as an inhibitor. Forest Products Journal, 1967, 17(7), p. 30-32.
- WIENHAUS O. Werkstoffe aus Holz und Zement. Holztechnologie, 1969, 20(4), p. 207-215.
- YAMAGISHI K. , KOMAZAWA K, KASAI A., NUNOMURA A. Fabrication des panneaux en bois-ciment utilisant un bois de mauvaise prise. 1. Influence d'un prétraitement des particules de mélèze avec de l'huile et des produits chimiques. J. Hokkaido Forest Products Research Inst., Asahigawa, Japan, 1980, 7, p. 6-10
- YASIN S.M., QURESHI T.A. Quantity of water solubles in some hardwoods species (a basis for they relative suitability in wood cement boards. Pakistan Journal of Forestry, 1989, 39(2), p. 103-106.

- YASUDA S., IWASE Y., SEGUCHI Y., TAKEMURA T., MATSUSHITA Y.  
Manufacture of wood-cement boards V. Cement-hardening inhibitory components of sugi heartwood and behavior of catechol as a simple inhibitor model with vicinal phenolic hydroxyl groups in cement paste. *Mokuzai Gakkaishi*, 1992, **38**(1), p. 52-58.
- YOUNG J.F., BERGER R.L., BREESE J. Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO<sub>2</sub>. *Journal of The American Ceramic Society*, 1974, **57**(9), p. 394-397.
- ZHENG TIAN L., MOSLEMI A.A. Influence of chemical additives on the hydration characteristics of Western Larch wood-cement-water mixtures. *Forest Products Journal*, 1985, **35**(7), p. 37-43.