

COMPUESTOS BIOMASA VEGETAL Y CEMENTO

Dr. Antonio L. Beraldo
Prof. Visitante – U-Bio-Bío – Concepción – Chile
Maio de 2005

I. INTRODUCCIÓN

De una manera general, en los países en desarrollo no hay una divulgación adecuada de los conocimientos científicos, principalmente para aquellos que actúan en el área rural. Construcciones rurales, por ejemplo, no han mostrado gran interés en la comunidad científica, siendo muy raras las investigaciones desarrolladas en este sector. En la mayoría de los casos, construcciones rurales o materiales alternativos para construcciones son asociados erróneamente a las obras temporales o a materiales de limitada durabilidad. Todavía, el empleo de técnicas apropiadas puede viabilizar la fabricación de componentes constructivos obtenidos a partir de la biomasa vegetal diversificada y de los aglomerantes inorgánicos.

Compuestos biomasa vegetal y cemento (**CBC**) son materiales livianos producidos con materias primas disponibles y renovables. En muchas aplicaciones estos compuestos pueden desempeñar un papel importante en la sustitución de los materiales convencionales normalmente empleados en la construcción.

Uno de los temas más polémicos discutidos actualmente se refiere a los inconvenientes ocasionados por la utilización indiscriminada del asbesto-cemento. Estas fibras minerales, mientras presenten ventajas tecnológicas cuando comparadas con otras fibras, todavía son muy impactantes al medio ambiente. En varios países fue interdictado su empleo en la fabricación de los componentes constructivos. La biomasa vegetal se presenta como una alternativa viable a estas fibras minerales, en caso que se logre con éxito neutralizar la acción dañosa de los extractivos existentes en su composición química en el fraguado del cemento.

II GENERALIDADES

Se define por compuestos biomasa vegetal- pegantes minerales a la asociación de un pegante mineral cualquier (cemento Pórtland, cemento magnesiano, yeso, etc.) con partículas vegetales, y en ciertos casos, con diversos aditivos (aceleradores, cargas minerales, plastificantes, introductores del aire, etc.). Conforme se

cambien las proporciones entre los diferentes constituyentes, y la distribución del tamaño de las partículas empleadas, es posible lograr la obtención de una larga gama de productos.

En la literatura especializada no se nota la diferencia en la terminología empleada para designar las diferentes partículas vegetales, adoptándose de una forma incorrecta el término “fibras” para designar los diferentes fragmentos resultantes de las operaciones con la madera. La expresión “wood fiber reinforced cement” se refiere a los productos a base de cemento reforzado por fibras (COUTTS, 1982). Todavía, las fibras son elementos primarios individuales no obtenibles en procesos mecánicos. La denominación mas correcta tendría que ser “partículas”. De una manera similar los compuestos no pueden ser considerados como “hormigones” o “béton de bois” (PIMIENTA et al., 1994) porque no presentan agregados gruesos en su constitución.

III IMPORTANCIA DE LA FABRICACIÓN DEL CBC

Las primeras aplicaciones comerciales de los productos a base de cemento y madera fueron producidas en los años 30. Inicialmente, fueran fabricados paneles livianos de cemento y madera para los cuales se utilizaba como pegante la magnesita (mezcla de cloruro de magnesio y óxido de magnesio). Estos paneles fueron conocidos por la denominación “Excelsior” (USA) y “Heraklit” (en Europa). En los años 50, varias patentes fueran registradas por la empresa Elmendorf. La gran mayoría de las fabricas actuales de paneles utilizan procesos derivados de estas patentes (DINWOODIE & PAXTON, 1984).

En los últimos 40 años, el desarrollo de los compuestos a base de lana de madera (“excelsior”) fue muy lento si se compara con aquellos obtenidos en la fabricación de compuestos de madera con pegantes orgánicos. Todavía, en varios países hubo la prohibición del empleo del asbesto en el sector de la construcción (Francia en 1997). De un gran número de posibilidades de sustitución de las fibras de asbesto, se puede citar las fibras recicladas de periódicos y las fibras de celulosa; ambas presentan precios

competitivos con las fibras artificiales. Se espera una intensa concurrencia en este mercado sobretodo entre los fabricantes de fibras metálicas y plásticas (PVA y PP).

La evolución en las técnicas constructivas y lo respecto a los aspectos ambientales acelerarán el consumo del CBC en Europa (HOLDERNESS, 1992). Todavía, una pesquisa realizada en el Reino Unido indicó que el suceso en el mercado para un nuevo panel a base de madera dependería de su aceptación junto a los arquitectos con respecto a sus propiedades básicas (KALAFATIS et al., 1989). Los CBC, por su naturaleza vegetal, conservan junto a la población aspectos negativos ligados a la durabilidad limitada y a la prefabricación (BUGNA et al., 1981).

Para los industriales, el CBC despierta un interés creciente (MOSLEMI, 1988a). Las materias primas cemento y madera (o otra biomasa) generalmente se encuentran disponibles localmente. Entonces, las fábricas pueden ubicarse cerca de los recursos vegetales y esto permite una reducción considerable del costo del transporte.

IV UTILIZACIONES DEL CBC

De acuerdo con DIX (1988), el CBC puede ser utilizado en obras externas (techos, muros, prefabricados, muebles, cajas perdidas, revestimiento de túneles, losas, cerramientos industriales, paneles antirruidos, etc.) y en obras internas (aislamiento acústico, puerta cortafuego, en construcciones con esqueleto de madera, paneles, conductos de ventilación, etc.).

Los mayores atractivos del CBC se refieren a su ligereza, su capacidad de aislamiento térmico y su resistencia mecánica considerable para un hormigón liviano.

PIMIANTA et al. (1994) presentaron varias posibilidades de utilización del CBC:

- Muros de albañilería: contruidos con bloques huecos o llenos con lana mineral o poliestireno (EPS) son muy atractivos por su facilidad en cortarse. La principal desventaja es el largo tiempo necesario para el curado (3 a 6 semanas).
- Paneles: del tipo sándwich, reforzados por piezas metálicas y con protección de hormigón o mortero.

- Muros anti-sonidos: se protegen las piezas de hormigón con capas de CBC (20 cm) onduladas, para aumentar el aislamiento acústico. Ciertas empresas emplean la producción automatizada comercializando el producto acabado.
- Divisiones: el centro en CBC, protegido con una capa externa de hormigón y con mortero de cemento en la capa interna. El montaje del panel es realizado con tornillos o adhesivo.
- Techos: capa interna en CBC protegida por una capa de hormigón o mortero (2 a 3 cm).
- Abrigos: paneles de 45 mm de espesor son utilizados en la construcción de abrigos para mascotas. Los fabricantes destacan las propiedades aislantes y hidrófugas del CBC.
- Viviendas de veraneo: mientras haya viabilidad técnica la demanda no ha sido significativa.
- Cava: el CBC es muy indicado para este uso por permitir la estabilización de la temperatura, el control de la humedad y principalmente por su capacidad de absorber las vibraciones.
- Baldosas: pueden ser fabricados de manera similar a la de los hormigones. En ciertos casos, se necesita una capa de mortero para proteger el CBC de los esfuerzos de abrasión.
- Placas: por su facilidad de corte el CBC permite realizar varios montajes, por ejemplo, en las instalaciones de equipos de control de consumo de agua y de electricidad en las viviendas.
- Instalaciones deportivas: el CBC recibe una capa de polvo de ladrillos cerámicos.
- Arrecifes artificiales: el CBC sirve de protección para la fauna marina.

V FABRICACIÓN DEL CBC

A ejemplo de diverso productos a base de cemento, el CBC puede ser fabricado de dos maneras clásicas: moldeo (deposición de la mezcla en moldes sin presión) y compactación (combinada o no con la extrusión). La eficiencia de los procesos es

fuertemente correlacionada con las características propias de las partículas vegetales (distribución de tamaño de las partículas y aspecto de su morfología) y, evidentemente, de las proporciones entre sus constituyentes (sobre todo la razón agua/materiales secos).

Las partículas vegetales son fuertemente higroscópicas. De este modo algunos investigadores sugieren que ellas sean humedecidas previamente, para que no logren absorber el agua necesaria para el fraguado del cemento. Todavía, también se puede contrargumentar que cuando las partículas están secas, principalmente en los haces habrá penetración de esta pasta de cemento, lo cual después de su endurecimiento, podrá ejercer un efecto favorable en la estabilidad dimensional del CBC.

Las partículas vegetales pueden, entonces, ser adicionadas a la pasta (o al mortero) de cemento, previamente homogeneizados. La introducción de la mezcla en los moldes se debe hacer rápidamente para evitar el secado prematuro, ocasionado por la pérdida del agua para el medio ambiente, o por una excesiva absorción de la parte de las partículas vegetales.

El desmolde normalmente es hecho después de un tiempo mucho más largo del que sería necesario en caso de la fabricación de productos convencionales a base de cemento. Sin embargo, el empleo de especies vegetales más adecuadas, de cementos especiales, o de aditivos específicos, permite minimizar esto que es uno de los mayores problemas en la industrialización del CBC.

El curado del CBC presenta una particularidad cuando comparado con los productos tradicionales a base de cemento. Mientras el curado sea más complicado al inicio, pues la pérdida de agua es más acentuada, después ocurre una forma de curado interno porque las partículas vegetales liberan parte del agua para el cemento. Investigaciones desarrolladas por BERALDO (1994) evidenciaron la importancia de un curado alternado constituido por ciclos de humidificación y secado. Se pudo observar efectos positivos en la estabilidad dimensional del CBC.

Aparentemente el CBC es más susceptible a la falta de que exceso de agua. Evidentemente valores excesivamente elevados de la proporción agua en relación a los materiales secos provocaron la segregación de la mezcla, principalmente cuando el molde no presente estanqueidad. Por otro lado, el empleo de cantidades reducidas de agua dificulta la compactación de la mezcla y propicia la presencia de heterogeneidades en el CBC.

VI FUENTES DE BIOMASA VEGETAL PARA EL CBC

La biomasa vegetal es un recurso inagotable ya sea en su forma original o cuando es obtenida de residuos originarios de los procesos agroindustriales. El empleo de la biomasa vegetal es una forma de economizar energía y al mismo tiempo de preservar el medio ambiente (RASHWAN et al., 1992). Ciertas regiones geográficas (en el oeste de la Amazonía, por ejemplo) son parcialmente o totalmente desprovistas de agregados naturales necesarios para la fabricación del hormigón. En otros casos los canteros de obras pueden ubicarse en plena floresta o en locales muy lejos de los centros de comercialización de los agregados convencionales (AROLA, 1992). En los dos casos precedentes se puede sustituir los agregados minerales por aquellos obtenidos de los residuos de la explotación de la madera buscándose la producción de un “hormigón” de media resistencia.

Otra fuente de materia prima muy importante son las explotaciones agrícolas. Estos valores fueron estimados en 12 millones de toneladas de paja de cereales en el Reino Unido (IRLE & SIMPSON, 1992), 5 millones de toneladas de residuos de “pallets” en los EUA (AROLA, 1992), 54 millones de toneladas de desechos de caña de azúcar en diversos países (ROWELL et al., 1986).

En Brasil la interdicción de la quema al aire libre de los residuos vegetales obligó a los industriales a buscar nuevas alternativas para su utilización racional. Los volúmenes generados son impresionantes siendo del orden de 2,2 millones de toneladas de cáscara de arroz (20% de los residuos del procesamiento industrial) y cantidades imposibles de evaluar en el caso de la industria maderera, constituida en su mayoría por empresas artesanales instaladas cerca de la floresta.

Todavía hay empresas que se preocupan en agregar valor a sus residuos vegetales. En las industrias de azúcar y de alcohol actualmente se recupera el desecho (el bagazo), utilizado para generar energía en las calderas, o destinado a la alimentación del ganado. Otras empresas emplean un sistema de extrusión para fabricar briquetas, vendidas para panaderías y pizzerías.

VII PROPIEDADES DEL CBC

Las características del CBC dependen fuertemente de la naturaleza de la biomasa empleada en su fabricación. Los granulados vegetales presentan diferencias en sus propiedades básicas: constitución anatómica (% de los elementos anatómicos y tamaño de los vasos), características físicas (absorción, distribución de tamaño de las partículas) y sobretodo la constitución química (porcentaje y naturaleza de los extractivos – azúcares, fenoles y resinas).

Las principales ventajas del CBC en comparación con los materiales convencionales a base de cemento son:

- disponibilidad de materia prima: teóricamente se puede fabricar CBC a partir de diversas materias primas vegetales: bambú, henequén, aserrín de madera y varios residuos agroindustriales (bagazo de caña, cáscara de arroz, tallos de maíz, de trigo, etc.). Todavía, casi ninguna biomasa vegetal

- masa específica limitada: los CBC pertenecen a la categoría de los “hormigones ligeros”, pues presentan una masa específica aparente entre los 400 a los 1500 kg/m³. Una serie de propiedades se vuelven inherentes a estas categorías distintas de CBC: comportamiento mecánico, resistencia al fuego, aislamiento térmico, disipación acústica, resistencia a los ciclos del hielo y de-hielo.

- resistencia a los agentes biológicos: la alcalinidad de la matriz cementante asegura la protección de la biomasa contra los ataques de los hongos y de los insectos. Sin embargo, la exposición del CBC en los ciclos de humidificación y secado puede ocasionar el surgimiento de fisuras y favorecer entonces al ataque de las partículas vegetales. Las largas fibras de henequén (*Agave sisaleana*) se subdividen y pierden su capacidad de refuerzo cuando son expuestas al ataque alcalino del cemento (GRAM, 1986). El CBC puede presentar modificaciones en su comportamiento mecánico, después de sufrir ciclos alternados de humidificación y secado (LEMPFER & SATTTLER, 1988).

- estabilidad dimensional: contrariamente en los paneles a base de pegantes orgánicos, el CBC presenta una buena estabilidad dimensional. Todavía, estos valores son muy elevados para permitir su empleo en obras externas sin protección.

- trabajabilidad: el CBC muestra una fluidez suficiente para ser bombeado y eventualmente puede ser inyectado sobre presión. Son mas fácil de cortar que comparado con el hormigón tradicional y causan un desgaste mas pequeño en las herramientas cuando comparado con paneles a base de pegantes orgánicos (DINWOODIE & PAXTON, 1984). Otro aspecto importante se refiere al tiempo necesario para efectuar los ensambles, pues el CBC por ser mucho mas liviano se puede con él fabricarse piezas de mayor longitud.

- características mecánicas: la velocidad de fraguado y la resistencia mecánica de los productos a base de cemento dependen de varios factores: composición química y finura del cemento, proporción de la mezcla, tipo y porcentaje de los aditivos (aceleradores o retardadores), temperatura ambiente, tamaño de la pieza, tipo del curado, etc. Se puede afirmar, en el caso del hormigón tradicional, que la resistencia mecánica sea proporcional a la dosificación en el cemento. Se considera también que a partir de los 90 días después de la fabricación cese el crecimiento de la resistencia mecánica, ocasionado por la falta de condiciones favorables a la hidratación del cemento. Todavía, para el CBC, la cinética de evolución de su resistencia mecánica no es plenamente conocida. Se trata de un material mucho mas poroso comparado con el hormigón tradicional y, de esa manera, presenta condiciones mucho mas favorables para la penetración del gas carbónico. Su carbonatación ocurre con mas intensidad porque las partículas vegetales funcionan como reservas de humedad. La resistencia mecánica en compresión del CBC (de la orden de 0,5 a 4,0 MPa) es sensiblemente inferior a aquella de los otros hormigones ligeros. Evidentemente esta característica, a ejemplo del que ocurre en los hormigones tradicionales, está estrechamente ligada a la masa específica y a la dosificación en el cemento. Las propiedades específicas de los agregados (su resistencia mecánica y distribución del tamaño de sus partículas), la proporción entre sus constituyentes y la forma de efectuar la compactación de la mezcla también son factores que interfieren en el comportamiento del CBC.

De una forma resumida, el CBC presenta grandes posibilidades de utilización en la construcción principalmente por su versatilidad y su bajo costo (cuando los desechos son aprovechados cerca del local de su generación). Incluso se puede afirmar que la utilización del CBC es solamente limitada por la imaginación del usuario (HOLDERNESS, 1992).

Sin embargo, el CBC presenta desventajas considerables se destacando: la compatibilidad química con el cemento que depende de la naturaleza de la biomasa vegetal; el tiempo necesario para el fraguado del cemento es relativamente mayor; la durabilidad puede ser muy limitada cuando no se utilizan cuidados especiales; la estabilidad dimensional en presencia de variaciones de humedad es mas pronunciada cuando se compara con productos similares a base de cemento; hay susceptibilidad a la formación de eflorescencias (SIMATUPANG & HABIGHORST, 1992).

VIII COMPATIBILIDAD QUÍMICA ENTRE LA BIOMASA VEGETAL Y EL CEMENTO

Casi todas las biomásas, sean ellas vegetales o animales tienen en sus composiciones compuestos químicos que provocan generalmente reacciones de inhibición para el desarrollo de la resistencia del pegante. Mientras este fenómeno sea extraño para pegantes orgánicos y es un factor muy frecuente cuando se emplean pegantes inorgánicos como el yeso, la cal y el cemento Portland. El conocimiento de las características químicas de la biomasa y de sus efectos sobre el pegante es fundamental para obtener compuestos de buena calidad.

El mínimo daño al fraguado del pegante es la calidad fundamental que debe presentar un agregado de origen vegetal. El comportamiento particular de cada especie vegetal en presencia del pegante es denominada “compatibilidad química”. A priori no se puede adicionar cualquier biomasa en su condición natural al cemento, pues los constituyentes químicos presentes en las partículas vegetales son muy sensibles al medio alcalino generado durante las reacciones de hidratación del pegante.

Varias investigaciones fueron desarrolladas sobre los mecanismos responsables por la inhibición del fraguado del cemento, ocasionado por los extractivos presentes en la biomasa vegetal. Durante la interacción entre la pasta de cemento y la biomasa vegetal, una parte de las hemicelulosas empieza a solubilizarse y retarda el fraguado del cemento (SIMATUPANG, 1986; SIMATUPANG et al., 1978). El ataque de la biomasa vegetal por los álcalis presentes en el cemento puede convertir parcialmente las hemicelulosas en

polímeros de azúcar, ocasionando problemas para el fraguado del pegante (READING, 1985). Los azúcares solubles contenidos en la madera afectan al proceso de hidratación del cemento (RASHWAN et al., 1992). En la madera “Meleze” la sustancia arabinogalactan, contenida en los extractivos solubles en el agua, es la causa de su incompatibilidad con el cemento (YAMAGISHI et al., 1980).

En algunos casos un contenido de 0,5% de azúcar es suficiente para provocar el surgimiento de fisuras de hinchamiento en el CBC disminuyendo considerablemente su resistencia mecánica (LIEBER & RICHARTZ, 1972). En el caso específico de la glucosa (a 1%) se observó una completa inhibición del fraguado del cemento (SIMATUPANG, 1986). Glucosa, sacarosa y fructosa – azúcares presentes en el bambú, se mostraron altamente negativos al fraguado del cemento (BERALDO, 1994).

Los cementos convencionales no presentan gran diferencias en sus composiciones elementales (arcilla y caliza) pero solamente en los porcentajes de los constituyentes obtenidos. De una manera general los cementos son constituidos por mezclas controladas de silicatos e aluminatos de calcio, combinadas de acuerdo con las especificaciones técnicas. En la química del cemento se adopta la siguiente terminología:

- C_3S – silicato tricalcico ($3CaO.SiO_2$);
- C_2S – silicato bicalcico ($2CaO.SiO_2$);
- C_3A – aluminato tricalcico ($3CaO.Al_2O_3$),
- C_4AF – hierro-aluminato tetracalcico ($4CaO. Al_2O_3.Fe_2O_3$);
- Otros (yeso, etc.).

En la reacción de hidratación del cemento los granos de C_3A producen iones Ca^{++} y OH^- y el pH de la solución se eleva hasta 12. Las concentraciones de los iones crecen hasta alcanzar un valor crítico a partir de lo cual se reduce la cristalización de los silicatos de calcio hidratados. Los constituyentes de la biomasa vegetal, tales como los azúcares, los ácidos derivados, los gluconatos, entre otros, reaccionan con los iones del cemento formando productos complejos. Entonces los granos de C_3A son involucrados por una capa de compuestos orgánicos, lo que reduce o impide la difusión de los iones (HACHMI & CAMPBELL, 1988).

Las reacciones inhibitorias se pueden desarrollar en la frontera (interface) entre la biomasa vegetal – cemento, y adelgazan las uniones mecánicas y químicas entre esos constituyentes. Terpenos, resinas e sustancias grasas pueden migrar para la superficie de la biomasa vegetal mientras se procesa su secado. La formación de esta capa hidrófoba reduce la cantidad de los puentes de hidrógeno formados, lo que implica en una reducción de la resistencia de esa capa (MILLER & MOSLEMI, 1991).

La hipótesis de que esa membrana externa retardaba el fraguado del cemento es conocida hace mucho tiempo (SANDERMANN et al., 1960). Sin embargo, no hubo una explicación racional en cuanto al mecanismo de formación y a la naturaleza de esa membrana. Análisis de las interacciones entre el cemento y diversos productos (aluminatos, carbohidratos, etc.) evidenciaron la formación de complejos estables en la solución, que se precipitan y envuelven los granos de C₃A (CASU et al., 1980).

Los compuestos de fenol y los taninos presentan la capacidad de combinarse con los iones metálicos del cemento, lo que puede impedir las reacciones de hidratación. La madera *A. mangium* muestra una gran concentración de sustancias ricas en fenol y es considerada entonces como no compatible con el cemento. Los extractivos de esa madera, impregnados en la madera *C. obtusa* (considerada compatible con el cemento), proporcionarán en esta última un alto grado de incompatibilidad (TACHI et al., 1988), comprueban el efecto desfavorable del fenol en el fraguado del cemento.

Un procedimiento similar, adoptado por BERALDO (1994), evidenció el papel nefasto de los extractivos presentes en las partículas de bambú en el fraguado del cemento. Partículas de bambú fueron hervidas en agua durante 2 h, obteniéndose una solución de coloración amarilla oscura. Después que la solución se enfrió se hicieron varios experimentos reemplazando parcialmente el agua necesaria en la fabricación de la pasta de cemento por aquella derivada de la solución originaria de las partículas de bambú. La disminución de la resistencia mecánica de la pasta de cemento fue fuertemente acentuada (hasta en 90% cuando se reemplazó totalmente en el agua por la solución).

En otro experimento el autor también comprobó este efecto inhibitorio de los extractivos del bambú. El CBC a base de la madera Abeto (*Abies* sp), madera considerada compatible con el cemento, se cambió totalmente su comportamiento cuando las partículas de esa madera fueron saturadas preliminarmente en una solución derivada de los extractivos

de las partículas de bambú (Figura 1). La resistencia en compresión del testigo (3,5 MPa) fue reducida por el mismo valor obtenido para el CBC a base de partículas naturales de bambú (0,5 MPa), corroborando el efecto nocivo de los constituyentes químicos del bambú al fraguado del cemento.

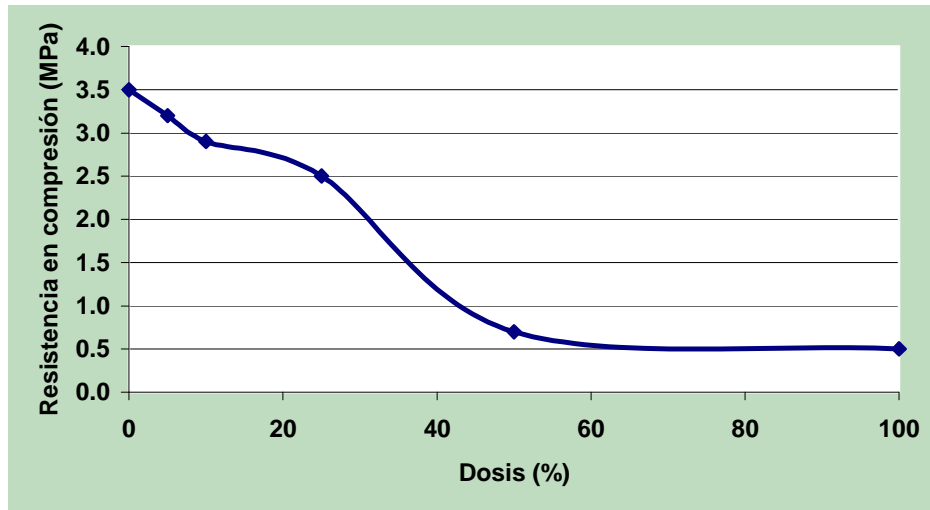


Figura 1 – Efecto del dosis (%) de la solución de extractivos de las partículas de bambú en la resistencia en compresión del CBC de partículas de *Abies* sp.

La madera brasileña “Seringueira” (*Hevea brasiliensis*), introducida en Malasia para la producción del caucho, presentó una gran incompatibilidad con el cemento, sobretodo por su constitución química muy fuerte en azúcares (1,0 hasta 2,3%) y en almidón (7,5 hasta 10,2%).

FISCHER et al. (1974) afirmaran que las sustancias nocivas del cemento son los carbohidratos solubles obtenidos por la difusión de los azúcares presentes en la biomasa vegetal, y a su conversión en ácidos sacarídicos. Todavía, KENNERS & RICHARDS (1954) y SIMATUPANG (1986) verificaron la predominancia de la formación del ácido láctico en respecto a aquella del ácido sacarídico, cuando la glucosa y la fructosa son degradadas en presencia de los álcalis.

Análisis efectuados en cromatografía de capa fina (“thin layer”) y por la determinación espectrofotométrica evidenciaron que los constituyentes perturbadores del

fraguado del cemento fueron los azúcares y los ácidos lignosulfónicos (BROKER & SIMATUPANG, 1973).

La análisis de la pasta de cemento que tuvieran preliminarmente contacto con maderas mostró la presencia de una cantidad importante de oligosacáridos para el caso de la madera “Hetre” (*Fagus sylvatica*) y de glucosa en la madera “Bouleau” (), de acuerdo con SIMATUPANG (1986).

Los azúcares ácidos y sus derivados son cerca de 10 veces mas inhibidores a la hidratación del C3A de que la glucosa y entre ellos el glucoheptato de calcio es uno de los mas grandes retardadores del fraguado del cemento (MILLESTONE, 1977).

Las características del CBC dependen fundamentalmente de las interacciones positivas entre la biomasa vegetal y el cemento. Los tratamientos preliminares efectuados en la biomasa vegetal minimizan el problema de su incompatibilidad con el cemento y se puede entonces lograr la obtención de CBC con adecuada resistencia mecánica (HACHMI & CAMPBELL, 1988).

Aún, en el estudio de la interacción entre la biomasa vegetal y el cemento no se debe considerar solamente la concentración de las sustancias inhibidoras, si no también su naturaleza (terpenos, ácidos grasos, taninos, carbohidratos, etc.). Las sustancias solubles en agua son las mas inhibidoras al fraguado del cemento (HACHMI & MOSLEMI, 1989).

La consecuencia de la elección de una biomasa vegetal inadecuada puede ser catastrófica sobre un punto de vista de industrialización del CBC. Ha sido propuesto, incluso, la eliminación sistemática del empleo de maderas ricas en taninos, o de maderas tropicales, en la fabricación del CBC (LIGNUM, 1960). Esa propuesta si fuera aceptada no permitiría que se aprovecharan los desechos generados en agroindustria y en el procesamiento mecánico de gran parte de las maderas en países en desarrollo.

De una forma general y resumida se puede afirmar que el efecto nocivo de la incompatibilidad química entre la biomasa y el cemento es un fenómeno de mas fácil verificación que de su real comprensión, pues se trata de algo muy complejo. Hasta hora ninguna teoría simple fue capaz de explicar los efectos de las variadas sustancias contenidas en la biomasa vegetal sobre los diferentes constituyentes del cemento (PIMIENTA et al., 1994).

IX FACTORES QUE AFECTAN LA COMPATIBILIDAD QUÍMICA ENTRE LA BIOMASA VEGETAL Y EL CEMENTO

En la parte precedente se abordó el efecto de la constitución química de la biomasa vegetal en el fraguado del cemento. Sin embargo, hay otros factores que están directamente relacionados con la concentración de las sustancias en la biomasa vegetal. Entre ellos:

- Naturaleza de la biomasa vegetal: los árboles de hojas anchas (Angiospermas dicotiledóneas) presentan un gran porcentaje de hemicelulosas que los árboles coníferas (Gimnospermas) y generalmente son más inhibitoras del fraguado del cemento (SIMATUPANG et al., 1978); todavía hay coníferas que son las excepciones a esta regla, como por ejemplo, Western larch (HOFFSTRAND et al., 1984). De acuerdo con SCHWARZ & SIMATUPANG (1984b), los porcentajes máximos de azúcares tolerados por el cemento también son diferentes por esos grupos de maderas situándose entre 0,4 y 0,5%, para las coníferas y entre 0,20 y 0,25%, para las otras.

Los desechos de gramíneas (caña de azúcar, arroz, maíz, trigo, bambú, etc.) presentan una gran concentración en azúcares y también son considerados inhibidores del fraguado del cemento no siendo así empleados en su forma natural.

- condición fitosanitaria: la madera de *Southern pine*, después de ser atacada por los organismos xilófagos, se presentó fuertemente inhibitora al fraguado del cemento y hubo necesidad de mezclarla con la madera sana para minimizar ese efecto negativo (WEATHERWAX & TARKOW, 1964, 1967). Por otro lado, BIBLIS & LO (1968) encontraron resultados opuestos al de los autores precedentes. En un primer momento se puede imaginar la hipótesis de que los organismos xilófagos se alimenten de sustancias contenidas en la biomasa vegetal, disminuyendo sus efectos inhibitorios sobre el fraguado del cemento. Por otro lado los productos de esta acción pueden ser tan inhibitorios como lo habían sido las sustancias originarias, lo que explica esa aparente contradicción entre los autores. BERALDO & CARVALHO (2004) observaron que la madera de *Eucalyptus grandis* talada en invierno y que permaneció 6 meses en la floresta produjo compuesto no aceptable con el cemento.

- anatomía: la corteza de la madera *Southern pine* es mucho mas inhibidora que la albura (cerca de 9 veces) y el corazón (cerca de 2,5 veces), cuando se comparan sus índices de compatibilidad¹ (WEATHERWAX & TARKOW, 1967; BIBLIS & LO, 1968). Esos diferentes comportamientos pueden ser explicados por la naturaleza y por los porcentajes de las sustancias contenidas en cada región anatómica del árbol.

- época de tala: esto es un factor muy importante en la compatibilidad química con el cemento, pues los porcentajes de los extractivos contenidos en la biomasa vegetal no son constantes en todas las épocas del año. Pruebas realizadas en coníferas alemanas por FISCHER et al. (1974) evidenciaron este aspecto. Las muestras fueron retiradas en tres posiciones del árbol (10%, 50% y 80% de la altura total). Se pudo observar una notoria diferencia en los porcentajes de los azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa) de acuerdo con la época de tala del árbol. Bajo las condiciones evaluadas los autores concluyeron que los porcentajes en azúcares fueran mas elevados en el mes de abril (primavera); los valores mas reducidos fueran obtenidos para una especie en agosto (verano) y para las otras tres en mayo (primavera). BERALDO & CARVALHO (2004) investigaron dos épocas de tala de la madera de *E. grandis* en las propiedades del compuesto a base de cemento. Los autores concluyeron que la tala del árbol efectuada en invierno fue mucho mas interesante para las propiedades del compuesto. En invierno ocurre una reducción del metabolismo del árbol y por supuesto principalmente los vasos presentan una concentración menos rica en sustancias nutritivas. En una investigación similar con la especie *Western larch*, BIBLIS & LO (1968) obtuvieron una mayor concentración en almidón para madera procesada en la primavera.

- altura del árbol: para la madera Peuplier (*Populus* sp), FISCHER et al. (1974) obtuvieron los porcentajes mas elevados de azúcares en la parte mas alta del árbol (80% de la altura total). BERALDO & CARVALHO (2004) hicieron una investigación muy completa a cerca del compuesto cemento y partículas del *E. grandis*. En algunos casos evaluados los compuestos derivados de las partículas obtenidas de la parte superior del árbol presentaron propiedades mecánicas aceptables.

- edad del árbol: a medida que el árbol crece hay un cambio en las proporciones entre los tejidos de la albura y del corazón, estas dependen de la región del árbol de acuerdo

¹ Presentado en el tópico siguiente

con su altura. Los compuestos producidos con partículas del árbol juvenil no tienen una buena estabilidad dimensional (PUGEL et al., 1990) y eso es un factor importante a considerarse en caso del empleo de especies vegetales de rápido crecimiento. BERALDO & CARVALHO (2004) obtuvieron resultados más satisfactorios para compuestos a base de partículas de árboles de 5 años de *E. grandis* en comparación con otras edades (3 años y 8 años).

- condiciones de almacenamiento: las dosis en azúcares y otros productos inhibidores pueden modificarse mientras se procesa el almacenamiento de la biomasa vegetal. SCHWARZ & SIMPATUPANG (1984a) obtuvieron para la madera Hêtre (*Fagus sylvatica*) las dosis en azúcar de 0,1% (madera secado al aire en ambiente protegido) y 0,2% (madera poco protegida). La madera Seringueira (*Hevea brasiliensis*) presentó una considerable disminución en su dosis de azúcar y de almidón después de 10 semanas de almacenamiento. De acuerdo con SCHWARZ (1988) transformaciones debidas a las enzimas disminuyen las dosis en azúcares contenidas en la biomasa vegetal. Por otro lado, LEE et al. (1987) no obtuvieron diferencias significativas en la calidad del compuesto cuando la biomasa vegetal fue almacenada al aire libre o bajo 7 °C.

SIMATUPANG et al. (1978) confirmaron que el almacenamiento de la madera provocó disminución en los contenidos del almidón y de sures (sacarosa, fructosa e glucosa). En los casos de exposición a las intemperies algunos constituyentes de la biomasa pueden ser parcialmente eliminados por las lluvias, lo que puede favorecer la obtención de compuestos de adecuado comportamiento mecánico.

Todavía estos efectos favorables del almacenamiento sobre el contenido de los azúcares no pudieron ser observados en el caso de los compuestos a base de fenoles, que no presentaron disminuciones importantes después de transcurridos 3 meses de almacenamiento (SIMATUPANG, 1986; VALENZUELA, 1989).

La más grande parte de las investigaciones fueron desarrolladas analizando partículas de maderas. Si embargo, problemas de compatibilidad química con el cemento también fueron destacados para el caso del empleo de partículas de bambú. BERALDO (1994) relató que mientras el contenido de los azúcares del bambú *Phyllostachys viridis*

hayán disminuido considerablemente después de 2 años de almacenamiento en condiciones protegidas, los valores finales se quedarán tan elevados que impedirán el fraguado del cemento. El autor utilizó la cromatografía líquida (HPLC) para analizar las diferentes soluciones obtenidas y comparar el efecto combinado del almacenamiento de las partículas (1 y 2 años) y de la duración del tiempo de calentamiento (1 y 2 horas), conforme se presenta en la Figura 2.

Utilizando la misma técnica el autor comparó diferentes bambúes: *Dendrocalamus giganteus* – DG; *Bambusa tuldoidea* – BT y *Phyllostachys viridis* – PV). En la Figura 3 se puede observar las diferencias acentuadas en los contenidos de los azúcares de los bambúes tropicales (DG y BT) y del bambú de clima temperado (PV). Incluso, el efecto de la anatomía también se puede destacar pues se confirmó que las partículas de bambú obtenidas de sus capas externas (PVE) presentan menor concentración de azúcares y por supuesto son mas durables.

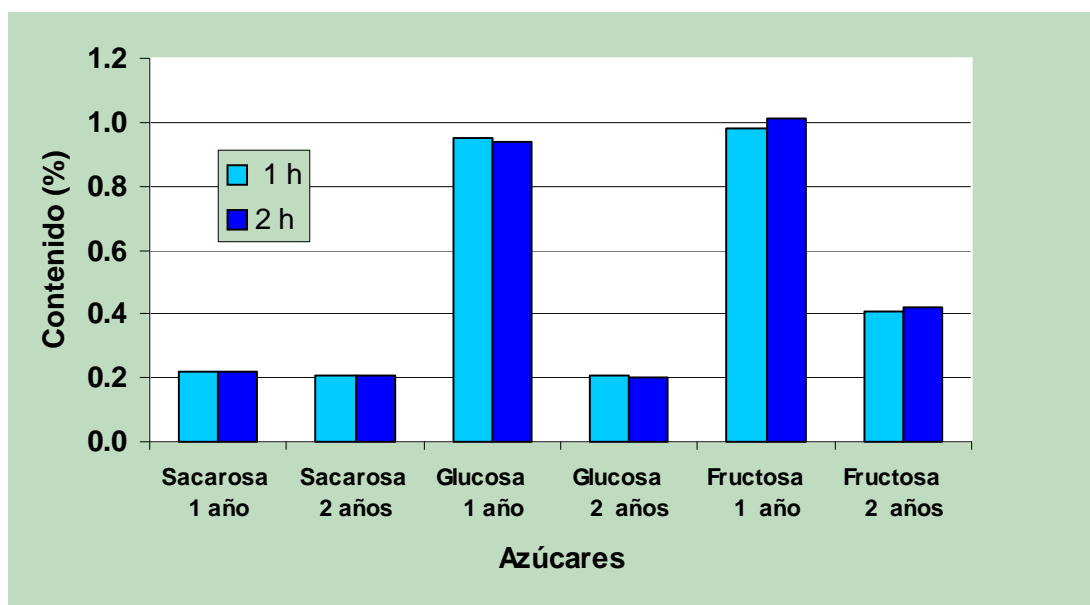


Figura 2 – Contenido en azúcares del bambú (*P. viridis*) en función del almacenamiento y de la duración de calentamiento.

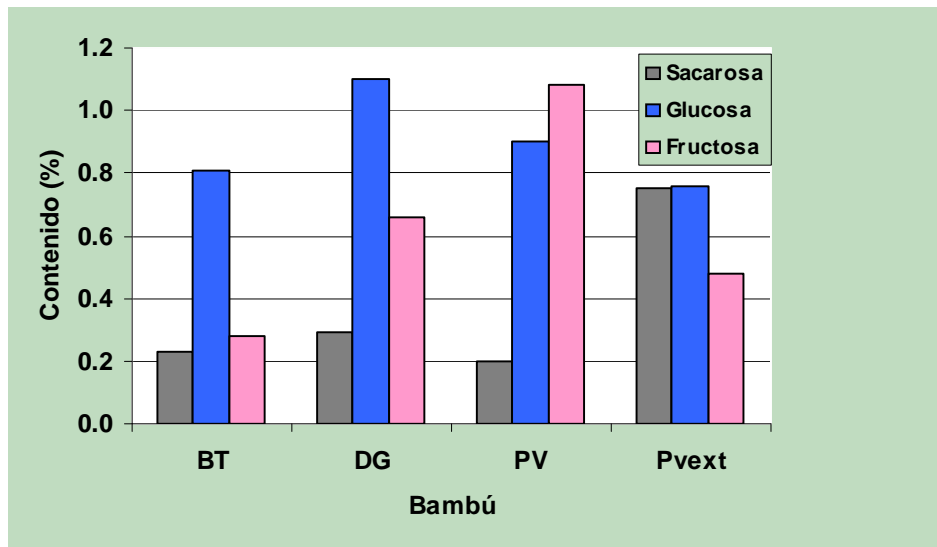


Figura 3 – Contenido de azúcares para diferentes especies de bambúes.

BT = *Bambusa tuldoides* DG = *Dendrocalamus giganteus*

PV = *Phyllostachys viridis* Pvext = partículas de las capas externas

X EVALUACIÓN DE LA COMPATIBILIDAD QUÍMICA ENTRE EL CEMENTO Y LA BIOMASA VEGETAL

La evaluación del comportamiento de una biomasa vegetal en presencia del cemento puede ser efectuada de dos maneras distintas. Una alternativa es cuantificar los parámetros de la curva de hidratación de la mezcla y la otra requiere del análisis del comportamiento mecánico del compuesto.

a) Curva de hidratación

La interacción entre la biomasa vegetal y el pegante inorgánico es expresada en la curva de hidratación de la mezcla. Se puede verificar el nivel de compatibilidad entre los constituyentes comparado con los valores obtenidos con los mismos datos correspondientes en una pasta pura de cemento. Los datos colectados son la temperatura máxima alcanzada por la mezcla, el tiempo para que esto ocurra y también la pendiente de la curva.

Los primeros investigadores que se interesaron por este tema colocaban las mezclas en frascos de Dewar y anotaban los datos de tiempo y de temperatura obtenido (SANDERMANN et al., 1960; WEATHERWAX & TARKOW, 1964, 1967). Esto no era una tarea muy fácil porque en muchos casos, sobretodo para biomazas altamente inhibitorias, el máximo valor de temperatura se produce después de un tiempo muy largo. En otros casos a veces ocurre una reacción endotérmica, ó sea, la temperatura jamás aumenta.

Actualmente con el empleo de placas de adquisición de datos el estudio de este fenómeno se tornó más dinámico. Las mezclas son involucradas en papel de aluminio y colocadas en cajones aislados con poliestireno expandido(EPS); entonces termopares son introducidos en las mezclas y se cierra los cajones. Se puede reglar el intervalo de tiempo para la adquisición de los datos y explotarlos para una planilla de cálculos.

Los datos obtenidos en las curvas de hidratación dependen de una serie de factores. La proporción entre los constituyentes de la mezcla (cemento : biomasa vegetal : agua), la naturaleza de la biomasa y la distribución de tamaño de sus partículas, el tipo de cemento empleado (normal, puzolánico, de fraguado rápido, etc.) y la calidad del agua, por ejemplo, modifican de forma acentuada las características de las curvas de hidratación.

En el experimento se emplea 200 g de cemento, 15 g de biomasa absolutamente seca e 90,5 g de agua (SANDERMANN et al., 1960). La masa de agua es obtenida por medio del siguiente cálculo: 0,25 veces la masa de cemento adicionado de 2,7 veces la masa de la biomasa seca. La razón másica cemento : la madera es mucho mas elevada (13,13 veces), siendo totalmente diferente a la que es empleada en una aplicación comercial (de la orden de 3 veces). De esta manera un éxito en el formato de la curva de hidratación no garantiza la compatibilidad química de la biomasa con el cemento. Se puede afirmar que este ensayo es una condición necesaria pero no suficiente para probar la adecuada biomasa para la fabricación del compuesto con el cemento.

La distribución del tamaño de las partículas vegetales desempeña un papel muy importante para los resultados de la curva de hidratación. Los investigadores recomiendan el empleo de materiales retenidos en tamices #200 (0,074 μm). Todavía, la disminución de tamaño de las partículas vegetales es una tarea complicada necesitando mucho tiempo de operación en molinos especiales.

ZUCCO (1999) investigó curvas de hidratación de diferentes mezclas de cemento y cascarilla de arroz (con variadas distribuciones del tamaño de las partículas). El autor indicó no haber diferencia significativa entre los efectos de las partículas retenidas en las tamices #200 y #100 (0,149 μm), sobre los parámetros de las curvas de hidratación (temperatura máxima y tiempo necesario para su ocurrencia). Todavía, para los materiales retenidos en tamices #50 (0,290 μm) y #30 (0,350 μm) se observaron cambios acentuados en los aspectos de las respectivas curvas de hidratación, confirmando informaciones de la literatura: cuanto más pequeñas son las partículas más grandes son sus efectos al fraguado del cemento.

Parámetros de una curva de hidratación

El método calorimétrico es los mas empleado para evaluar la interacción entre la biomasa vegetal y el cemento, y varias son las posibilidades de efectuar el análisis de esta compatibilidad (SANDERMANN et al., 1960; WEATHERWAX & TARKOW, 1964, 1967; MOSLEMI & LIM, 1984; VALENZUELA, 1989). En todos los casos los investigadores hacen comparaciones entre los datos de las diferentes mezclas con aquellos correspondientes a la pasta de cemento, buscando determinar el índice de compatibilidad (I_c).

- a) Temperatura máxima: cuanto más favorable es el medio a las reacciones de hidratación del cemento mas grande es la temperatura alcanzada por las mezclas. En determinadas situaciones biomosas “retardadoras” producen un máximo de temperatura después de mucho tiempo que la pasta de cemento, notandose su inadecuación para el empleo en la industria (ejemplo teórico en Figura 4). Todavía hay que tener en cuenta la capacidad de aislamiento del calorímetro para que no se logre errores en las mediciones. En ciertos caso, la energía liberada en la reacción puede ultrapasar 145 J/g, mientras que para biomosas inhibitoras este valor se reduce hasta 10 J/g (JAIN et al., 1989).

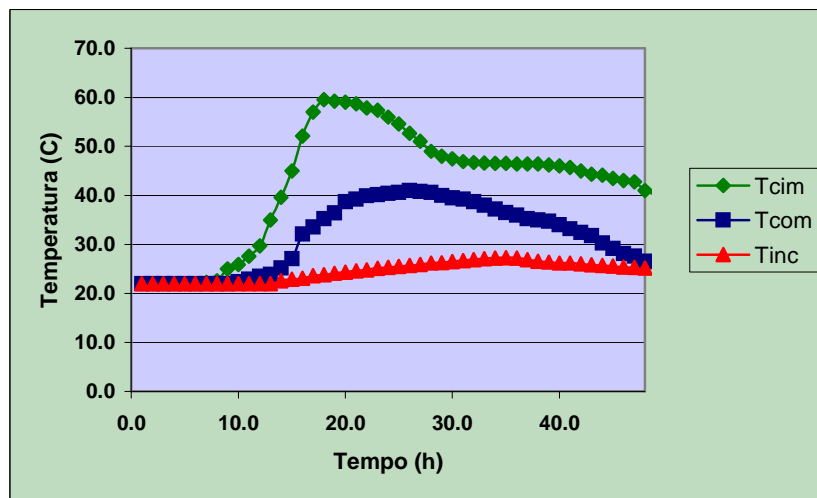


Figura 4 – Ejemplo teórico de curvas de hidratación de la pasta de cemento (T_{cim}), de mezclas con biomasa compatible (T_{com}) y no compatible (T_{inc}).

Los pares ordenados (temperatura máxima y tiempo para su ocurrencia) para cada caso presentado son: pasta de cemento (59,2 °C; 8,5 h), biomasa compatible (41,0 °C; 12,5 h) y no compatible (27,3 °C; 17,0 h). El índice de compatibilidad es calculado por:

$$I_c = \frac{\theta_{cim} - \theta_{mis}}{\theta_{cim}} * 100\%$$

Cuanto mas pequeños son los índices mas compatible es la biomasa (el ideal sería 0%). Aún, en este calculo existe la posibilidad teórica (pero muy improbable que ocurra en la practica) de que una biomasa sea tan inhibitoria al fraguado del cemento que el máximo de temperatura, mientras sea cercana a la de la pasta de cemento, ocurra solamente después de un intervalo de tiempo muy largo. Otra posibilidad (esta es mucho más frecuente) es la inexistencia del máximo de temperatura; también en algunos casos la reacción de hidratación puede ser endotérmica: ocurrido un intervalo de tiempo muy pequeño después de colocar los termopares se produce un ligero aumento de temperatura y no aumenta más.

Para el ejemplo teórico presentado en la Figura 4 los índices de compatibilidad de compatible y no 30,74% (biomasa compatible) y de 53,86% (biomasa no compatible).

- b) Tiempo para que ocurra la temperatura máxima: esta es otra forma para evaluar la compatibilidad entre el cemento y la biomasa. Existen dos materias-primas distintas que pueden presentar los mismos tiempos para la ocurrencia de la temperatura máxima, pero estas temperaturas máximas puedan ser completamente diferentes. Los comentarios hechos en el ítem anterior también se aplican a este caso.

El índice de compatibilidad es calculado por:

$$I_C = \frac{t_{mis} - t_{cim}}{t_{cim}} * 100\%$$

Para el ejemplo teórico presentado en la Figura 4 los índices de compatibilidad para las biombras compatibles y no compatibles fueron de 47,06% y de 100,00%, respectivamente.

- c) Pendiente máxima: la tasa máxima de elevación de la temperatura puede ser más representativa de la eficiencia de la reacción de hidratación del pegante, aunque, teóricamente puede ocurrir las mismas pendientes para dos mezclas distintas, pero con intervalo de inicio de elevación de temperatura muy diferentes.

El índice de compatibilidad es calculado por:

$$I_C = \frac{s_{cim} - s_{mis}}{s_{cim}} * 100\%$$

Para el ejemplo teórico presentado en la Figura 4 los índices de compatibilidad para las biombras compatibles y no compatibles fueran de 69,14% y de 95,43%, respectivamente.

- d) Índice combinado: en el trabajo de MOSLEMI & LIM (1984) fue introducido un nuevo índice para evaluar la compatibilidad entre la biomasa vegetal y el cemento. Los investigadores efectuaron una combinación entre los índices presentados anteriormente por medio de:

$$I_c = 100 * \frac{(t_c - t_m)}{t_c} * \frac{(\theta_c - \theta_m)}{\theta_m} * \frac{(s_c - s_m)}{s_c}$$

Para los datos presentados en la Figura 4, los índices para biomasas compatibles y no compatibles fueron 10,00% y 51,40%.

e) Razón entre las áreas: los gráficos de las curvas tiempo versus temperatura delimitan en cierta área. De esta manera MILLER & MOSLEMI (1991) propusieron comparar las áreas referentes a la curva de la pasta pura de cemento con aquellas correspondientes a las mezclas derivadas de las diferentes biomasas vegetales. Mientras el inicio de las curvas sea determinado por el registro del tiempo ($t = 0$), la selección del tiempo final para completar la integración de las curvas puede ser considerada de dos maneras distintas:

e1) por el tiempo para que ocurra la temperatura máxima de la pasta de cemento (generalmente en cerca de 6 h a 8 h);

e2) por un determinado tiempo, por ejemplo, 24 h después de efectuar las mezclas. En los dos casos es más prudente eliminar los efectos externos, o sea, computando los aumentos de temperatura con relación a la temperatura del medio ambiente (idealmente considerada constante).

Utilizando esta técnica BERALDO (1994) pudo confirmar el efecto nocivo de 0,1% de azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa) en el fraguado del cemento. La sacarosa retardó considerablemente la reacción de hidratación y el máximo de temperatura de la pasta de cemento solamente ocurrió después de 38 h (Figura 5). Concentraciones más elevadas en fructosa afectaron acentuadamente las curvas de hidratación de las mezclas con el cemento (Figura 6).

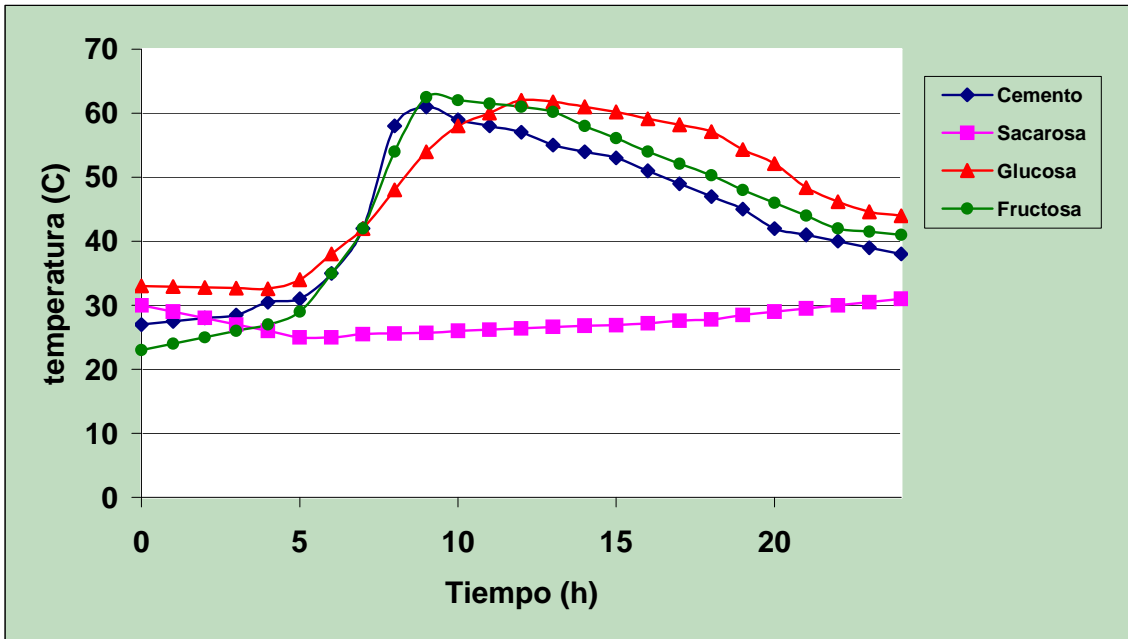


Figura 5 – Efecto de la adición de 0,1% de azúcares en las curvas de hidratación de mezclas con el cemento.

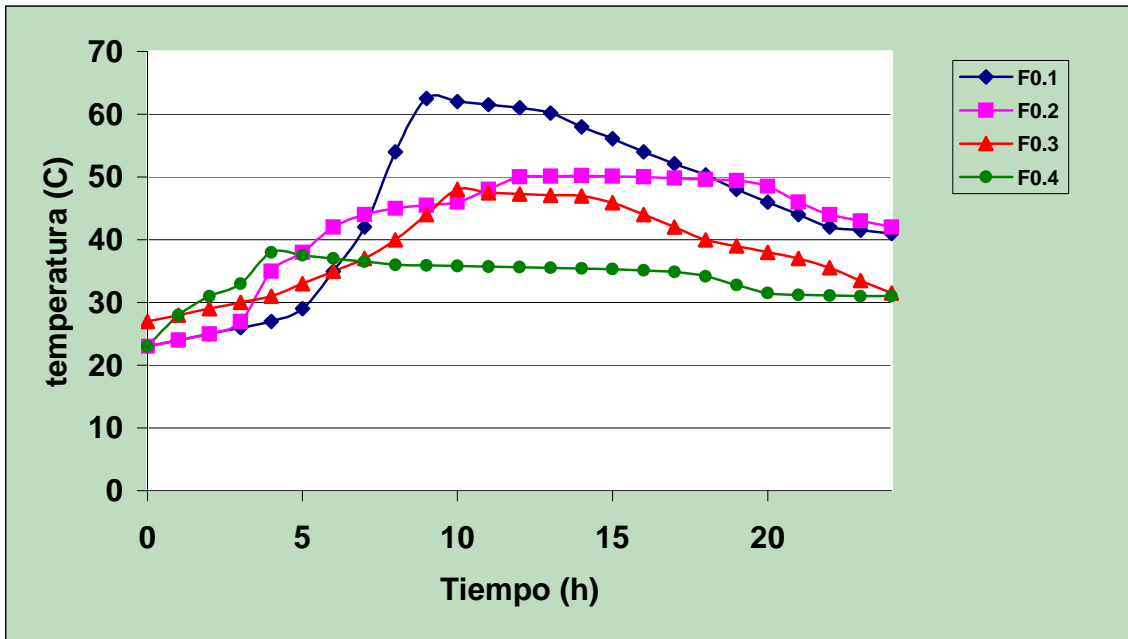


Figura 6 – Efecto del porcentaje en fructosa en las curvas de hidratación de mezclas con el cemento.

b) Evaluación de la compatibilidad entre biomasa vegetal y cemento por medio de ensayos destructivos y no destructivos (ultrasonido)

b1) Ensayo mecánico

Varios investigadores correlacionaron la compatibilidad química con los resultados obtenidos en ensayos mecánicos (LEE et al., 1987; LEE & SHORT, 1989; VALENZUELA, 1989; MILLER & MOSLEMI, 1991). Cuando hubo compatibilidad química entre los constituyentes del CBC, ocurre una adecuada hidratación del cemento y se puede imaginar la existencia de una red de silicatos conectando las partículas vegetales. En caso contrario, sustancias inhibidoras son extraídas de la biomasa vegetal y se ubican en su superficie creando una capa (interface) no conectada al pegante. En caso de la total incompatibilidad las partículas vegetales se quedan completamente sueltas en la mezcla.

Sin embargo, para MOSLEMI & PFISTER (1987), LEE & SHORT (1989) y MILLER & MOSLEMI (1991) las características de la curva de hidratación (temperatura máxima y tiempo para su ocurrencia) de las mezclas no parecen correlacionarse con los datos obtenidos en ensayos de flexión estática o de compresión diametral (splitting test). De acuerdo con los investigadores hay otros factores que interfieren, sobretodo la anatomía particular de una dada biomasa vegetal y la forma de fractura de sus partículas, con implicaciones acentuadas en la adherencia de la biomasa vegetal con el pegante.

La constatación del efecto inhibitor de los azúcares en la resistencia mecánica de pastas de cemento fue verificada por BERALDO (1994). La adición de 0,5% de sacarosa redujo la resistencia en compresión de la pasta de cemento en solamente 10% del valor testigo (Figura 7).

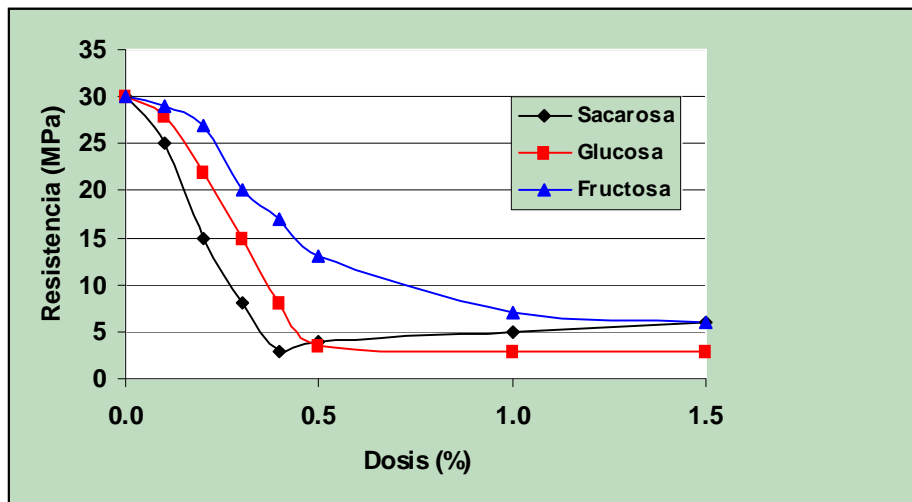


Figura 7 - Efecto de la adición de dosis de azúcares en la resistencia en compresión de la pasta de cemento.

b2) Ensayo no destructivo (ultrasonido)

Hace mucho tiempo que se emplean ensayos no destructivos (Non Destructive Evaluating Tests – NDE ó NDT) en la evaluación de las propiedades de los materiales tradicionales, sobretodo el acero y el hormigón. Esta técnica permite detectar la presencia de defectos internos en estos materiales y, en caso específico del hormigón, este método es utilizado para acompañar la evolución de la hidratación de los constituyentes del cemento. Esta propiedad particular de los materiales es traducida de una manera global por la mensuración del tiempo necesario para la propagación de la onda del ultrasonido a través de una probeta (y consecuentemente se obtiene la velocidad de propagación).

Para los casos de los compuestos a base de cemento la velocidad de propagación es función de una gran serie de parámetros aún en la naturaleza de la biomasa vegetal y sea la mas importante:

- edad de la probeta: a medida que ocurre el envejecimiento la red de silicatos hidratados se vuelve cada vez mas importante, hasta que los cambios sean tan imperceptibles que el aparato de ultrasonido no los detecte mas.

- humedad: en varios materiales se observa que la velocidad de propagación varía con el inverso de la humedad. Para el caso específico de la madera ocurre una estabilización de la velocidad de propagación abajo del punto de saturación de las fibras (alrededor de 30%).

- tipo de cemento: mientras todos los cementos sean constituidos de silicatos de calcio, aluminio y hierro, las diferentes proporciones empleadas en su fabricación (y sobretodo el porcentaje de C_3A) producen compuestos con características propias de fraguado. De esta forma la velocidad de formación de la red de silicatos hidratados es diferente, lo que permite que el ultrasonido detecte esas particularidades.

- tipo y dosis de los aditivos: los aditivos aceleradores o retardadores son empleados para controlar la velocidad del fraguado del cemento. En los compuestos de biomasa vegetal generalmente se utilizan aceleradores buscando crear condiciones más favorables al pegante y se puede evaluar sus efectos por el ultrasonido.

- proporción entre los constituyentes: cuando se mide la velocidad de propagación a través de un cuerpo, en realidad se mide un tiempo promedio necesario para que la onda efectúe su recorrido en un medio heterogéneo. De esta manera en los compuestos a base de cemento, la proporción entre el cemento, la arena, la grava (o las partículas vegetales) y la agua desempeñan un papel fundamental en la propiedad final del material.

- tipo del curado: en la fabricación de los productos a base del cemento se debe evitar la pérdida prematura del agua para que se procese la hidratación de los constituyentes del cemento. Se observa este efecto de forma más pronunciada cuando se efectúa el curado por carbonatación en las edades iniciales.

Evolución de la velocidad de propagación del ultrasonido con la edad

La detección de la señal del ultrasonido solo se vuelve posible cuando exista una estructura mínima para permitir el recorrido de la onda sonora. En las primeras horas aún no se forman los productos hidratados del cemento y el pegante presenta un período de latencia (donde la temperatura se mantiene constante hasta 4 h). Aunque sea posible inspeccionar la evolución de la velocidad del ultrasonido en el CBC en las primeras horas, el más usual es efectuar mediciones diarias.

La ley que comanda la evolución de la velocidad del ultrasonido para materiales a base del cemento se puede definir por:

$$V_e = V_{\max} (1 - \exp(-ke)) \quad (1)$$

siendo:

V_e = velocidad del ultrasonido en la edad e (en días);

k = constante global de desaceleración.

Se verifica experimentalmente que los mayores cambios en la magnitud de la velocidad se presentan en los primeros días de edad; después se observa una tendencia de su estabilización alrededor de 7 días. Estos son datos evidentemente promedios pues el grado de desarrollo de la velocidad depende estrechamente de los factores presentados en el tópico precedente. Entonces de una manera simplificada se puede considerar los valores promedios de la velocidad del ultrasonido entre los 7 y los 10 días. Considerándose este valor como V_{\max} entonces se obtiene:

$$(V_{\max} - V_e) / V_{\max} = \exp(-ke) \quad (2)$$

$$\ln((V_{\max} - V_e) / V_{\max}) = -ke \quad (3)$$

Por regresión lineal se obtiene el coeficiente angular k , permitiendo conocer los parámetros de la curva correspondiente a la mezcla, presentada en la ecuación (1).

En las Figuras 8, 9 y 10 se presentan las curvas de ultrasonido obtenidas para los compuestos de partículas de bambú (*Guadua angustifolia*) combinadas con tres tipos de cemento brasileños (CP II, CP III y CP V).

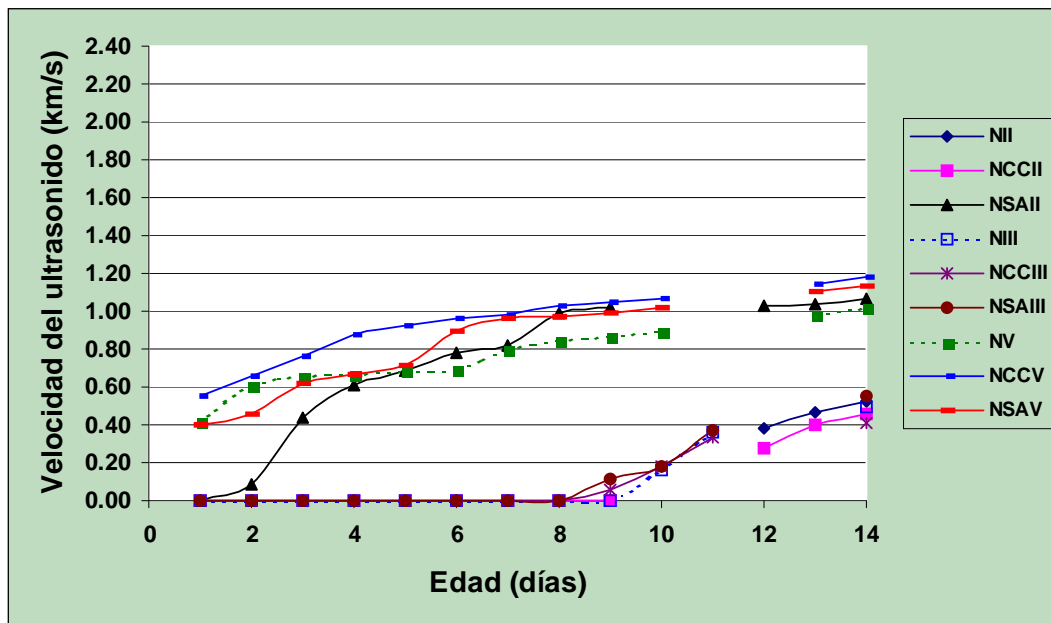


Figura 8 – Velocidad del ultrasonido para compuestos de partículas naturales de bambú.
N = Naturales **NCC** = Nat. + 5% Cloruro de calcio **NSA** = Nat. + 5% sulfato de aluminio.
 Tipos de cemento: **II**, **III** y **V** (fraguado rápido).

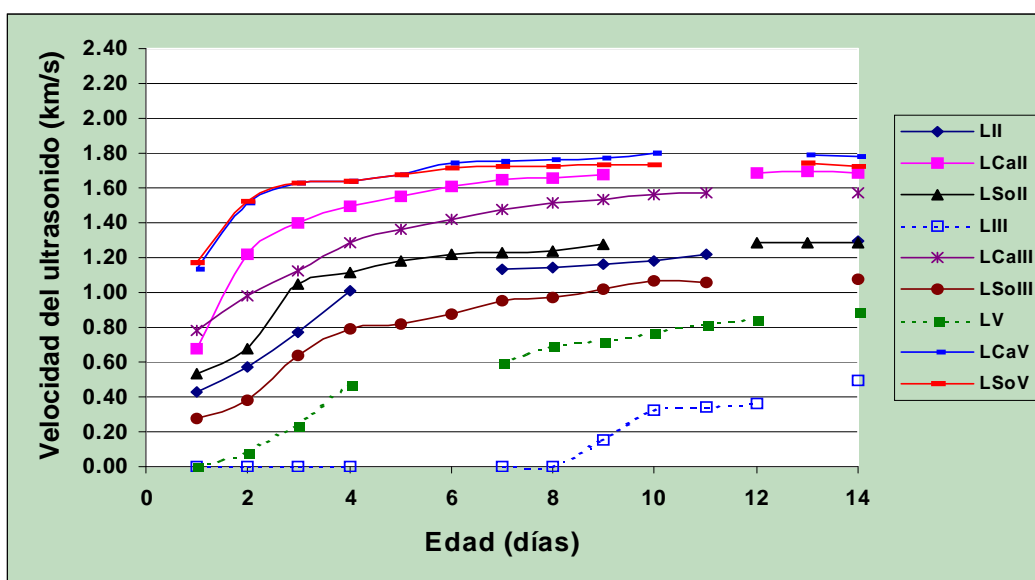


Figura 9 – Velocidad del ultrasonido para compuestos de partículas lavadas de bambú.
L = Lavadas **LCa** = Lavadas en hidróxido de calcio **LSo** = Lavadas en hidróxido de sodio.
 Tipos de cemento: **II**, **III** y **V** (fraguado rápido).

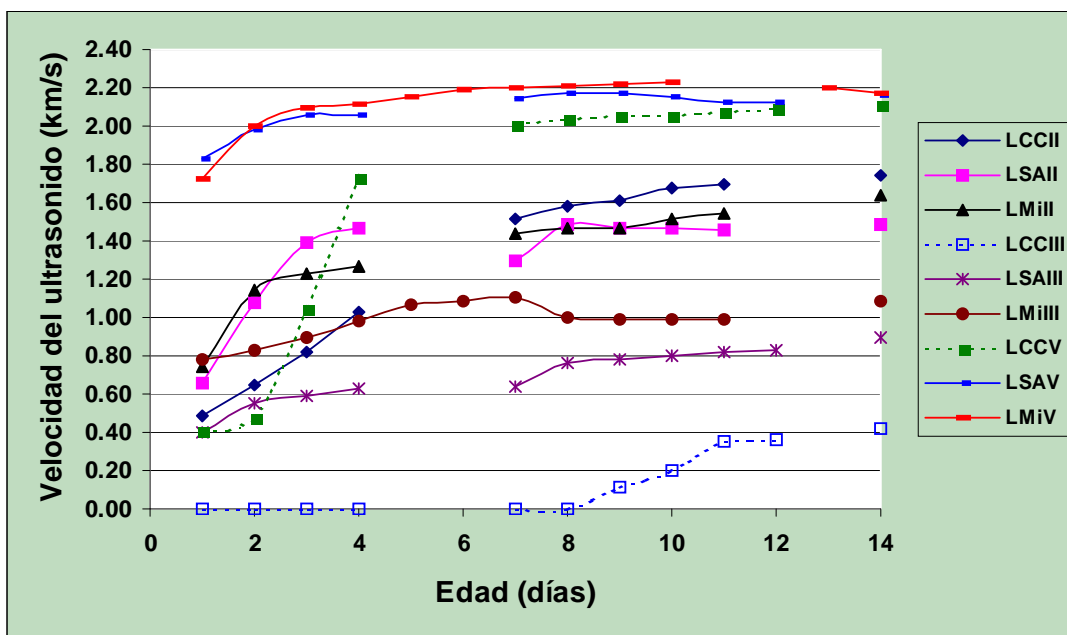


Figura 10 – Velocidad del ultrasonido para compuestos de partículas tratadas de bambú.
LCC = Lavadas + 5% ce cloruro de calcio **LSA** = Lavadas + 5% de sulfato de aluminio
LMi = Lavadas en solución de silicato de sodio (10%) y sulfato de aluminio (20%).
Tipos de cemento: **II**, **III** y **V** (fraguado rápido).

Correlación entre la velocidad del ultrasonido y la resistencia mecánica

Una de las mayores aplicaciones del ultrasonido es en la evaluación del comportamiento mecánico de un dato material. En materiales a base de cemento las edades para efectuar los ensayos mecánicos generalmente son a los 3, 7, 28 y 90 días. Para el CBC se puede observar que las reacciones de hidratación son mucho mas rápidas que para los materiales convencionales a base de cemento. Se trata de un material con una importante porosidad lo que implica una tasa de secado mucho mas efectiva. La carbonatación también se presenta en un grado mas intenso, favorecida por la combinación de condiciones óptimas de humedad y porosidad. Considerándose estas hipótesis se recomienda que los ensayos sean aplicados a los 28 días.

Varios investigadores estudiaron materiales diversos utilizando el ultrasonido y propusieron ecuaciones relacionando la velocidad del ultrasonido con la resistencia mecánica del material. Varios modelos matemáticos fueron propuestos y en caso del CBC los mas adecuados son:

$$R = A \exp(Bv) \quad (4)$$

$$R = Av^B \quad (5)$$

R = resistencia mecánica obtenida en un determinado ensayo;

v = velocidad del ultrasonido en el día del ensayo.

En las Figuras 11,12 y 13 se presentan los modelos matemáticos obtenidos para los compuestos de partículas de bambú Guadua y tres tipos de cemento brasileños.

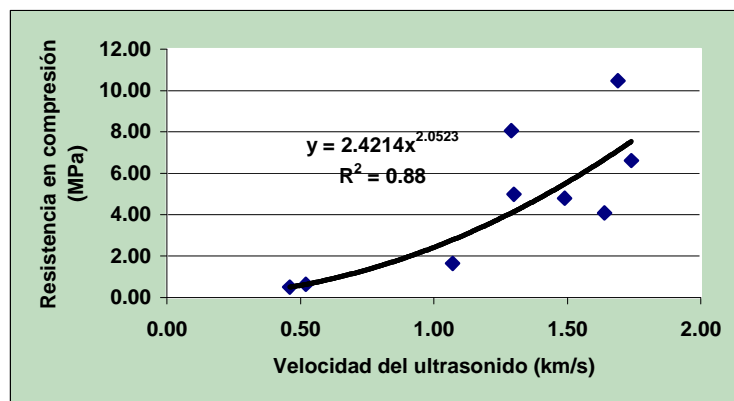


Figura 11- Compuestos de partículas de Guadua y cemento CP II.

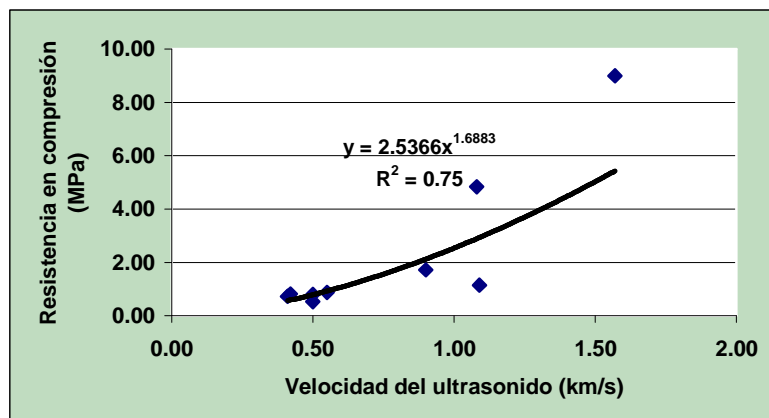


Figura 12- Compuestos de partículas de Guadua y cemento CP III.

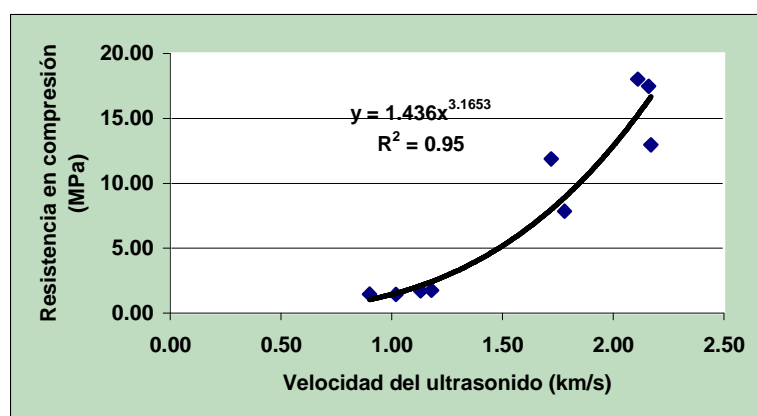


Figura 13- Compuestos de partículas de Guadua y cemento CP V.

Tratamientos para mejorar la compatibilidad entre la biomasa vegetal y el cemento

Por motivos de orden económico o geográfico a veces no se puede utilizar una materia prima más favorable al fraguado del cemento, o entonces la demanda es tan importante que no permite que se haga el almacenamiento de la biomasa vegetal. En estos casos se debe buscar alternativas que concilien los aspectos económicos y tecnológicos, adoptándose técnicas simples y confiables para minimizar los efectos nocivos de biomasa vegetal (SIMATUPANG et al., 1978). Todavía no hay una receta general que sea

utilizable para todas las biomásas vegetales mientras las alternativas globales se constituyan en dos categorías:

- a) eliminar y/o extraer las sustancias inhibidoras o
- b) minimizar su recorrido hacia la superficie de las partículas vegetales.

Las técnicas mas utilizadas para optimizar la interacción entre la biomasa vegetal y el cemento fueran propuestas por SIMATUPANG et al. (1988):

- envejecimiento: mientras se procese, pueden ocurrir reacciones debidas a la acción de las enzimas, modificando los extractivos contenidos en la biomasa vegetal en sustancias menos nocivas al fraguado del cemento. Todavía, dependiendo de las características propias de la biomasa vegetal y de la forma de procesar su envejecimiento, los resultados pueden no ser los esperados, pues la degradación no se produce y entonces en el proceso se generan sustancias tan inhibidoras como eran en las originales.

- extracción de los constituyentes inhibidores en solución acuosa: en su mayor parte las sustancias contenidas en la biomasa vegetal son extraíbles en agua o en soluciones acuosas. Todavía la eficiencia de ese proceso en el fraguado del cemento depende de la naturaleza de la biomasa vegetal (BIBLIS & LO, 1968; MOSLEMI & LIM, 1984; SCHWARZ & SIMATUPANG, 1984b; MOUGEL, 1992; RASHWAN et al., 1992).

Algunos parámetros deben ser considerados en la búsqueda del suceso de ese procedimiento:

- a) *pH de la solución*: los resultados obtenidos por los diversos investigadores son controvertidos en ese aspecto. Pero la biomasa vegetal tiene una naturaleza ácida mientras que el cemento se interesa en un ambiente básico para que realice su fraguado. De esa manera las soluciones alcalinas teóricamente son las mas adecuadas y entre ellas las mas utilizables son los hidróxidos de calcio y de sodio. También se debe tener en cuenta la necesidad de eliminar el exceso de sustancias adheridas en las partículas vegetales, normalmente se va haciendo un lavado de las partículas vegetales en agua corriente. Y por otro lado los desechos

originados en el tratamiento deben ser neutralizados o reemplazados en tratamientos posteriores.

- b) *Temperatura y duración de la extracción:* en el capítulo precedente se mostró esos efectos en los contenidos de azúcares presentes en las partículas del bambú *P. viridis*. Sobre todo los azúcares son fácilmente extraíbles en temperaturas superiores a 50 °C y para duraciones de extracción superiores a media hora. En algunos casos duraciones más largas pueden degradar las hemicelulosas y liberar sustancias aún más nocivas al cemento (IRLE & SIMPSON, 1992). En el caso de una instalación industrial hay que considerar los costos necesarios, sobre todo del calentamiento (mientras se pueda utilizar la biomasa vegetal excedente como fuente de energía) y la deposición y transporte de los desechos resultantes (HACHMI & CAMPBELL, 1988; YASHIN & QURESH, 1989). Una alternativa es el uso del agua a temperatura ambiente. El intervalo de tratamiento puede aumentar en forma significativa y en ese caso ocurre incluso la acción del ataque de las enzimas con consecuencia a veces negativas en la compatibilidad y que se generan sustancias más nocivas al cemento. Comparado con los azúcares, otras sustancias (taninos, fenoles, etc.) presentan mayores dificultades al efectuarse su extracción.

- utilización de los aceleradores: la interacción entre la biomasa vegetal y el cemento puede ser traducida de una manera simple por una especie de competencia. Mientras las sustancias solubles se desplazan hacia la superficie de las partículas vegetales, empieza la formación de los productos hidratados del cemento. Si el primer acontecimiento ha sido más efectivo se formará una capa impermeable altamente inhibidora al fraguado del cemento y entonces no se obtiene un CBC de propiedades adecuadas. No obstante si en el segundo acontecimiento ha sido predominante las sustancias inhibidoras no ejercerán los mismos efectos negativos como en el caso precedente. La acción de los aceleradores de fraguado consiste entonces en propiciar la formación de un ambiente más favorable al fraguado del cemento. Los aceleradores más empleados en la fabricación del CBC son los

cloruros, los sulfatos, los silicatos, los carbonatos y los aluminatos (normalmente entre 2% a 5% de la masa de cemento). Entre ellos se destaca el cloruro de calcio (CaCl_2) – la patente de su aplicación data de 1888, mientras no exista un acelerador funcional para toda biomasa vegetal: la investigación a cerca del acelerador mas adecuado debe ser conducida para cada biomasa vegetal considerada.

Algunos investigadores concluirán que los cloruros reaccionan con el C_3A formando hidrocloalouminato de calcio. Los granos del cemento son entonces recubiertos por una capa más permeable que del material original lo que intensifica las reacciones de hidratación y al mismo tiempo en las partículas vegetales se forma una capa bloqueadora que impide la liberación de las sustancias nocivas hacia la superficie.

La utilización de los aceleradores permite anticipar el fraguado y el endurecimiento de los productos a base del cemento. La resistencia mecánica del CBC modificado por el acelerador en las primeras edades ultrapasa de forma significativa otro CBC testigo. Sin embargo la resistencia mecánica final no parece modificarse acentuadamente, indicando que el período inicial es lo más crucial para el desarrollo de la interacción química entre la biomasa vegetal y el cemento.

Dos agravantes se hacen presentes cuando se emplean aceleradores en la fabricación de productos a base del cemento. El pH de la mezcla se reduce y las armaduras en acero se quedan desprotegidas (LEE & SHORT, 1989). Otro inconveniente es relacionado con la estabilidad dimensional: para el hormigón el empleo de cloruro de calcio aumenta la retracción en dos veces para dosis al 2% y en diez veces para dosis al 5%. Para otros sales la retracción puede aumentar en un 20% al 40%.

En la fabricación de los paneles de CBC se propuso el uso de CaCl_2 al 1% o de NH_4Cl al 3% (KAVVOURAS, 1987), mientras KAYAHARA et al. (1979) indicaran para ese mismo propósito el AlCl_3 . La eficiencia de la acción del acelerador de fraguado depende de la naturaleza de la biomasa vegetal. Paneles de la madera Epicea (*Picea abies*) presentaron características mas adecuadas cuando se empleó 3% de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en su fabricación; el mismo acelerador fue indicado para la fabricación de paneles de maderas en Indonesia.

En determinadas situaciones la biomasa vegetal es tan inhibidora que los aceleradores no logran el éxito. Los aceleradores CaCl_2 e NaSiO_3 no fueron eficaces en neutralizar las substancias contenidas en las maderas “Southern red oak” y “White oak”, respectivamente.

Una investigación muy amplia fue desarrollada por ZHENG TIAN & MOSLEMI (1985) evaluando el efecto de 30 aceleradores en las partículas de la madera “Larch”. Los resultados más satisfactorios fueron obtenidos con los cloruros (SnCl_2 , FeCl_3 , AlCl_3 y CaCl_2) utilizados en dosis de 5% al 6,5% con relación a la masa del cemento.

YASUDA et al. (1992) verificaron que el MgCl_2 fue mas eficaz que el CaCl_2 en neutralizar las sustancias contenidas en la madera *A. mangium*. La misma conclusión fue obtenida por RASHWAN et al. (1992) al analizar la madera “White spruce”. Todavía estos últimos investigadores utilizaron el CaCl_2 por motivos de orden económico.

Los efectos positivos de los aceleradores están estrechamente ligados al tipo y a la concentración de las sustancias contenidas en la biomasa vegetal. YAMAGISHI et al. (1980) combinaron $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con partículas de “Sapín” (*P. abies*) verificando un aumento en la velocidad de fraguado del cemento mientras que por la madera “Peuplier” (*Populus*) los resultados no fueron significativos.

MOSLEMI et al. (1983) obtuvieron éxito con el empleo de CaCl_2 y de NaOH al 5% para fabricar CBC a base de las partículas de la madera “Lodgepole pine”; todavía los mismos aceleradores no fueron eficaces en neutralizar las sustancias nocivas contenidas en la madera “Western larch”. Para esta última hubo necesidad de aplicarse preliminarmente el lavado de las partículas.

Esa constatación de la necesidad de efectuar el lavado de las partículas también fue verificada por BERALDO (1994) al comparar el efecto del CaCl_2 en el CBC de partículas de bambú (*P. viridis*), mientras ese acelerador separadamente hubiese sido eficaz para las maderas francesas “Hêtre” (*F. sylvatica*) y “Pin maritime” (*Pinus maritima*), conforme como se presenta en la Figura 14.

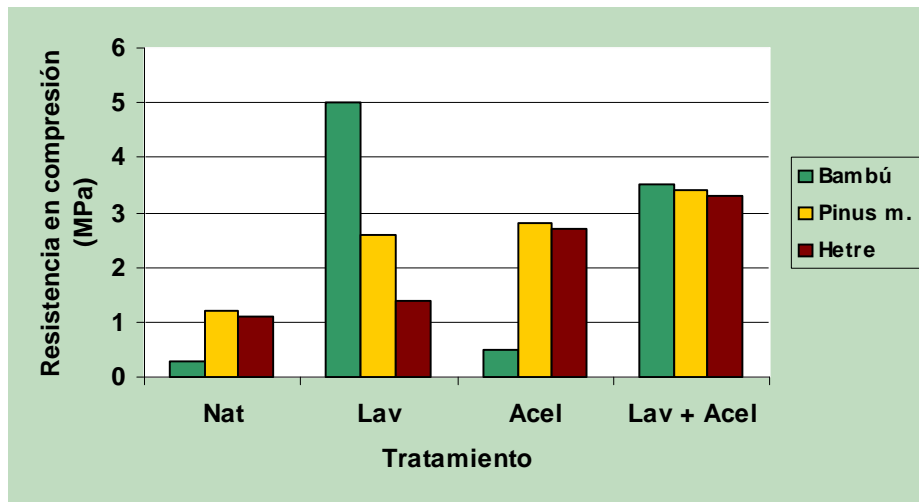


Figura 14 – Efecto de los tratamientos en el CBC.

- secado de la biomasa vegetal: el objetivo es eliminar parcialmente el agua y los compuestos volátiles al producirse la degradación térmica de las hemicelulosas. La biomasa vegetal se denomina entonces “termo-retificada” o “tostada” (temperaturas entre 180 °C y 270 °C). Las propiedades mecánicas del CBC se modifican positivamente (LANGE & SIMATUPANG, 1984) pero no se obtuvo el mismo efecto en la estabilidad dimensional (MOUGEL, 1992). En una escala industrial ese procedimiento tendría dos grandes dificultades: aporte de energía y necesidad del almacenamiento de las partículas secas.

- recubrimiento de las partículas vegetales: los objetivos son: disminuir la capacidad de absorción de las partículas vegetales (y indirectamente mejorar la estabilidad dimensional del CBC), bloquear el recorrido de las sustancias inhibidoras hacia la superficie de las partículas vegetales y minimizar el efecto del ataque de las partículas vegetales por los constituyentes alcalinos del cemento. Se puede utilizar la inmersión de las partículas vegetales en soluciones minerales (pasta de cemento diluida, cloruro de calcio, metasilicato de sodio – Na_2SiO_3) o orgánicas (betumen, polietilenoglicol), o entonces pulverizar esas soluciones sobre las partículas vegetales. Para soluciones orgánicas normalmente se emplean solventes específicos buscando optimizar el proceso.

La impregnación de las partículas vegetales con una solución diluida de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ actúa favorablemente en la resistencia mecánica del CBC. Los compuestos se adhieren a la

superficie de las partículas vegetales o penetran en sus elementos anatómicos (sobre todo los haces vasculares) favoreciendo el anclaje de la pasta de cemento y al mismo tiempo se puede mejorar la eficiencia de la carbonatación si las condiciones fueren óptimas (humedad y porosidad).

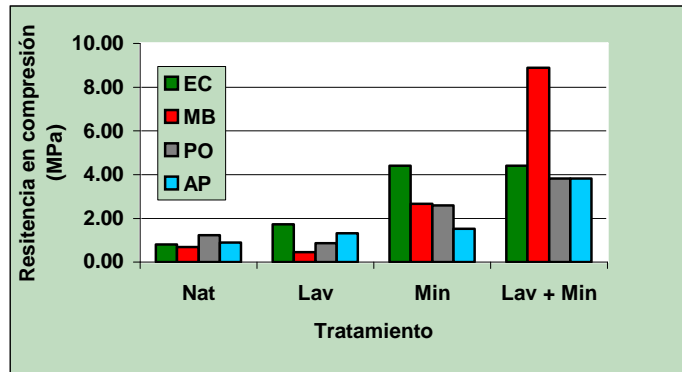
LEE (1984) propuso la impregnación de la madera con tanino, buscando mejorar la estabilidad dimensional del CBC. Todavía, esta sustancia es un retardador del fraguado del cemento.

YAMAGISHI et al. (1980) pulverizaron aceite lubricante reciclado sobre partículas de la madera “Meléze” y concluyeron que no hubo modificación importante en el fraguado del cemento.

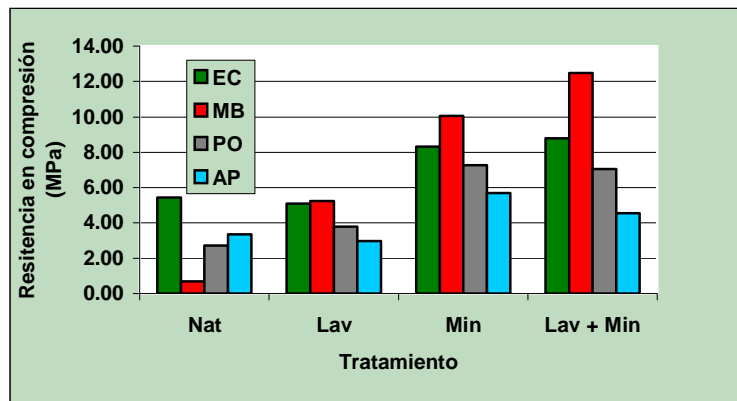
BERGSTRÖM & GRAM (1984) y GRAM (1986) lograron aumentar la vida útil de las fibras de henequén (*Agave sisalana*) en presencia de la pasta de cemento, aplicando sobre ellas agentes hidrofugantes (formina y ácido esteárico).

- mineralización de las partículas vegetales: FURUNO et al. (1991) propusieron la asociación del Na_2SiO_3 con CaCl_2 o con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para proteger la madera contra el fuego y contra el ataque de los hongos. Todavía, la asociación entre los aceleradores Na_2SiO_3 , NaOH y CaCl_2 disminuyó la resistencia mecánica del CBC (LEE & SHORT, 1989), lo que no fue constatado por BERALDO et al. (1996). Estos últimos investigadores analizaron la interacción entre cuatro especies de madera y dos tipos de cementos brasileños (Figura 15a y 15b). Los autores verificaron un incremento significativo de la resistencia en compresión en los casos donde se efectuó la mineralización de las partículas vegetales. Sin embargo, el efecto del lavado preliminar de las partículas vegetales no se mostró efectivo para algunas especies de madera.

La mineralización de las partículas vegetales es una opción muy interesante sobre todo desde un punto de vista técnico, mientras tanto se necesita de un análisis económico del costo para ver una aplicación a escala industrial. Las dosis usuales de los productos químicos son del 2% al 5% (silicato de sodio) y del 10% al 30% de sulfato de aluminio.



a) Cemento CP II-E-32



b) Cemento CP V - ARI

Figura 15 – Resistencia en compresión del CBC.

Leyenda: Nat = partículas vegetales sin tratamiento

Lav = lavadas en agua caliente

Min = mineralizadas (silicato de sodio y sulfato de aluminio)

Lav + Min = combinación de los dos tratamientos precedentes.

EC = *Eucalyptus citriodora*

MB = *Myroxylon balsamum*

PO = *Pinus oocarpa*

AP = *Aspidosperma polyneuron*

- tipo de cemento: en las figuras precedentes se observa claramente la influencia del tipo de cemento empleado en la fabricación del CBC. El cemento Pórtland de tipo II, contiene escoria de alto horno (*blast furnace slag*), es mucho más sensible a la acción de los extractos presentes en las partículas vegetales, que el cemento Pórtland de tipo V – cemento de fraguado rápido. Todavía, algunas biomásas vegetales naturales (por ejemplo en el caso de la madera **MB**) necesitan obligatoriamente que se efectúe el lavado preliminar de sus partículas, y en caso que no se adopte la mineralización.

PAZNER & KLEMAREVSKI (1988) concluyeron que el cemento magnesiano (*Sorel*) es prácticamente insensible al efecto de los azúcares contenidos en las maderas. Todavía los autores relataron problemas ocurridos con el curado del CBC y su comportamiento inadecuado cuando fue expuesto a las intemperies. De este relato se puede concluir que por la estabilidad dimensional del CBC se debe efectuar operaciones combinando los tratamientos en la biomasa vegetal y en la matriz cimenticia.

- modificaciones en la matriz: en este caso se puede dividir en tres categorías:

a) *acción química*: BERGSTRÖM & GRAM (1984) observaron un comportamiento positivo del CBC a base de henequén (*A. sisalana*), substituyendo 45% de la masa de cemento por humo de silicio (*microsilica*). Los autores afirmaron que los efectos positivos obtenidos en la durabilidad del CBC podrían ser atribuidos a la disminución del pH de la mezcla. LANGE et al. (1988) también indicaron la substitución parcial del cemento por humo de silicio y por cenizas volantes (*fly ash*) en la fabricación de paneles de cemento y madera “Meléze” o de maderas Angiospermas. La adición de partículas minerales con dimensión inferior a aquellas del cemento mejora acentuadamente la resistencia del CBC, debido a un efecto de paquete; los espacios entre los granos del cemento son rellenados por los granos de humo de silicio y la masa específica aparente del CBC también aumenta. Todavía la presencia de partículas minerales muy pequeñas necesita de un mayor aporte de agua y se debe buscar la proporción óptima con el cemento (SIMATUPANG, 1979; LANGE & SIMATUPANG, 1985).

Los aspectos económicos deben ser considerados cuando se proponga la substitución del cemento por humo de silicio, pues el costo de este material es muchas veces superior al

del cemento. Una alternativa es la utilización de cenizas de cáscara de arroz (contiene hasta 90% de silicio) obtenida bajo condiciones controladas de calcinación.

b) *acción física*: en el CBC las partículas de la biomasa vegetal generalmente son mayores que aquellas del cemento (alrededor de los 15 μm). En las aplicaciones del CBC donde no se utilice el prensado (fabricación de bloques huecos, por ejemplo) la estructura del material presentará un aspecto cavernoso, caracterizada por la existencia de una gran porosidad (BERALDO, 1996). La ligación entre las partículas vegetales es asegurada solamente por puentes de cemento, quedando espacios entre ellas, que pueden ser rellenados por adiciones minerales activas (carbonatos, que incluso desarrollan actividades descritas en el tópico anterior) o inertes (arena), conforme destacaron MOUGEL (1992) y BERALDO (1994). En la Figura 16 se presenta el efecto de la adición de arena graduada (proporción de 1:1 con relación a la masa de cemento) en el CBC de cuatro especies vegetales.

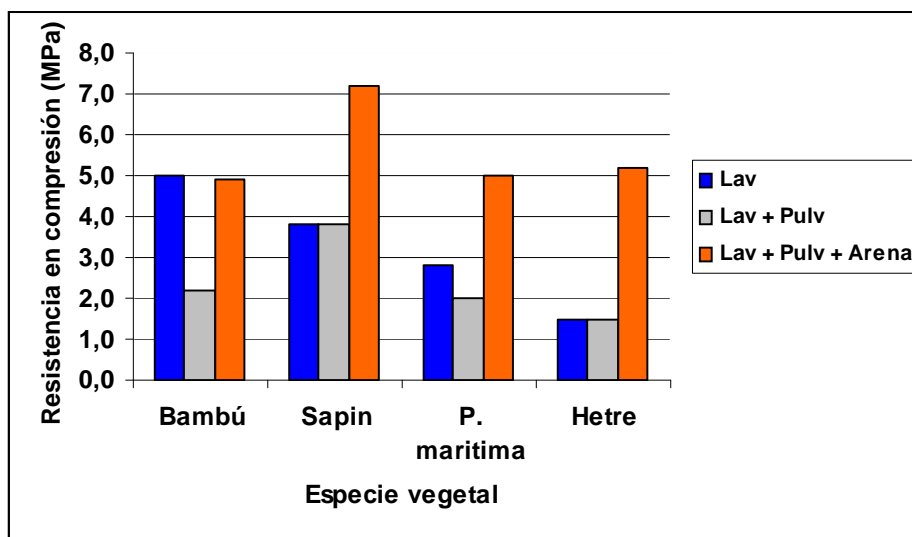


Figura 16 – Resistencia en compresión del CBC por los tres tratamientos efectuados.

c) Carbonatación acelerada: varias investigaciones fueron desarrolladas a cerca del efecto provocado por la carbonatación acelerada en las propiedades de materiales a base del cemento. En presencia del aire atmosférico (que contiene

0,03% de gas carbónico) los constituyentes del cemento (C_2S , C_3S , C_3A y C_4AF) reaccionan con la agua y liberan el hidróxido de calcio mientras el gas carbónico se disuelve en agua y genera el ácido carbónico. Este reacciona con el hidróxido de calcio generando carbonato de calcio, agua y liberando calor.

Los resultados obtenidos en las diversas investigaciones desarrolladas en ese tema indicaran los parámetros óptimos por el suceso de ese tratamiento:

c1) Contenido de humedad: en presencia de una atmósfera saturada en agua ocurre la formación superficial de $CaCO_3$, lo cual impide que la penetración del gas carbónico prosiga. Sin embargo, si el contenido de humedad disminuye, por ejemplo por medio de un vacío, la penetración del gas es más efectiva. El grado máximo de carbonatación ocurre en contenidos de humedad del ambiente alrededor de 50%.

c2) Concentración del gas: en un ambiente donde la concentración en gas carbónico sea más elevada la carbonatación es más rápida. De esa manera se logra mayor éxito cuando las probetas son sometidas a un ambiente artificialmente enriquecido en gas carbónico.

c3) Geometría de la probeta: en comparación entre dos probetas que tengan un mismo volumen, aquella que presente una proporción más elevada entre la superficie y el espesor tendrá carbonatación más efectiva, pues el acceso del gas es facilitado en este último caso.

c4) Presión del gas: la presión de gas carbónico entre 1 y 2 atmósferas favorece las reacciones mientras que una presión más elevada (4 atm) no produce un efecto considerable (YOUNG et al., 1974). Los investigadores analizaron dos formas de efectuar la carbonatación: en un sistema *dinámico* o *abierto* (en lo cual el gas pasaba en un ambiente conteniendo nitrato de magnesio de forma a mantener un ambiente de 50% de humedad); y en otro sistema denominado *estático* o *cerrado* (las probetas eran colocadas en embalajes plásticos y se introducía el gas). Este último sistema la presión no desarrolla un papel importante pues ocurre predominancia de la difusión. Todavía, la reacción de carbonatación es muy rápida (10 minutos) y fuertemente exotérmica (provocando fisuras en las probetas). Se observó la condensación de agua en las paredes del embalaje plástico, lo que disminuyó la velocidad de la reacción.

El estudio de la influencia de los diferentes parámetros actuantes en la velocidad de la carbonatación se constituye en un análisis complejo. Un hormigón hidratado normalmente presenta contenidos considerables de hidróxido de calcio y de clínquer (mezcla de carbonato

y arcilla que aún no se hidrataron). Sin embargo, en el hormigón sometido a la carbonatación artificial ocurre una concentración considerable de calcita (carbonato de calcio) y una reducida presencia de clínquer. El autor concluyó que un tratamiento artificial con gas carbónico de 10 a 15 minutos es equivalente a una hidratación de varias horas.

Mientras la carbonatación artificial sea una forma eficiente de acelerar el endurecimiento de materiales a base del cemento, raramente se obtiene condiciones óptimas para su ejecución. YOUNG et al. (1974) recomendaron que se sumergiesen las probetas en agua (7 días) después de someterlas a la carbonatación artificial (10 minutos), para mejorar las propiedades mecánicas del mortero.

En sus investigaciones a cerca de la carbonatación, VERBECK (1958) propuso el empleo de pastas o morteros en la evaluación de sus efectos. MEYERS (1949) ya había abordado ese tema relatando que la adición de arena al cemento aumentaba su porosidad y en consecuencia la penetración del gas era más efectiva.

Mientras sea evidente el efecto de la carbonatación en los productos a base del cemento, producido por el aumento de masa de la probeta después del tratamiento, lo mismo no se puede afirmar con respecto a la microscopia. Los minúsculos cristales de carbonato de calcio se encuentran dispersos en la matriz y de preferencia en locales donde hayan encontrado condiciones óptimas para su desarrollo (combinación de porosidad y de humedad), necesitando de una gran ampliación para que se puedan observar. BERALDO (1994) utilizó microscopia electrónica de barrido (MEB) de láminas petrográficas en el análisis del CBC sometido a carbonatación artificial o a ciclos de humidificación y secado. Las morfologías observadas en las probetas son muy distintas: cristales aplastados en el primer caso (Figura 17) y en formato de aguja en el segundo caso (Figura 18).

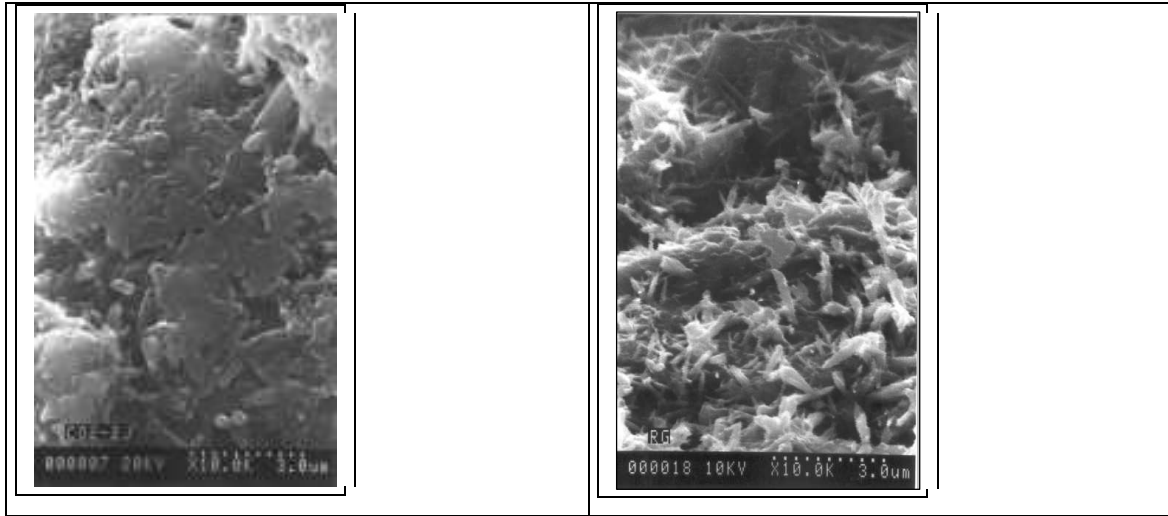


Figura 17 - CBC carbonatado

Figura 18 – CBC humidificado y secado.

Estabilidad dimensional de productos a base del cemento

Mientras una adecuada resistencia mecánica sea una propiedad importante a ser obtenida en los materiales compuestos a base del cemento, su estabilidad dimensional también no puede ser olvidada. MEYERS (1949) fue uno de los primeros investigadores a utilizar la carbonatación para la estabilidad dimensional del hormigón. El autor concluyó que el cemento en su forma coloidal es responsable por la variación dimensional del compuesto mientras que la estructura cristalina del carbonato de calcio generado en la carbonatación permite reducir en hasta 70% esos valores. De esa manera sería una gran ventaja efectuar la carbonatación *después del periodo inicial* de hidratación del compuesto. El autor incluso ha propuesto que la instalación por la fabricación de los compuestos fuera ubicada cerca de los locales de generación de gas carbónico.

VERBECK (1958) observó que probetas que estuvieron ubicadas en ambientes de baja concentración en gas carbónico presentaron una retracción irreversible después de haber sido sometidas a ciclos de humidificación y de secado. Después de cada ciclo ocurren nuevamente condiciones óptimas y la carbonatación recomienza, culminando con un relleno de los vacíos entre las partículas de cemento y arena. El autor relató la importancia de la retracción prematura en los materiales a base del cemento antes de que fueran empleados en la construcción.

Carbonatación del CBC

Por su naturaleza el CBC presenta condiciones más favorables a la carbonatación que otros productos a base del cemento. En efecto, la porosidad del CBC es mucho mayor y las partículas vegetales pueden desarrollar un papel en el almacenamiento de agua necesaria para la carbonatación.

Aún, cuando comparado con los materiales tradicionales a base del cemento, se nota que solamente en los años 90 se investigó este tema mas profundamente en la fabricación del CBC, conforme a trabajos presentados en el “Inorganic-Bonded Wood & Fiber Composites Conference”, realizado en Spokane - USA (LAHTINEN, 1992; SIMATUPANG et al., 1992; SIMATUPANG & HABIGHORST, 1992; GEIMER et al., 1992).

En este evento se presentaran los resultados de investigaciones desarrolladas a cerca del efecto de los carbonatos en la fabricación del CBC, contemplando la adición de compuestos sólidos o del gas carbónico. SIMATUPANG et al. (1992) obtuvieron que el carbonato de potasio fue más eficiente que el carbonato de sodio. BERALDO (1994) no obtuvo resultados adecuados en compresión después de la carbonatación del mortero 1:1) del CBC de la madera Sapin (*Abies sp*) con el carbonato de sodio y con el bicarbonato de sodio (Figura 19).

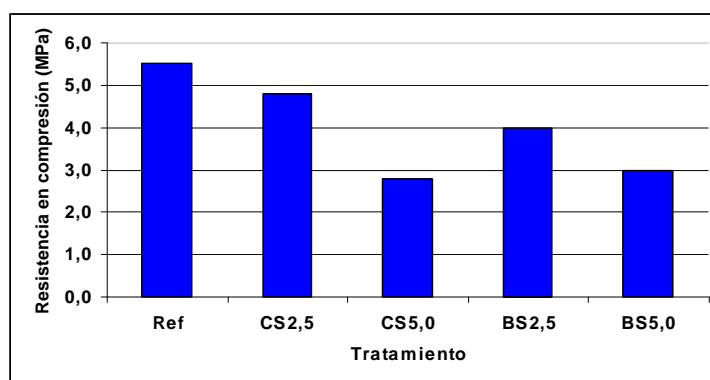


Figura 19 – Efecto de la adición (%) de carbonatos en la resistencia en compresión.

Leyenda: Ref = mortero (1:1) de CBC de la madera *Sapin*. Partículas naturales pulverizadas con aceite. CS = carbonato de sodio BS = bicarbonato de sodio.

Una de las aplicaciones más interesantes de la carbonatación es en la fabricación del CBC a base de la biomasa vegetal inhibidora al fraguado del cemento. Teóricamente el empleo de esa técnica permite que el fraguado del cemento sea tan rápido que no se queda afectado por la migración de las sustancias inhibidoras hacia la pasta del cemento. Patentes a cerca de la carbonatación del CBC fueron depositadas en Inglaterra y en Hungría.

SIMATUPANG et al. (1992) estudiaron la carbonatación de paneles a través de la medida de la conductibilidad eléctrica de la mezcla. Los investigadores verificaron que el inicio del fraguado del cemento se caracterizaba por una brusca alteración en esa propiedad.

En la carbonatación de los paneles se emplea un vacío inicial. LAHTINEN (1992) presentó resultados interesantes obtenidos por el método empleado en la empresa húngara Rauma-Repola Oy. El tiempo necesario para el fraguado del cemento fue reducido a solamente 5 minutos; la resistencia mecánica del panel inmediatamente después del desmolde alcanzó cerca de un 50% de su resistencia final.

Evidentemente la velocidad segundo la cual se procesa la carbonatación depende de la presión aplicada, de la porosidad del panel, de la humedad óptima (SIMATUPANG & HABIGHORST, 1992) y de la proporción agua y cemento y biomasa vegetal y cemento. GEIMER et al. (1992) destacaron igualmente la importancia de la sustitución parcial del cemento por 5% de hidróxido de calcio, para el beneficio de la carbonatación.

La carbonatación provoca un tipo de envejecimiento acelerado del CBC. Productos de la hidratación del cemento fueron detectados en el lumen de las células de la madera (AKERS & STUDINKA, 1989; BENTUR & AKERS, 1989). Los investigadores concluyeron que el tratamiento con duración de 3 a 4 meses en una atmósfera rica en gas carbónico sería equivalente a un envejecimiento natural de 5 años.

BERALDO & ZOULALIAN (1996) analizaron el efecto de la carbonatación del CBC en tres materiales diferentes: probetas cilíndricas (50 mm de diámetro y 100 mm de altura), cúbicas (100 mm de lado) y bloques huecos (90 x 190 x 390 mm y espesor de pared de 20 mm).

a) Probetas cilíndricas: en un reactor cerrado se comprobó que la presión adoptada no ejerce influencia significativa en la eficiencia de la carbonatación. La duración del tratamiento fue evaluada a través de la medida de la temperatura y se constató que el máximo fue alcanzado alrededor de una hora. El secado preliminar de las probetas fue de

fundamental importancia para la eficiencia de la carbonatación. A medida en que la probeta seca ocurre la evaporación de agua y en consecuencia aumenta su porosidad favoreciendo la penetración más efectiva del gas.

b) Probetas cúbicas: la carbonatación no logró éxito. Solamente se observó la formación de una capa endurecida, lo que permitiría la manipulación del material sin riesgo. Todavía, evidentemente aún restarían productos no hidratados en su gran mayoría lo que implicaría en la colocación del CBC en cura húmeda.

c) Bloques huecos: se utilizó un equipo convencional en la fabricación de los bloques, lo que dificultó sobremanera su manipulación, y se pudo constatar la importancia de efectuar un secado preliminar. En efecto, los bloques pesados antes y después de la carbonatación indicaron las siguientes variaciones máxicas: un día (1,3%), dos días (1,5%) y cuatro días (2,0%).

Variación dimensional del CBC

Las principales investigaciones a cerca del CBC buscaron garantizar una resistencia mecánica compatible con las aplicaciones de este material. Sin embargo, la comprensión de los mecanismos actuantes sobre la naturaleza de la variación dimensional del CBC en presencia de cambios de humedad aún resta ser explicada (BROKER & SIMATUPANG, 1974a), y su desconocimiento impide una adecuada divulgación del material (ROWELL et al., 1991).

Existen dos tipos de variación dimensional en el CBC:

- irreversible: es consecuencia de las reacciones de hidratación que ocurren durante el fraguado del cemento. El almacenamiento del CBC (4 a 6 semanas) permite minimizar su magnitud.

- reversible: ocurre debido a los cambios ambientales, provocado por la absorción y la pérdida de humedad.

La retracción de un hormigón ligero depende inversamente de su masa específica aparente y directamente del dosis en cemento (PIMIANTA et al., 1994). Por el CBC de

1000 kg/m³ la retracción estimada es de 5 mm/m mientras que para aquello de 1500 kg/m³ el valor se reduce hasta 2 mm/m.

Paneles de CBC en presencia de cambios de humedad presentan variación dimensional muy inferior a los compuestos a base de pegantes orgánicos (DINWOODIE & PAXTON, 1984). Varios factores interfieren en la estabilidad dimensional del CBC:

- Geometría de las partículas vegetales: cuanto más largas sean las partículas vegetales más estable será el CBC (BROOKER & SIMATUPANG, 1974a; BADEJO, 1988; MOSLEMI, 1988b).

- Masa específica aparente: la compactación afecta directamente la resistencia mecánica y la estabilidad dimensional del CBC (BADEJO, 1988).

- Proporción agua y cemento: la estabilidad varía con el inverso de esa proporción (BROKER & SIMATUPANG, 1974a; SARJA, 1989). Todavía, por la naturaleza de la biomasa vegetal altamente higroscópica, los aportes en agua siempre son más elevados que en los materiales convencionales a base del cemento. En una aplicación industrial el uso del vacío es fuertemente recomendado.

- Tipo de curado: el secado en autoclave aporta mayor estabilidad al CBC (HANNANT, 1984; KUROKI et al., 1988).

- Agregados de mayor módulo de elasticidad: parte de los movimientos del CBC en presencia de variación de humedad puede ser minimizado por la presencia de agregados disponiendo de mayor módulo de elasticidad, como es el caso de la arena. BERALDO (1994) pudo verificar el efecto favorable de la adición de arena al CBC (Figura 20). Todos los compuestos alcanzaron variación dimensional inferior a 1 mm/m.

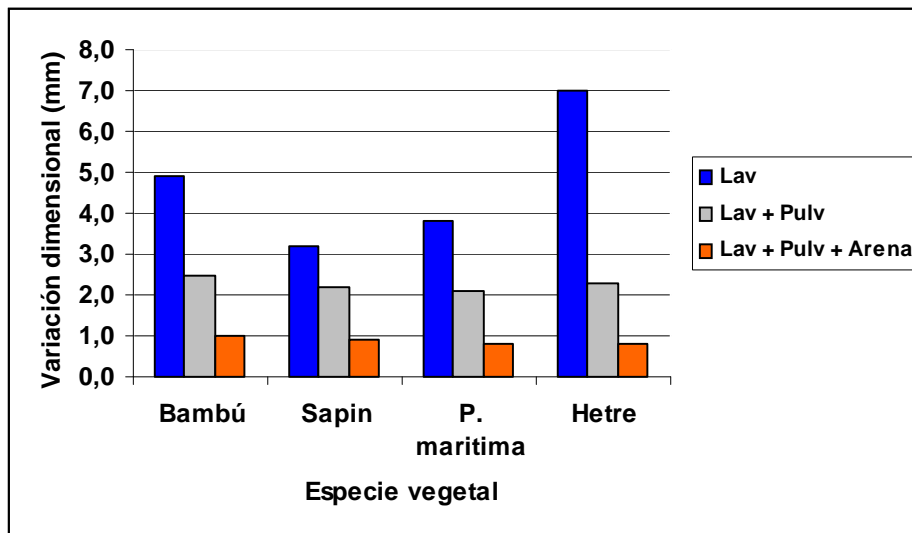


Figura 20- Variación dimensional del CBC por los tres tratamientos efectuados.

El curado del CBC

Mientras no sean plenamente conocidas las razones del comportamiento inadecuado de ciertas biomasa vegetales en presencia del cemento, diversas técnicas presentadas precedentemente han logrado minimizar los inconvenientes derivados de la interacción entre los constituyentes de la mezcla. De la misma manera, diversas investigaciones realizadas evidenciaron la importancia de la elección de biomasa vegetal con determinada distribución de tamaño de sus partículas, y de las adecuadas proporciones entre el pegante, la biomasa vegetal y el agua. Todavía, no han sido desarrolladas tantas investigaciones a cerca del curado del CBC.

BERALDO (1994) analizó el efecto de la alternancia de ciclos de humidificación (4 días) y secado (21 días bajo condiciones controladas – 33 °C y 50% humedad relativa) logrando alcanzar estabilidad dimensional en CBC a base de partículas de madera *Sapin* (Figura 21). Las amplitudes entre las situaciones extremas (hinchamiento y retracción) cambiaran de 1,6 mm/m hasta 0,3 mm/m, denotando el efecto de la cicatrización (colmatación) de los poros del CBC por los productos originados en la hidratación del cemento.

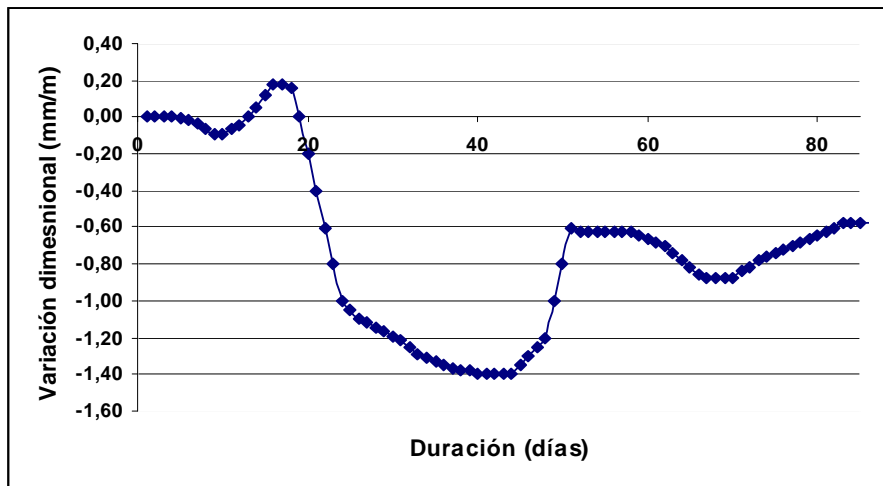


Figura 21 – Variación dimensional del CBC bajo ciclos de humidificación y secado.

Consideraciones finales

El CBC es un sistema complejo constituido de biomasa vegetal (de preferencia que sea compatible con el cemento), por una matriz (modificada o no por la presencia de aditivos y cargas minerales), por una cantidad de agua (siempre superior a aquella necesaria en la fabricación de productos convencionales a base del cemento) y por un considerable volumen de aire. Ese sistema dinámico recibe la influencia del medio ambiente, hidratándose y liberando hidróxido de calcio, lo cual reacciona con el gas carbónico, generando productos que se depositan en los espacios existentes entre los constituyentes del CBC, produciendo una cicatrización de las fisuras existentes.

Mientras se conozca adecuadamente los procedimientos adoptados en la fabricación del CBC, todavía existe aún un largo camino hacia para que este material despierte un interés industrial. Varios preconceptos se quedan arraigados y impiden que las ventajas del CBC sean explotadas sobretodo en países en vías de desarrollo.

Sin embargo, la civilización moderna genera cada vez más desechos por los cuales se debe procurar aplicaciones racionales en la busca de sustitución de los materiales convencionales que no son renovables.

REFERENCIAS 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 and Lighthweight Concrete*, 11(2), p. 93-97, 1989.
- AROLA R. A. Chunkrete: an alternative to concrete. Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 121-131, 1992.
- BADEJO S. O. O. Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwoods. *Wood Science and Technology*, 22, p. 357-370, 1988.
- 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 and Lighthweight Concrete*, 11(2), p. 99-109, 1989.
- BERALDO A. L. Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité. Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 222pp, 1994.
- _____. Wood-cement hollow blocks for rural utilization. ASAE Annual Meeting, Phoenix, Arizona, USA, paper # 9644112, 6pp, 1996.
- 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). Workshop Reciclagem e Reutilização de resíduos como materiais de construção civil. ENTAC, EPUSP, São Paulo, p. 79-84, 1996.
- BERALDO A. L., ZOULALIAN A. Carbonatação de compósitos biomassa vegetal-cimento. XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Bauru, SP, CD-ROM, 6pp, 1996.
- BERALDO A. L., CARVALHO J. V. Compósito Eucalyptus grandis-cimento Portland. *Scientia Forestalis*, São Carlos, SP, v.1, n.1, p. 150-161, 2004.
- BERGSTRÖM S. G., GRAM H. E. Durability of alkali-sensitive fibres in concrete. *The International Journal of Cement and Lighthweight Concrete*, 6(2), p. 75-80, 1984.
- BIBLIS E. J., LO C. Sugars and others wood extractives: Effect on the setting of southern-pine cement mixtures. *Forest Products Journal*, 18(8), p. 28-34, 1968.

- BRÖKER F. W., SIMATUPANG M. H. Dünnschichtchromatographischen Nachweis zementerhärtungsstörender Stoffe. *Zement-Kalk-Gips*, n. 5, p. 245-247, 1973.
- _____. Dimensionsstabilisierung zementgebundenen Holzwerkstoffe. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 32, p. 188-193, 1974a.
- _____. Ursachen der Dimensionsänderung zementgebundenen Holzwerkstoffe. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 32, p. 150-155, 1974b.
- BUGNA J., VASEY P., VETSCH T. Le bois-ciment: un substitut possible à l'amiante-ciment? *Chantiers*, Suisse, v. 12, p. 37-42, 1981.
- CASU B., CHIRUZZI M., TEGIACCHI T., ZOPPETTI G. Interaction of aluminates with carbohydrates and aldonates. 7th International Symposium on Chemical Cement, Paris, France, v. IV, p. 558-563, 1980.
- COUTTS B. Wood fiber inorganic composite – The Australien scene 1970^{'s} – 1990^{'s}. Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 26-27, 1992.
- DINWOODIE J. M., PAXTON B. H. Wood-cement particleboard: A technical assessment. *Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium*, v. 1, p. 217-227, 1984.
- DIX R. J. H. R. The principles of cement-bonded particleboards manufacture. International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p.136-139, 1988.
- FISCHER V. F., WIENHAUS O., RYSEL M., OLDBRECHT J. The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards. *Holztechnologie*, 15(1), p. 12-19, 1974.
- FURUNO T., UEHARA T., JODAI S. Combinations of wood and silicate. I – Impregnation by water glass and application of aluminum sulfates and calcium chloride as reactants. *Mokuzai Gakkaishi*, v. 37, n. 5, p. 62-472, 1991.
- GEIMER R. L., SOUZA M. R., MOSLEMI A. A., SIMATUPANG M. H. Carbon dioxide application for rapid production of cement particleboard. Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 31-41, 1992.
- GRAM H. E. Durability studies of natural organic fibres in concrete, mortar on cement. RILEM Symposium on developments in fibre reinforced cement and concrete, v. 2, p. 13-17, 1986.

- HACHMI M., CAMPBELL A. G. Wood-cement chemical relationships. International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p.43-47, 1988.
- HACHMI M., MOSLEMI A. A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest Products Journal*, 39(6), p. 55-58, 1989.
- HANNANT D. J. Fibre reinforced cement and concrete. Part 2: Practical composites. *Concrete*, March, p. 21-22, 1984.
- 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*, 34(2), p. 57-61, 1984.
- HOLDERNESS S. Marketing and opportunities for cement-bonded particleboards: lesson from Great Britain and North America. Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 129-132, 1992.
- IRLE M., SIMPSON H. Agricultural residues for cement-bonded composites. Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 54-58, 1992.
- JAIN V. K., SHUKLA K. S., KUMAR S. Heat of hydration studies on cellulosic materials and cement systems. *J. Timb. Develop. Assoc.*, India, v. XXXV(2), p. 19-32, 1989.
- KALAFATIS P., COOPER R. J., SMITH C. The promotion of a new type of particleboard to architects – the case of Compak. *Journal of Inst. of Wood Science*, 11(5), p. 86-92, 1989.
- KAVVOURAS P. K. Suitability of *Quercus conferta* wood for the manufacture of cement-bonded flakeboard. *Holzforschung*, 41(3), p. 159-163, 1987.
- KAYAHARA M., TAJIKA K., NAKAGAWA H. Increase of strength of cement-wood composites. *Mokuzai Gakkaishi*, 25(8), p. 552-557, 1979.
- KENNER J., RICHARDS G. N. The degradation of carbohydrates by alkali. Part IV. 1-0-Methylfructose, Glucose and Fructose. *Journal of Chemical Society*, London, UK, v. IV, p. 1784-1789, 1954.
- KUROKI Y., NAGATOMI W., YAMADA J. Manufacture of lighth-weight cement-bonded particleboard in Japan. International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p. 136-142, 1988.

- LAHTINEM P. K. Experience with cement-bonded manufacturing when using a short-cycle press line. Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 32-34, 1992.
- LANGE H., SIMPATUPANG M. H. Herstellung von zementgebundenen Fichten- und Pappelspanplatten: Wechselwirkungen von fünf Einflußfaktoren und ihre Wirkung auf die Plattenfestigkeit. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 43, p. 229-236, 1985.
- LEE A. W. C. Physical and mechanical properties of cement bonded Southern Pine excelsior board. *Forest Products Journal*, 34(4), p. 30-34, 1984.
- 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*, 19(3), p. 262-268, 1987.
- LEE A. W. C., SHORT P. H. Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board. *Forest Products Journal*. 39(10) p. 68-70, 1989.
- LEMPFER K., SATTLER H. Long-term performance of cement-bonded particleboard and fireboard. International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p. 125-132, 1988.
- LIEBER V. W., RICHARTZ W. Einfluß von Triäthanolamin, Zucker und Borsäure auf das Erstarren und Erhärten von Zementen. *Zement-kalk-Gips*, n. 9, p. 403-409, 1972.
- LIGNUM. Base technologiques/matériaux dérivés du bois/Matériaux à base de particules de bois et de liant minéral. Zurich, Suisse, 9pp, 1960.
- MEYERS S. L. Effects of carbon dioxide on hydrated cement and concrete. *Rock Products*, Jan., p. 96-98, 1949.
- MILLESTONE N. B. The effect of glucose and some glucose oxidation products on the hydration of tricalcium aluminate. *Cement and Concrete Research*, 7(1), p. 45-52, 1977.
- MILLER D. P., MOSLEMI A. A. Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood and Fiber Science*, 23(4), p. 472-482, 1991.
- MOSLEMI A. A. Inorganically bonded wood. *Chemtech*, Aug., p. 504-510, 1988a.
- _____. Wood-cement panel products: coming of age. International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p. 12-18, 1988b.

- 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*, 15(2), p. 164-176, 1983.
- MOSLEMI A.A., LIM Y. T. Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. *Forest Products Journal*, 34(7/8), p. 22-26, 1984.
- 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*, 19(2), p. 165-175, 1987.
- MOUGEL E. Mise au point d'un composite ciment-bois dont les variations dimensionnelles vis-à-vis des variations d'humidité sont contrôllées. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, Nancy, France, 160pp, 1992.
- PAZNER L., KLEMAREVSKI A. New developments in wood bonding with magnesium oxyphosphate cement. International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p. 26-30, 1988.
- PIMIANTA P., CHANDELLIER J., RUBAUD M., DUTRUEL F., NICOLE H. Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. *Cahiers du CSTB*, Paris, France, 2073, 45pp, 1994.
- PUGEL A. D., PRICE E. W., HE C. Y. Composites from Southern Pine juvenile wood. Part 2. Durability and dimensional stability. *Forest Products Journal*, 40(3), p. 57-61, 1990.
- RASHWAN M. S., HATZINIKOLAS M., ZMAVC R. Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue. *Forest Product Journal*, 42, p. 57-64, 1992.
- READING T. J. Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces. *Concrete International*, Nov., p. 57-62, 1985.
- ROWELL R. M., TILLMAN A. M., ZHENGtian L. Dimensional stabilization of flakeboard by chemical modification. *Wood and Fiber Science*, 23(4), p. 558-566, 1991.
- 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*, 23(4), p. 558-566, 1986.
- SANDERMANN W., PREUSSER H. J., SCHWIENS W. The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials. *Holzforschung*, 14(3), p. 70-77, 1960.

- SARJA A. Structural wood-fiber concrete. *Concrete International*, 7, p. 45-49, 1989.
- SCHWARZ H. G. Cement-bonded boards in Malaysia. International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p. 91-92, 1988.
- 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*, 41, p. 65-69, 1984a.
- _____. Eingnung des Buchenholzes zur Herstellung zementgebundener Holzwerstoffe. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 42, p. 265-270, 1984b.
- SHIGEKURA Y., TAKAHASI K. Study on the improvement of excelsior board – A trial of gypsum excelsior board. *Science University of Tokyo*, Japan, p. 258-260, 1979.
- SIMATUPANG M. H. Der wasserbedarf bei der Herstellung zementgebundener Holzspanplatten. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 37, p. 379-382, 1979.
- _____. Abbaureaktionen von Glucose, Cellobiose und Holz unter dem Einfluß von Portlandzementmörtel. *Holzforchung*, 40(3), p. 149-155, 1986.
- SIMATUPANG M. H., SCHWARZ H. G., BRÖKER F. W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. 8th World Forestry Congress, Jakarta, Indonesia, Oct., p. 98-120, 1978.
- SIMATUPANG M. H.; LANGE H.; KASIM A.; SEDDIG N. Influence of wood species on the setting of cement and gypsum: International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p. 33-42, 1988.
- SIMATUPANG M. H., HABIGHORST C. The carbon dioxide process to enhance cement hydration in manufacturing of cement-bonded composites – Comparison with common production method. Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 114-120, 1992.
- 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*, v. 34, p. 761-764, 1988.
- 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 de Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique, 135pp, 1989.
- 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*, 14(2), p. 567-570, 1964.

_____. Effect of wood on setting of Portland cement: decayed wood as an inhibitor. *Forest Products Journal*, 17(7), p. 30-32, 1967.

WIENHAUS O. Werkstoffe aus Holz und Zement. *Holztechnologie*, 20(4), p. 207-215, 1969.

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 (trad.). *J. Hokkaido Forest Products Research Inst., Asahigawa, Japan*, 7, p. 6-10, 1980.

YASIN S. M., QURESH T. A. quantity of water soluble in some hardwoods species (a basis for they relative suitability in wood cement boards). *Pakistan Journal of Forestry*, 39(2), p. 103-106, 1989.

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 inhibitory model with vicinal phenolic hydroxyl groups in cement paste. *Mokuzai Gakkaishi*, 38(1), p. 52-58, 1992.

YOUNG J. F., BERGER R. L., BREESE J. Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 57(9), p. 394-397, 1974.

ZHENG TIAN L., MOSLEMI A. A. Influence of chemical additives on the hydration characteristics of Western Larch wood-cement-water mixtures. *Forest Products Journal*, 35(7), p. 37-43, 1985.

ZUCCO L. L. Estudo da viabilidade de fabricação de placas prensadas de cimento e casca de arroz. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 94pp. 1999.