

COMPUESTO DE RESIDUOS DE PINUS RADIATA Y CEMENTO PORTLAND

Antonio L. Beraldo⁽¹⁾ (beraldo@agr.unicamp.br)

Aldo A. Ballerini⁽²⁾ (aballeri@ubiobio.cl), **Mario A. Nuñez**⁽²⁾ (mnunez@ubiobio.cl)

(1) Facultad de Ingeniería Agrícola – Universidad Estatal de Campinas- SP – Brasil

(2) Facultad de Ingeniería de la Madera – Universidad Del Bío-Bío – Concepción - Chile

Resúmen: la especie *Pinus radiata* D. Don es la más importante para la industria maderera chilena por su volumen de comercialización en la forma de madera aserrada, de madera transformada en diversos tipos de tableros (paneles de partículas y de fibras, MDF etc.) o en la fabricación de madera laminada encolada. Durante el procesamiento mecánico del *P. radiata* son generados varios tipos de residuos que no han sido explotados hasta ahora de una forma racional. Constituyó el objetivo de este trabajo investigar el comportamiento mecánico de compuestos de dos tipos de partículas de *P. radiata* (aserrín y virutas) con un cemento de fraguado rápido. Varios tratamientos físico-químicos fueron aplicados a las partículas vegetales. En una segunda investigación también se evaluó el efecto de dos otros tipos de cemento (siderúrgico y puzolánico) en la resistencia del compuesto en compresión. De entre todos los tratamientos aplicados a los residuos vegetales, los resultados obtenidos indicaron el efecto más efectivo del cloruro de calcio (al 2% con relación a la masa de cemento) para los tres tipos de cementos. Confirmando los datos disponibles en la literatura, el cemento de fraguado rápido fue más efectivo en neutralizar la acción de las sustancias inhibitorias de la madera que los cementos siderúrgico y puzolánico.

Palabras-clave: *Pinus radiata*, compuesto, cemento Portland, residuos de la madera

PINUS RADIATA RESIDUES AND PORTLAND CEMENT COMPOSITE

Abstract: *Pinus radiata* D. Don is the most important specie for Chilean wood industry because its market volume, mainly as sawn wood, modified wood applied to several board types (wood particles, wood fibers, MDF etc.) or for laminate glued wood production. Several residues types are generated during mechanical transformation of *P. radiata*. Actually these wood residues are not rationally exploited. The behavior of a composite from a high initial strength Portland cement and two kinds of *P. radiata* residues (sawdust and chips) was evaluated in this research work. A lot of physical and chemical treatments were applied to the wood particles. Others cement types (blast furnace slag and pozolane) influence on composite compression strength were also evaluated. Among the treatments applied to the vegetable residues, the results obtained pointed to the most effective effect of the calcium chloride (2% to the cement mass) on the three cement types employed. According to the literature, high initial strength Portland cement shows a better performance for neutralize inhibitory wood substances than the others two cements.

Keywords: *Pinus radiata*, composite, Portland cement, wood residues

1. INTRODUCCIÓN

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.

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.

Para los industriales, el CBC despierta un interés creciente (MOSLEMI, 1988). 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.

La especie de madera *Pinus radiata* D. Don fue introducida en Chile por los inmigrantes. Actualmente la explotación de esta madera y la exportación de sus subproductos son responsables por una parcela significativa en la economía chilena. En la preparación de la madera en los aserraderos son generados importantes volúmenes de desechos los cuales hasta ahora no han sido explotados de forma racional. El estudio del compuesto de dos tipos de residuos de esta madera con cemento Portland constituyó el objetivo de este trabajo investigativo.

2. ESTUDIO BIBLIOGRAFICO

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 desproveídas 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.

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 sobretudo la constitución química (porcentaje y naturaleza de los extractivos – azúcares, fenoles y resinas).

La consecuencia de la elección de una biomasa vegetal inadecuada puede ser catastrófica sobre un punto de vista de industrialización del CBC. Ha sido propuesta, 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

aprovechasen 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 más 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 (PIMIANTA et al., 1994).

Varios factores están directamente relacionados con la concentración de las sustancias en la biomasa vegetal:

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, la especie *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 0,40% y 0,50%, 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 inhibidores 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 más inhibitora que la albura (cerca de 9 veces) y el corazón (cerca de 2,5 veces), cuando se comparan sus índices de compatibilidad (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 fueron más elevados en el mes de abril (primavera); los valores más reducidos fueron 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 del cemento. Los autores

concluyeron que la tala del árbol efectuada en invierno fue mucho más 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 de *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 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 mas 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 Hetre (*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.

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 comparando 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.

b) Evaluación de la compatibilidad entre biomasa vegetal y cemento por medio de ensayos mecánicos: 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 (interfase) 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.

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 particulares (SIMATUPANG et al., 1978). Todavía no hay una receta general que sea utilizable para todas las biomasa vegetal mientras las alternativas globales se constituyan en dos categorías:

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

Las técnicas más 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 inhibitoras como eran en las originales.

extracción de los constituyentes inhibitoras 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; 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 más adecuadas y entre ellas las más 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*: 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 aun más nocivas al cemento (IRLE & SIMPSON, 1992). 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 (VALENZUELA, 1989).

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 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 más adecuado debe ser conducida para cada biomasa vegetal considerada.

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) y aumenta la retracción en dos veces para dosis al 2% y en diez veces para dosis al 5%.

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.

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 “*Hetre*” (*F. sylvatica*) y “*Pin maritime*” (*Pinus maritima*).

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.

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. 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.

tipo de cemento: 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 fraguado rápido. Todavía, algunas biomásas vegetales naturales necesitan obligatoriamente que se efectúe el lavado preliminar de sus partículas, y en caso que no se adopte la mineralización.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En este trabajo fueron utilizados virutas y aserrín de la madera *Pinus radiata* D. Don, resultantes de los procesos de fabricación de la empresa Mapal. En la Figura 1 se presenta la distribución del tamaño de las partículas de madera y de una arena normalmente utilizada en la construcción. Los mayores porcentajes retenidas correspondieron a las aberturas de 0.600 mm para la arena y de 1.180 mm para las partículas de madera. Mientras tanto, una porcentaje significativo de viruta fue retenida en las aberturas 2.390 mm y 4.750 mm, denotando el aspecto más grosero de ese residuo. El tamaño de las partículas utilizadas ejerce una grande influencia en la eficiencia de la compactación de una mezcla, en el acabado de la superficie, en el consumo del aglomerante y las propiedades básicas del compuesto.

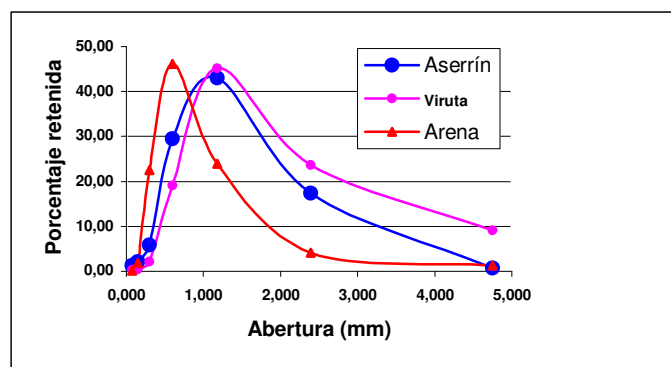


Figura 1 – Distribución porcentual de las partículas vegetales y de la arena.

Otra propiedad importante de los granulados es su masa específica aparente, definida por la relación entre la masa de las partículas y el volumen ocupado por ellas. Esa propiedad depende del contenido de humedad de las partículas, de la forma con la cual se efectúa su compactación y de la geometría del contenedor utilizado.

Fueron efectuadas tres repeticiones del ensayo para cada granulado, adoptándose un precipitado con capacidad de 1 litro. Para el caso de las partículas en la forma de virutas, se efectuó una separación en el tamiz 4.800 mm, conservando aquellos pasantes en esta abertura.

Las partículas de madera, con contenido de humedad alrededor del 10%, fueron colocadas en el precipitado sin ejercer ninguna compactación. Los valores obtenidos fueron de 0.13 g/cm^3 y 0.19 g/cm^3 para virutas y para aserrín, respectivamente. Los valores obtenidos son muy inferiores al de los áridos empleados en la construcción, los cuales se ubican alrededor del 1.50 g/cm^3 . De la comparación entre los resultados de las masas específicas aparentes de las partículas vegetales se nota que, para que se obtenga un mismo volumen de compuesto, la masa de aserrín debe ser un poco más elevada.

Debido al elevado consumo de los materiales necesarios para fabricar tableros de madera y cemento, fueron confeccionadas probetas cilíndricas, adaptándose las recomendaciones de la norma brasileña NBR 7215, específica para morteros de arena y cemento. De ese modo, con los datos de las masas específicas aparentes de las partículas de madera, se pudo evaluar la cantidad de material necesario para rellenar los tres moldes de PVC (diámetro de 45 mm y longitud de 90 mm), considerados como siendo las repeticiones de las diferentes mezclas investigadas.

En la fabricación de los compuestos, la masa de las partículas de madera se ubica alrededor del 25% al 50% de la masa del cemento. Ese rango tan largo del porcentaje de la madera proporciona la obtención de compuestos con diferentes propiedades físico-mecánicas. En este trabajo se adoptó el porcentaje promedio del 33% de partículas de madera con relación a la masa del cemento.

El factor agua/cemento (a/c) es de fundamental importancia en la fabricación de los morteros y de los hormigones. Varias son las estrategias adoptadas buscándose disminuir ese factor, sin perder la trabajabilidad de la mezcla, pues la resistencia mecánica de los productos convencionales a base del cemento varía con el inverso de ese factor. Todavía, en los compuestos de madera y cemento existe un agravante ocasionado por la presencia de un granulado que es altamente absorbedor del agua. De esa manera, el factor a/c normalmente del orden del 0.50, para materiales clásicos a base del cemento, debe ser aumentado de forma significativa en los compuestos no prensados, situándose alrededor del 0.60 al 0.80. Mientras

se pueda optimizar el valor de ese factor, por medio de ensayos específicos de trabajabilidad, en los compuestos de madera y cemento se adopta un valor de forma empírica, pues los ensayos clásicos no se muestran adecuados. Normalmente en las primeras mezclas de los compuestos se adiciona lentamente el agua hasta observarse un recubrimiento uniforme de las partículas vegetales por la pasta de cemento. La mezcla presenta entonces una capacidad de moldearse y se observa una capa brillante en la superficie de las partículas vegetales.

Las sustancias químicas contenidas en las partículas vegetales son perturbadoras del proceso del fraguado y del endurecimiento del cemento. Reacciones complejas se procesan cuando las partículas vegetales son sometidas a un medio alcalino, como es el caso de la pasta del cemento. Las sustancias químicas intentan migrar hacia la superficie de las partículas vegetales mientras que los constituyentes del cemento se disuelven en el agua. Durante alrededor de 2 horas el cemento se queda en latencia, mientras que la solución alcalina empieza a reaccionar con los constituyentes de la madera. De ese modo, se adoptan estrategias que visen actuar en dos direcciones: la primera, buscando eliminar parte de las sustancias inhibitoras al fraguado del cemento, y la segunda, favoreciendo el fraguado del cemento, por medio del empleo de catalizadores (aceleradores).

Tratamientos aplicados a las partículas vegetales: las maderas coníferas son conocidas por su estructura anatómica más sencilla do que aquella de las maderas latifoliadas. Una otra diferencia importante se refiere al tipo y al contenido de los extractivos, siendo estos últimos presentados en una concentración mucho más elevada en las maderas latifoliadas. De ese modo, de una forma general, se puede esperar que las partículas provenientes de los árboles coníferas sean menos problemáticas al fraguado del cemento.

Natural: este fue el tratamiento testigo, en lo cual se buscó verificar la hipótesis de la adecuación del empleo de las partículas vegetales, sin sufrir ningún tipo de modificación, excepto por la separación del tamaño de las partículas en tamices.

Lavado: una grande parte de los extractivos contenidos en las partículas vegetales puede ser extraída en agua caliente o en soluciones alcalinas. En el primero caso la temperatura del agua fue de 80 °C y la duración del proceso fue de 2 horas. Para las soluciones alcalinas de hidróxido de calcio y hidróxido de sodio se empleó la concentración de 5% en agua, durante un tiempo de 24 horas. Para los tipos de tratamientos, después se efectuó el lavado de las partículas en agua de llave, para eliminar los residuos. Las partículas fueron secadas al aire hasta alcanzar el contenido de humedad del 10%.

Furuno et al. (1991) efectuaron el tratamiento de mineralización de la madera con un baño en dos soluciones salinas. Los investigadores combinaron el silicato de sodio con cloruro de calcio y con sulfato de aluminio, y verificaron el mejor desempeño de la madera al ataque de los hongos y contra el fuego. BERALDO et al. (1996) verificaron que la mineralización actúa como se fuera un súper catalizador, mejorando acentuadamente las propiedades mecánicas de los compuestos de madera y cemento.

Las partículas de madera fueron inmergidas en la solución de silicato de sodio (al 10%) durante 5 minutos, retiradas y colocadas sobre un tamiz y prensadas manualmente para eliminar el exceso del producto. A seguir, las partículas fueron colocadas en la solución de sulfato de aluminio (al 20%), repitiendo el procedimiento anterior. Después del tratamiento, las partículas vegetales fueron secadas al aire hasta alcanzar un contenido de humedad del 10%.

Utilización de los catalizadores: en la tecnología de la fabricación de los productos a base del cemento es frecuente el uso de catalizadores para acelerar el fraguado del pegante. Varios investigadores verificaron que los catalizadores desarrollan un importante papel en la reacción de la pasta de cemento con las partículas vegetales. En este trabajo, fueron empleados los aceleradores cloruro de calcio, sulfato de aluminio y silicato de sodio. La dosis empleada fue del 2% del producto anhidro con relación a la masa del cemento. Los catalizadores fueron disueltos en el agua y después adicionados a la mezcla preliminar del cemento con las partículas vegetales (naturales y lavadas en agua caliente).

Tipo del cemento: mientras los cementos comerciales sean constituidos por mezclas de C_2S ($2CaO.SiO_2$), C_3S ($3CaO.SiO_2$), C_3A ($3CaO.Al_2O_3$), C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) y yeso ($CaSO_4.2H_2O$), los diferentes porcentajes entre esos constituyentes proporcionan la obtención de productos con características muy diferentes, sobretodo con relación a la velocidad del fraguado.

Las partículas vegetales presentan un grado variable de compatibilidad química con el cemento, y la selección de un cemento de fraguado rápido (ARI – alta resistencia inicial), en general, permite fabricar compuestos con características superiores al de los demás cementos. En este trabajo se empleó el cemento Bio-Bio de Alta Resistencia Inicial para todos los tratamientos relatados, y para los tratamientos de las partículas de aserrín en su forma Natural, Natural con los catalizadores (cloruro de calcio, sulfato de aluminio y silicato de sodio), y lavada en hidróxido de calcio, también se utilizaron los cementos Bio-Bio Siderurgico y Polpaico Puzolánico.

Dosis y preparación de las probetas: con los datos de la masa específica aparente de los dos tipos de partículas vegetales, se definió las masas necesarias para rellenar los tres moldes (repeticiones) correspondientes a cada mezcla efectuada. De ese modo se obtuvieron las proporciones en masa entre los constituyentes (cemento:partículas:agua): **Virutas: 1:0.34:0.61** y **Aserrín: 1:0.33:0.68**.

Inicialmente se mezclaba el cemento con las partículas vegetales, y a seguir se adicionaba el agua (con el catalizador disuelto, en algunos casos). La mezcla finalizada era distribuida en 5 capas en los moldes plásticos previamente untados con aceite. Una espátula era empleada para homogeneizar la mezcla en los moldes y se efectuaba una compactación manual con auxilio de un cilindro de madera. Las mezclas eran involucradas en bolsas plásticas durante 24 horas, cuando se efectuaba el desmolde, y se procesaba la identificación de las probetas, anotándose su diámetro, altura y masa. Durante una semana las probetas permanecían envueltas en una bolsa plástica. Después se iniciaba el periodo del secado al aire por 21 días, durante los cuales se pesaban las probetas para observar la cinética del secado.

Ensayo de compresión axial: a la edad de 28 días, las bases de las probetas eran lijadas y regularizadas con una capa de una pasta de yeso. El ensayo de compresión axial fue desarrollado en un equipo Instron 4468, con velocidad de desplazamiento de 1 mm/min, anotándose la carga máxima suportada pela probeta. La tensión de ruptura (en MPa) era calculada dividiéndose la carga máxima por la área de la sección transversal de la probeta.

Análisis estadística: la análisis de variancia de los datos de la tensión de ruptura fue efectuada con el auxilio del software Statgraphs 5.1. Los valores promedios de la tensión de ruptura fueron comparados a través del teste de Tukey (al 95% de confiabilidad estadística) Las

variables independientes consideradas fueron los tipos de partículas vegetales (virutas y aserrín) y los tratamientos a ellas aplicados (Natural - **Nat**, Natural + Cloruro de calcio - **NCC**, Natural + Sulfato de aluminio - **NSA**, Natural + Silicato de sodio - **NSS**, Lavado - **Lav**, Lavado + Cloruro de calcio - **LCC**, Lavado + Sulfato de aluminio - **LSA**, Lavado + Silicato de sodio - **LSS**, Lavado en cal - **LCA**, Lavado en soda - **LSO** y Mineralizado - **Min**).

En una segunda etapa, para los tratamientos Nat, NCC, NSA y NSS, aplicados a los compuestos con aserrín, también se consideró como variable independiente, el tipo de cemento (Bio-Bio-ARI, Bio-Bio Siderúrgico y Polpaico Puzolánico)

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Con excepción de algunos tratamientos presentados en la Tabla 1, se pudo observar una clara superioridad de los compuestos del cemento con aserrín con relación a aquellos con la viruta. Dos factores pueden explicar esa diferencia en la resistencia de los compuestos a base de los dos tipos de partículas de madera. Primeramente, la estructura de los compuestos es muy diferente, pues la compactación es mucho más eficiente en los compuestos fabricados con partículas de aserrín (consumo de partículas en el compuesto de 270 kg/m³), do que en los compuestos con virutas (consumo de 220 kg/m³), con las cuales se observa un tipo de amortiguación de la presión aplicada. Al mismo tiempo, el consumo del cemento, para el mismo volumen de compuesto obtenido, es más elevado para partículas de aserrín (800 kg/m³) cuando es comparado con las partículas de viruta (640 kg/m³)

Tabla 1- Valores promedios de la resistencia en compresión axial (en MPa), desviación estándar (en MPa) y CV - coeficiente de variación (%).

Tratamiento	Virutas			Aserrín		
	Promedio	Desviación	CV(%)	Promedio	Desviación	CV(%)
Nat	4.98	0.30	6.12	8.90	0.22	2.45
NCC	6.94	0.54	7.72	11.39	0.31	2.72
NSA	4.71	0.29	6.06	7.31	0.21	2.85
NSS	4.24	0.33	7.84	6.74	0.39	5.83
Lav	5.26	0.10	1.94	8.68	0.51	5.87
LCC	4.86	0.08	1.71	9.42	0.73	7.77
LSA	4.54	0.17	3.77	8.83	0.45	5.04
LSS	5.55	0.34	6.09	6.22	0.45	7.22
LCA	6.54	0.43	6.60	0.96*	0.07	7.21
LSO	4.23	0.18	4.21	1.28*	0.13	10.20
Min	4.64	0.27	5.87	2.44*	0.10	3.95

Leyenda adoptada: Nat – Partículas naturales; NCC - Cloruro de calcio (2%);

NSA – Sulfato de aluminio (2%); NSS – Silicato de sodio (2%); Lav- Partículas lavadas en agua caliente; LCA – Partículas lavadas en solución de cal (5%); LSO - Partículas lavadas en solución de soda (5%); Min – Mineralizadas SS(10%) + SA (20%); * valores no esperados.

La análisis de variancia presentada en la Tabla 2 indicó efectos muy significativos del tipo de partícula vegetal empleada en la fabricación del compuesto con el cemento de fraguado rápido y de los tratamientos aplicados a estas partículas. La interacción entre esos dos parámetros también es muy significativa.

Tabla 2 – Compuestos de partículas de *P. radiata* y cemento de fraguado rápido.
Análisis de variancia para la Tensión – Suma de Cuadrados Tipo III.

Fuente	Soma de Cuadrados	GL	Media Cuadrática	F-teste	Valor-P
Efectos principales					
A: Partículas	89.79	1	89.79	603.36	0.0000
B: Tratamientos	27.98	7	3.99	26.86	0.0000
Interacciones					
AB	17.85	7	2.55	17.13	0.0000
Residual	4.76	32	0.15		
Total (Corrigido)	140.38	47			

Todos los F-teste son basados en los errores de los residuos promedios cuadráticos

El *Multiple range test* presentado en la Tabla 3 confirma la diferencia estadísticamente significativa entre las partículas de *P. radiata* en la forma de viruta y aserrín.

Tabla 3- Grupos homogéneos par la tensión vs partículas

Método	Teste de Tukey			Grupos Homogéneos
	HSD	95%		
Partículas	Número	Promedio LS	LS Sigma	
1:Viruta	24	5.14	0.08	x
2:Aserrín	24	7.87	0.08	x
Contraste		Diferencia	Limites	
1-2		*-2.74	0.23	

* indica una diferencia estadística significativa al 95%.

Virutas

Considerándose que la resistencia a la compresión de los compuestos de los dos residuos vegetales es significativamente diferente y que esos residuos son generados en etapas distintas del procesamiento mecánico de la madera, se adoptó presentar los resultados de forma separada. Para la viruta el análisis estadística (*multiple range test*) indicó la existencia de 4 grupos homogéneos, con los datos de los valores promedios de tensión de ruptura, organizados de forma creciente en un mismo grupo y también creciente entre los diferentes grupos ($G1 < G2 < G3 < G4$):

G1: NSS, LSA, NSA, LCC;

G2: LSA, NSA, LCC, Lav;

G3: NSA, LCC, Lav, LSS;

G4: Nat y NCC.

En los grupos G2 y G3 se pudo observar la ocurrencia de las partículas lavadas en agua caliente (Lav) Este facto indica que el empleo de los parámetros adoptados en el tratamiento (duración y temperatura de lavado) no permitió alcanzar el objetivo deseado, o entonces, lo que es más probable, que la madera de *P. radiata* sea moderadamente compatible con el cemento, provocando solamente un retardo de su fraguado sin alterar de forma substancial las características del pegante. De esa manera, en la fabricación de compuestos del cemento de fraguado rápido (ARI) con virutas de *P. radiata*, aparentemente no se necesita adoptar tratamientos muy sofisticados, pues incluso las partículas en su forma natural producen adecuada resistencia en compresión. Evidentemente, para una aplicación industrial, la

posibilidad de utilizar partículas naturales es mucho más atractiva, pues no requiere que se efectúen cambios significativos en el diseño de la instalación.

Aserrín

El análisis estadístico también indicó la existencia de 4 grupos homogéneos para los compuestos a base del aserrín.

G1: LSS y NSS; G2: NSS, NSA; G3: Lav, LSA, Nat, LCC; G4: NCC.

Los resultados indican la misma tendencia observada para el caso de los compuestos con virutas, denotando no necesitar efectuar tratamientos más sofisticados, pues, nuevamente, el tratamiento NCC se posiciona como el más efectivo. Pero, de forma inesperada, los tres tratamientos: lavado en solución de cal (LCA), lavado en solución de soda (LSO) y mineralizado (Min), teóricamente favorables a la reacción entre el cemento y las partículas vegetales, no contribuyeron para la resistencia en compresión, conforme está destacado en la Tabla 1. Una posible explicación para la existencia de tales compuestos con resistencias en compresión totalmente inadecuadas, se puede atribuir al procedimiento operacional adoptado. Probablemente, después de los tratamientos efectuados, no sea posible separar adecuadamente los residuos de las sustancias químicas, (hidróxido de calcio, hidróxido de sodio, silicato de sodio y sulfato de aluminio) del aserrín. Al prepararse las mezclas, la masa de aserrín es modificada, siendo remplazada parcialmente por sustancias pulverulentas residuales, las cuales afectaran de forma negativa las reacciones del cemento. Incluso, se pudo observar que mientras que el contenido promedio de humedad de las diferentes probetas, a los 28 días, se ubicó en el rango del 15% al 20%, para las probetas LCA y LSO, el valor promedio fue del orden del 8%, con excesiva evaporación del agua y notándose un aspecto inadecuado de la mezcla, la cual se transformaba en un polvo mediante una presión manual.

Mientras tanto, una segunda mineralización (5% de silicato de sodio + 5% de cloruro de calcio) proporcionó la obtención de un compuesto con resistencia en compresión promedia de 11 MPa. Aparentemente, la acción del cloruro de calcio es la principal responsable por la adecuada reacción entre el aserrín natural y el cemento. En todo caso, sobre un aspecto económico esta alternativa no se muestra tan interesante, pues en el tratamiento natural y cloruro de calcio (NCC) se emplea solamente 2% de cloruro de calcio. Todavía, en este trabajo no se analizó la durabilidad del compuesto, teóricamente superior después de aplicar los tratamientos de mineralización (Furuno et al., 1991).

Efecto del tipo del cemento: para los tratamientos natural (Nat), natural y cloruro de calcio (NCC), natural y sulfato de aluminio (NSA) y natural y silicato de sodio (NSS), se evaluó el efecto del tipo de cemento empleado (ARI - alta resistencia inicial, siderúrgico y puzolánico) La análisis de variancia presentada en la Tabla 4 indica que los dos efectos (tipo de cemento y tipo del tratamiento) y su interacción también fueran altamente significativas al nivel de 95% de probabilidad.

Tabla 4 - Efecto del tipo de cemento y del tratamiento.
Análisis de variancia para la Tensión – Suma de Cuadrados Tipo III.

Fuente	Soma de Cuadrados	GL	Media Cuadrática	F-teste	Valor-P
Efectos principales					
A: Cemento	35.94	2	17.97	107.22	0.0000
B: Tratamientos	115.01	3	38.34	228.76	0.0000
Interacciones					
AB	17.31	6	2.89	17.22	0.0000
Residual	4.02	24	0.17		
Total (Corrigido)	177.28	35			

Considerándose los tratamientos agrupados se obtuvo que el cemento de fraguado rápido (promedio de 8,59 MPa) fue superior estadísticamente al cemento siderúrgico (promedio de 6,76 MPa) y esto al cemento puzolánico (6,26 MPa). Considerándose los tipos de cemento agrupados, el tratamiento NCC (promedio de 10,21 MPa) presentó un resultado muy superior al tratamiento NSA (promedio de 5,52 MPa) y NSS (promedio de 6,57 MPa), los cuales no acrecen ventajas cuando comparados con el tratamiento natural (promedio de 6,57 MPa). El tratamiento NCC fue lo más efectivo para todos los cementos utilizados: fraguado rápido (11,39 MPa), siderúrgico (9,31 MPa) y Puzolánico (9,94 MPa)

5. CONCLUSIONES

El compuesto de *Pinus radiata* y cemento analizado en este trabajo indicó las siguientes tendencias:

- las partículas de aserrín proporcionaran la obtención de compuesto con una resistencia en compresión superior a aquella del compuesto con virutas.
- el cemento de fraguado rápido fue más efectivo que los cementos puzolánicos y siderúrgicos para neutralizar los constituyentes nocivos contenidos en la madera de *P. radiata*.
- de entre los tratamientos aplicados a las partículas de *P. radiata* la utilización del cloruro de calcio (al 2%) fue más efectiva y proporcionó una mayor resistencia para los compuestos.

6. AGRADECIMENTOS

Los autores son gratos a las empresas Mapal y Cemento Bío-Bío por los materiales donados y a la Fundación Andes por la beca.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AROLA R. A. (1992). Chunkrete: an alternative to concrete. In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 121-131.
- ASSOCIACIÓN BRASILEÑA DE ESTANDARDS TECNICOS – ABNT- NBR 7215 (1991). Mortero de cemento Portland. Especificación. Rio de Janeiro, 8p.

- 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. (1994). Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 222p.
- BERALDO A. L., BARTHOLOMEU A., BATISTA A. M., FAGUNDES A. C., ROLIM M. M., SEGANTINI A. V (1996). Viabilidade de fabricação de compósitos resíduos de madeira e cimento Portland (CBC). In: Workshop Reciclagem e Reutilização de resíduos como materiais de construção civil. ANTAC, EPUSP, São Paulo, p. 79-84.
- BERALDO A. L., CARVALHO J. V. (2004). Compósito Eucalyptus grandis-cimento Portland. *Scientia Forestalis*, São Carlos, SP, v.1, n.1, p. 150-161.
- BIBLIS E. J., LO C. (1968). Sugars and others wood extractives: Effect on the setting of southern-pine cement mixtures. *Forest Products Journal*, 18(8), p. 28-34.
- FISCHER V. F., WIENHAUS O., RYSEL M., OLDBRECHT J. (1974). The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards. *Holztechnologie*, 15(1), p. 12-19.
- FURUNO T., UEHARA T., JODAI S. (1991). Combinations of wood and silicate. I – Impregnation by water glass and application of aluminum sulfate and calcium chloride as reactants. *Mokuzai Gakkaishi*, v. 37, n. 5, p. 62-472.
- HOFSTRAND A. D., MOSLEMI A. A., GARCIA J. F. (1984). Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement. *Forest Products Journal*, 34(2), p. 57-61.
- IRLE M., SIMPSON H. (1992). Agricultural residues for cement-bonded composites. In: Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference, Moscow, Idaho, USA, v. 3, p. 54-58.
- LANGE H., SIMPATUPANG M. H. (1985). 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.
- LEE A. W. C., HONG Z., PHILLIPS D. R., HSE C. Y. (1987). 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.
- LEE A. W. C., SHORT P. H. (1989). Pre-treating hardwood for cement-bonded excelsior board. *Forest Products Journal*. 39(10) p. 68-70.
- LIGNUM. (1960). Base technologiques/matériaux derives du bois/Matériaux à base de particules de bois et de liant mineral. Zurich, Suisse, 9p.
- MILLER D. P., MOSLEMI A. A. (1991). Wood-cement composites: Effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood and Fiber Science*, 23(4), p. 472-482.
- MOSLEMI A. A. (1988). Inorganically bonded wood. *Chemtech*, Aug., p. 504-510.
- MOSLEMI A. A., GARCIA J. F., HOFSTRAND A. D. (1983). Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems. *Wood and Fiber Science*, 15(2), p. 164-176.
- MOSLEMI A.A., LIM Y. T. (1984). Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. *Forest Products Journal*, 34(7/8), p. 22-26.
- MOUGEL E. (1992). 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, 160p.
- PIMIANTA P., CHANDELLIER J., RUBAUD M., DUTRUEL F., NICOLE H. (1994). Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. *Cahiers du CSTB*, Paris, France, 2073, 45p.
- PUGEL A. D., PRICE E. W., HE C. Y. (1990). Composites from Southern Pine juvenile wood. Part 2. Durability and dimensional stability. *Forest Products Journal*, 40(3), p. 57-61.

- RASHWAN M. S., HATZINIKOLAS M., ZMAVC R. (1992). Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue. *Forest Product Journal*, 42, p. 57-64.
- SCHWARZ H. G. (1988). Cement-bonded boards in Malaysia. In: International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p. 91-92.
- SCHWARZ H. G., SIMATUPANG M. H. (1984a). 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.
- _____. (1984b). Eingung des Buchenholzes zur Herstellung zementgebundener Holzwerkstoffe. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 42, p. 265-270.
- SIMATUPANG M. H., SCHWARZ H. G., BRÖKER F. W. (1978). Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In: 8th World Forestry Congress, Jakarta, Indonesia, Oct., p. 98-120.
- SIMATUPANG M. H.; LANGE H.; KASIM A.; SEDDIG N. (1988). Influence of wood species on the setting of cement and gypsum. In: International Conference of fiber and particleboard bonded with inorganic binder, Spokane, USA, v. 1, p. 33-42.
- VALENZUELA W. A. (1989). 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, 135p.
- WEATHERWAX R. C., TARKOW H. (1964). Effect of wood on setting of Portland cement. *Forest Products Journal*, 14(2), p. 567-570.
- _____. (1967). Effect of wood on setting of Portland cement: decayed wood as an inhibitor. *Forest Products Journal*, 17(7), p. 30-32.
- ZHENG TIAN L., MOSLEMI A. A. (1985). Influence of chemical additives on the hydration characteristics of Western Larch wood-cement-water mixtures. *Forest Products Journal*, 35(7), p. 37-43.