

NOTAS TÉCNICAS

COMPUESTOS NO-ESTRUCTURALES DE CEMENTOS COMERCIALES Y ASERRÍN DE MADERAS ARGENTINAS

NON-STRUCTURAL COMPOSITES OF SAWDUST FROM ARGENTINA WOOD SPECIES AND COMERCIAL CEMENTS

Antonio L. Beraldo¹, Humberto Balzamo²

RESUMEN

En el procesamiento mecánico de la madera se generan importantes volúmenes de residuos los cuales en su mayor parte aún no se emplean en la fabricación de componentes para la construcción. En este trabajo investigativo, se evaluó el comportamiento de un compuesto no-estructural de aserrín de dos especies de maderas argentinas combinadas con tres tipos de cementos comerciales. Partículas de maderas (*Eucalyptus grandis* y *Poplar* sp) fueron sometidas a diversos tratamientos y combinadas con tres tipos de cementos comerciales (CPC40, ARI50 y CPP40). Inicialmente, la eficiencia de la reacción fue investigada por medio del ensayo calorimétrico (curva de hidratación). A seguir, probetas cilíndricas fueron sometidas al ensayo de compresión simple, después de 14 días de fabricación. Al mismo tiempo, la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) fue evaluada durante la etapa de endurecimiento de las mezclas. Los resultados obtenidos se mostraron muy coherentes entre sí, permitiendo destacar los efectos de los factores naturaleza de la madera, tipo de cemento y tipo de tratamiento, además de las interacciones entre estos factores. La combinación más efectiva fue el empleo de partículas de *E. grandis*, combinadas indistintamente con los cementos CPC40 o ARI50, adicionados con 3% de cloruro de calcio.

Palabras clave: Compuestos no estructurales, biomasa vegetal, ultrasonido, curva de hidratación, *Eucalyptus grandis*, *Poplar* sp

ABSTRACT

The most part of residues generated during wood mechanic processing remains unexplored for construction material non-structural compounds production. *Eucalyptus grandis* and Cottonwood (*Poplar* sp) particles were submitted to several treatments, combining three cements (blast furnace slag, high initial strength and puzolanic). Firstly, binder reaction efficacy was investigated by means a calorimetric test (mixture hydration curves). After, cylindrical specimens were submitted to a compression test at 14 days old. Also, ultrasonic pulse velocity (UPV) was obtained during composite hardening process. Results obtained were very coherent detecting the effect of the biomass and cement types, the effect of the treatment applied to the wood particles and the interaction between these parameters. The most effective combination was obtained when a combination of *E. grandis* particles with blast furnace slag or high initial strength cements, both with 3% calcium chloride addition was used.

Keywords: Non-structural composites, vegetable biomass, ultrasound, hydration curve, *Eucalyptus grandis*, *Poplar* sp

¹ Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Estatal de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina. hbalzamo@fi.uba.ar
Autor para correspondencia: beraldo@agr.unicamp.br
Recibido: 16.01. 2009. Aceptado: 09.10. 2009

INTRODUCCIÓN

Lograr una adecuada disposición de los diversos desechos generados en las distintas actividades industriales es uno de los más grandes desafíos de la sociedad actual. En este trabajo se incluye el aprovechamiento de los residuos de los aserraderos, pues la mayor parte de ellos se pierde o descarta sin considerar los posibles daños producidos al medio ambiente. Asimismo, se analizan distintas alternativas para mejorar las propiedades físico-mecánicas de los compuestos, a saber: lavado de las partículas de madera en agua y en solución alcalina, empleo de catalizadores y de mineralización.

Los compuestos de biomasa vegetal y aglomerantes inorgánicos comprenden una larga gama de productos, que pueden ser clasificados en algunas categorías con respecto a sus particularidades y a los porcentajes empleados. Varias son las ventajas aportadas por el empleo de los compuestos de madera y cemento (CMC). Los “agregados” vegetales se encuentran disponibles a un precio competitivo y a diferencia de los minerales (arena, piedra, ripio) son materiales renovables, cuya cosecha no afecta significativamente al medio ambiente. Inclusive, los CMC permiten almacenar de una forma eficiente el gas carbónico, pues considerándose una dosis de 200 a 300 kg de residuos de madera empleados en un metro cúbico de CMC, se puede estimar alrededor de 500 kg de gas carbónico potencialmente inmovilizado en la matriz de cemento. Esa cantidad de gas carbónico sería emitida a la atmósfera en caso de que la madera fuera quemada.

Una biomasa vegetal cualquiera (aserrín de madera, partículas de bambú, cáscara de arroz), mezclada con cemento comercial, produce cambios significativos en la cinética de la hidratación de los mayores constituyentes del aglomerante (C_2S , C_3S , C_3A y C_4AF), los cuales reaccionan de una forma particular con los extractivos del aserrín. Esta reacción entre el cemento y el aserrín de la madera es denominada “compatibilidad química” y depende de una serie de factores, de entre ellos el tipo de cemento y el tipo y contenido de extractivos presentes en la biomasa vegetal (Hachmi y Moslemi 1989).

El primer estudio que debe llevarse a cabo al empezar la investigación de la fabricación del compuesto cementiceo con una determinada biomasa vegetal se refiere a evaluar la compatibilidad química entre ellos (Sandermann *et al.* 1960, Moslemi y Lim 1984, Hofstrand *et al.* 1984, Beraldo 1999). Se destacan dos alternativas:

- Evaluar la curva de hidratación de la mezcla;
- Evaluar el comportamiento físico y mecánico del compuesto por medio de ensayos no destructivos y destructivos.

La primera alternativa presenta la gran ventaja vinculada con el corto tiempo necesario para colectar los datos. Generalmente dentro de las 24 h se obtienen los parámetros que permiten conocer el grado de interacción entre la biomasa vegetal y el cemento.

Varios autores se han dedicado a este tema y los parámetros evaluados inicialmente han sido la temperatura máxima alcanzada por la mezcla y el tiempo necesario para que esto suceda, tanto para las distintas mezclas como también para una pasta de referencia: Sandermann *et al.* (1960), Moslemi y Lim (1984), Hofstrand *et al.* (1984). Posteriormente Miller y Moslemi (1991) evaluaron la pendiente máxima de las curvas y el área bajo las curvas de la temperatura a lo largo del tiempo.

Sin embargo, se puede decir que ese experimento es una *condición necesaria pero no suficiente* para garantizar la existencia de una compatibilidad química entre la biomasa vegetal y el cemento. Por este motivo para la evaluación de la compatibilidad entre la madera y la pasta de cemento fueron propuestos varios índices intentando uniformizar los resultados.

$$I_{ti} = 100 \frac{t_m - t_c}{t_c} \quad (1)$$

$$I_{te} = 100 \frac{T_c - T_m}{T_c} \quad (2)$$

$$I_p = 100 \frac{p_c - p_m}{p_c} \quad (3)$$

$$I_a = 100 \frac{a_c - a_m}{a_c} \quad (4)$$

$$I_c = 100 \frac{(t_m - t_c)}{t_c} \frac{(T_c - T_m)}{T_c} \frac{(p_c - p_m)}{p_c} \quad (5)$$

m = valores relativos a la mezcla; c = valores relativos a la pasta de cemento.

T = temperatura máxima alcanzada por la mezcla;

t = tiempo necesario para alcanzar esa temperatura;

p = pendiente máxima de la curva de hidratación;

a = área bajo la curva de hidratación.

I_{ti} = índice del retardo relativo del tiempo Weatherwax y Tarkow (1964);

I_{te} = índice de la disminución relativa de la temperatura Weatherwax y Tarkow (1964);

I_p = índice de la pendiente máxima relativa;

I_a = índice de la disminución relativa del área Moslemi y Lim (1984);

I_c = índice de compatibilidad Hofstrand *et al.* (1984).

La segunda alternativa indica que la producción de compuestos de cemento con una biomasa vegetal cualquiera se materializa por el grado de interacción obtenido en la mezcla, que puede ser evaluado globalmente por medio de la aplicación de ensayos no destructivos como el ultrasonido (Beraldo 1999, Beraldo y Martins 2007) u ondas de presión (Teixeira y Moslemi 2001) o destructivos como el ensayo de compresión Lee *et al.* (1987), pudiendo verificar la interacción a través de la correlación de los resultados.

Con respecto al empleo del ultrasonido, la obtención de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) a lo largo del tiempo de vida de la probeta es una forma muy eficiente de evaluar los cambios producidos en el seno de la mezcla mientras se producen las reacciones de hidratación del aglomerante. Esos cambios son más significativos en las primeras etapas de vida de la probeta, observándose después una tendencia a la estabilización de la VPU alrededor de una semana de vida. El desarrollo de la VPU a lo largo del tiempo de vida de la probeta, obedece a una ley exponencial:

$$v = v_{\max} \{1 - \exp(A + Bt)\} \quad (6)$$

Los coeficientes A y B (generalmente negativos) reflejan de una cierta manera la cinética de la reacción entre la pasta del cemento (natural o con catalizadores) y los constituyentes de la biomasa vegetal (Beraldo 1999).

La magnitud de la VPU máxima es un buen indicador del grado de compatibilidad entre la madera y el cemento; valores ubicados en el rango del 1.5 a 2.0 km/s para la VPU, normalmente indican que los compuestos presentan buena calidad, mientras que valores del orden del 0.5 km/s denotan la existencia de una estructura irregular, provocando una disipación acentuada de la energía de propagación de la onda ultrasónica. Este hecho puede originarse tanto debido a la falta de compatibilidad química entre la madera y el cemento, como también por una proporción excesiva de madera en relación al cemento. Además, conforme Teixeira y Moslemi (2001), con los datos de densidad de la probeta y de la VPU es posible estimar el módulo de elasticidad dinámico (E_d en GPa), por medio de:

$$E_d = \rho(VPU)^2 \quad (7)$$

ρ = densidad de la probeta (kg/m^3)

El objetivo de este trabajo fue evaluar la interacción entre residuos de aserraderos de dos especies de maderas combinados con tres tipos de cementos argentinos con el fin de obtener información preliminar para la producción de compuestos no estructurales.

MATERIALES Y MÉTODOS

-Obtención del aserrín

En este estudio fueron utilizadas las siguientes especies:

- Eucalipto (*Eucalyptus grandis*), resultante de la fabricación de muebles en el taller del Centro de Investigación Tecnológica de la Madera y Afines - CITEMA (Hurlingham);
- Álamo (*Populus* sp), producido del aserrado primario en el Aserradero Ederra S.A. (San Fernando).

-Análisis granulométrico

En principio se hizo un estudio de la distribución en tamaño de las partículas vegetales y se las comparó con una arena fina del Río Paraná, empleada normalmente en la construcción, como se muestra en la Figura 1.

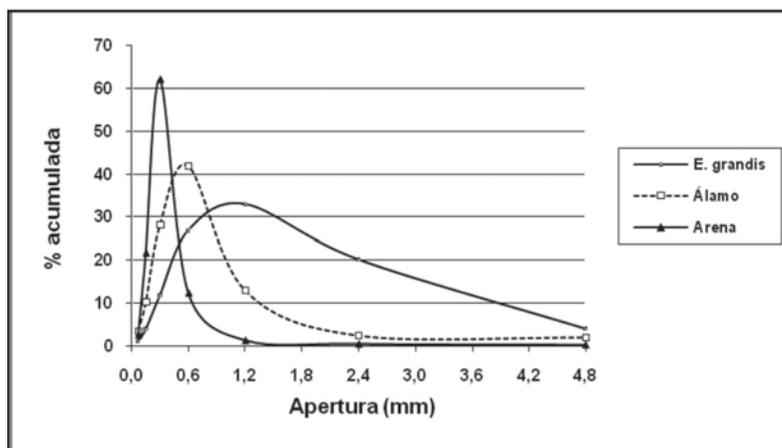


Figura 1: Granulometría de la arena y de las partículas de maderas.

-Determinación de la densidad aparente del aserrín

Para la realización de los ensayos y para la fabricación de las probetas se seleccionaron las partículas de madera pasantes en el tamiz nº #8 (2.38 mm).

La densidad aparente de los distintos aserrines en la condición no compactada fue obtenida en un recipiente de 3 litros de capacidad. Las partículas vegetales fueron colocadas sin compactación en el precipitado para registrar la masa de las partículas. Para cada una de las especies vegetales fueron efectuadas 3 determinaciones. Los resultados obtenidos indicaron los siguientes valores promedios de densidad aparente: *E. grandis* (190 kg/m³) y *Populus* sp (170 kg/m³).

-Tipos de cemento

La naturaleza del cemento ejerce una marcada interferencia en la efectividad de la reacción de sus constituyentes con cualquier biomasa vegetal. Por sus diferentes constituciones químicas, los cementos reaccionan de manera diferente y de acuerdo con los porcentajes de los constituyentes, éstas reacciones se producen adecuadamente o en el caso de uso de una biomasa extremadamente inhibidora, los extractivos pueden neutralizar completamente las reacciones de hidratación del cemento.

Fueron usados los siguientes cementos:

- a) CPC 40 - IRAM 50000 – cemento **C1 (IRAM, 2000a)**;
- b) ARI50 - IRAM 50001 – cemento **C2 (IRAM, 2000b)**;
- c) CPP40 – ARS - IRAM 50001 – cemento **C3 (IRAM, 2000b)**.

-Tratamientos aplicados a las partículas de madera

Para este trabajo fueron seleccionados los siguientes tratamientos:

- a) Natural – correspondiente a las partículas de madera pasantes en el tamiz de apertura #8 (2.38 mm) – Tratamiento T1;
- b) Lavado – las partículas de madera fueron sometidas durante 1 h a una temperatura en agua de 80 °C. Luego, fueron lavadas en agua corriente y secadas en estufa – Tratamiento T2;
- c) Lavado en solución diluida de cemento – las partículas de madera fueron sumergidas en una solución diluida de cada tipo de cemento en agua al 2% y a temperatura ambiente durante 24 h, para exponerlas a un medio alcalino y aumentar la eficacia de extracción de sustancias inhibidoras al fraguado. Luego, las partículas de madera fueron lavadas con agua corriente y secadas en estufa – Tratamiento T4;
- d) Uso de aditivos aceleradores de fraguado: En algunas ocasiones, los tratamientos de extracción aplicados a las partículas vegetales, no se muestran efectivos para anular los efectos nocivos de las sustancias inhibidoras al fraguado del cemento, como alternativa se emplean aceleradores y de entre ellos el más efectivo generalmente es el cloruro de calcio, Moslemi y Lim (1984).

En las mezclas con partículas de madera, fueron investigados tres tipos de aceleradores (cloruro de calcio, silicato de sodio y sulfato de aluminio). El producto utilizado contenía 24% de cloruro de calcio – Tratamiento T3; el silicato de sodio (en solución) – Tratamiento T5 y el sulfato de aluminio (en polvo) – Tratamiento T6, conteniendo además 37% y 54% de constituyentes sólidos. Todos los catalizadores de fraguado fueron utilizados al 3% en relación a la masa del cemento. Todos los aceleradores eran inicialmente disueltos en agua y luego introducidos en la mezcladora.

e) Mineralización de las partículas vegetales: se evaluó el efecto de la mineralización de las partículas vegetales para crear alrededor de ellas una capa protectora.

- e1) Inmersión de las partículas en una solución al 1.5% de silicato de sodio durante 5 minutos, seguido de una nueva inmersión en una solución al 5% de sulfato de aluminio – Tratamiento T7;
- e2) Inmersión de las partículas en una solución al 1.5% de silicato de sodio durante 5 minutos, seguido de una nueva inmersión en una solución al 1.5% de cloruro de calcio – Tratamiento T8.

-Curva de hidratación

Weatherwax y Tarkow (1964) emplearon en mezclas con cemento, partículas de madera pasantes en el tamiz nº 200 (0.075 mm). En este trabajo de investigación se evaluó el comportamiento de partículas pasantes en el tamiz nº 30 (0.60 mm), por ser más realista para el caso de la fabricación de los productos. El objetivo fue comparar las especies madereras y diferentes tipos de cemento.

La mezcla fue constituida por 200 g de cemento, 15 g de aserrín seco en estufa a 105 ± 5 °C. La masa de agua fue calculada por medio de la ecuación 8:

$$m_a = 0.25m_c + 2m_m \quad (8)$$

siendo:

m_a = masa del agua (g)

m_c = masa del cemento (g)

m_m = masa de madera seca (g)

El ensayo fue efectuado en el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Estatal de Campinas – SP – Brasil.

Para efectuar la mezcla, se utilizó una bolsa plástica en la que incorporaron el cemento, las partículas de madera y el agua, homogenizando todos los componentes. La bolsa fue introducida en una caja aislada térmicamente. Se controló la temperatura cada 5 minutos por medio de termómetros-resistivos PT 100 y un sistema de adquisición de datos Novus Datalogger. Los datos fueron exportados a una planilla Excel, permitiendo evaluar la temperatura máxima de hidratación de la mezcla y tiempo en alcanzarla, la pendiente máxima de la curva y el área bajo la curva. También se evaluaron los mismos parámetros para las pastas de cemento (en estos casos la masa de agua fue mantenida constante e igual a 50 g), buscando efectuar la comparación entre los distintos parámetros involucrados en las reacciones de hidratación (especie vegetal, tipo de cemento y del acelerador de fraguado – cloruro de calcio al 3% de la masa del cemento).

Preparación de las mezclas y producción de las probetas

Para el ensayo se moldearon probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro y largo de 100 mm, adaptándose la norma brasileña NBR 7215 (ABNT, 1996). La masa de cemento fue mantenida constante e igual a 320 g (correspondiendo a un consumo de alrededor 540 kg de cemento por m³ de compuesto). La cantidad de agua fue obtenida empíricamente por una inspección visual pues para este tipo de mezcla el ensayo de fluidez no es adecuado.

a) *Eucalyptus grandis*: masa de cemento = 320 g; masa de madera = 150 g y masa del agua = 220 g (relación de **1 : 0.41 : 0.69**).

b) *Populus* sp: masa de cemento = 320 g; masa de madera = 130 g y masa del agua = 220 g (relación de **1 : 0.39 : 0.69**).

En una mezcladora Hobart, se introdujo el agua y después el cemento. La mezcla se efectuó durante 2 minutos y luego se adicionaron lentamente las partículas vegetales durante 3 minutos más. La mezcla fue colocada con una espátula en cuatro capas en los moldes cilíndricos y recibiendo cada una de las capas 10 golpes por medio de un cilindro metálico de 1 kg de masa. Luego, los moldes fueron depositados en una bolsa plástica y mantenidos en una cámara húmeda durante 24 h. El curado se realizó en dos etapas, la primera durante una semana en una cámara húmeda y otra semana en una sala climatizada con una humedad relativa del 60% y temperatura de 21 °C. Durante la segunda etapa de curado, las probetas fueron pesadas diariamente.

Ensayo no Destructivo – END

El ensayo fue efectuado en el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Estatal de Campinas. Solamente fueron efectuadas mezclas con partículas de *E. grandis* con los tres tipos de cemento. Se usó la proporción (en masa) de 1 : 0.375 : 0.70. Inmediatamente después del desmolde, se determinó la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) a través de las probetas por medio del empleo del equipo Ultrasonic Tester BP-7 de marca Steinkamp, disponiendo de transductores de sección exponencial de 45 kHz de frecuencia de resonancia. Durante una semana, las probetas fueron mantenidas en curado húmedo y se repitió este procedimiento para evaluar el desarrollo de las reacciones de hidratación por medio de los cambios en la VPU, permaneciendo luego durante una semana más en ambiente de laboratorio.

Además del empleo de mezclas de referencia madera-cemento, también se fabricaron probetas con la adición del acelerador cloruro de calcio (al 3% en relación a la masa del cemento).

Se obtuvo la VPU relativa para un tiempo de vida de 14 días, valor que fue adoptado en este trabajo, como la velocidad máxima de propagación (v_{\max}) en la ecuación (6), citada por Beraldo (1999). Con los datos de la UPV y de la densidad, se obtuvo el módulo de elasticidad dinámico (E_d) de acuerdo con la ecuación (7).

Ensayos mecánicos

En este trabajo son realizados ensayos de compresión simple y es determinado el módulo de ruptura, por que los compuestos fabricados en madera-cemento, no son usados con fines estructurales sino para aligerar la construcción (Stancato 2005). Además debido a la limitada dimensión de las probetas no se pudo determinar con exactitud las deformaciones y la tensión de proporcionalidad.

Ensayo de compresión simple

Las bases de las probetas fueron regularizadas a los 14 días con una pasta de azufre (75%), grafito (5%) y cuarzo (20%). Después de transcurridas 2 h, se efectuó el ensayo de compresión en un equipo Iber Test, aplicándose una velocidad de carga de 0.5 kN/s. La tensión de ruptura fue obtenida dividiéndose la carga máxima por el área transversal de la probeta.

Análisis Estadístico

Se aplicó un análisis de variancia (ANOVA) a los resultados del ensayo de compresión por medio del software Statgraphics 5.1, al nivel de 95% de confianza (test Tukey). Fueron comparados los factores: tipo de cemento, tipo de partículas vegetales y tipo de tratamiento realizado a las partículas vegetales y sus interacciones con los resultados de la compresión simple.

Fabricación de morteros

En el desarrollo fueron confeccionadas probetas prismáticas (4 cm x 4 cm x 16 cm), según la norma IRAM 1622 (IRAM 2006). Se partió de una mezcla de mortero testigo (relación en masa 1 : 3 : 0.5) y se efectuó el reemplazo de 10% (150 g), 20% (300 g) y 30% (450 g) de arena por aserrín de *E. grandis* en porcentaje de 7% (34.4 g), 14% (68.8 g) y 21% (103.2 g). La masa de cemento fue mantenida constante e igual a 500 g.

Inicialmente se mezcló cemento y arena, luego se le adicionó la mitad del agua, el aserrín y por último el resto del agua. Fueron evaluadas las siguientes propiedades de la mezcla en estado fresco: fluidez, peso de la unidad de volumen y contenido de aire incorporado. El curado se realizó en una cámara húmeda (7 días) y luego en una sala climatizada (7 días).

Las probetas fueron ensayadas en flexión en un equipo Iber Test adoptándose una velocidad de desplazamiento aproximado de 1 división por segundo. Luego se aplicó el ensayo de compresión a las dos mitades de las probetas precedentes. La velocidad de aplicación de la carga fue de 2.5 kN/s.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Curvas de hidratación

En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan las curvas de hidratación de las mezclas de partículas de las maderas naturales (*Populus* sp - **Anat** y *Eucalyptus grandis* - **Enat**) con los cementos CPC40, ARI50 y CPP40, respectivamente. Se nota claramente una similitud entre los comportamientos de las mezclas preparadas con los cementos CPC40 y ARI50 con respecto al efecto del catalizador cloruro de calcio (**ACC** y **ECC**), mientras que para el cemento CPP todas las curvas están muy cercanas unas de las otras.

El análisis de los diferentes índices de compatibilidad, confirma que el cloruro de calcio anticipó los tiempos necesarios para que las mezclas alcancen sus temperaturas máximas y al mismo tiempo hizo aumentar esas temperaturas (Tabla 1). El índice de las pendientes (I_p) se mostró menos efectivo en la determinación de la compatibilidad. Tampoco los índices entre las áreas (I_a) y el índice más utilizado por los investigadores Hofstrand *et al.* (1984), se mostraron adecuados para la comprensión de la compatibilidad.

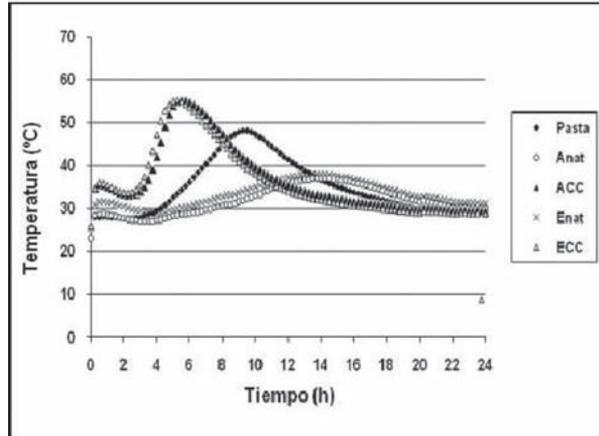


Figura 2 – Curvas de hidratación de la pasta y de mezclas con cemento CPC40.

Anat = *Populus sp* natural; ACC = *Populus sp* y cloruro de calcio;
 Enat = *Eucalyptus grandis* natural; ECC = *Eucalyptus grandis* y cloruro de calcio

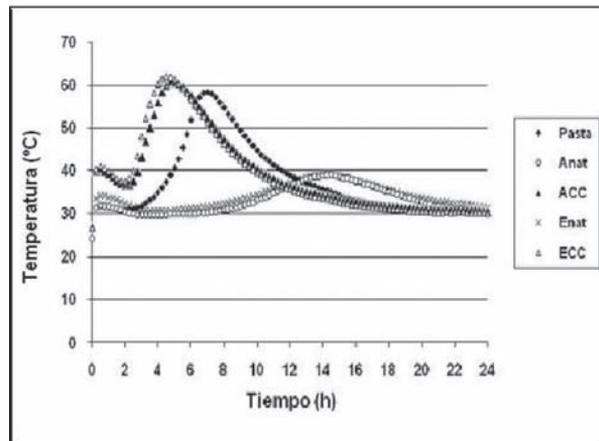


Figura 3 – Curvas de hidratación de la pasta y de mezclas con cemento ARI50.

Anat = *Populus sp* natural; ACC = *Populus sp* y cloruro de calcio;
 Enat = *Eucalyptus grandis* natural; ECC = *Eucalyptus grandis* y cloruro de calcio

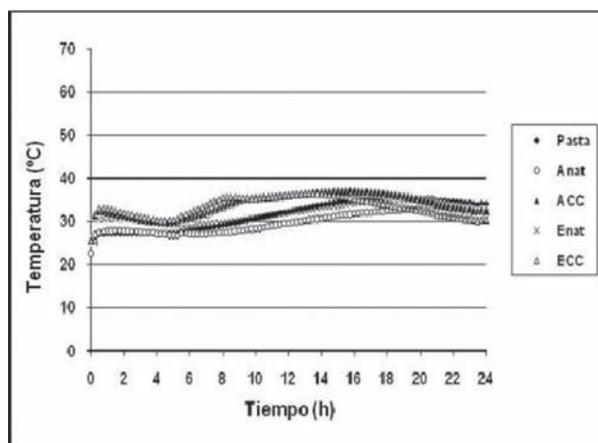


Figura 4 – Curvas de hidratación de la pasta y de mezclas con cemento CPP40.

Anat = *Populus sp* natural; ACC = *Populus sp* y cloruro de calcio;
Enat = *Eucalyptus grandis* natural; ECC = *Eucalyptus grandis* y cloruro de calcio

Tabla 1 – Índice de compatibilidad madera-cemento.

	Indice	Anat	ACC	Enat	ECC
	Iti	43.8	-40.2	42.0	-45.6
	Ite	-22.9	15.2	-21.0	15.2
CPC40	Ip	33.3	-100.0	33.3	-133.3
	Ic	-3.4	6.1	-3.0	9.2
	Ia	-27.3	16.3	-14.9	11.9
	Iti	107.1	-28.9	103.5	-35.0
	Ite	33.0	-3.9	33.2	-6.2
ARI50	Ip	75.0	-16.7	83.3	-33.3
	Ic	26.5	-0.2	28.6	-0.7
	Ia	-33.8	13.1	-26.9	12.5
	Iti	1.3	-19.3	-3.1	-30.0
	Ite	7.6	-4.8	2.0	-2.5
CPP40	Ip	50.0	-50.0	50.0	-50.0
	Ic	0.1	-0.5	0.0	-0.4
	Ia	-18.7	31.5	6.4	25.3

Velocidad del pulso ultrasónico (VPU)

En la Figura 5 se presentan las curvas de la VPU para los compuestos de *E. grandis* con los tres tipos de cementos empleados. Los coeficientes de la curva descrita en la ecuación (6) se presentan en la Tabla 2. De las curvas de VPU, se observa claramente el rol positivo del catalizador (CC), pues las curvas correspondientes siempre se ubican en un rango superior al de las mezclas con las partículas naturales (N). Se observa que la curva correspondiente al cemento ARI50 con partículas naturales, se ubica en el tramo inferior de la figura, con VPU alrededor del 1.0 km/s. Mientras tanto, el empleo del catalizador cloruro de calcio aumenta significativamente la magnitud de la VPU en los compuestos con los tres tipos de cementos. Y, como era de esperar, las VPU máximas para los compuestos a base de los cementos CPC40 y ARI50 son muy similares y superiores al de los compuestos con cemento CPP40.

Las curvas mostraron un aspecto muy similar a aquellos presentados por Beraldo y Martins (2007), para compuestos de partículas de bambú y cementos Pórtland brasileños.

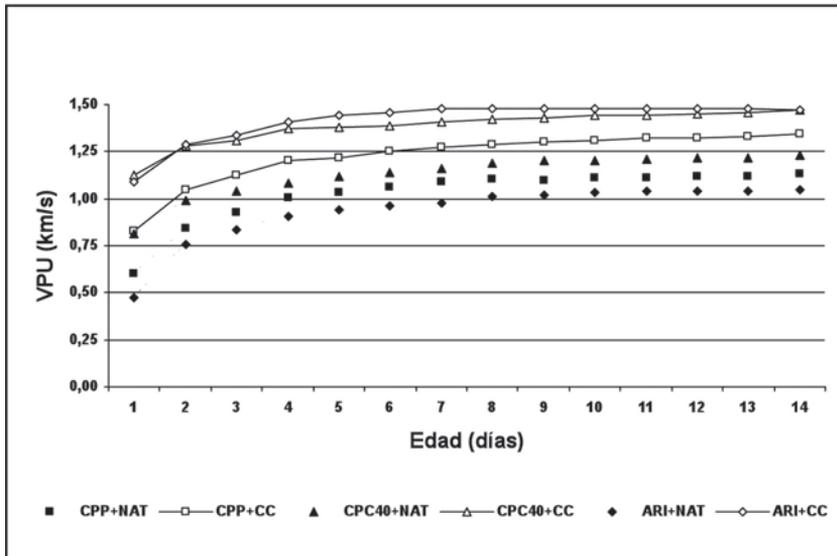


Figura 5 – Velocidad del pulso ultrasónico (VPU) para compuestos de partículas de *E. grandis* naturales (N) y con catalizador (CC) y los cementos CPP40, CPC40 y ARI50.

Tabla 2 – Coeficientes del modelo $V = v_{max} \{1 - \exp(A+B.t)\}$

Coefficientes	CPC40N	CPC40CC	ARI50N	ARI50CC	CPP40N	CPP40CC
v_{max}	1.23	1.47	1.05	1.48	1.13	1.34
A	-0.915	-1.439	-0.463	-0.821	-0.506	-0.824
B	-0.301	-0.250	-0.343	-0.552	-0.397	-0.317
R ²	0.98	0.95	0.97	0.99	0.99	0.98

N = Partículas naturales de *E. grandis* CC= Partículas con catalizador cloruro de calcio.

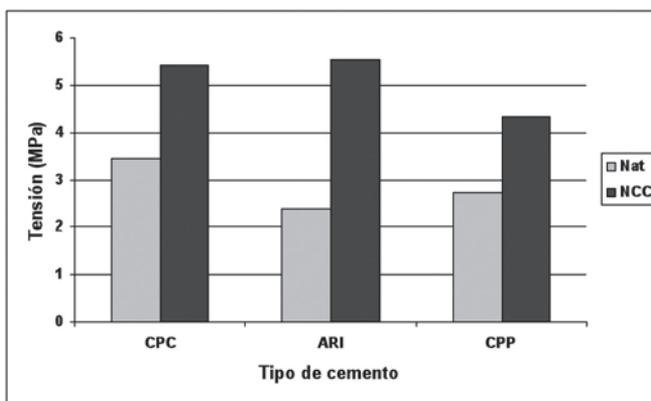
Los valores de E_p , evaluados de acuerdo con la ecuación (7), se ubicaron en un rango de 0.97 al 1.34 GPa, para el caso del empleo de las partículas naturales de *Eucalyptus*, combinadas con los tres tipos de cemento. Con las partículas de *Eucalyptus* tratadas con cloruro de calcio, se observó un aumento significativo del valor de E_p , ubicado en un rango de 1.63 al 2.10 GPa.

Los valores del E_d son muy inferiores al de los hormigones ordinarios, lo que indica que este tipo de compuesto no presenta un comportamiento estructural. Mientras tanto, una importante ventaja es su capacidad de aligerar la construcción, además de sus propiedades de aislamiento térmico y de absorción acústica.

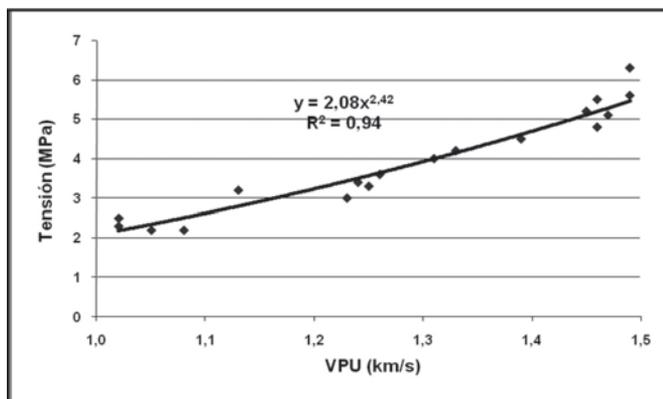
Resistencia a la compresión

La Figura 6a presenta el resultado del ensayo de compresión aplicado a las probetas en laboratorio de Brasil. Los valores más elevados de la VPU confirman el efecto positivo del cloruro de calcio. Cabe resaltar que los valores de resistencia obtenidos, se mostraron muy inferiores a los ensayos en los laboratorios de la Universidad de Buenos Aires – UBA (Figuras 7a y 7b). Mientras los tipos de cemento y las partículas de madera (*E. grandis*) han sido enviados de Argentina, hay otros factores que deben ser considerados (naturaleza del cloruro de calcio, el agua, la forma de efectuar la compactación y el tipo de curado aplicado a las probetas).

A pesar de que la cantidad de datos es reducida, en la Figura 6b se verifica una correlación entre la VPU y la resistencia en compresión, de acuerdo con un modelo matemático de curva de potencia. Teixeira y Moslemi (2001), utilizando el método de ondas de presión en tejas a base de compuestos de madera y cemento, obtuvieron una buena correlación entre módulo de elasticidad estático y varias propiedades de los compuestos (densidad, velocidad de la onda de presión y módulo dinámico). Beraldo y Martins (2007) obtuvieron modelos matemáticos similares al de la Figura 6b, en compuestos de partículas de bambú y cementos brasileños: Tensión = $1.42(\text{VPU})^{1.90}$, para cemento compuesto; Tensión = $0.05(\text{VPU})^{4.56}$, para cemento ARI



(a) Resistencia a la compresión



b) Correlación VPU y resistencia a la compresión.

Figura 6 - Compuestos de *E. grandis* y de los tres tipos de cemento.

La Tabla 3 presenta el análisis de variancia (ANOVA) aplicada a los datos del ensayo de compresión en Brasil. El tipo del cemento (CPP40, CPC40 y ARI50), el tipo de tratamiento adoptado (natural o cloruro de calcio) y su interacción, fueron significativos a nivel del 95% de probabilidad estadística.

Tabla 3 – ANOVA aplicada a los datos del ensayo de compresión (Brasil).

Fuente	Suma de los Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	p-value
Efectos principales					
A: Cemento	1.5786	2	0.7893	4.11	0.0437
B: Tratamiento	20.9736	1	20.9736	109.25	0.0000
Interacciones					
AB	2.8221	2	1.411	7.35	0.0082
Residuos	2.3037	12	0.1920		
Total (corrigido)	27.678	17			

Para todas las propiedades evaluadas es flagrante la ventaja de la adición de cloruro de calcio, sobretodo en la tensión. Entre los tipos de cemento, el CPC40 y el ARI50 muestran predominancia comparados con el CPP40, para casi todas las propiedades evaluadas.

Tabla 4 – Comparación estadística de los valores promedios de las propiedades.

Propiedad	Tratamientos Efectuados		Tipos de Cemento		
	Natural	Cloruro de calcio	ARI50	CPC40	CPP40
Densidad (kg/m ³)	878 ^a	941 ^b	923 ^a	921 ^a	886 ^c
VPU (m/s)	1137 ^a	1428 ^b	1263 ^a	1350 ^b	1233 ^a
E _d (GPa)	1141 ^a	1927 ^b	1531 ^a	1670 ^b	1372 ^c
Tensión (MPa)	2.86 ^a	5.02 ^a	3.92 ^{a,b}	4.31 ^{b,c}	3.58 ^a

Promedios de la propiedad, con la misma letra en la horizontal, no difieren entre si al nivel de 95% de probabilidad estadística (test de Tukey), para los factores tratamientos y tipos de cemento.

Teixeira y Moslemi (2001) obtuvieron modelos matemáticos complejos al estimar el modulo estático en flexión, por medio de los parámetros densidad, UPV y E_d.

En este trabajo, varios modelos matemáticos predictivos de la tensión en función de las demás propiedades fueron evaluados. Lo que resultó más sencillo indica la dependencia más fuerte de la tensión con respecto al modulo dinámico:

$$\text{Tensión} = -0.229 + 0.0027E_d \quad R^2 = 0.95$$

Los ensayos más detallados fueron conducidos en Argentina. La Tabla 5 presenta el resultado del análisis estadístico global (ANOVA) aplicado a los ensayos de compresión, realizados en la Universidad de Buenos Aires – UBA, indicando que todos los factores evaluados (especie de madera, tipo de cemento y tipo de tratamientos aplicados a las partículas de la madera) y también las interacciones entre ellos, son altamente significativos, al nivel de 95% de probabilidad estadística, en la resistencia a la compresión de los compuestos.

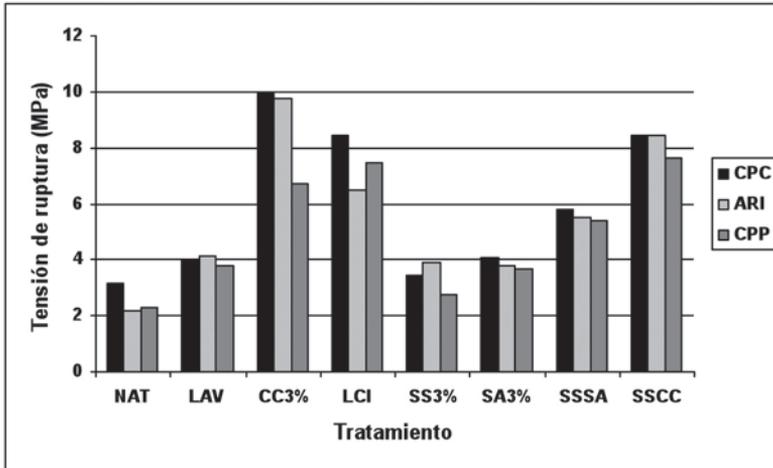
Tabla 5 – ANOVA aplicada a los datos experimentales (Argentina).

Fuente	Suma de los Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	p-value
Efectos principales					
A: Madera	86.8158	1	86.8158	576.91	0.0000
B: Cemento	10.8182	2	5.4091	35.94	0.0000
C: Tratamiento	385.0820	7	55.0118	365.57	0.0000
Interacciones					
AB	1.8788	2	0.9394	6.24	0.0027
AC	75.6593	7	10.8085	71.82	0.0000
BC	29.0248	14	2.0732	13.78	0.0000
Residuos	16.5533	110	0.1505		
Total (corrected)	605.8330	143			

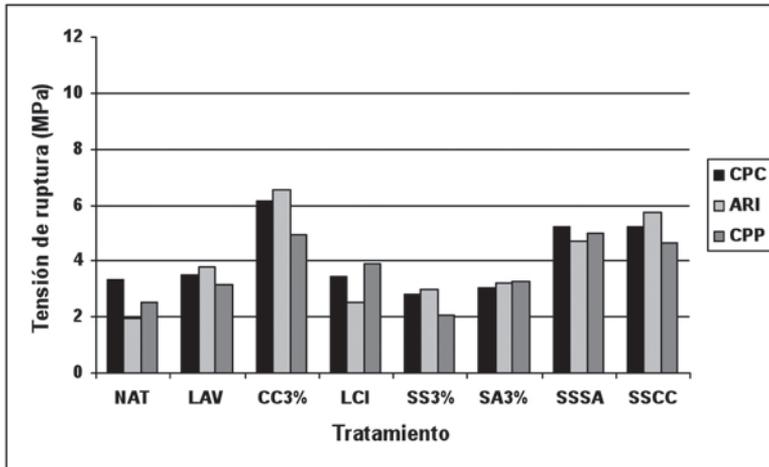
Probablemente, parte de los resultados obtenidos puede ser atribuido a la diferencia entre la constitución química de las maderas (aunque ese parámetro no haya sido evaluado en esta investigación), conforme ha sido relatado por Sandermann *et al.* (1960). El contenido de extractivos en la madera depende de una serie de factores (especie botánica, condiciones del sitio, partes del árbol, edad, región anatómica considerada, época de la tala, etc.). Datos presentados en la literatura son muy variables: 2% (Govin *et al.* 2005), 3.8% (White 1987), 3-5% (Núñez 2005) y hasta un valor muy elevado de 17.91% en una madera tropical (Mori *et al.* 2003). Además, otro factor de importancia a considerar es el tamaño de las partículas. Las del *Populus* sp, presentaban una distribución menos adecuada (mayor porcentaje de finos, Figura 1), lo que es un agravante en los términos de la resistencia mecánica de sus compuestos con los distintos tipos del cemento (Figuras 7a y 7b).

De una manera global, del primer análisis se pudo constatar una jerarquía entre los distintos parámetros involucrados en la magnitud de la resistencia a la compresión.

- Especies de madera: *E. grandis* (5.47 MPa) > *Populus* sp (3.91 MPa);
- Tipos de cementos: CPC40 (5.00 MPa) > cemento ARI50 (4.74 MPa) > cemento CPP40 (4.33 MPa);
- Tipos de tratamientos: T3 (7.34 MPa) > T8 (6.69 MPa) > T4 (5.37 MPa) = T7 (5.29 MPa) > T2 (3.73 MPa) = T6 (3.52 MPa) > T5 (2.99 MPa) > T1 (2.60 MPa).



(a) *E. grandis*



(b) *Populus sp*

Figura 7 – Resistencia a la compresión para compuestos de tres tipos de cementos.

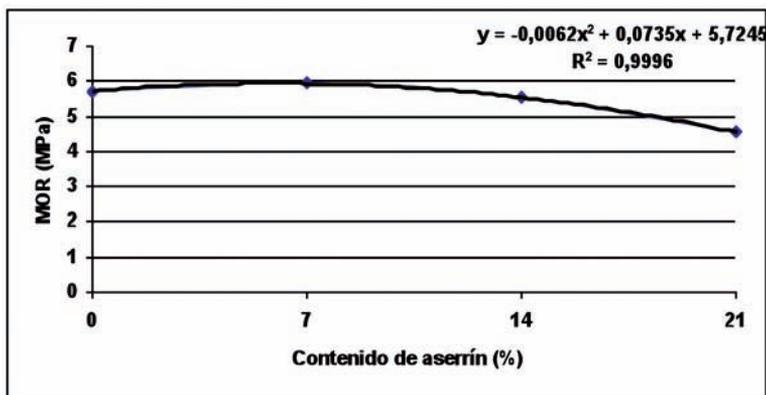
Resultados obtenidos en los morteros

En estado fresco

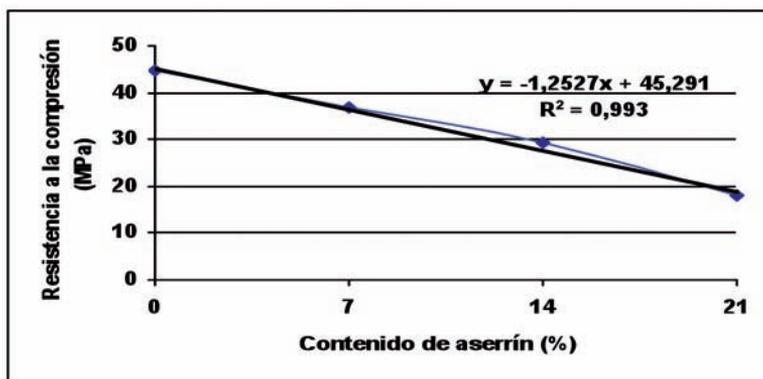
Para contenidos más elevados de aserrín se observó una disminución acentuada de la trabajabilidad (69% para el mortero testigo, para 40% con 21% de adición de aserrín), lo que indica una mayor dificultad para trabajar con contenidos de adición más elevados). El peso por unidad de volumen (PUV) y el contenido de aire incorporado dependen directamente de los contenidos de aserrín. Cuanto más elevados lo sean, disminuye el PUV (de 2.19 g/cm³ para el mortero testigo, para 1.73 g/cm³ con 21% de adición de aserrín) y aumenta la cantidad de aire incorporado de 2.70% (para el mortero) al 14.40% (compuesto con 21% de adición de aserrín).

En estado endurecido

El módulo de ruptura (**MOR**) no cambia significativamente con el aumento del contenido de aserrín hasta un valor de 14% (Figura 8a). Mientras tanto, la tensión de ruptura en compresión disminuye 25% para cada 7% de reemplazo de arena por aserrín (Figura 8b).



(a) - Flexión



(b) Compresión

Figura 8 – Resistencia en función del contenido de aserrín.

CONCLUSIONES

Las propiedades de los compuestos no-estructurales de residuos de aserraderos y cementos comerciales se mostraron altamente influenciadas por la naturaleza de la madera (*E. grandis* y *Populus* sp), por el tipo de cemento utilizado (CPC40, ARI50 y CPP40) y por el tipo de tratamiento aplicado a los residuos. Los datos obtenidos, analizados e interpretados estadísticamente, permitieron destacar:

- √ Detección de la compatibilidad química entre las maderas y los cementos, por medio del método calorimétrico;
- √ Viabilidad de aplicación del ensayo no destructivo (END) por ultrasonido en la evaluación del endurecimiento de los compuestos;
- √ Superioridad de los compuestos de *E. grandis* en relación a los de *Populus* sp;
- √ Influencia positiva del cloruro de calcio (al 3% en relación a la masa de cemento) en la resistencia en compresión simple para todos los compuestos evaluados;
- √ Comparable desempeño en compresión simple de los compuestos de cementos CPC 40 y ARI50, ambos superiores a los compuestos del cemento CPP40;
- √ Posibilidad de fabricación de elementos constructivos a partir de morteros de cemento, arena y aserrín.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen al Banco Santander, por la beca para el primer autor, al Acuerdo Cátedra entre las universidades UBA y UNICAMP, por la pasantía del primer autor, a los profesores Milan Klaric y Gregório Phytlowany, por su contribución, a los técnicos Rómulo y Víctor (UBA); Flávia, Gisleiva y Michelle (UNICAMP) por la contribución al desarrollo de los ensayos.

También agradecen a las empresas Loma Negra, por la donación del cemento, Degussa, por la donación de catalizadores, CITEMA –INTI y al aserradero Ederra, por la donación de aserrín.

REFERENCIAS

- ABNT. 1996.** Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215-1996. Rio de Janeiro, 8p.
- Beraldo, A.L. 1999.** Ultrasonic speed wave: cure type influence on wood-cement composite compression strength. In: Proceedings of the NDTISS'99 – International Symposium on Non Destructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21st Century, UFSM, Torres, RS, Brasil, 86-90.
- Beraldo, AL.; Martins, S.C.F. 2007.** Destructive and non-destructive evaluation of bamboo chips-Portland cement composites. *Journal of Bamboo and Rattan*. 6: 61-70.
- 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): 57-61.

Govin, A.; Peschard, A.; Fredon, E.; Guyonnet, R. 2005. New insights into wood and cement interaction. *Holzforschung* 59(3): 330-335.

Hachmi, M.; Moslemi, A. A. 1989. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest Products Journal* 39(6): 55-58.

IRAM. 2006. Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 1622-2006.

IRAM. 2000a. Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de La conformidad y condiciones de recepción. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 50000-2000.

IRAM. 2000b. Cemento. Cemento con propiedades especiales. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 50001-2000.

Lee, A.W.C.; Hong, Z.; Phillipis, 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): 262-268.

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): 472-482.

Mori, F.A.; Mendes, L.M.; Trugilho, P.F.; Cardoso, M.G. 2003. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento de aguardente de cana-de-açúcar. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 23(3):396-400.

Moslemi, A.A.; Lim, Y.T. 1984. Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. *Forest Products Journal* 34(7-8): 22-26.

Núñez, C.E. 2005. Caracteres biométricos y composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* implantado en la Mesopotamia Argentina. *Proceedings*. Terceras Jornadas Científico Tecnológicas de la Universidad de Misiones y Quintas de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Posadas. Argentina.

Sandermann, W.; Preusser, H.J.; Chweers, W. 1960. The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials. *Holzforschung* 14(3): 70-77.

Stancato, A. C. 2005. Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

Teixeira, D.E.; Moslemi, A.A. 2001. Assessing modulus of elasticity of wood-fiber cement (WFC) sheets using non-destructive evaluation (NDE). *Bioresource Technology* 79(2): 193-198.

Weatherwax, R.C.; Tarkow, H. 1964. Effect of wood on setting of portland cement. *Forest Products Journal* 14 (12): 567-570.

White, R.H. 1987. Effect of lignin and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and Fiber Science* 19(4):446-452.