

Influencia de los Tratamientos de Mineralización de la Madera en las Propiedades Mecánicas de los Compuestos de Madera-Cemento

Adrián I. Yoris¹, Analía S. Quiroga^{1*}, Jorge A. Citroni¹, Ignacio Rintoul²

¹CECOVI – Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda – Facultad Regional Santa Fe Lavaise 610 (S3004EWB) Santa Fe – Argentina - Tel.: +54 0342 4601579 – 2390 – Fax: 4690348

²Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química – Centro Científico Tecnológico CONICET Santa Fe Ruta Nac. 168 Km. 472 Paraje “El Pozo” (S3000GLN) Santa Fe – Argentina.
asquiroga@frsf.utn.edu.ar

Resumen – Los compuestos de madera-cemento son materiales no tradicionales con fines estructurales y de aislamiento. El principal inconveniente que presentan en su proceso de elaboración es la incompatibilidad entre el cemento y la madera, debida a la presencia de sustancias inhibitoras del fraguado naturalmente presentes en la madera. El conocimiento de estos compuestos es limitado en lo que respecta a las materias primas locales. En el presente trabajo se evalúa la influencia de tres tratamientos de la madera -extracción acuosa, hidrólisis alcalina y recubrimiento con polímero- en las propiedades mecánicas de las fibras de madera y de los compuestos de madera-cemento obtenidos. El comportamiento mecánico se evaluó mediante la resistencia a la tracción en fibras individuales de madera y la resistencia a la compresión de los compuestos. La hidrólisis alcalina resultó ser el mejor tratamiento para minimizar los efectos inhibitorios, seguido por los métodos de recubrimiento con polímero y extracción acuosa.

Palabras claves: materiales compuestos, construcción en seco, inhibidores de fragüe, vivienda

Influence of Wood Treatments on Mechanical Properties of Wood-Cement Composites

Abstract—Wood-cement composites are non-traditional materials for structural and isolation purposes. The main inconvenient affecting its manufacture is the incompatibility between wood and cement, caused by setting inhibitory substances naturally present in woods. The knowledge of wood-cement composites is rather limited for local raw materials. This work evaluates the influence of three wood treatments -aqueous extraction, alkaline hydrolysis and polymer coating- on mechanical properties of wood fibers and of final wood-cement composites. Tensile properties of individual wood fibers and compression properties of wood-cement composites were studied for evaluation of mechanical behavior. The alkaline hydrolysis was found as the most effective treatment for suppression of inhibitory effects, followed by polymer coating and aqueous extraction methods.

Keywords: composite materials, rapid construction, setting inhibitors, housing

INTRODUCCIÓN

Los compuestos de madera-cemento han sido ampliamente utilizados en Europa y Estados Unidos en la construcción de viviendas, con fines estructurales y de aislamiento, desde hace más de un siglo (Van Elten, 2006). Sin embargo en Argentina la industria de la construcción siempre ha preferido la fabricación y el empleo de materiales convencionales tales como el ladrillo cerámico. Esta realidad hace que el conocimiento sobre materiales compuestos de maderacemento sea muy limitado al no contarse con datos previos relativos a materias primas locales.

En nuestro país la problemática de la vivienda no deja de ser una realidad ineludible, por lo que el desarrollo de materiales alternativos para la construcción rápida y masiva de viviendas integrales y de calidad

ha empezado a adquirir un creciente grado de interés por parte de las instituciones gubernamentales. Este aspecto es particularmente importante en la región del Litoral, donde también se han comenzado a desarrollar materiales regionales para situaciones de emergencia aplicables mediante métodos constructivos en seco.

Los compuestos de madera-cemento son materiales con excelentes propiedades, destacándose su alta durabilidad, estabilidad dimensional, resistencia al fuego y al agua, sus buenas propiedades acústicas y térmicas (Del Menezzi et al., 2007), su resistencia a la degradación biológica y bajos costos de producción. Otros aspectos importantes y atrayentes son las ventajas que presentan los sistemas constructivos con paneles premoldeados, tanto desde el punto de vista económico como de la rapidez de la ejecución de la obra.

Una de las dificultades a la hora de trabajar con compuestos de madera-cemento es la incompatibilidad entre la madera y el cemento debido a la presencia de sustancias inhibidoras en la madera, tales como azúcares y hemicelulosas. Estas sustancias forman membranas impermeables alrededor de gránulos de cemento no hidratados impidiendo la difusión del agua hacia el interior de los mismos, lo que afecta el fraguado y la cohesión del mortero. Estos efectos han sido ampliamente estudiados para maderas de origen europeo, pero el conocimiento de este fenómeno referido a maderas locales es muy escaso. Se pueden emplear diversos métodos para contrarrestar este efecto como la extracción en agua, hidrólisis alcalina y retención de azúcares (Lee y Short, 1989). Si bien estos tratamientos mejoran la eficiencia del fraguado del cemento en la superficie de la madera cada uno actúa de forma diferente. En la extracción acuosa se extraen los azúcares solubles en agua; en la hidrólisis alcalina se degradan las hemicelulosas y los azúcares, mientras que en el tratamiento de retención se forma una película en la superficie de la madera que impide el paso de sustancias inhibidoras a la pasta cementicia. A su vez se ha observado que los tratamientos aplicados a la madera afectan las propiedades mecánicas de las mismas y en consecuencia a las del material compuesto resultante. Por otra parte, se ha demostrado que el grado de inhibición del fraguado se relaciona con la naturaleza de los extractivos y con la cantidad y tipo de azúcares. (Jorge et al., 2004). Por ejemplo, la fructuosa no afecta el fraguado del cemento hasta concentraciones de 0,50%, mientras que la glucosa lo inhibe por completo con concentraciones de 0,25%. Por el contrario, el tratamiento de la madera tiene el inconveniente de que puede causar, en algunos casos, una disminución en las propiedades mecánicas finales de los materiales compuestos resultantes. Otra metodología muy usada es la adición de sustancias químicas inorgánicas conocidas como acelerantes, que permiten reducir los tiempos de fraguado del cemento (Moslemi et al., 1983; Zhengtian and Moslemi, 1985). Se ha reportado que los acelerantes de fragüe usualmente mejoran las propiedades de los compuestos de madera-cemento (Jorge et al., 2004).

En el presente trabajo se evalúa la influencia de tres tratamientos de la madera en las propiedades mecánicas de las fibras individuales de madera (FIM) y de los compuestos de madera-cemento (CMC). Los tratamientos que se utilizaron fueron extracción acuosa (EA), hidrólisis alcalina (HA) y recubrimiento con polímero (RP). Se realizaron ensayos de tracción en las FIM y de compresión en los CMC con el fin de evaluar

su comportamiento mecánico. Se determinaron el módulo de elasticidad por tracción (T MOE) en las FIM, el módulo de elasticidad por compresión (C MOE) y la resistencia a la compresión (RC) de los CMC para 10 condiciones de ensayo diferentes, empleando un diseño experimental de 3 factores en 2 niveles para cada tipo de tratamiento. La evaluación de la matriz propuesta se basó en el método de superficie-respuesta (Cochran and Cox, 1978; Davies, 1954).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se empleó cemento Portland compuesto tipo CPC 40 y fibras de madera de álamo carolino (especie *Populus X Euroamericana CV*), generalmente empleada para relleno de embalajes en la industria frutihortícola.

La madera fue tratada mediante los tratamientos EA, HA y RP. La matriz de ensayo tanto para EA como para HA se basó en un diseño experimental cúbico-centrado con réplica en el punto central. Para el RP se empleó un cubo de dos caras centradas. Ésto dio como resultado 10 condiciones experimentales para cada tratamiento (Fig. 1).

En el método EA las FIM fueron sumergidas en un baño de agua termostatzado entre 25 y 100°C durante 5 a 45 min. En el segundo método la HA fue realizada a temperatura ambiente sumergiendo las FIM en una solución de hidróxido de calcio durante 4 a 72 h con concentraciones entre 5,6 y 22,2 g/l. Las relaciones de agua-madera (H_2O/W) variaron entre 20 y 40 g/g para los métodos EA y HA. En el método RP, un polímero orgánico (estireno acrílico) fue utilizado como agente de recubrimiento para formar una película en la superficie de la madera. En este último caso se varió la cantidad de usos de la solución de polímero. El polímero se diluyó en agua en concentraciones entre 0,083 y 0,333 l/l. Todas las condiciones de ensayo se resumen en la Tabla 1.

Posterior a los tratamientos, las FIM fueron secadas a temperatura ambiente y acondicionadas durante 24 hs en una atmósfera a 23°C y 50 % HR. Se tomaron muestras de FIM de 15 cm de longitud dando un total de 30 muestras para cada condición de tratamiento (900 muestras en total entre los tres tratamientos, más 30 muestras de FIM no tratadas). Se realizaron ensayos de resistencia a la tracción sobre las muestras de FIM tratadas en un equipo Instron 3344 (Illinois, USA), y luego se compararon contra los valores obtenidos en maderas no tratadas. Se utilizó un valor de distancia entre mordazas de 2 cm y se adoptó una pre-tensión de 1 N. Se empleó una velocidad de aplicación de carga de 5 mm/min para asegurar que el tiempo de rotura fuera mayor a 15 segundos.

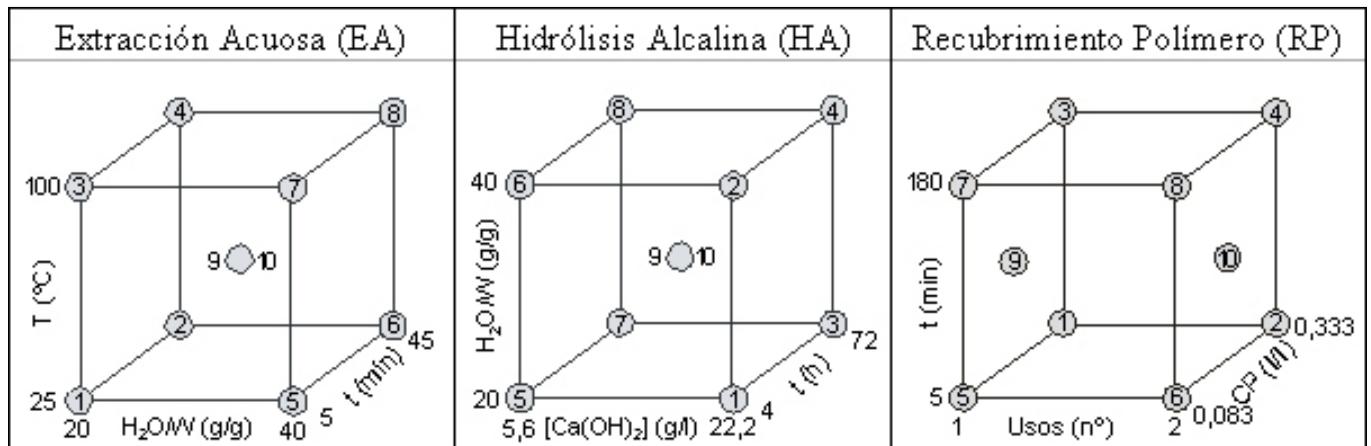


Fig. 1 - Esquema del diseño experimental para cada tratamiento

N°	Extracción (EA)			Hidrólisis (HA)			Recubrimiento (RP)		
	H ₂ O/W	T	t	[Ca(OH) ₂]	t	H ₂ O/W	[CP]	t	Usos
	(g/g)	(°C)	(min)	(g/l)	(h)	(g/g)	(l/l)	(min)	(n°)
1	20	25	5	22,2	4	20	0,333	5	1
2	20	25	45	22,2	4	40	0,333	5	2
3	20	100	5	22,2	72	20	0,333	180	1
4	20	100	45	22,2	72	40	0,333	180	2
5	40	25	5	5,6	4	20	0,083	5	1
6	40	25	45	5,6	4	40	0,083	5	2
7	40	100	5	5,6	72	20	0,083	180	1
8	40	100	45	5,6	72	40	0,083	180	2
9	30	62,5	25	11,1	24	30	0,167	60	1
10	30	62,5	25	11,1	24	30	0,167	60	2

Tabla 1 - Condiciones experimentales

En una segunda etapa se obtuvieron 30 paneles a escala de laboratorio utilizando madera tratada como se indica en la Tabla 1. Inicialmente se realizaron ensayos preliminares para ajustar la composición de la pasta utilizando cemento Portland comercial. Se mezcló la pasta de cemento con la madera y se introdujo en un molde durante 72 hs, obteniéndose CMC de 30x30x7 cm. Luego del desmolde y de un tiempo de secado de 15 días, las muestras se cortaron en cubos de 7x7x7 cm y se ensayaron mecánicamente a la compresión.

Los ensayos de resistencia a la compresión (RC) se realizaron en un equipo Instron 1137 (Illinois, USA) en la dirección perpendicular al moldeo, siendo ésta la situación del panel en servicio cuando se lo emplea en muros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los tres tratamientos de la madera propuestos re-

sultaron eficaces para evitar la inhibición del fraguado. Sin embargo produjeron cambios en las propiedades mecánicas de las FIM y de los CMC. Debido a inhomogeneidades detectadas en el material, se obtuvo una gran variación de la carga de rotura para un mismo módulo elástico, razón por la cual se seleccionó el T MOE como parámetro representativo de las propiedades mecánicas de las FIM. La Tabla 2 muestra los promedios de T MOE medidos en FIM tratadas y los C MOE y RC medidos en CMC producidos con madera tratada.

Las muestras de FIM no tratadas presentaron un T MOE promedio de 1200 MPa con una dispersión normal del 6%. Se obtuvieron mediciones de T MOE notoriamente mayores para las muestras tratadas, dependiendo del tipo de tratamiento: 1594 MPa para la EA, 1762 MPa para la HA y 2108 para RP.

Las mediciones de T MOE máximas y mínimas rea-

lizadas en 300 especímenes totales por cada tratamiento fueron 7890 y 186 MPa para la EA, 7287 y 268 MPa para HA y de 7174 y 203 para RP. Además, la diferencia entre el T MOE máximo y mínimo medidos dentro de una muestra de 30 especímenes correspondientes a una condición de prueba dada fue de 7419 MPa para la EA, 6660 MPa para la HA y 6971 MPa para RP.

La dispersión en las determinaciones de T MOE resultó muy alta dentro de cada condición de tratamiento, motivo por el cual debieron ensayarse un número elevado de probetas para conseguir información estadísticamente confiable sobre la influencia de las variables de proceso en las propiedades mecánicas de las FIM. La dispersión normal en mediciones del T MOE fue de 13% para la EA, 19% para la HA y 18% para RP. Por lo tanto el T MOE podría considerarse afectado por un parámetro de proceso dado cuando su influencia es mayor que los valores citados. De acuerdo con esta hipótesis, el aumento de la relación H₂O/W durante la EA, la disminución del tiempo de la inmersión durante la HA y el aumento de la concentración de la solución de polímero durante el RP se podrían considerar como responsables del aumento del T MOE. El resto de las variables estudiadas no pueden ser consideradas, ya que sus efectos se encuentran dentro del rango de la dispersión normal.

En general, la RC en los CMC obtenidos con madera tratada por EA y RP fueron, en ambos casos, superiores a los obtenidos con madera tratada por HA. Esta observación sugiere una disminución de las propiedades mecánicas de la madera causada por la agresividad del medio alcalino que promueve la disgregación y ruptura de las fibras. Los tratamientos de EA y RP no afectaron significativamente la integridad de las mismas, conservando sus propiedades originales.

En las Figs. 2 a 4 se resumen los resultados de las determinaciones experimentales según el diseño experimental planteado para cada tratamiento y la funcionalidad del C MOE que surge de la aplicación del método de superficie-respuesta. En el tratamiento de EA se observa que el C MOE aumenta con el incremento de la relación de H₂O/W y la disminución del tiempo de inmersión. Curiosamente, el C MOE en los tratamientos realizados a 100°C resulta significativamente menor que en los tratamientos realizados a 25°C para un tiempo dado. En la HA el C MOE aumenta con el incremento de la relación H₂O/W, la concentración de Ca(OH)₂ y con la disminución del tiempo de inmersión. En el tratamiento de RP, el C MOE disminuye con el incremento de la concentración del agente de recubrimiento. Sin embargo, éste muestra pequeñas diferencias entre la solución de recubrimiento usada por primera vez y la reutilizada. Por último, el C MOE no se ve afectado cuando se sumerge en solución de 1 a 3 hs. Sin embargo se observa un incremento significativo cuando el tiempo es de 5 min.

La variación del C MOE puede explicarse por el efecto que provocan las sustancias de bajo peso molecular de las fibras de madera. Normalmente, cuando las sustancias de bajo peso molecular se eliminan, el material se vuelve más rígido.

En general la eliminación de estas sustancias se ve favorecida por una relación de H₂O/W elevada. El efecto del tiempo de inmersión puede ser explicado en términos de transferencia de masa y procesos difusivos.

Una vez que la madera se sumerge en agua durante el tratamiento de EA, el agua comienza inmediatamente a infiltrarse en la madera arrastrando las

N°	Extracción (EA)			Hidrólisis (HA)			Recubrimiento (RP)		
	T MOE	C MOE	RC	T MOE	C MOE	RC	T MOE	C MOE	RC
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	1120	1.03	0.11	2329	0.98	0.07	2488	0.89	0.09
2	1579	0.82	0.07	1945	0.98	0.07	2320	1.09	0.10
3	1311	1.09	0.10	1458	1.40	0.11	1883	0.70	0.06
4	1563	0.61	0.08	1684	0.75	0.07	2203	0.65	0.08
5	1808	1.31	0.10	1683	1.15	0.08	2357	1.09	0.13
6	1617	0.89	0.10	1981	1.09	0.09	1608	1.31	0.15
7	2135	1.23	0.10	1484	0.89	0.06	1637	0.89	0.08
8	1908	0.93	0.11	1828	1.03	0.10	1674	0.61	0.09
9	1692	0.98	0.11	1892	1.09	0.12	2322	0.70	0.07
10	1206	1.09	0.11	1339	1.23	0.11	2591	0.52	0.09

Tabla 2 - T MOE de las FIM, C MOE y RC de los CMC

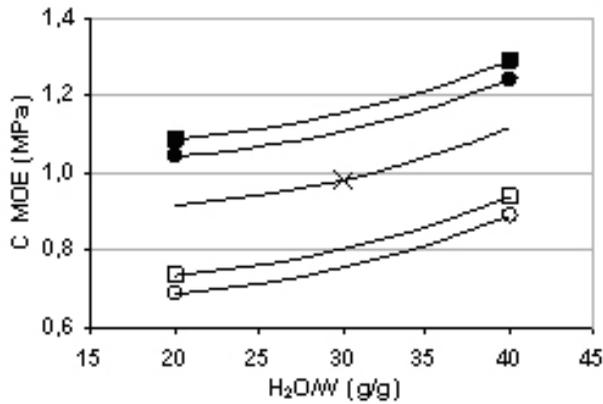


Fig. 2 - C MOE de los CMC vs condiciones experimentales del tratamiento EA.

$T = 25^{\circ}\text{C}$ (cuadrado), $T = 100^{\circ}\text{C}$ (círculo),
 $t = 5 \text{ min}$ (símbolo lleno), $t = 45 \text{ min}$ (símbolo vacío) y
 $T = 62.5^{\circ}\text{C} - t = 25 \text{ min}$ (cruz)

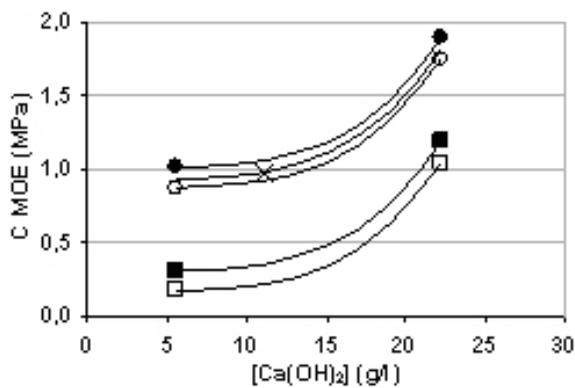


Fig. 3 - C MOE de los CMC vs condiciones experimentales del tratamiento HA.

$H_2O/W = 20 \text{ g/g}$ (cuadrado),
 $H_2O/W = 40 \text{ g/g}$ (círculo), $t = 4 \text{ h}$ (símbolo lleno),
 $t = 72 \text{ h}$ (símbolo vacío) and $H_2O/W = 30 \text{ g/g} - t = 24 \text{ h}$ (cruz)

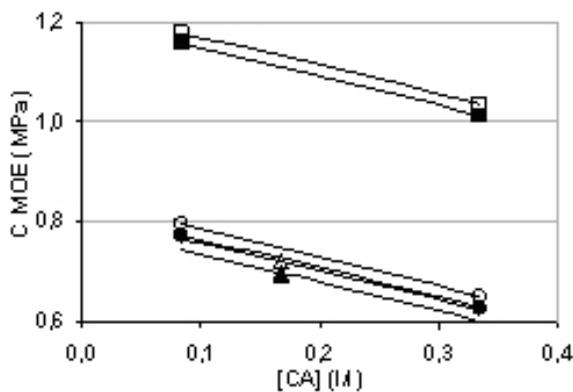


Fig. 4 - C MOE de los CMC vs. condiciones experimentales del tratamiento RP.

$t = 5 \text{ min}$ (cuadrado), $t = 60 \text{ min}$ (triángulo),
 $t = 180 \text{ min}$ (círculo), solución nueva (símbolo lleno),
 solución reciclada (símbolo vacío)

sustancias solubles hacia el interior de las fibras. Si ésta se retira del agua antes de que llegue a su máxima capacidad de absorción, la superficie de la misma se mantendrá libre de sustancias solubles. Sin embargo, si su capacidad de absorción es máxima, las sustancias solubles dejan de ser arrastradas hacia el interior y comienza su difusión al medio de extracción. Por esto, si la madera es retirada luego del período de saturación, se tendrá presencia de sustancias inhibitoras en la superficie de la misma. El mismo mecanismo es aplicable para HA y RP. La disminución del C MOE que se observó a 100°C se puede atribuir al daño provocado en las fibras de madera debido a esta exposición. La madera tratada con HA muestra un incremento del C MOE. Esto se puede explicar suponiendo que la agresividad del medio alcalino puede degradar y extraer una mayor cantidad de sustancias solubles que el tratamiento EA. Por el contrario, la madera tratada con RP aumenta la retención de sustancias de bajo peso molecular en el interior de la madera, por lo que la flexibilidad original se conserva resultando los CMC con un menor C MOE.

CONCLUSIONES

Los tres tratamientos estudiados resultaron estrategias convenientes para evitar el fenómeno de inhibición del fraguado. Sin embargo la selección de estos tratamientos dependerá de las aplicaciones finales de los CMC. El tratamiento de HA es apto para obtener paneles rígidos. Por el contrario, cuando se buscan propiedades elásticas, el tratamiento más conveniente es el RP.

La influencia de los tratamientos de la madera en las propiedades mecánicas de los CMC podría explicarse en términos de transferencia de masa entre el medio de inmersión y la madera, por el proceso de difusión de sustancias solubles (sustancias inhibitoras incluidas) y por la agresión físico-química en la estructura de las fibras de madera.

La RC de los CMC obtenidos con los tratamientos de EA y RP fueron, en ambos casos, superiores a los obtenidos con el tratamiento de HA debido a un medio de inmersión menos agresivo.

El C MOE aumentó con el incremento de la relación H_2O/W y la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el HA. A su vez, también se incrementó con la disminución del tiempo de inmersión y de la concentración del agente de recubrimiento en el RP. La temperatura y el número de usos de la solución de RP no afectaron significativamente el C MOE.

En todos los casos la madera tratada resultó considerablemente más rígida que la no tratada.

El mayor incremento del T MOE fue observado en las FIM con tratamiento de RP, seguido por HA y lue-

go las sometidas a EA. La naturaleza inhomogénea de las FIM impidió determinar con precisión la influencia de las variables de los tratamientos en sus propiedades mecánicas. Aumentando el número de muestras se podría comprender mejor el comportamiento de las propiedades a la tracción de las FIM. Es de importancia tener en cuenta el factor de orientación debido a las componentes de tensión y corte provocadas por la dirección de las FIM en la determinación de los T MOE.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. Victorio Marzocchi del Instituto de Tecnología Celulósica, FIQ-UNL por las determinaciones de resistencia a la tracción en las FIM.

REFERENCIAS

Van Elten, "Production of wood wool cement board and wood strand cement board (Eltoboard) on one plant and applications of the products", Proceedings 10th Int.

Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference, São Paulo – Brazil, November 15-18, 1-11, (2006).

Del Menezzi, De Castro and De Souza, "Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume", *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 9(2), 105-115 (2007).

Jorge, Pereira and Ferreira, "Wood-cement composites: a review", *Holz als Rohund Werkstoff*, 62(5), 370-377, (2004).

Moslemi, García and Hofstrand, "Effect of various treatments and additives on wood-portland cement-water systems", *Wood and Fiber Science*, 15(2), 164-176, (1983).

Zhengtian and Moslemi, "Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-ement-water mixtures", *Forest Products Journal*, 35(7), 37-43, (1985).

Cochran and Cox, "Diseños Experimentales", Editorial Trillas, Ciudad de México (1978).

Davies, "Design and Analysis of Industrial Experiments", Oliver & Boyet Eds., Edinburgh (1954).