

EVALUATION OF CEMENT-WOOD BONDING CONSISTENCY, ONE WAY TO IMPROVE THE MECHANICAL PROPERTIES OF NOVEL COMPOSITES

Vergara González, E.; Vergara González, D.; Corral Bovadilla, M.; Nájera Hernández, P.;
Otaño Jiménez, L.

Universidad de La Rioja

Cement-wood composites are an opportunity for energetic and sustainable rehabilitation of buildings. The cement-wood composites exhibit low thermal conductivity and good sound absorbing performance. However these composites have worse mechanical properties than traditional concretes.

The mechanical characteristics of these materials depend on several factors. One of them is the cement-wood bonding consistency. The bonding consistency includes adhesion between cement and wood and the behavior of the cement transition zone. This paper presents a new method for assessing the cement-wood bonding consistency as a tool for preliminary exploration of possible surface treatments of wood, designed to improve the mechanical properties in the final composite.

Physical and chemical treatments of wood were tested, obtaining results of bonding consistency with cement, which allow selection of new treatments for the manufacture of cement-wood composites with improved mechanical properties.

Keywords: *Concrete; Insulation; Wood*

EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DE UNIÓN CEMENTO-MADERA, UNA VÍA PARA LA MEJORA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE NUEVOS COMPOSITES

Los composites cemento-madera son una oportunidad para la rehabilitación energética de edificios y la construcción sostenible. Los composites cemento-madera presentan una baja conductividad térmica y un buen comportamiento absorbente de sonido. Sin embargo presentan peores propiedades mecánicas que los hormigones tradicionales.

Las características mecánicas de estos materiales dependen de varios factores, siendo el factor que denominamos consistencia de unión cemento-madera uno de ellos. La consistencia de unión incluye la adhesión entre el cemento y la madera y el comportamiento del cemento en la zona de transición. En este trabajo se presenta un nuevo método que permite evaluar la consistencia de unión cemento-madera como herramienta para la exploración preliminar de posibles tratamientos de la superficie de la madera, encaminados a mejorar las propiedades mecánicas del composite final.

Se han ensayado tratamientos físicos y químicos de la madera, obteniéndose resultados de la consistencia de unión a cemento, que permiten la selección de nuevos tratamientos alternativos para la fabricación de composites cemento-madera con mejores propiedades mecánicas.

Palabras clave: *Hormigón; Aislamiento; Madera*

Correspondencia: Eliseo Vergara: eliseo.vergara@unirioja.es

1. Introducción

La madera es un material sostenible y de fácil acceso en muchos lugares del mundo. La producción actual de madera supone una mayor disponibilidad de material de pequeño tamaño, bien porque su producción es más fácil o bien porque se genera como subproducto de la obtención de piezas de mayor tamaño.

Tradicionalmente la madera de pequeño tamaño ha sido empleada en la fabricación de composites ligados por resinas orgánicas. El alto precio de estas resinas y la dependencia del petróleo para su obtención, hacen interesante la posibilidad de emplear ligantes inorgánicos (preferiblemente cemento, un material no muy caro, accesible y con buenas propiedades de resistencia y uso en exteriores)

Los composites de cemento-madera son conocidos hace más de 60 años (Moslemi & Pfister, 1987) y actualmente están adquiriendo cada vez mayor relevancia en el sector de la construcción por sus propiedades: Baja conductividad térmica, absorción de sonido, resistencia a condiciones atmosféricas diversas y no ser atacables por hongos o insectos resultando duraderos a largo plazo, comportamiento ignífugo, baja densidad y bajo peso por unidad de volumen o área construida (Ashori et al., 2012).

El comportamiento de los composites cemento-madera desde un punto de vista mecánico, es peor que el de los hormigones tradicionales.

Las propiedades mecánicas de un hormigón se relacionan con una serie de parámetros: Calidad de los áridos empleados, siendo necesario que tengan una resistencia a la compresión muy alta, forma, tamaño máximo y distribución de tamaños de dichos áridos y relación agua-cemento en la mezcla, son características que influyen sobre las propiedades mecánicas del material (Lijiu et al, 2005; Wasserman & Bentur, 1996).

La investigación actual sobre composites de madera-cemento toma en consideración la propiedad denominada compatibilidad cemento-madera Jorge et al., 2004).

La compatibilidad, cuando se aplica en el área de investigación de materiales composites de madera-cemento, se refiere al grado de fraguado después de la mezcla del cemento con agua y con una determinada cantidad y tipo de madera que se encuentre en forma fragmentada. En términos generales, si el proceso químico de endurecimiento del cemento no se altera, o sólo lo hace en un grado bajo, por la presencia de madera, se dice que el cemento y la madera son compatibles. Por otro lado, si el fraguado del cemento se ve afectado por la presencia de la madera, entonces se dice que cemento y madera son incompatibles. Este fenómeno de interacción implica comúnmente una disminución de las propiedades mecánicas del composite, y en casos extremos puede dar un material sin integridad física (Jorge et al., 2004).

La inhibición del fraguado del cemento se asocia a malas propiedades mecánicas del composite resultante. Las causas de la inhibición del fraguado se achacan a la liberación por parte de la madera de diferentes sustancias químicas inhibidoras (Miller & Moslemi, 1991; Zhengtian & Moslemi, 1986; Hachmi & Moslemi, 1989; Tachi et al, 1989; Yasuda et al., 1992).

Sin embargo, hasta el momento, no se ha considerado la interacción entre madera y cemento como posible influencia en las propiedades mecánicas de los composites madera-cemento. En un composite cuya carga es madera y su ligante es cemento, las partículas de madera son rodeadas por el cemento de modo que se crea una interfase entre la madera empleada y el cemento. Esta interfase que une madera y cemento debe tener influencia en el comportamiento mecánico final del composite. La consistencia de la unión madera-cemento debe ser la propiedad que hace que el cemento se adhiera a la madera y que tanto

esta unión como el cemento circundante sean más o menos resistentes a los efectos mecánicos. A medida que esta unión y la zona adyacente son más resistentes a la rotura cuando se les aplican fuerzas, el conjunto del material tendrá mejores propiedades mecánicas.

Actualmente la posibilidad directa de conocer las características mecánicas de un composite madera-cemento implica fabricar probetas normalizadas y a los 28 días medir sus propiedades mecánicas. Esto supone un importante esfuerzo y unos costes altos. En este trabajo proponemos un método eficiente en cuanto a costes y tiempo necesario para obtener resultados útiles para la Exploración Preliminar (Vergara et al. 2011), una metodología diseñada para estudiar las posibilidades previas encaminadas hacia la obtención de resultados innovadores, fundamentada en la obtención de resultados tangibles para orientar trabajos de investigación con mayores posibilidades de éxito.

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es:

Introducir la idea de la consistencia de la unión madera-cemento como influencia en las propiedades mecánicas finales de materiales compuestos por estos dos elementos.

Los objetivos específicos que se pretenden lograr son:

Establecer un ensayo de tipo índice que permita clasificar tratamientos de la madera para que al ser empleada como carga con ligante cemento, el tratamiento de la madera fomente la resistencia de la unión entre la carga y el ligante.

Discernir entre diferentes tratamientos de la madera en cuanto a sus resultados de adhesión en composites madera-cemento mediante ensayos eficientes.

Proporcionar un ensayo que permita la Exploración Preliminar (Vergara et al. 2011) para el diseño de nuevos materiales madera-cemento con mejores propiedades mecánicas.

3. Metodología

La metrología y su aplicación en los ensayos de cualquier tipo, exige el concepto de la trazabilidad. La trazabilidad se sustenta en dos características principales que debe cumplir todo ensayo:

1º La posibilidad de establecer una cadena ininterrumpida de comparaciones con patrones que finalmente acaben llegando a los patrones del sistema internacional de medida.

2º La necesidad de establecer completamente todas los sistemas, procesos y acciones que se realizan para obtener la medida, de forma que esta pueda repetirse posteriormente de forma idéntica.

En disciplinas como la Química y la Biología, se emplean con cierta profusión las medidas que se denominan índices. Este grupo de ensayos tiene la característica principal de que no necesariamente cumple el primer principio de la trazabilidad, y por tanto no es posible o no es evidente el poder justificar una cadena ininterrumpida de comparaciones con patrones hasta llegar a las unidades del sistema internacional.

A pesar de no cumplir esta premisa de la trazabilidad, las medidas de tipo índice son útiles, dado que tienen un valor informativo y permiten tomar decisiones.

En este trabajo planteamos la necesidad de realizar una Exploración Preliminar, acción que se fundamenta en proponer posibilidades para realizar una posterior investigación científica y el empleo de índices como fuente de información para la selección de tratamientos de

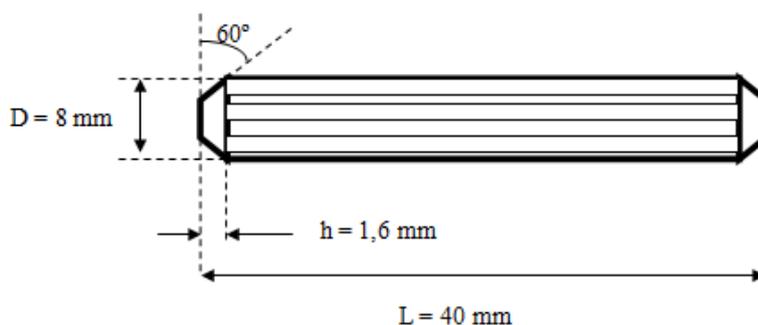
madera en un proyecto de investigación de fabricación de composites madera-cemento es una opción eficiente.

3.1 Descripción de la preparación de las probetas a ensayar.

El ensayo propuesto se fundamenta en estudiar la interacción entre el cemento y la madera en condiciones que faciliten la reproducción de dichos ensayos, los resultados permitan tomar decisiones y el coste en tiempo y económico de los mismos sea muy reducido.

La madera seleccionada es un espárrago normalizado según DIN68150 de $8 \pm 0,2$ mm de grosor nominal y 40 ± 1 mm de longitud.

Figura 1: Especificación de espárragos de madera DIN6815 empleados en los ensayos



Sobre cada espárrago de madera se realiza el tratamiento correspondiente a ensayar que puede consistir en diferentes opciones. Dicho tratamiento reproduce fielmente el tratamiento que se aplicará a la madera durante el proceso industrial y que en este trabajo han sido:

1º Deposición de un componente químico sobre la superficie de la madera: Se reparte sobre el espárrago de forma homogénea y sobre la totalidad de su superficie, la cantidad de 0,25 ml de disolución acuosa del reactivo que se va a estudiar en posibles diferentes concentraciones. El reparto se realiza sobre un recipiente de plástico hidrófobo de forma que el líquido tiende a adherirse constantemente sobre la madera. Se deja secar completamente durante 24 horas.

2º Lavado extractivo en disolución acuosa. Se prepara una disolución acuosa de concentración idéntica a la que se va aplicar en el proceso industrial y en exceso respecto de la cantidad de madera tratada en el espárrago. Mínimo debe ser de 8 ml de disolución por espárrago tratado. Los espárragos deben sumergirse completamente en dicha disolución durante el tiempo en horas que industrialmente se establece para el tratamiento, generalmente puede oscilar entre 8 y 24 horas.

3º Tratamientos físicos, como por ejemplo tratamientos térmicos. Se realizan mediante calentamiento en condiciones idénticas a las que se van a emplear en el proceso industrial y deben afectar a la totalidad de la superficie del espárrago.

4º Cualquier otro posible tratamiento, siempre y cuando reproduzca sobre la totalidad de la superficie de la madera el efecto que posteriormente se llevará a cabo en el proceso industrial.

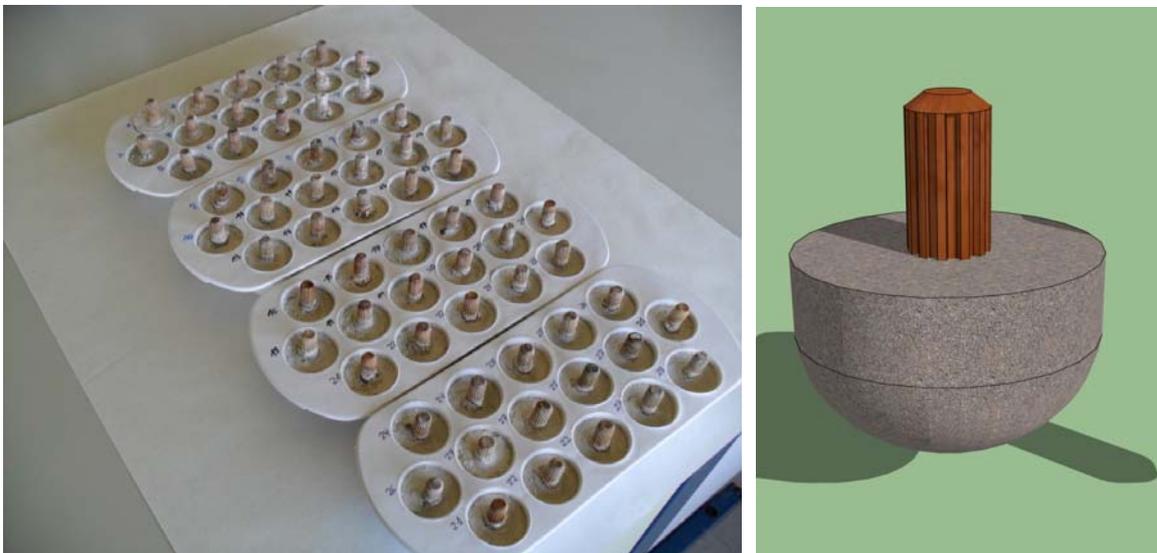
Una vez tratados los espárragos se construyen las probetas de prueba. Estas se fabrican empleando cemento de tipo idéntico al seleccionado para la fabricación industrial. Diferentes tipos de cementos o diferentes adiciones a los mismos, debe ser ensayada como diferentes

pruebas. La relación agua/cemento empleada debe ser lo más similar posible a la que se empleará. En este trabajo la relación agua/cemento seleccionada ha sido 1:1. En composites madera-cemento con alta proporción de madera, este tipo de relaciones son necesarias para facilitar el amasado.

Para la fabricación de la probeta se emplea un molde en goma que facilita el desmoldado de las piezas. La forma del molde debe ser tal, que rodee completamente el espárrago de madera. Debe ser cilíndrica, finalizando al menos en uno de sus dos planos en forma de círculo. La altura del molde y por tanto la altura del espárrago hasta la que llega el cemento debe ser de 25 mm. El diámetro del cilindro preferentemente será de 30 mm.

El molde se rellena de cemento y se introduce sobre el mismo el espárrago de madera en la zona central del molde de modo que quede vertical. El espárrago debe llegar hasta el fondo y presionar sobre este. Los espárragos que tras el fraguado no mantengan posición vertical son eliminados.

Figura 2: Moldes para el cemento y probeta fabricada



La probeta fabricada fragua durante 7 días, sin extraer del molde y en entorno con humedad relativa del 90%. A los 7 días se extrae del molde y se procede a su ensayo. Es necesario medir y referir la altura de fraguado del cemento empleado sobre el espárrago, ya que con el fraguado se produce reducción de altura de la madera cubierta.

En este trabajo el cemento empleado ha sido cemento tipo III/B 42,5N/SR y la madera era de Haya.

Tras desmoldar las probetas, se eliminan aquellas que resulten agrietadas y aquellas en las que el espárrago de madera no ha quedado en posición vertical.

3.1 Descripción del ensayo de adhesión.

El ensayo de adhesión exige de la aplicación de dos sistemas:

Sistema rígido con agujero circular en su parte central de 16 mm de diámetro. Este sistema ejercerá de superficie inmóvil sobre la que tocará el cemento. El espárrago de madera traspasará el agujero por su interior.

Figura 3: Banco de sujeción de las probetas y elemento de sujeción aplicado a una probeta



Dinamómetro con fondo de escala superior a la fuerza necesaria para separar el espárrago del cilindro de cemento y señalización de la fuerza máxima aplicada. En este trabajo empleamos un dinamómetro digital modelo PCE-FM200 con 20 Kg (196N) de fondo de escala y grabación del pico máximo de fuerza.

El espárrago de madera se sujeta mediante un elemento de compresión. La sujeción se une al dinamómetro de forma que este trabaje de forma vertical y se realiza tracción sobre él hasta que el espárrago sale desprendido del cilindro de cemento. El resultado de la medida obtenida mediante este ensayo tipo índice es la fuerza ejercida para desprender completamente el espárrago de madera.

3.1 Descripción de los tratamientos aplicados.

Se han aplicado tratamientos de tres tipos:

1º Tratamientos de adición de sustancias químicas en disolución acuosa sobre la madera, con secado posterior de la misma para depositar dichas sustancias en su superficie. En todos los casos se añadió 0,25 ml por espárrago de madera. Posteriormente se procedió al secado de las muestras a temperatura ambiente durante 24 horas antes de entrar en contacto con el cemento.

2º Tratamientos de lavado de la madera con sustancias extractoras de componentes inhibidores del fraguado. Aplicado mediante diferentes concentraciones disueltas de sustancia lavadora y en volumen de 10 ml de disolución de lavado por espárrago de madera. El tiempo de lavado en todos los casos fue de 6 horas. Tras el lavado y escurrido de las muestras se procedió a su secado durante 24 horas a temperatura ambiente.

3º Tratamiento físico basado en la aplicación de calor a 120º C de temperatura mediante aire caliente por convención en estufa.

4. Resultados

Los ensayos realizados permiten obtener índices de consistencia de la interacción cemento-madera para 26 tratamientos posibles de la madera.

Se han realizado ensayos que denominamos blanco para la madera cuando sobre esta no se realizó ningún tratamiento.

4.1 Resultados de los tratamientos.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del ensayo propuesto han sido:

Tabla 1: Resultados del índice de consistencia de la unión madera-cemento para los diferentes tratamientos ensayados

N	Tratamiento	Concentración (gr/l)	Cantidad de disolución añadida por muestra (ml)	Cantidad de sólidos añadida por muestra (gr)	Tiempo secado (h)	Relación cem/H ₂ O	Media Indice Consistencia (Kg)
1	Blanco					1	3,7
2	NaCl	80,0	0,25	0,02	24	1	1,8
3	CaCl ₂ anh	76,0	0,25	0,02	24	1	3,1
4	AlCl ₃ ·6H ₂ O	79,0	0,25	0,02	24	1	9,5
5	MgCl ₂ ·H ₂ O	79,0	0,25	0,02	24	1	3,6
6	Na ₂ SO ₄ anh	75,0	0,25	0,02	24	1	3,6
7	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	100,0	0,25	0,03	24	1	10,2
8	Sodio Oxalato	Saturada	0,25		24	1	11,0
9	Acido Oxálico·2H ₂ O	80,5	0,25	0,02	24	1	5,0
10	Calcio Acetato·2H ₂ O	75,0	0,25	0,02	24	1	4,7
11	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	81,5	0,25	0,02	24	1	4,4
12	Ca(OH) ₂	Saturada	0,25		24	1	5,4
13	Na ₂ SiO ₃	75,0	0,25	0,02	24	1	9,4
14	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	76,5	0,25	0,02	24	1	2,3
15	Urea	86,5	0,25	0,02	24	1	3,6
16	NH ₄ H ₂ PO ₄	76,5	0,25	0,02	24	1	4,5
17	MgSO ₄ ·7H ₂ O	70,0	0,25	0,02	24	1	4,3
18	K ₂ SO ₄	70,0	0,25	0,02	24	1	3,1
19	Latex SBR en agua	330,0	0,25	0,08	24	1	9,7
20	Latex SBR en agua	165,0	0,25	0,04	24	1	2,7
21	Latex SBR en agua	80,0	0,25	0,02	24	1	2,0
22	Agua lavado				24	1	4,5
23	Ca(OH) ₂ sat lavado	Saturada			24	1	6,6
24	CaCl ₂ anh 33gr/l lavado	33			24	1	2,1
25	Na ₂ SiO ₃ 33gr/l lavado	33			24	1	16,9
26	Térmico aire caliente				24	1	4,8

4.2 Características de los resultados.

Los resultados presentan una precisión baja para las mismas muestras. Con el fin de poder obtener información útil por cada tipo de tratamiento y facilitar su comparación, se han realizado 5 medidas por tratamiento. De cada grupo de 5 medidas se han eliminado el valor superior y el valor inferior y con los tres valores intermedios se obtiene el valor medio que se presenta en la tabla.

4.3 Agrupaciones químicas de los resultados.

Los resultados obtenidos pueden agruparse según las características químicas de los tratamientos:

Respecto de los aniones con los que se ha obtenido el índice, observamos que el anión Silicato (Na_2SiO_3 9,4 Kg en deposición y 16,9 Kg en lavado) y el anión Oxalato (Sodio Oxalato 11 Kg) dan valores altos para la consistencia de la unión cemento madera según el método de medida propuesto. Sin embargo, aniones típicamente considerados aceleradores del fraguado de cementos como Cloruro (NaCl 1,8 Kg; CaCl_2 3,1 Kg y MgCl_2 3,6 Kg) o Nitrato no dan valores tan altos ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 4,4 kg). Otros aniones como Sulfato, Carbonato, Fosfato, Hidróxido y Acetato (con todas sus sales por debajo de 6,6 Kg) tampoco ofrecen valores altos de consistencia de la unión entre cemento y madera. Hay una excepción para AlCl_3 respecto de los cloruros y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para los sulfatos que mantienen en común el catión aluminio (por encima de 9,5 Kg).

Si observamos los resultados considerando los cationes, tenemos que: Sodio, Potasio, Magnesio y Calcio, este último tradicionalmente aplicado como acelerador del fraguado, no ofrecen los resultados más altos de consistencia de la unión cemento-madera (todos por debajo de 6,6 Kg a excepción de aquellos cationes asociados a aniones que si promueven la unión madera-cemento). El catión que mejores resultados obtiene es Aluminio (por encima de 9,5 Kg en cualquiera de sus formas) dando valores altos de consistencia de la unión, tanto para su sal con anión Sulfato como su sal con anión Cloruro.

4.4 Resultados según el tipo de tratamiento.

Se han obtenido buenos resultados del índice de consistencia de la unión cemento-madera tanto para tratamientos de deposición de sales y secado de las mismas, como para el proceso de lavado de la madera durante 6 horas en medios que contienen sales disueltas.

Se obtienen buenos resultados para los tratamientos con Sodio Silicato (Na_2SiO_3), bien sean aplicados en deposición o mediante lavado. Para tratamientos con Calcio Hidróxido y con Calcio Cloruro, independientemente del proceso que se lleve a cabo, se obtienen resultados más discretos. En todos los casos comparados se observa mayor influencia de las sustancias químicas empleadas que del tipo de proceso aplicado.

El proceso térmico ensayado no produce buenos resultados y desde el punto de vista de su implementación en el sector industrial es complicado y costoso.

Desde el punto de vista operativo industrial, el método consistente en el tratamiento de deposición de sales disueltas en agua es mucho más económico que el tratamiento de lavado.

5. Conclusiones

Se propone un nuevo enfoque para la investigación en mejora de las propiedades mecánicas de composites madera-cemento. Este nuevo enfoque toma en consideración la

resistencia a la rotura de la interfase entre la madera y el cemento, como un nuevo factor a tener en cuenta, además del factor de la compatibilidad madera-cemento, sobre el que se realiza la mayor parte de la investigación actual (Jorge et al., 2004)

Se ha diseñado un método de ensayo que permite obtener datos preliminares respecto de la consistencia de la unión cemento-madera. Este método facilita al obtención de medidas tipo índice, que no son directamente trasladables a predecir mejoras en las prestaciones mecánicas finales de estos composites, pero que si proporcionan utilidad en la Exploración Preliminar (Vergara et al. 2011) previa a la realización de trabajos de investigación en el campo de la mejora de los composites cemento-madera.

En este aspecto los resultados de aplicar el método inducen a buscar tratamientos de la madera que pueden ser basados en el empleo de silicatos y/o de sales de aluminio, frente a los tratamientos que tradicionalmente se estudian y aplican industrialmente, basados en el empleo de cationes Calcio y/o aceleradores del fraguado (Cloruros, Hidróxidos).

Respecto de los posibles métodos de tratamiento, el método que implica la adición de sustancias químicas a la madera, partiendo de disoluciones acuosas de las mismas, compete en cuanto a resultados con métodos de lavado y resulta más sencillo, económico y competitivo de aplicar a gran escala.

6. Referencias

- Ashori A., Tabarsa T., Amosi F. (2012) Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood–cement composite materials *Construction and Building Materials, Volume 27, Issue 1, Pages 126-129*
- Hachmi M., Moslemi A.A. (1989) Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest Prod J* 39(6):55–58
- Jorge, F.C.; Pereira, C.; Ferreira, J.M.F. (2004). Wood-cement composites: a review *Holz Roh Werkst* 62:370–377.
- Lijiu W., Shuzhong Z., Guofan Z. (2005) Investigation of the mix ratio design of lightweight aggregate concrete *Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 5, Pages 931-935*
- Miller D.P., Moslemi A.A. (1991b) Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood Fibre Sci* 23(4):472–482
- Moslemi A., Pfister S.C. (1987) The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood–cement composite panels. *Wood Fiber Sci, 19 (2) (1987), pp. 165–175*
- Tachi M., Tange J., Nagadomi W., Suzuki Y., Terashima N., Yasuda S. (1989). Manufacture of wood-cement boards IV. Cementhardening inhibitory components of the Malaysian fast-growing tree, *Acacia mangium*. *Mokuzai Gakkaishi* 35(8):731–735
- Vergara E., Nájera P., Otaño L., Vergara D., Navarro A. (2011) Fundamentos teóricos, desarrollo de una nueva metodología para la innovación y aplicaciones a la dirección de proyectos: Exploración Preliminar ,XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos 2011 Huesca,pp 0367-0382, pp 0416-0426
- Wasserman R., Bentur A. (1996) Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength *Cement and Concrete Composites, Volume 18, Issue 1, Pages 67-76*

Yasuda S., Iwase Y., Seguchi Y., Takemura T., Matsushita Y. (1992) Manufacture of wood-cement boards V. Cement-hardening inhibitory components of sugi heartwood and behavior of catechol as a simple inhibitor model with vicinal phenolic hydroxyl groups in cement paste. *Mokuzai Gakkaishi* 38(1):52–58

Zhengtian L., Moslemi A.A. (1986). Effect of western larch extractives on cement setting. *Forest Prod J* 36(1):53–54