

Evaluación del Proceso de Endurecimiento en Mezclas Cemento-madera por Ultrasonido.

¹Beraldo, A., ²Baradit E.

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

²Departamento de Física, Universidad del Bío-Bío, Concepción. Chile.

email: ebaradit@ubiobio.cl

Resumen

En este trabajo se estudió el proceso de evolución de la hidratación de compuestos de partículas de madera con cemento Portland por medio de ultrasonido. Los resultados obtenidos muestran que la velocidad de los pulsos de ultrasonido (VPU) depende tanto del tamaño de las partículas vegetales como de la proporción entre los constituyentes y del efecto de catalizadores utilizados en la mezcla. Se comprueba que la VPU sufre cambios significativos en las tempranas edades de los compuestos, tendiendo finalmente a estabilizarse de acuerdo a una ley exponencial.

Palabras claves. *Ultrasonido, compuestos, cemento Portland, partículas de madera.*

Abstract

In this work the hydration evolution process of Portland cement and wood particles composites using ultrasound was evaluated. Results showed that ultrasonic pulse velocity (UPV) depends on wood particles size, the compounds ratio and the catalyst effect in the mix. UPV changes very quickly in the first ages of the composites according to an exponential law.

Keywords. *Ultrasonics, composites, Portland cement, wood particles.*

Introducción

En el procesamiento mecánico de la madera se generan cantidades importantes de desechos en forma de aserrín, virutas y polvos. Algunas empresas logran aprovechar tales desechos en la generación de

energía utilizando la quema directa de los residuos o después de procesarlos en la forma de briquetas. Mientras tanto, la mayoría de los desechos generados son simplemente depositados a cielo abierto o quemados sin control, aumentando la contaminación ambiental.

Sin embargo, productos resultantes del procesamiento de la madera pueden reemplazar total o parcialmente los áridos (arena, gravilla y ripio) utilizados en la fabricación de morteros y hormigones. Por supuesto, se trata de un material alternativo con propiedades, y sobretodo aplicaciones muy distintas de aquellas logradas con materiales empleados normalmente en las construcciones.

De una manera contraria a aquella observada en los granulados minerales, las diferentes formas en que se presentan las partículas vegetales (polvo, aserrín, virutas y lanas) tienen un mismo inconveniente – su compleja interacción química con el pegante, en general, con el cemento Portland. Existen diferentes formas de evaluar el grado de esa interacción entre la biomasa vegetal y el pegante, Los ensayos mecánicos son los mas utilizados aunque se necesita un tiempo demasiado largo hasta que el material alcance una determinada edad, normalmente a los 28 días. Por otro lado, el empleo de métodos no destructivos permite evaluar la eficiencia de la reacción química entre los constituyentes del compuesto (cemento, biomasa vegetal, agua y aditivos) por medio de la determinación de la velocidad de propagación de una onda ultrasónica (UPV – ultrasonic pulse velocity) al largo del tiempo (o de la edad de la probeta). Desde hace tiempo son conocidos los ensayos no destructivos (Non Destructive Evaluation or non destructive testing – NDE ó NDT) en la evaluación de materiales tradicionales, en especial el acero y el hormigón. Esta técnica permite detectar la presencia de defectos internos en estos materiales y, en caso específico del hormigón, este método es utilizado para acompañar la evolución de la hidratación de los constituyentes del cemento (Naik et al. 2004). Esta propiedad particular de los materiales es traducida de una manera global por la mensuración del tiempo necesario para la propagación de la onda del ultrasonido a través de una probeta (y consecuentemente se obtiene la velocidad de propagación). De una forma general, para las mezclas donde las reacciones fueron

adecuadas con el pegante, se logra obtener las UPV mas elevadas mientras que los valores muy reducidos de la UPV indican la presencia de una reacción no satisfactoria.

Un compuesto es formado por dos o más materiales, y presenta la particularidad de que sus propiedades son muy distintas de aquellas presentadas por los materiales originales. En esa categoría se incluyen las diferentes mezclas entre la biomasa vegetal y los pegantes inorgánicos, por ejemplo el cemento Portland. De esa manera parte de las propiedades del compuesto son originarias de sus constituyentes mayores – el cemento Portland y la biomasa vegetal.

Por su mayor proporción en masa, el tipo de cemento Portland adoptado contribuye de forma significativa en las propiedades del compuesto. Varias investigaciones destacaran la importancia de la naturaleza del cemento (proporción entre los constituyentes C_2S , C_3S , C_3A y C_4AF) en el éxito de la reacción con la biomasa vegetal. De entre los diferentes tipos de cemento disponibles en el mercado, el cemento de fraguado rápido es el que mejor se adapta a la perturbación causada por la liberación de las sustancias inhibidoras contenidas en la biomasa vegetal, liberadas mientras se forma el medio alcalino resultante de la disolución de los gránulos de cemento en el agua.

La biomasa vegetal, contrariamente a lo que ocurre con los granulados minerales convencionales, es muy reactiva en presencia del medio alcalino. Varias sustancias – denominadas en lo general de extractivos, migran hacia la superficie de las partículas vegetales, constituyendo una capa impermeable en la cual la reacción de hidratación del cemento puede ser frenada o en casos muy extremos, simplemente no ocurre esa reacción.

De lo expuesto anteriormente se puede imaginar que ocurra un tipo de competencia entre las velocidades del fraguado del cemento y de la liberación de sustancias inhibidoras por parte de la biomasa vegetal. Entonces las estrategias que visen acelerar el primero evento (fraguado del cemento) o minimizar el segundo (liberación de sustancias) deben ser buscadas.

En la literatura hay sólo alguna información sobre el comportamiento de los compuestos biomasa vegetal y cemento, evaluado por medio de NDE. Aparentemente no hay una investigación profunda en el tema, salvo raras excepciones (Beraldo, 1999; Teixeira & Moslemi, 2001). Todavía, la naturaleza del pegante empleado y sobretodo de las características de la biomasa vegetal no permiten que se pueda generalizar los resultados obtenidos en las investigaciones relacionadas, necesitando que sea evaluada la interacción particular de una nueva biomasa y un nuevo tipo de cemento.

Una aproximación preliminar de evaluación de las características del compuesto por medio de NDE puede ser basada en los estudios obtenidos para morteros y hormigones. Sin embargo, deben ser destacadas diferencias en el tipo del cemento, naturaleza de los agregados, contenido del humedad, tipo y dosis de los aditivos, razón agua y cemento, razón granulados y cemento, modificación de la UPV con la edad de la probeta, y tipo de curado.

Los fundamentos de la utilización del ultrasonido se basan en la propagación de una onda mecánica a través del medio material. Las características de ésta propagación dependen del estado y las condiciones físicas del medio. Un medio en estado mas rígido generalmente facilita la transmisión de energía y presenta una mayor velocidad de propagación.

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

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

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

Donde V- velocidad del ultrasonido en la edad e (en días), k - constante global de desaceleración.

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

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

El objetivo de este trabajo es el análisis de la UPV en compuestos de cemento Portland y partículas de *Pinus radiata* Don, como indicador de la evolución de la resistencia mecánica de los compuestos.

Materiales y Métodos.

Fueron producidas probetas con diferentes mezclas de cemento y partículas de la madera de *Pinus radiata* D. Don, para la evaluación de la VPU según la edad de la probeta. Para esto se utilizó un equipo Panametrics 5800 con transductores de frecuencia de resonancia de 1 MHz y un osciloscopio Tektronix TDS 340.

Fueron confeccionadas en forma triplicada probetas cilíndricas de 33 mm de altura y 45 mm de diámetro. Al mismo tiempo, con el objetivo de obtener la señal en las edades precoces de las probetas

fueron confeccionadas vigas prismáticas (25 mm x 30 mm x 224 mm). La mezcla era distribuida de forma uniforme y se aplicaba una presión de 1.0 MPa en un equipo Instron.

Preparación de las mezclas. Inicialmente se efectuaba la mezcla entre el cemento de fraguado rápido (cemento Bio-Bio – Alta resistencia inicial - ARI) y las partículas de la madera. Después se adicionaba el agua a la mezcla y se continuaba mezclando hasta obtener uniformidad en el color.

También fueron preparadas mezclas de mortero de arena (1 : 3: 0.5) y de un mortero de arena con partículas de madera (1 : 2: 0.1 : 0.5) para comparar la evolución de la VPU en el tiempo.

Tratamientos aplicados a las partículas. Con el objetivo de verificar si el ultrasonido era sensible a los cambios ocasionados por diferentes reacciones entre el cemento y las partículas, fueron adoptados los siguientes tratamientos:

- a) *Natural*: partículas en su forma original (testigo);
- b) *Lavado*: partículas lavadas en agua caliente (2 h a 80 °C);
- c) *Acelerador*: empleo de los aceleradores cloruro de calcio, sulfato de aluminio y silicato de sodio (2% de la masa anhidra con relación a la masa del cemento);
- d) *Combinado*: combinación entre los tratamientos b) y c).

Las proporciones adoptadas entre las masas para las probetas cilíndricas fueron las siguientes:

- a) Virutas: 1 : 0.33 : 0.61 (masa de cemento : madera : agua);
- b) Aserrín: 1 : 0.33 : 0.63.

En el caso de las vigas prensadas, las probetas fueron confeccionadas bajo las siguientes condiciones.

- a) Partículas naturales: vigas V1 y V2 (1 : 0.10 : 0.33), viga V3 (1 : 0.30 : 0.50) confeccionadas con virutas. Estas vigas fueron posteriormente cortadas para que fuera posible evaluar la VPU en las tres direcciones ortogonales (siendo “y” la dirección paralela al prensado de la viga). También fue producida la viga V6, que es similar a la viga V3, pero con aserrín.

- b) Aceleradores: viga V4 con cloruro de calcio (2%) y viga V5 con sulfato de aluminio (2%), similares a la viga V3.

Todas las probetas, cilíndricas y vigas, eran curadas durante una semana en una bolsa plástica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo se muestran en los gráficos 1-5, y han sido separados en los obtenidos para probetas cilíndricas y vigas prensadas.

I. Probetas cilíndricas. En el análisis para las probetas cilíndricas se consideraron tres factores: a) Proporción entre los constituyentes, b) Tipo de partícula vegetal, y c) Tratamiento aplicado.

- a) Las reacciones de hidratación del cemento ocurren de forma muy intensa en las primeras edades de las probetas, y esto mismo se produce en la VPU. En la Figura 1 se presentan las VPU para un mortero de arena y cemento (1:3:0.48), un compuesto (**Cam**) mortero de arena y cemento con adición de partículas de madera (1:2:0.1:0.5) y un compuesto (**Cmd**) de madera y cemento (1:0.33:0.61). La alta frecuencia de ultrasonido no permitió observar señales en las primeras edades de las probetas en varias situaciones, sobretodo cuando se emplearon partículas en forma de virutas o cuando el tratamiento aplicado a las mezclas no fue satisfactorio.

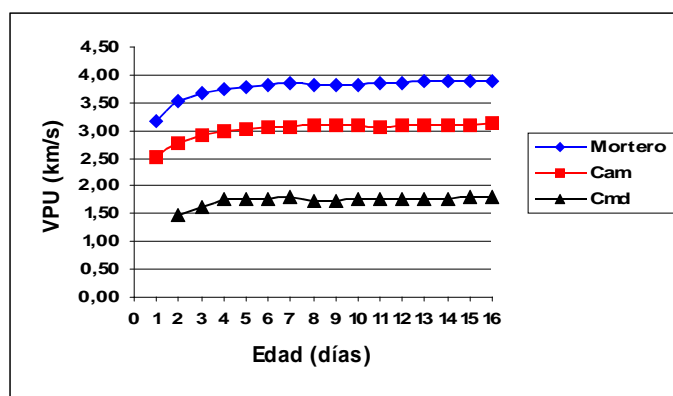


Figura 1 – Comparación entre VPU de distintos materiales a base del cemento al largo del tiempo (edad de la probeta).

Con los datos de estabilización (V_{max}) y con la densidad de las probetas, se obtuvieron también los módulos de elasticidad dinámicos. Para el mortero y para los compuestos **Cam** y **Cmd** los valores fueron de 33.0 GPa, 18.7 GPa y 3.6 GPa, respectivamente. Para el mortero el valor obtenido es muy cercano a lo relatado para hormigones (Naik et al. 2004). Para el compuesto Cam se observa que la simple modificación de una parte de arena por un 10% de partículas de madera, con relación a la masa de cemento, redujo el Ed en cerca de 40%. Los valores de densidad y de VPU del compuesto Cmd son cercanos a la mitad en relación a las del mortero, y por lo tanto su Ed es cerca de 1/8 del mortero.

- b) Los compuestos con viruta presentan una estructura más heterogénea que los con aserrín. Mientras en estos compuestos la razón de las partículas ha sido constante (30% de la masa de cemento), la estructura específica formada en los compuestos de viruta provoca una disipación mayor de energía de la onda de ultrasonido. Otro aspecto a ser destacado, se refiere a la región de contacto de la probeta con los transductores. Para el caso de los compuestos de viruta se observa un acoplamiento débil, debido al mayor tamaño de las partículas, en relación a las de aserrín, y por esto su compactación es menos efectiva con el cemento.
- c) Las propiedades físico-mecánicas de los compuestos de madera y cemento dependen significativamente de las características específicas de estos constituyentes. En este experimento fueron empleados dos materias primas que favorecen la propagación ultrasónica. Los resultados de las curvas de VPU mostradas en las figuras 2 y 3, corresponden a la relación de los compuestos utilizados. Cualquier variación en ellos, conlleva a una modificación en los valores de VPU.

Debido a lo expuesto, se llevo a cabo el análisis de los compuestos en forma separada, pues la magnitud de la VPU en los compuestos de aserrín (Figura 2) siempre fue mayor que en los compuestos de viruta (Figura 3). En las dos figuras se puede observar que el empleo de determinados tratamientos

permitió observar una señal de ultrasonido en las primeras edades de la probeta, y también, una estabilización más rápida de la VPU.

Las densidades de las probetas compuestas con ambos tipos de partículas eran muy cercanas, por lo que la diferencia en E_d se puede atribuir a una diferencia en la rigidez de las estructuras de los compuestos. Los resultados obtenidos permitieron confirmar que la especie de *Pinus radiata* utilizada es moderadamente compatible con el cemento de fraguado rápido. En efecto, los valores de E_d para los compuestos de aserrín natural o de aserrín tratado por aceleradores, se situaron alrededor de 4.0 GPa. De entre los aceleradores utilizados, el cloruro de calcio (al 2% de la masa de cemento) permitió obtener las VPU más elevadas, indicando con esto, su mejor condición para la fabricación de compuestos. Para el caso de compuestos de virutas el valor promedio de E_d se situó alrededor de 3.0 GPa, observándose la misma tendencia que en aserrín, al utilizar el cloruro del calcio como acelerador.

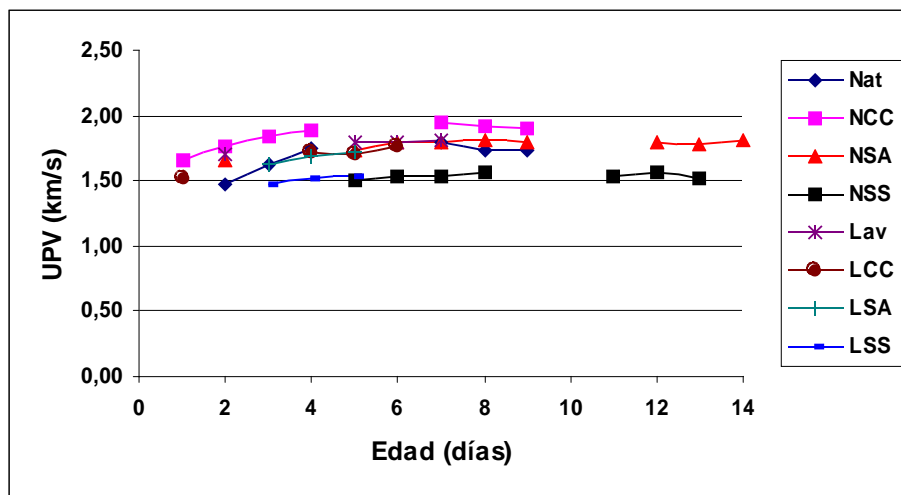


Figura 2 – UPV para compuestos de aserrín.

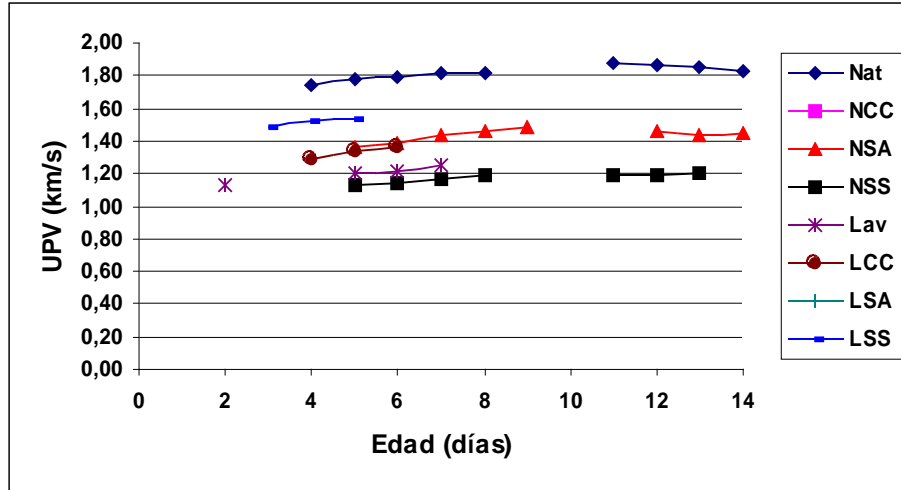


Figura 3 – UPV para compuestos de virutas.

II. Vigas prensadas .

Los resultados de las VPU en las tres direcciones de las vigas prensadas evidenciaron su naturaleza ortotrópica, pues la VPU en la dirección paralela a la dirección de compactación de la mezcla (dirección **y**) es muy inferior a las otras dos direcciones (**x** e **z**). Para la viga con 10% de partículas de madera los valores de E_d para las direcciones **x**, **y**, **z**, fueron 12.4 GPa, 8.4 GPa y 13.3 GPa, respectivamente. Esos valores disminuyeron a 4.6 GPa, 1.9 GPa y 5.5 GPa respectivamente al aumentar a un 30% el contenido de partículas de madera.

Para vigas prensadas con 30% de virutas, también se pudo confirmar el efecto favorable del empleo del cloruro de calcio, comparado con los aceleradores de sulfato de aluminio y silicato de sodio. Los valores de E_d para las direcciones **x**, **y** cambiaron a 7.0 GPa y 4.0 GPa, respectivamente.

En las vigas prensadas no se observó el efecto del tamaño de las partículas en la magnitud de la VPU, a diferencia de lo observado en las probetas cilíndricas no prensadas. Para la viga de partículas con 30% de aserrín, los valores de E_d en las direcciones **x** e **y** fueron respectivamente de 5.1 GPa y 2.9 GPa.

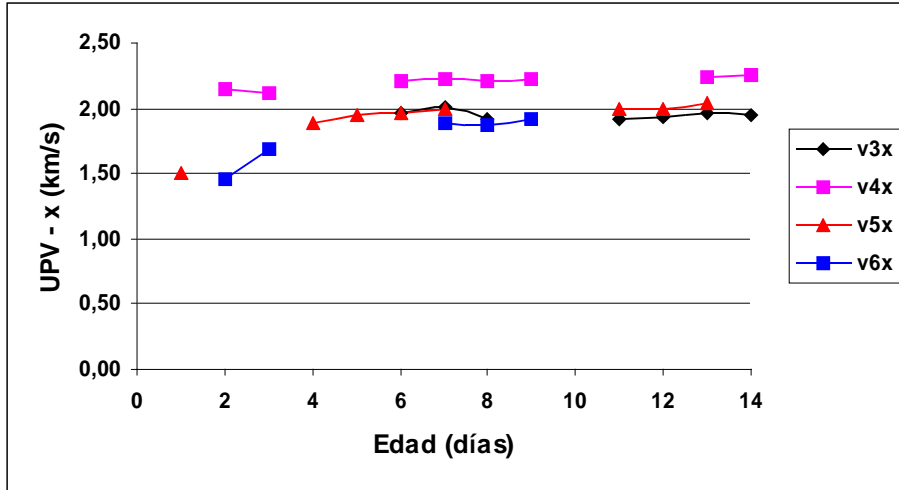


Figura 4 – VPU en la dirección x - vigas

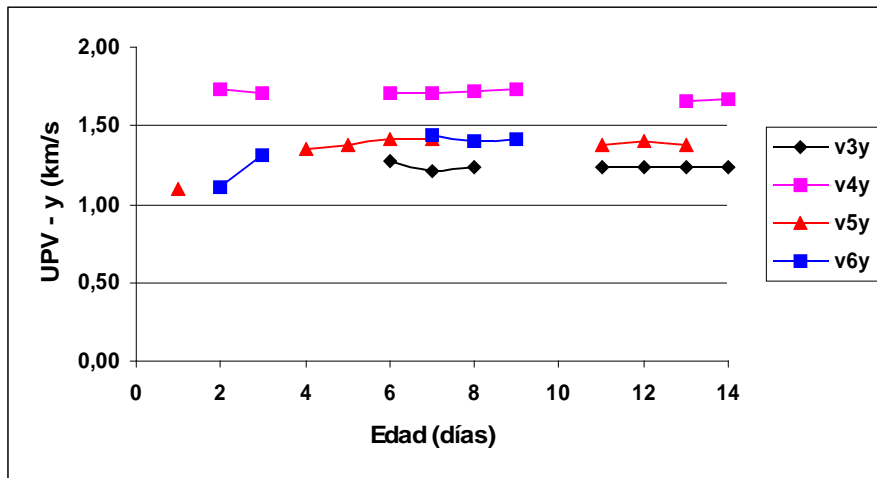


Figura 5 - VPU en la dirección y – vigas.

Finalmente, a forma de comparación con el estudio efectuado sobre probetas cilíndricas en este trabajo, se llevaron a cabo mediciones en probetas de 50 mm de diámetro y 100 mm de alto con aserrín natural (**Nat**) y aserrín con cloruro de calcio (**NCC**) con un equipo Ultrasonic Tester BP7 de Steinkamp a frecuencia de 45 kHz. A esta frecuencia, a diferencia de 1 MHz, se obtuvieron señales a tempranas edades (Figura 6), lo que permite observar mejor el comportamiento exponencial de las VPU en

dependencia del tiempo. En la figura se observa una buena relación entre los datos experimentales y el modelo teórico.

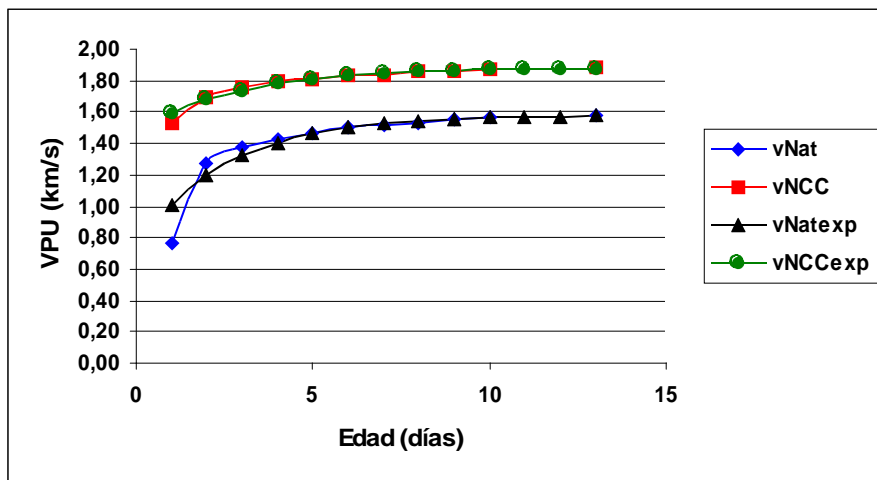


Figura 6 - VPU v/s edad de las probetas.

Conclusiones.

La utilización de la técnica de ultrasonido hace factible el monitoreo del proceso de fraguado y de endurecimiento de las mezclas conformadas por cemento Portland y partículas de madera.

Bibliografía.

Beraldo A.L. Ultrasonic speed wave: cure type influence on compression strength of wood-cement composite.1999. Proc. Int. Symp. on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems. Torres, RS, Brasil, p. 86-90.

Naik, T.R., Malhotra, V.M., Popovics, J.S. 2004. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. CRC Press.

Teixeira, D.E., Moslemi, A. 2001. Assessing Modulus of Elasticity of Wood-fiber Cement (WFC) Sheets Using Nondestructive Evaluation (NDE). Bioresource Technology 79(2):193-198.