

## COMPUESTO DE ASERRÍN Y CEMENTO

Antonio Ludovico Beraldo <sup>1</sup>; Michelle Rodrigues <sup>2</sup> y Angélica Mendes <sup>3</sup>

Facultad de Ingeniería Agrícola – Universidad Estatal de Campinas. San Pablo, Brasil.

<sup>1</sup> Profesor Asociado beraldo@agr.unicamp.br. <sup>2</sup> Estudiante de Maestría m002222@dac.unicamp.br <sup>3</sup> [Estudiante de Doctorado](mailto:angélica.Mendes@agr.unicamp.br) angélica.Mendes@agr.unicamp.br.

### RESUMEN

En países como el Brasil, donde una de las principales actividades es el agro-negocio, surge la oportunidad de emplear los subproductos de esta actividad en la construcción civil, tanto para el medio urbano como para el medio rural, proponiéndose una finalidad adecuada y provechosa a los residuos. Este trabajo tuvo como objetivo la fabricación de compuestos a base del cemento con la adición de dos tipos de residuos de Eucalipto (*Eucalyptus sp*) generados en los aserraderos. Los residuos de maderas fueron empleados en su forma natural y después de ser sometidos a diversos tratamientos, con el intuito de mejorar la compatibilidad química con los cementos Portland (CPII y CPV–ARI) Fueron realizados los siguientes ensayos: la curva de hidratación de las mezclas; la compresión simple de probetas y la evaluación de la propagación del ultrasonido a través de las probetas. Los resultados más adecuado, cuanto a las propiedades físico-mecánicas de los compuestos, fueron obtenidos en los tratamientos de mineralización. Compuestos de cemento de fraguado rápido (ARI) mostraron superioridad con relación a los de cemento CPII. El residuo de la madera en la forma de aserrín presentó los mejores resultados.

**Palabras clave: compatibilidad química, resistencia, material alternativo.**

### INTRODUCCIÓN

Países tropicales presentan oportunidades significativas para la producción de compuestos de fibras vegetales (GUIMARÃES, 1990), especialmente porque es posible la utilización de subproductos generados en las principales actividades agrícolas

desarrolladas en estos países. Conforme relataron AGOPYAN & JOHN (1992), la utilización de compuestos hechos de fibra vegetal y cemento, preparados con cementos de baja alcalinidad, ofrece una alternativa para la construcción de edificios a un bajo costo, pues, es reducida la degradación de la fibra en un ambiente alcalino.

El uso de los compuestos formados por los residuos vegetales permite un amplio campo de estudio de la producción y de la aplicación de estos compuestos en la construcción civil. Es importante la aplicación de los compuestos, entre otros aspectos, debido al aprovechamiento de los residuos de la industria maderera, visto que, son materiales fácilmente reutilizables, disponibles y de bajo costo. La viabilidad del uso de los residuos vegetales en la pasta de cemento depende de la realización de un tratamiento químico apropiado para cada especie vegetal (STANCATO et al., 2005)

De acuerdo con varios autores, los efectos de la madera en la hidratación del cemento dependen de los siguientes factores: posición geográfica del árbol, época del año, de la especie considerada y de sus variados constituyentes químicos (SANDERMANN et al., 1960; MILLER, 1988) BIBLIS & LO (1968) relataron que el tiempo de retardo de la hidratación del cemento es relacionado con la cantidad de los azúcares solubles almacenados en la madera.

Esta investigación evaluó el comportamiento de compuestos a base de cemento, modificados con adiciones de dos tipos de residuos generados en aserraderos de eucalipto.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El material analizado fue proveído por la Madeireira Santa Cruz, ubicada en la ciudad de Taubaté, San Pablo. La producción mensual del aserradero es de alrededor 200 m<sup>3</sup>, generando residuos evaluados en 40% al 50% del volumen aserrado. Uno de los residuos utilizados es originario de la operación primaria de los troncos (F - sierra huincha) y el otro es resultante del aserrado de las vigas (C - sierra circular)

Para evaluar la interacción química entre los residuos de la madera y los cementos empleados se efectuó el ensayo de la curva de hidratación de las mezclas. Fueron

obtenidos los valores de la temperatura máxima alcanzada por la mezcla, el tiempo para su ocurrencia y la pendiente de la curva. Las mezclas de cemento y madera fueron introducidas en contenedores plásticos aislados térmicamente. Termopares fueron introducidos en las mezclas y los datos fueron obtenidos por medio del aparato *Fielder Logger*.

Para la realización de los experimentos fueron utilizados 200 g de cemento, 15 g de madera anhidra y 85 g del agua. El calculo de la masa de agua fue expresado por la siguiente ecuación (SANDERMANN et al.,1960):

$$M_a = (0,25 \times M_c) + (K \times M_{ms}),$$

siendo:

$M_a$  = Masa del agua (g);

$M_c$  = Masa del cemento (g);

$M_{ms}$  = Masa de madera anhidra (g).

K = coeficiente empírico

Las partículas de madera habían sido retenidas en el tamiz # 50 (0.300 mm), entonces se adoptó el valor  $K = 2,2$  en dicha ecuación.

MOSLEMI & LIM (1984) definieron un índice de compatibilidad entre la madera y el cemento por medio de la ecuación:

$$I_c = 100 * \frac{(t_m - t_c)}{t_c} \cdot \frac{(\theta_c - \theta_m)}{\theta_c} \cdot \frac{(s_c - s_m)}{s_c}$$

siendo:

$t_c$  = tiempo para la ocurrencia de la temperatura máxima de la pasta de cemento;  $t_m$  = tiempo para la ocurrencia de la temperatura máxima de la mezcla;  $\theta_c$  = temperatura máxima alcanzada por la pasta de cemento (°C);  $\theta_m$  = temperatura máxima alcanzada por la mezcla (°C)  $s_c$  = pendiente máxima obtenida en la curva (tasa máxima de elevación de la temperatura de la pasta de cemento, %);  $s_m$  = pendiente máxima de la curva (tasa máxima de elevación de la temperatura de la mezcla, %).

Para los ensayos de la curva de hidratación fueron evaluados los siguientes tratamientos: **t1** - Pasta de cemento ARI (cemento Portland tipo V-ARI y agua); **t2** - Pasta de cemento CPII (cemento Portland tipo II y agua); **t3** - Mezcla de la pasta de ARI con Eucalipto natural; **t4** - Mezcla de la pasta de CP II con Eucalipto natural; **t5** - Mezcla de la pasta de ARI, adicionada a los extractivos de la madera (con porcentajes del 5% y

del 10% con relación a la masa de cemento); **t6** - Mezcla de la pasta de CPII, adicionada a los extractivos de la madera (5% con relación a la masa de cemento); **t7** - Mezcla de la pasta de ARI con partículas de eucalipto lavado en agua caliente; **t8** - Mezcla de la pasta de CPII con partículas de eucalipto lavado en agua caliente; y **t9** - Mezcla de la pasta de ARI con eucalipto lavado en agua caliente y con la adición del 3% de cloruro de calcio (con relación a la masa de cemento).

Los compuestos fueron producidos utilizándose dos tipos de residuos de la madera de eucalipto (**C** - aserrín y **F** - polvo) y dos tipos de cemento Portland **CP II-E-32** (NBR 11578) y **CP V-ARI** (NB - R 5733) Las probetas fueron moldeadas con el factor agua/cemento de 0.60 para todas las adiciones; tres probetas cilíndricas (5 cm de diámetro y 10 cm de largo, de acuerdo con el estándar NBR 7215) fueron fabricadas para cada mezcla evaluada.

También se efectuó el proceso de mineralización de dos formas distintas. Las partículas de madera fueron inmergidas en una solución al 5% de silicato de sodio por 5 minutos y, después, fueron inmergidas en una solución al 10% de sulfato de aluminio. En la otra forma de mineralización las partículas de madera fueron inmergidas en una solución al 5% de silicato de sodio y, en seguida, en otra solución del 3% de cloruro de calcio. Los tratamientos aplicados a las partículas de eucalipto son presentados en la Tabla 1.

Las probetas fueron de-moldeadas después de 24 h de su fabricación, y permanecieron durante sete días en una cámara húmeda, seguidos de más 7 días de secado al aire libre.

Durante la etapa de endurecimiento de las mezclas (hasta los 14 días) se obtuvo la evaluación del tiempo necesario para la propagación de la onda del ultrasonido a través de las probetas. Para evaluar el tiempo de propagación fue utilizado el aparato *Ultrasonic Tester*, modelo BP7 fabricado por la empresa *STEINKAMP*, disponiendo de detectores de sección exponencial con 45 kHz de frecuencia de resonancia. Generalmente la evolución de la velocidad del pulso del ultrasonido (VPU) es un indicativo de la integridad del material.

A los 14 días de la fabricación, las probetas tuvieron sus bases regularizadas (de acuerdo con las recomendaciones del estándar NBR 7215) Los ensayos fueron efectuados en un aparato de la marca *Versa Tester*. El tiempo para la ruptura de las

probetas fue de alrededor de los 5 min. El análisis estadístico fue efectuado por medio del software *Statgraphics 4.1*, obteniéndose el análisis de variancia (ANOVA) de los factores: tipo de partículas de la madera, tipo del cemento y tipo de tratamientos aplicados a las partículas, además de las posibles interacciones entre los factores. Los resultados promedios fueron comparados por medio del teste de Tukey al nivel de 95% de probabilidad estadística.

Tabla 1. Tratamientos aplicados a las partículas de eucalipto.

Tratamiento	Cemento	
	ARI	CPII
Natural	T1	T2
Natural + cloruro de calcio (al 3%)	T3	T4
Lavada en agua caliente – a 80° C durante 2 h	T5	T6
Lavada en solución de cal	T7	T8
Lavada en solución de soda	T9	T10
Adición de sulfato de aluminio	T11	T12
Adición de silicato de sodio	T13	T14
Silicato de sodio (al 5%) y sulfato de aluminio (al 10%)	T15	T16
Silicato de sodio (al 5%) y Cloruro de calcio (al 3%)	T17	T18

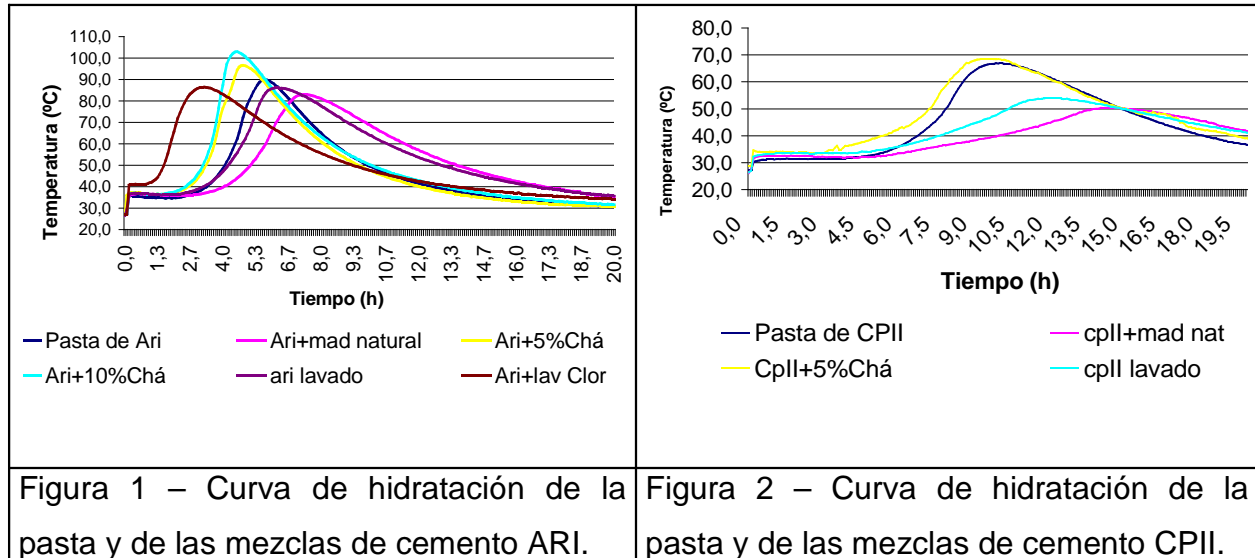
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evolución de las temperaturas de las pastas de cemento y de las diferentes mezclas evaluadas se presenta en las Figuras 1 y 2.

En la Figura 1 se observa que los extractivos presentes en la madera del eucalipto modificaron acentuadamente el aspecto de las curvas de hidratación, probablemente acelerando la reacción de hidratación de algunos constituyentes del cemento ARI. La madera natural es moderadamente inhibitoria al fraguado del cemento ARI (**IC = 1,6**) y se obtuvo ventajas cuando se aplicó el lavado en las partículas y principalmente cuando combinado con la adición del cloruro de calcio.

En la Figura 2 se puede confirmar el mismo efecto positivo de los extractivos en el fraguado del cemento CPII. Mientras tanto, la madera natural es inhibitoria al fraguado

de este tipo de cemento (**IC = 3,8**), indicando la necesidad de minimizar este inconveniente por medio del lavado de las partículas, o del empleo de catalizadores del fraguado.



Las Figuras 3, 4, 5 y 6 presentan la evolución de la velocidad del pulso del ultrasonido (VPU) en las diferentes probetas, a lo largo del tiempo (edad de las probetas)

- La madera en su forma natural (sin tratamiento) y con la adición del 3% de cloruro de calcio. Se puede observar que las partículas **C** presentaron VPU más elevadas do de las partículas **F**, y que los compuestos de cemento ARI también presentaron VPU más elevadas que aquellos del cemento CPII (Figura 3)
- Madera lavada en agua, madera lavada en solución de cal y madera lavada en solución de soda. Solamente compuestos a base de cemento ARI presentaron VPU adecuadas. El lavado en solución de cal fue el menos satisfactorio (Figura 4)
- Mineralización con silicato de sodio y sulfato de aluminio. El efecto positivo es evidente, denotando la adecuación de este tipo de tratamiento en las VPU, sobretodo para las partículas de madera tipo C (Figura 5)
- Mineralización con silicato de sodio y cloruro de calcio. Aparentemente este tipo de tratamiento aportó los mejores resultados en la VPU, sobretodo con el empleo del cemento ARI y de las partículas tipo C (Figura 6)

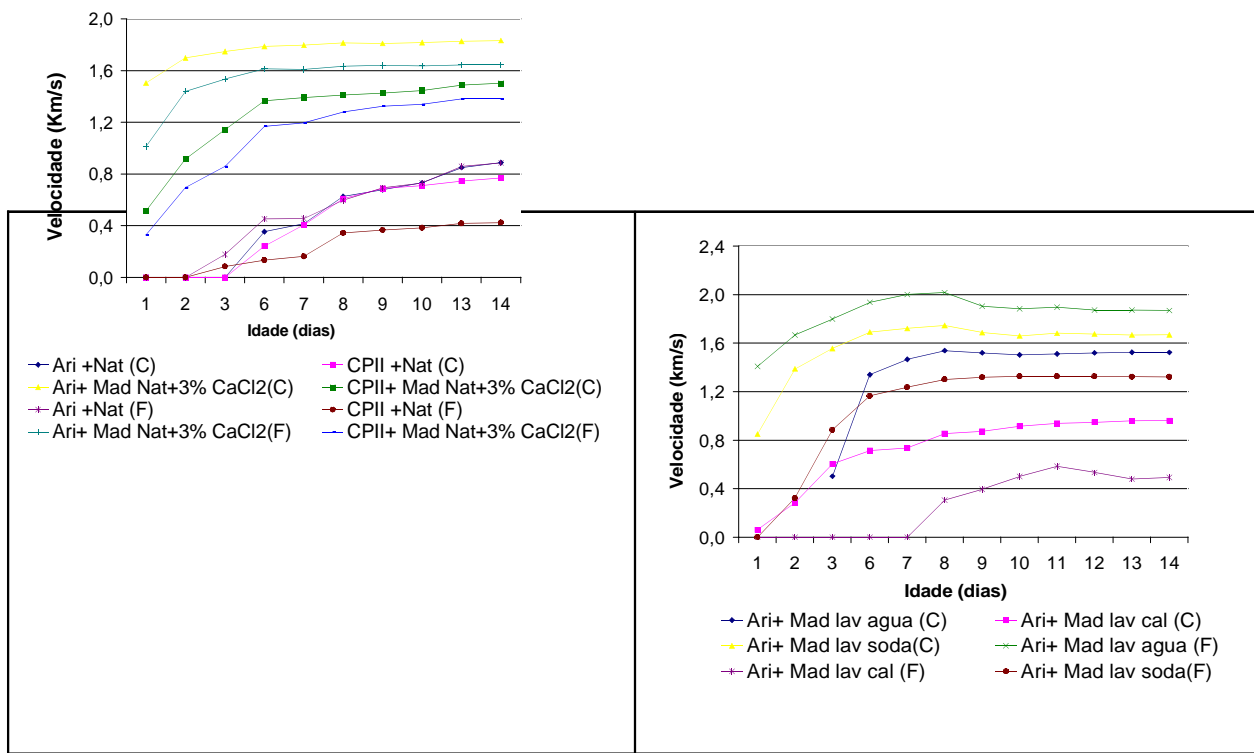


Figura 3: Tratamientos T1, T2, T3 y T4.

Figura 4: Tratamientos T5, T7 y T9.

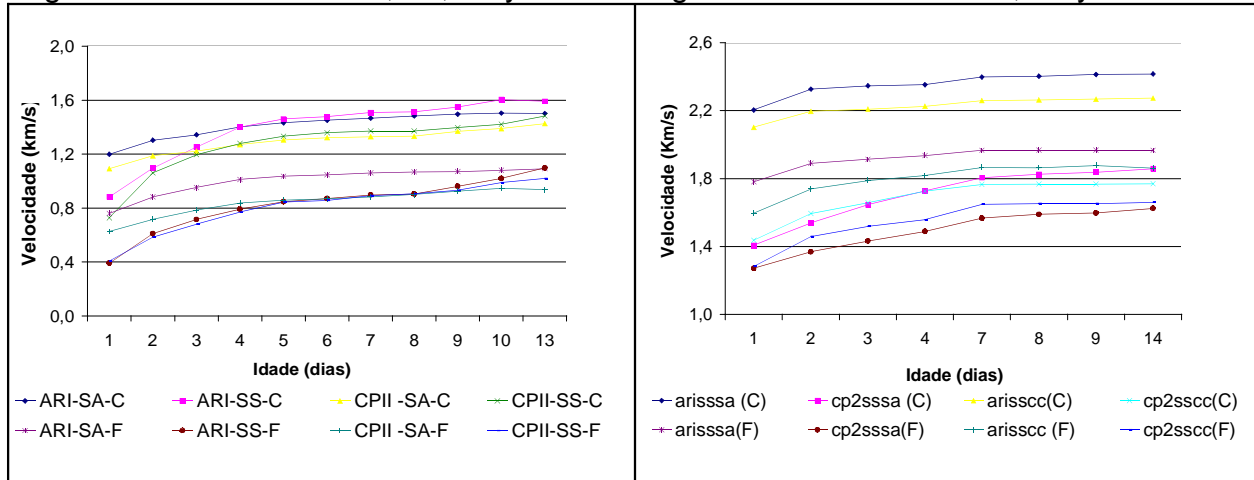


Figura 5: Tratamientos T11, T12, T13 y T14.

Figura 6: Tratamientos T15, T16, T17 y T18.

Legenda : Nat – natural, Mad – Madera, Lav – Lavada, ARI – Cemento Portland tipo V – ARI; CP II – Cemento Portland tipo II, F – residuo de la sierra huincha (polvo), C – residuo de la sierra circular (aserrín), SS – silicato de sodio, SA – sulfato de aluminio, CC – cloruro de calcio.

En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se presentan los modelos matemáticos obtenidos de la resistencia a la compresión versus la VPU para los compuestos de partículas de eucalipto y los dos tipos de cemento,

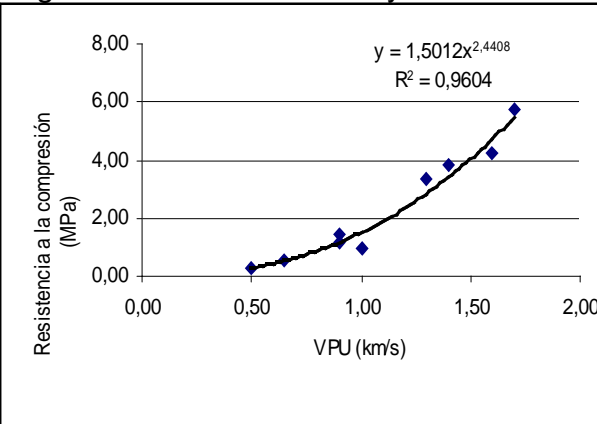
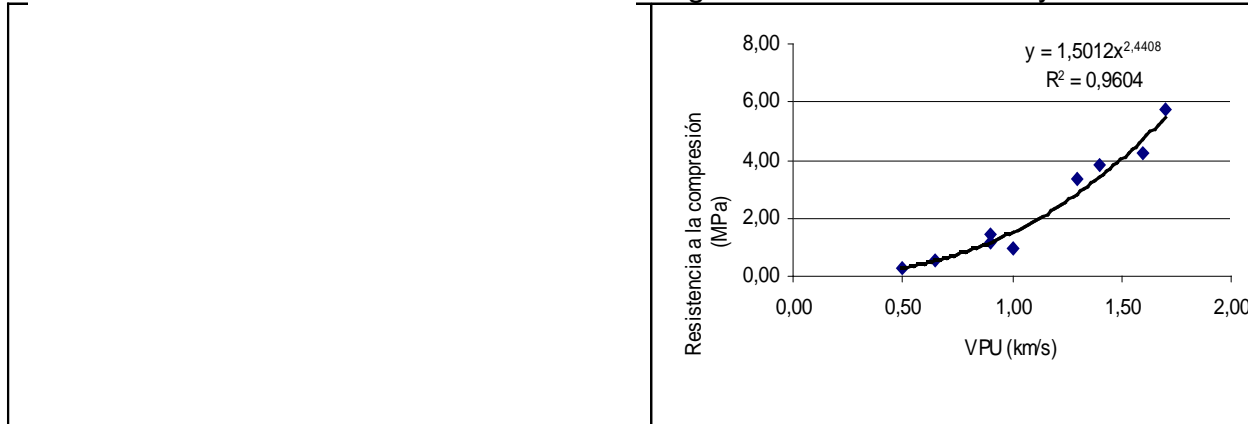
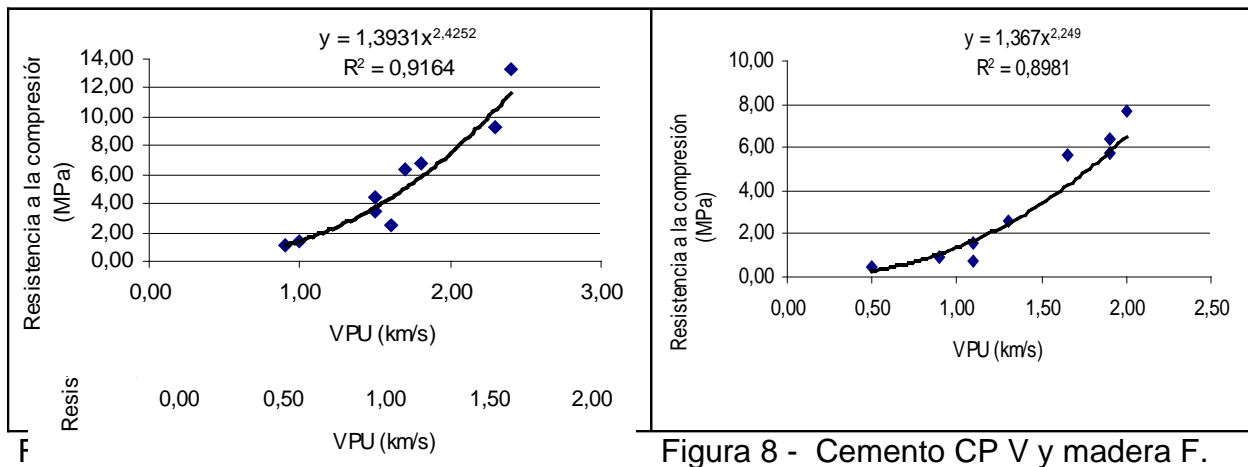
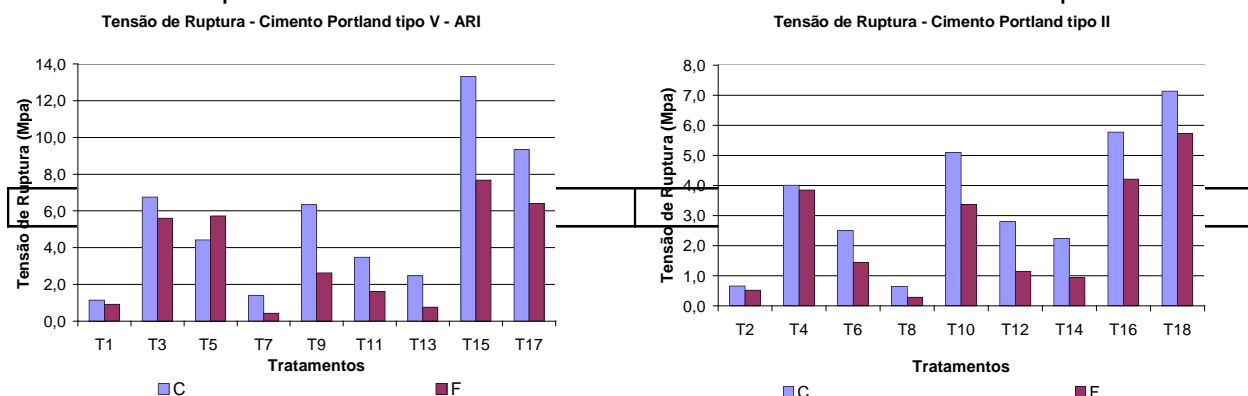


Figura 9 - Cemento CP II y madera C.

Figura 10 - Cemento CP II y madera F.

Los resultados de los ensayos de compresión simple son presentados en las Figuras 11 y 12 para los compuestos hechos con cementos ARI y CPII, respectivamente. Para los tratamientos similares, los compuestos de cemento ARI se mostraron superiores al de los compuestos de cemento CPII. También fue nítida el predominio del empleo de las partículas de aserrín (C) con relación al polvo de madera (F), excepto para el tratamiento T5, en la resistencia a la compresión de los compuestos. Corroborando los resultados de las VPU, el empleo de la madera natural fue inadecuado para la resistencia de los compuestos y, por otro lado, los tratamientos definidos como mineralización permitieron alcanzar las resistencias más elevadas en compresión



Fonte	Soma quadrados	Df	Média	F Razão	F Valor
A:cimento	31,6767	1	31,6767	90,88	0,0000
B:madeira	101,017	1	101,017	289,82	0,0000
C:tratamiento	118,361	8	14,7951	41,79	0,0000
AB	21,5204	1	21,5204	61,74	0,0000
AC	28,7249	8	3,59061	10,30	0,0000
BC	118,361	8	14,7951	41,79	0,0000
ABC	85,1485	8	10,6436	30,54	0,0000
Resíduo	25,0955	72	0,348548		
TOTAL (Corrigido)	879,679	107			

Figura 11: Tensión de ruptura – cemento ARI -- Figura 12: Tensión de ruptura – cemento CPII

En la Figura 13 se presenta el análisis de variancia (ANOVA) para los valores de la resistencia a la compresión, indicando que los tres factores (tipo de cemento, tipo de partículas de madera y tipos de tratamiento) fueron altamente significativos al nivel de 95% de probabilidad estadística, además de las interacciones también significativas entre los factores.

Todas as Razoes-F são baseadas em médias quadradas dos resíduos

Figura 13 - Análisis de variancia entre los factores para la resistencia en compresión.

La comparación de los valores promedios por medio del teste de Tukey LSD (Multiple Range Test – Agrupamiento Homogéneos) indicó que:

- a) tipo de cemento: compuestos de cemento ARI (promedio de 3.99 MPa) fueron diferentes estadísticamente de los compuestos de CPII (promedio de 2.91 MPa)
- b) tipos de partículas de madera: las partículas más gruesas (C – promedio de 4.41 MPa) fueron más efectivas en la resistencia de que los compuestos de polvo de madera (F – promedio de 2.48 MPa)
- c) tipos de tratamientos: las mineralizaciones de silicato de sodio y cloruro de calcio (promedio de 6.60 MPa) y de silicato de sodio y sulfato de aluminio (promedio de 6.06 MPa) no presentaron diferencias estadísticas entre si, pero fueron ambos superiores y diferentes estadísticamente a los demás tratamientos. También una alternativa para alcanzar una resistencia adecuada en compresión es el empleo del acelerador de fraguado cloruro de calcio (promedio de 5.05 MPa) La madera en su forma natural presentó una resistencia en compresión de alrededor del 0.7 MPa.

Las interacciones entre los factores permitieron agrupar las combinaciones más efectivas, considerando el tipo de cemento o el tipo de partículas de madera. De este modo, las combinaciones más adecuadas pueden ser:

a) cemento del tipo V-ARI: tratamiento de mineralización de las partículas con silicato de sodio y cloruro de calcio (promedio de 6.80 MPa), y la mineralización con silicato de sodio y sulfato de aluminio (promedio de 7.13 MPa);

b) cemento del tipo II: los mismos tratamientos para el cemento ARI con resistencias promedios de 6.43 MPa y 4.99 MPa, respectivamente.

c) partículas de madera del tipo C (aserrín): los mejores resultados también fueron obtenidos con la mineralización: silicato de sodio y cloruro de calcio (promedio de 8.23 MPa), y silicato de sodio y sulfato de aluminio (promedio de 9.55 MPa).

d) partículas de madera del tipo F (polvo): el tratamiento más adecuado fue la mineralización con silicato de sodio y cloruro de calcio (promedio de 4.97 MPa)

## **CONCLUSIONES**

El análisis de la curva de hidratación de mezclas de partículas de madera de eucalipto, y principalmente cuando fue empleado el cemento compuesto tipo CPII, permitió observar la naturaleza inhibidora de los residuos de los aserraderos. Las partículas de madera en forma de polvo (tipo F) presentaron un efecto inhibitor más pronunciado de que las partículas en forma de aserrín (tipo C) Estas tendencias pudieron ser confirmadas por medio del ensayo no destructivo del ultrasonido. Con efecto, la magnitud de las velocidades de propagación del pulso del ultrasonido (VPU) indicó claramente la ineficiencia de mezclas con partículas naturales, sobretodo cuando fueron efectuadas con el cemento CPII. En la totalidad de los ensayos aplicados el desempeño de compuestos de cemento ARI fue superior al de los compuestos de cemento CPII.

Aunque sea necesario efectuar el tratamiento de las partículas de madera, la fabricación de los compuestos es una forma de proponer el aprovechamiento racional de los residuos evitando que sean simplemente quemados, liberando gas carbónico y contribuyendo para la contaminación ambiental.

## BIBLIOGRAFIA CITADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. Rio de Janeiro. NBR 5733. 1991. – Cimento Portland de alta resistência inicial, especificação. 5 p.

---

NBR 7215. 1996. – Cimento Portland: determinação da resistência à compressão, método de ensaio. 8 p.

---

NBR 9939. 1987. - Agregados: determinação do teor de umidade total por secagem em agregado graúdo. 2 p.

---

NBR 11578. 1991.– Cimento Portland composto, especificação. 1991. 8 p.

Agopyan V, John V. M. 1992. Durability evaluation of vegetable fibre reinforced materials. *Build Res Infor.* 20(4):233-235.

Biblis E. J., Lo C. F. 1968. Effect on the setting of southern pine-cement mixture. *Forest Products Journal.* 18(8):28–34.

Guimarães S. S. 1990. Vegetable fiber-cement composites. In: Sobral HS, editor. *Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Vegetable Plants and their fibres as Building Materials.* London: Chapman & Hall. p. 98-107.

Miller D.; P. 1988. Wood–cement composites: interactions of wood components with Portland cement. PhD thesis. Moscow, University of Idaho, USA.

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

Sandermann W, Preusser H. J., Schwiens W. 1960. The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials. *Holzforschung.* 14(3):70–7.

Stancato, A. C., Burke, A. K., Beraldo, A. L. 2005. Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPMC). *Cement & Concrete Composites* 27. 599–603.

Weatherwax, R.C.; Tarkow H. 1964. Effect of wood on setting of portland cement, For. Prod. J. (1964 Dec.) 567– 570 (Forest Products Research Society, Session 12, Chemical Conversion June 24).

Zucco, L. L. 1999. Estudo da viabilidade de fabricação de placas prensadas de cimento e casca de arroz. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, 94p.