

COMPUESTO DE CÁSCARA DE HUEVO Y MORTERO DE CEMENTO PORTLAND

Antonio Ludovico Beraldo⁽¹⁾ y César Hideo Nagumo⁽²⁾

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

⁽¹⁾ Profesor Asociado, Doctor en Ciencias de la Madera. beraldo@agr.unicamp.br

⁽²⁾ Estudiante de pré-grado. nagumo@agr.unicamp.br

RESUMEN

Las actividades agroindustriales generan una grande cantidad de residuos, los cuales, aún no son explotados de forma racional. Generalmente los residuos agroindustriales son desechados en la naturaleza sin control o simplemente son quemados al aire libre, contribuyendo para la degradación ambiental. Resultante del procesamiento del huevo, la cáscara es un tipo de residuo que presenta un grande potencial para aplicación en la construcción, sobre todo por constituirse principalmente de carbonato de calcio. En este trabajo se evaluó el comportamiento de la cáscara de huevo mezclada con la pasta de cemento, por medio de ensayo de la curva de hidratación. Los resultados obtenidos indicaron la necesidad de aplicar tratamientos a la cáscara para minimizar su perturbación al fraguado del cemento. En una segunda etapa de la investigación fueron fabricados morteros de cemento, arena y cáscara de huevo tratada. Las probetas fueron evaluadas por ultrasonido y al fin de 21 días de secado, las probetas fueron ensayadas en la compresión simple. Los resultados de los ensayos indicaron la influencia del tipo de cemento, del tratamiento y de la proporción entre los constituyentes en la resistencia del compuesto. El ensayo no destructivo (END) fue sensible lo suficiente para detectar las diferencias estructurales entre los diferentes compuestos que proporcionó una buena correlación con los ensayos de compresión simple.

Palabras claves: compuestos, cáscara de huevo, cemento, residuos agroindustriales

INTRODUCCIÓN

Actualmente la avicultura brasileña es una de las más desarrolladas destacándose en el panorama mundial por los volúmenes comercializados de carne y huevos. Todavía, gran parte de la producción brasileña de alrededor 70 mil toneladas de cáscara de huevos (Producción: fuente FNP *on line*) son descartadas sin ningún control, generando grandes inconvenientes para las incubadoras de pollitos y para las empresas alimenticias que utilizan el huevo como materia prima.

La utilización de los residuos de la cáscara de huevo, como materia prima para la construcción, es una interesante posibilidad de ejercer el control y la minimización de los problemas ambientales causados por el descarte de los residuos. El empleo de los residuos puede viabilizar la fabricación de materiales de bajo costo, permitiendo así el reemplazo parcial o total de los áridos (arena, gravilla y ripio)

La propuesta de este trabajo fue la caracterización de la cáscara de huevo, sobre el punto de vista de la distribución de tamaño de sus partículas y, además, verificar la influencia de los constituyentes de la cáscara en la resistencia a la compresión del mortero a base del cemento y arena.

El huevo es una estructura constituida por una piel resistente y deformable, sometida a una presión interna. La piel es formada por tres membranas: las dos membranas externas son ligadas entre sí por un colchón y el espacio encerrado entre ellas es rellenado por un líquido bajo presión. Este líquido luego endurece, después de la postura, y constituye la casca de carbonato de calcio. La membrana externa y los colchones secan y desaparecen. Los colchones dejan en su puesto poros que son necesarios para la “respiración” del embrión. La membrana interna permanece y permite el cambio del oxígeno por osmosis. Los carbonatos son muy finos y se quedan conectados a los demás, permitiendo la formación de los poros. Los cristales de carbonatos son prismáticos presentando dimensiones de 300 micrones de largo y 50 micrones de diámetro (VASCONCELOS, 2000).

La cáscara de huevo en su forma triturada es un material biológico no uniforme, además de ser poroso y de difícil caracterización debido a su forma geométrica variable y a la distribución irregular de sus partículas (BROD, 1999)

Una alternativa interesante es la posibilidad de reemplazar los áridos convencionales por materias primas que sean renovables y disponibles localmente. Raramente se puede adicionar una biomasa al cemento sin realizar un tratamiento específico. Cada material particular presenta características únicas, principalmente en su constitución química. De esta forma, las investigaciones iniciales en este tema buscaron adecuar cada biomasa con determinado tipo de catalizador (acelerador), para mejorar el desempeño de los materiales. Los aceleradores de fraguado, en su gran mayoría, son constituidos por los cloruros, que actúan más rápidamente de lo que los otros aceleradores y proporcionan la obtención de materiales más resistentes.

El efecto global de la adecuación de las propiedades de los distintos materiales es generalmente evaluado por medio de ensayos clásicos de compresión o de flexión. Mientras tanto, los ensayos no destructivos (END) cada vez más son utilizados en la evaluación de los materiales y el suceso se debe al hecho de que ellos ofrecen una evaluación de la modificación estructural en los materiales sin necesitar destruirlos (BERALDO, 1999). El equipo de ultrasonido emite un impulso de vibración longitudinal, producido por un transductor mantenido en contacto íntimo con el material evaluado. El impulso vibratorio es captado por otro transductor, siendo convertido en una señal eléctrica y en unidades de tiempo. Este tiempo de propagación del ultrasonido en el material (y la velocidad del pulso de ultrasonido - VPU) puede caracterizar el material, constituyéndose en una forma rápida de evaluar su integridad.


Una otra forma de evaluar la compatibilidad entre el pegante y una biomasa es por medio del ensayo de la curva de hidratación. Esta curva indica la evolución de la temperatura de hidratación obtenida en las mezclas de cemento. De acuerdo con SANDERMANN et al. (1960), el cemento normal presenta una temperatura de hidratación elevada, superior a 80 °C. Todavía, en la presencia de glucosa, almidón o otras sustancias inhibitorias, la hidratación es rápidamente interrumpida, manteniéndose la temperatura alrededor de los 28 °C. WEATHERWAX y TARKOW (1964) determinaron una forma de evaluar los efectos inhibitorios, considerando el intervalo de tiempo necesario para alcanzar la temperatura máxima de hidratación del cemento.

MATERIALES Y MÉTODOS

- La masa específica aparente de la cáscara de huevo fue obtenida en la condición seca y no compactada. Un precipitado de vidrio, de volumen conocido, fue pesado antes y después de recibir una masa de partículas de huevo.
- Para evaluar la distribución en tamaño de las partículas de la cáscara de huevo fue adaptada la norma brasileña NBR 7217, empleándose 60 g de material pasante en los tamices (apertura en mm): 4.77; 2.38; 1.19; 0.59; 0.297; 0.149; 0.074.
- El contenido de humedad de la cáscara de huevo fue determinado por medio del método de la estufa a 70 °C hasta la obtención de masa constante
- La curva de hidratación de las diferentes mezclas fue obtenida por medio de la inserción de termocuplas tipo J en contenedores plásticos individuales, siendo el conjunto colocado en un calorímetro. Un sistema de adquisición de datos conectado a un computador, registraba la temperatura a cada 5 minutos (Figura 1) Las masas de cáscara de huevo fueron de 60 g, 70 g, 80 g, 90 g y 100 g; las masas de cemento y del agua fueron mantenidas constantes e iguales a 200 g y 100 g, respectivamente (Tabla 1)

Tabla 1 – Cantidades de los materiales

empleados.



Termopar	Cimento(g)	Água (g)	Casca de ovo(g)
Canal 1	200	100	70
Canal 3	200	100	80
Canal 4	200	100	60
Canal 5	200	100	90
Canal 6	200	100	100
Canal 7	Somente AGUA		
Canal 8	Somente AR		

Figura 1 - Conjunto de adquisición de datos utilizado para la curva de hidratación de las mezclas de los compuestos. Proporciones de las mezclas de cemento: cáscara de huevo: agua: canal 1 (1:0.35:0.50), canal 3 (1:0.40:0.50), canal 4 (1: 0.30:0.50), canal 5 (1:0.45:0.50) y canal 6 (1:0.50:0.50)

Los resultados obtenidos en el ensayo precedente indicaron que la cáscara de huevo, en su forma natural, no es compatible con el cemento Portland. Entonces una serie de tratamientos fueron aplicados a la biomasa:

T1 - Lavado en agua de llave y realizándose la separación de las partículas por decantación, seguido de su secado en estufa a 105° C por 24 h;

T2 - Inmersión en una solución de NaOH al 3% por 24 h y, lavado en agua de llave y secado en estufa a 105° C por 24 h;

T3 - Inmersión en una solución de Ca(OH)₂ al 5% por 24 h, lavado en de llave y secado en estufa a 105° C por 24 h.

T4 – Utilización del acelerador del fraguado cloruro de calcio al 3% con relación a la masa del cemento.

La utilización del acelerador de fraguado, en determinados casos, mejora el desempeño del compuesto, de acuerdo con ZUCCO (1999) El empleo del cloruro de calcio permite la obtención de compuestos con propiedades mecánicas superiores al de los demás compuestos.

En la fabricación de probetas se utilizaron los cementos Portland compuesto CP II-E-32 (NBR 11578) y el cemento de fraguado rápido CP-V-ARI (NBR 5733) La arena presentaba granulometría media, evaluada de acuerdo con las recomendaciones de la norma NBR 7215. De este modo, probetas cilíndricas (50 mm de diámetro y 100 mm de longitud) fueron confeccionadas efectuándose mezcla manual de los componentes hasta alcanzar la homogeneidad. La mezcla fue colocada en moldes plásticos de PVC previamente untados con aceite mineral. La compactación fue efectuada en tres capas con auxilio de un soquete simple; el des-moldeo fue efectuado 24 h después de la fabricación. El curado fue conducido por 7 días en una cámara húmeda, seguidos de más 14 días de curado al aire libre.

Fueron fabricadas probetas (con tres repeticiones) de mezclas de cemento : arena: cáscara de huevo : agua (en masa), en las siguientes proporciones

P1) 1 : 2.0 : 2.0 : 0.60; **P2)** 1 : 2.5 : 1.5: 0.60; **P3)** 1 : 1.5: 2.0:0.60

Decorridas 24 h de la fabricación de las probetas se efectuó su des-moldeo y se aplicó el ensayo no destructivo (END) por medio de la obtención de la velocidad del pulso de

ultrasonido (VPU) Fue utilizado el aparato Ultrasonic Tester BP 7 (Steinkamp). Los transductores piezo-eléctricos, de sección exponencial, presentaban frecuencia de resonancia de 45 kHz. El ensayo fue conducido durante 21 días. La VPU fue obtenida dividiéndose el largo de la probeta por el tiempo de propagación de la onda del ultrasonido. De acuerdo con BERALDO (1999), la VPU a lo largo del tiempo (edad de la probeta) obedece una ley presentada por:

$$v_t = v_{\max}(1 - \exp(A + Bt))$$

siendo: v_t = VPU teórica en la edad t (en días);

v_{\max} = VPU máxima obtenida experimentalmente.

El ensayo de compresión simple fue realizado después de decorridos 21 días de la fabricación de las probetas (NBR 7215) Las bases de la probeta fueron regularizadas con la aplicación de una pasta de azufre y caolín

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El conocimiento de la distribución en tamaño de las partículas de la cáscara de huevo es importante para mezclarla al cemento y a la arena. En la Figura 1 se verifica que la cáscara de huevo es más grosera que la arena, concentrándose alrededor del 60% en el tamiz de apertura 0.59 mm.

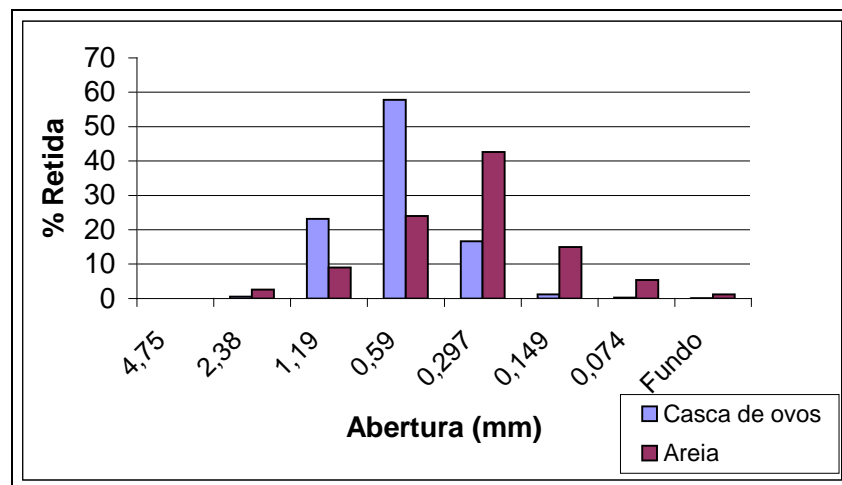


Figura 1 - Distribución del tamaño de la arena y de la cáscara de huevo.

La masa específica aparente de la cáscara de huevo fue de alrededor 1 g/cm^3 , un valor correspondiente al $2/3$ de la masa específica aparente de la arena. Este valor se debe a la utilización de cáscara de huevos producidas por gallinas con edad avanzada (superior a los 700 días de vida)

En la Figura 2 se presentan las temperaturas de las curvas de hidratación de las mezclas de cemento y cáscara de huevo. La cáscara de huevo mostró un efecto inhibitorio en el fraguado del cemento, pues la temperatura máxima alcanzó $43 \text{ }^\circ\text{C}$, valor inferior al de la pasta del cemento de alrededor del $70 \text{ }^\circ\text{C}$. De acuerdo con SANDERMANN et al. (1960), las mezclas con temperaturas de alrededor del $59 \text{ }^\circ\text{C}$ son consideradas inhibitoras al fraguado del cemento. Este efecto negativo al fraguado del cemento ocurrió, probablemente, debido a la presencia de residuos de la película protectora de la cáscara de huevo, que es un material orgánico (proteína)

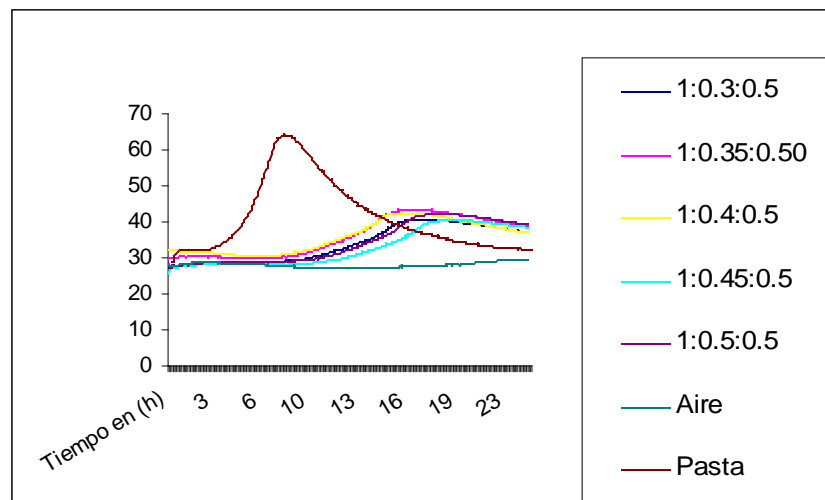


Figura 2 – Curvas de hidratación de la pasta de cemento y de las diferentes mezclas.

La Tabla 2 presenta el análisis de variancia (ANOVA) aplicada a los resultados del ensayo de compresión de las probetas de cemento, arena y cáscara de huevo. El efecto de los factores **A** - tipo del cemento, **B** - tratamientos aplicados a la cáscara de huevo y **C** - proporciones adoptadas en las mezclas fueron altamente significativos, además de las interacciones también significativas entre los factores A x B y A x C.

a) Tipo de cemento: compuestos del cemento de fraguado rápido (ARI) mostraron resistencia a la compresión superior al de los compuestos del cemento II, con valores promedios de 10.67 MPa y 6.64 MPa, respectivamente.

b) Tipo de tratamiento: el tratamiento **T4** (12.15 MPa) fue superior a los demás **T1** (8.07 MPa), **T2** (7.04 MPa) y **T3** (7.38 MPa), los cuales no presentaron diferencias estadísticas entre sí. Los resultados confirmaron la adecuación del empleo del cloruro de calcio en la resistencia en compresión del compuesto. Aparentemente el cloruro de calcio logró neutralizar, al menos parcialmente, el efecto negativo de la cáscara de huevo, detectado en las curvas de hidratación de la Figura 1.

c) Proporciones: la proporción **P3** (11.15 MPa) fue superior a las demás **P1** (6.82 MPa) y **P2** (7.99 MPa), estadísticamente no diferentes entre si. Los resultados confirmaron la adecuación de la proporción de 1:2.5:1.0:0.60 en la resistencia del compuesto, probablemente debido al efecto involucrado más eficiente del cemento en las partículas de arena y de cáscara de huevo.

Tabla 2 – Análisis de variancia (ANOVA).

Analysis of Variance for Compresión MPa – Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Cemento	293,183	1	293,183	98,30	0,0000
B:Tratamiento	302,703	3	100,901	33,83	0,0000
C:Proporción	240,924	2	120,462	40,39	0,0000
INTERACTIONS					
AB	226,236	3	75,4119	25,28	0,0000
AC	39,6632	2	19,8316	6,65	0,0026
BC	19,6054	6	3,26756	1,10	0,3770
RESIDUAL	161,058	54	2,98255		
TOTAL (CORRECTED)	1283,37	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

La Tabla 3 presenta la ANOVA para el cemento tipo II y las Tablas 4 y 5 presentan la comparación de los resultados para los factores: tratamientos y proporciones, respectivamente.

Tabla 3 – ANOVA para los compuestos de cemento tipo II.

Analysis of Variance for Compresión MPa – Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tratamiento	47,9128	3	15,9709	13,59	0,0000
B:Proporción	81,6735	2	40,8368	34,76	0,0000
INTERACTIONS					
AB	28,1515	6	4,69191	3,99	0,0065
RESIDUAL	28,1965	24	1,17486		
TOTAL (CORRECTED)	185,934	35			

Tabla 4 – Comparación entre los *tratamientos* para compuestos del cemento tipo II.

Multiple Range Tests for Compresión MPa by Tratamiento

Method: 95,0 percent Tukey HSD

Tratamiento	Count	LS Mean	LS Sigma	Homogeneous Groups
-------------	-------	---------	----------	--------------------

2	9	4,89556	0,361303	X
3	9	6,37333	0,361303	X
4	9	7,32556	0,361303	XX
1	9	7,95889	0,361303	X

Contrast	Difference	+/- Limits
----------	------------	------------

1 - 2	*3,06333	1,4099
1 - 3	*1,58556	1,4099
1 - 4	0,633333	1,4099
2 - 3	*-1,47778	1,4099
2 - 4	*-2,43	1,4099
3 - 4	-0,952222	1,4099

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 5 – Comparación entre las *proporciones* para compuestos del cemento tipo II.

Multiple Range Tests for Compresión MPa by Proporción

Method: 95,0 percent Tukey HSD

Proporción	Count	LS Mean	LS Sigma	Homogeneous Groups
------------	-------	---------	----------	--------------------

1	12	4,65917	0,312897	X
2	12	6,94583	0,312897	X
3	12	8,31	0,312897	X

Contrast	Difference	+/- Limits
----------	------------	------------

1 - 2	*-2,28667	1,10541
1 - 3	*-3,65083	1,10541
2 - 3	*-1,36417	1,10541

* denotes a statistically significant difference.

La Tabla 6 presenta la ANOVA para el cemento tipo V - ARI y las Tablas 7 y 8 presentan la comparación de los resultados para los factores: tratamientos y proporciones, respectivamente.

Tabla 6 - ANOVA para los compuestos del cemento tipo V.

Analysis of Variance for Compresión MPa - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tratamiento	481,026	3	160,342	35,34	0,0000
B:Proporción	198,913	2	99,4566	21,92	0,0000
INTERACTIONS					
AB	15,4261	6	2,57102	0,57	0,7526
RESIDUAL	108,889	24	4,53704		
TOTAL (CORRECTED)	804,254	35			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tabla 7 – Comparación entre los *tratamientos* para compuestos del cemento tipo V.

Multiple Range Tests for Compresión MPa by Tratamiento

Method: 95,0 percent Tukey HSD

Tratamiento	Count	LS Mean	LS Sigma	Homogeneous Groups
1	9	8,17333	0,710011	X
3	9	8,37667	0,710011	X
2	9	9,17444	0,710011	X
4	9	16,9722	0,710011	X

Contrast	Difference	+/- Limits
1 - 2	-1,00111	2,77065
1 - 3	-0,203333	2,77065
1 - 4	*-8,79889	2,77065
2 - 3	0,797778	2,77065
2 - 4	*-7,79778	2,77065
3 - 4	*-8,59556	2,77065

* denotes a statistically significant difference.

Tabla 8– Comparación entre las *proporciones* para compuestos del cemento tipo V.

Multiple Range Tests for Compresión MPa by Proporción

Method: 95,0 percent Tukey HSD

Proporción	Count	LS Mean	LS Sigma	Homogeneous Groups
1	12	8,99	0,614887	X
2	12	9,03417	0,614887	X
3	12	13,9983	0,614887	X

Contrast	Difference	+/- Limits
1 - 2	-0,0441667	2,17229
1 - 3	*-5,00833	2,17229
2 - 3	*-4,96417	2,17229

* denotes a statistically significant difference.

La velocidad de propagación del ultrasonido de los compuestos y después tendió a estabilizarse a los 15 días. La elevación de la resistencia a la compresión del cemento ARI en la Figura 3) La elevación de la resistencia actuó positivamente en la magnitud de la VPU con la resistencia de los compuestos fabricados.

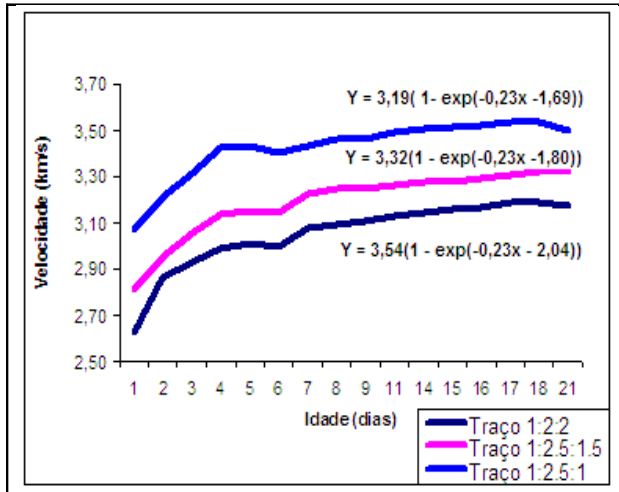


Figura 3 – VPU para compuestos de cemento ARI y tratamiento con cloruro de calcio.

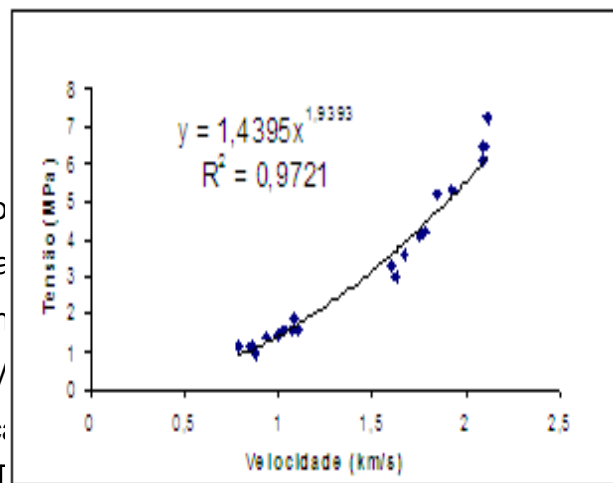


Figura 4 – Correlación entre la VPU y la resistencia a la compresión (CPII)

CONCLUSIONES

La cáscara de huevo en su forma natural se mostró inhibitoria al fraguado del cemento. La resistencia a la compresión de los compuestos del mortero de cemento y arena, modificados por las adiciones de cáscara de huevo, fue fuertemente dependiente de los factores empleados en la fabricación de los compuestos (tipo del cemento, tipo del tratamiento y de las proporciones entre los constituyentes) Los resultados más adecuados fueron obtenidos con el empleo del cemento de fraguado rápido (CPV ARI), con la aplicación del acelerador del fraguado cloruro de calcio y con la proporción de 2.5 partes de arena y 1.0 parte de cáscara de huevo (en masa) La velocidad del pulso de ultrasonido (VPU) fue fuertemente acelerada en las primeras edades de los compuestos y después tendió a estabilizarse a los 15 días. La VPU mostró una buena correlación con la resistencia de los compuestos en compresión.

LITERATURA CITADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, Rio de Janeiro.

NBR 5733. 1991. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, especificação. 5p.

NBR 7215. 1996. Cimento Portland: Determinação da resistência a compressão, método de ensaio. 8p.

NBR 11578. 1991. Cimento Portland Composto, especificação. 8p.

BERALDO, A. L. 1999. Ultrasonic speed wave: cure type influence on wood-cement composite compression strength. NDTISS'1999 –International Symposium on Non-Destructive Testing. ABENDE, Torres – RS. v.1, p.86-90.

BROD, F. P. R. 1999. Construção e teste de um secador vibro-fluidizado. Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas.

SANDERMANN, W.; PREUSSER, H.J.; SCHIENS, W. 1960. The effect of wood extractives on the setting of cement-bonded wood materials. Holzforschung, v.14 (3): 70-77.

VASCONCELOS, A. C. 2000. Estrutura da natureza: um estudo da interface entre a biologia e engenharia. Studio Nobel, São Paulo. p.111-114.

ZUCCO, L. L. 1999. Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz. Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas.

WEATERWAX, R.C., TARKOW, H. 1964. Effect of wood on setting of Portland cement. Forest Products Journal, v.14 (12): 567-568