

Evaluación de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) en mezclas de cemento Pórtland, ceniza y cáscara de arroz

Antonio Ludovico Beraldo y Lóris Ladir Zucco
Universidad Estatal de Campinas
Campinas – SP – CEP 13083-875 – Brasil
Teléfono 00551935211030
beraldo@agr.unicamp.br llzucco@yahoo.com.br

Resumen

La cultura del arroz ocupa grandes áreas principalmente en la región sur del Brasil. Como subproducto de la producción industrial del arroz son generadas alrededor de las 2.6 millones de toneladas anuales de residuos en forma de cáscara, correspondiendo a 20% de la masa del grano original. Más recientemente cenizas también empezaron a ser generadas durante el secado de los granos de arroz. El aprovechamiento racional de tales residuos aún es un problema no resuelto y entonces una parte substancial de los residuos es desperdiciada, o contamina el medio ambiente. Sin embargo, agregados de origen vegetal pueden ser empleados en la fabricación de hormigones o de morteros livianos, en la búsqueda de materiales de comportamiento diferenciado en los términos de aislamiento térmico y acústico y de resistencia a las cargas dinámicas. En este trabajo investigativo se evaluó de forma indirecta el desarrollo de las modificaciones estructurales en compuestos de cemento, ceniza y cáscara de arroz por medio de la medición de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU). Los resultados obtenidos indicaron las influencias del tamaño de las partículas de la cáscara de arroz, del contenido en cenizas y de la interacción entre esos dos parámetros en la magnitud de la VPU. Las curvas de las VPU obedecieron a una ley exponencial y los valores máximos fueron obtenidos alrededor de los 7 días de edad.

Palabras clave: compuestos, cascarilla de arroz, cenizas, END, ultrasonido.

1. Introducción

Como resultado del procesamiento del arroz son generadas grandes cantidades de residuos en la forma de cáscara. Actualmente una de las alternativas para la utilización de esos residuos ha sido su quema simple, al final de la cual resulta otro tipo de residuo – las cenizas de las cáscaras. Propuestas alternativas que propongan el uso de los materiales ceniza y cáscara de arroz pueden conllevar a una forma de minimizar los problemas causados por sus deposiciones en el medio ambiente.

Por su naturaleza los residuos del procesamiento del arroz tienen una descomposición muy lenta, y, por lo tanto, la concentración anual de cáscara de arroz es un grave problema aún no resuelto, lo mismo ocurre actualmente para las cenizas resultantes de la quema de la cáscara de arroz. Las cenizas así obtenidas, a su vez, provocan la polución del suelo, pues presentan una concentración considerable de carbono residual (considerado como un contaminante del suelo), y aún presentan una concentración

elevada de óxidos alcalinos, cuya característica principal es la de, en contacto con el agua, actúan como bases, alcalinizando el medio acuoso.

De esta manera, la presente investigación buscó desarrollar estudios que posibiliten el aprovechamiento de la cáscara de arroz quemada a baja temperatura, denominada en este trabajo investigativo de ceniza de cáscara de arroz (CCA), en la producción de pastas y compuestos a base de cemento Pórtland.

2. Estudio Bibliográfico

La cantidad de paja que permanece en los campos agrícolas es muy elevada, ubicándose alrededor del 25% superior a la cantidad de arroz con cáscara producido (1). La cáscara equivale a 20%-22% de la masa de los granos (2), y, de ese modo, en Brasil, para el año de 2006, hubo un potencial de materia-prima de alrededor de los 16.5 millones de toneladas de paja y alrededor de los 2.6 millones de toneladas de cáscara de arroz.

Las principales ventajas son el gran contenido en cenizas, de alrededor de los 18% al 22% de la masa de la cáscara de arroz o, de alrededor del 4% de la masa de los granos (3), el elevado contenido de sílice en las cenizas (de hasta el 98%), la estructura física de la sílice (estructura alveolar, de gran superficie específica) y la disponibilidad de materia-prima cáscara de arroz a lo largo del año en casi todas las provincias brasileñas, etc.

Actualmente, la mayor parte de las investigaciones en la búsqueda del aprovechamiento de la cáscara de arroz es concentrada en la aplicación de sus cenizas. Varios factores contribuyen para que los residuos de la producción de arroz sean actualmente muy valorizados, sobre todo en el sector de la construcción civil.

La adición o la sustitución parcial del cemento por la CCA pueden provocar aumentos considerables en la resistencia de los materiales a base de cemento Pórtland. Un hormigón con adición de 5% de CCA tuvo su resistencia mecánica aumentada de unos 25% en relación al hormigón clásico a los 28 días de edad (4).

En los compuestos el cemento es la materia-prima de costo más elevado y su sustitución, aunque sea parcial, lograría disminuir el costo de la fabricación de los compuestos de una forma acentuada, viabilizando su utilización en la construcción (5).

Las propiedades de los distintos materiales son comúnmente obtenidas por medio de ensayos mecánicos (compresión axial, de tracción por compresión diametral – *Brazilian test*, flexión estática, etc.). Mientras tanto, algunas propiedades pueden ser estimadas por medio de ensayos no destructivos (END). Para hormigón, mortero, yeso, madera y sus compuestos, el empleo del END puede ser útil para la determinación del módulo de elasticidad dinámico (módulo dinámico de Young), para verificar la anisotropía total del material (comportamiento de acuerdo con el eje considerado), para la detección de patologías y defectos y, más recientemente, en la investigación del desarrollo de la cinética de la hidratación de productos de cemento Pórtland (6).

Para el caso de los compuestos de cemento Pórtland, la evolución de sus heterogeneidades puede ser monitoreada por medio de la medida de la VPU, desde las etapas iniciales (fraguado), hasta las edades más avanzadas (endurecimiento), para un mismo material. El tiempo necesario para la propagación de la onda (y, por lo tanto de su respectiva VPU) puede caracterizar la naturaleza de un material, funcionando como un parámetro para la evaluación de sus propiedades físicas.

Por medio del empleo del END es posible desarrollar una metodología para evaluar la calidad de hormigones en el estado fresco o en las primeras edades (7). Los autores

evaluaron las características de propagación de la onda de ultrasonido con las propiedades del hormigón, en especial investigando el efecto de la relación agua/cemento. La propagación de la onda se mostró fuertemente afectada por las propiedades y por las características elásticas de los materiales constituyentes del hormigón.

Los compuestos a base del cemento presentan un comportamiento muy similar en términos de la morfología de las curvas de VPU a lo largo de la edad de la probeta, obedeciendo, de acuerdo con (6), a la ley:

$$v_e = v_{\max} \{1 - \exp(A + Be)\} \dots(1)$$

v_e = VPU en la edad e ;

v_{\max} = VPU máxima obtenida experimentalmente;

e = edad de la probeta (en horas o en días);

A, B = coeficientes obtenidos por regresión.

3. Desarrollo Experimental

3.1 Cáscara de arroz

La cáscara de arroz fue procesada (molida, lavada y mezclada) de acuerdo con los procedimientos utilizados en una investigación preliminar (8). El material definido como **10 mm**, se refiere a distribución en tamaño (“granulometría”) de las partículas equivalente al material originario de la empresa; el material definido como **5 mm** se refiere a la distribución en tamaño de las partículas equivalente al material obtenido en molino-de-martillos, en tamices de apertura nominal 5 mm de diámetro y, el material definido como **10+5 mm**, se refiere a la mezcla de los materiales 10 mm (65% de la masa de cáscara de arroz en la mezcla) y 5 mm (35% de la masa de cáscara de arroz en la mezcla).

3.2 Cemento

Se empleó el cemento Pórtland CP-V-ARI RS (9) (cemento Pórtland de alta resistencia inicial - ARI, con resistencia a los sulfatos – RS, NBR 5733), cuyas características físicas, químicas y mecánicas favorecen la disminución en el tiempo del desmolde de las probetas, aún de presentar una menor sensibilidad a la acción de los extractivos contenidos en la cáscara de arroz (5,8).

3.3 Ceniza de cáscara de arroz

La ceniza de cáscara de arroz es resultante de un proceso industrial y en general no presenta uniformidad en tamaño de sus partículas. La ceniza fue desintegrada en molino-de-martillos y, en seguida, fue tamizada, adoptándose las partículas que pasaron por el tamiz ABNT # 100 (0.149 mm).

3.4 Procedimiento experimental

3.4.1 Preparación de las mezclas

- a) **Pastas y mezclas con cáscara de arroz fina**

Inicialmente se colocaba el acelerador de fraguado (cloruro de calcio) y el agua de-ionizada en la mezcladora y después se adicionaba la ceniza de cáscara de arroz (CCA), mezclando hasta observarse la homogeneidad de la mezcla. En seguida se adicionaba el cemento y la cáscara de arroz (duración total del proceso de 3 minutos). Finalizada la mezcla de los constituyentes se procesaba el relleno del molde de la UTS (*Unidad Termo-Sónica*, Figura 1).

En una etapa preliminar se evaluó el comportamiento de pastas puras de cemento (PP) y después que han sido modificadas por distintas adiciones de cenizas de cáscara de arroz (0%, 5%, 20% e 35%, en masa). La cáscara de arroz fue adicionada a las pastas anteriores en los tamaños correspondientes a las partículas pasantes en los tamices de aperturas #200 (0.074 mm), #100 (0.150 mm), #50 (0.300 mm), #30 (0.600 mm) e #16 (1.200 mm), conforme presentado en la Tabla 1.

Tabla 1. Pastas evaluadas (razón en masa - cemento:ceniza:cáscara de arroz).

Tratamiento	Razón	Tratamiento	Razón	Tratamiento	Razón
PP-0%	1 : 0.0 : 0.0	#200-0%	1 : 0.0 : 0.0	#100-0%	1 : 0.0 : 0.0
PP-5%	1 : 0.05 : 0.0	#200-5%	1 : 0.05 : 0.0	#100-5%	1 : 0.05 : 0.0
PP-20%	1 : 0.20 : 0.0	#200-20%	1 : 0.20 : 0.0	#100-20%	1 : 0.20 : 0.0
PP-35%	1 : 0.35 : 0.0	#200-35%	1 : 0.35 : 0.0	#100-35%	1 : 0.35 : 0.0
#50-0%	1 : 0.0 : 0.075	#30-0%	1 : 0.0 : 0.075	#16-0%	1 : 0.0 : 0.075
#50-5%	1 : 0.05 : 0.075	#30-5%	1 : 0.05 : 0.075	#16-5%	1 : 0.05 : 0.075
#50-20%	1 : 0.20 : 0.075	#30-20%	1 : 0.20 : 0.075	#16-20%	1 : 0.20 : 0.075
#50-35%	1 : 0.35 : 0.075	#30-35%	1 : 0.35 : 0.075	#16-35%	1 : 0.35 : 0.075

b) **Compuestos con 7.5% de cáscara de arroz gruesa**

En la segunda etapa de la investigación, fue adicionada a la pasta de cemento las cáscaras de arroz de tamaños más gruesos, denominados 10 mm (tamaño original), 5 mm e 10+5 mm (65% de 10 mm + 35% de 5 mm). El porcentaje de adición de 5% de CCA fue descartado pues una evaluación de los resultados obtenidos en el ensayo precedente detectó la ausencia de diferencia estadística en relación al testigo (0% de adición), motivo por lo cual fueron mantenidas solamente las adiciones de 20% e 35% (Tabla 2).

Tabla 2. Compuestos (proporción en masa - cemento:ceniza:cáscara). 7.5% de cáscara de arroz.

Tratamiento	Razón	Tratamiento	Razón	Tratamiento	Razón
10 mm - 0%	1 : 0.0 : 0.075	5 mm - 0%	1 : 0.0 : 0.075	5/10 mm - 0%	1 : 0.0 : 0.075
10 mm - 20%	1 : 0.20 : 0.075	5 mm - 5%	1 : 0.20 : 0.075	5/10 mm - 5%	1 : 0.20 : 0.075
10 mm - 35%	1 : 0.35 : 0.075	5 mm - 20%	1 : 0.35 : 0.075	5/10 mm - 20%	1 : 0.35 : 0.075

c) **Compuestos producido con contenidos elevados de cáscara de arroz**

La Tabla 3 presenta las proporciones empleadas en la fabricación de los compuestos, aumentándose la masa de cáscara de arroz para valores del orden de 35% al 42%, de acuerdo con (8).

Tabla 3. Compuesto (proporción en masa - cemento:ceniza:cáscara de arroz).

Tratamiento	Razón	Tratamiento	Razón	Tratamiento	Razón
10 mm - 0%	1 : 0.0 : 0.35	5 mm - 0%	1 : 0.0 : 0.42	5/10 mm - 0%	1 : 0.0 : 0.39
10 mm - 20%	1 : 0.20 : 0.35	5 mm - 20%	1 : 0.20 : 0.42	5/10 mm - 20%	1 : 0.20 : 0.39
10 mm - 35%	1 : 0.35 : 0.35	5 mm - 35%	1 : 0.35 : 0.42	5/10 mm - 35%	1 : 0.35 : 0.39

3.4.2 Ensayo No Destructivo (END) aplicado a las probetas

Buscándose evaluar los cambios en la VPU a lo largo del tiempo, en esta investigación fue diseñado un equipo específico denominado de *unidad termo-sónica* (UTS). Las probetas cilíndricas (50 mm de diámetro y longitud promedio de 900 mm) fueron moldeadas por medio de una tabla vibrante. Para la obtención del tiempo necesario para la propagación de la onda ultra-sónica se empleó el equipo Ultrasonic Tester BP-7, marca STEINKAMP, disponiendo de captosres electro-acústicos de base plana (30 mm de diámetro), utilizados conjuntamente con la UTS para evaluar la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) a través de la mezcla en las primeras 24 h. Después del desmolde, las probetas fueron curadas en una cámara húmeda durante 28 días y diariamente se media el tiempo de propagación de la onda de ultrasonido.



Figura 1. (A) - Unidad termo-sónica (UTS); (B) Detalle de la probeta cilíndrica en el interior del equipo; (C) Detalle del sistema de acoplamiento del ultrasonido.

4. Resultados y Discusión

4.1 Pastas – Efecto de la granulometría de la cáscara de arroz fina en la VPU

La evolución de la VPU a través de las pastas puras (Figura 2) y también de las pastas modificadas (Figuras 3 a 7), a lo largo del tiempo (edad de las probetas) en horas (à la izquierda) y en días (à la derecha), fueron ajustadas por medio de la ecuación (1), cuyos coeficientes son presentados en las Tablas 4 y 5, respectivamente.

Se puede observar la ocurrencia de las primeras señales alrededor de las 4 horas después de efectuarse las mezclas y una tendencia de retardo de la aparición de la señal cuanto más finas fueron las partículas de la cáscara de arroz. En las curvas en las cuales la edad está presentada en horas ocurre una tendencia a la estabilización de la magnitud de la VPU (alrededor de los 2.5 km/s) entre las 8 y las 12 horas. La magnitud de la VPU se correlaciona directamente con el contenido en cenizas de cáscara de arroz presente en la mezcla. Un contenido más elevado en cenizas proporciona un relleno más efectivo de la

matriz cementante, permitiendo un desplazamiento más adecuado de la onda ultrasónica. En los tramos de la derecha de los gráficos no se observan cambios importantes en la magnitud de la VPU a partir de una semana de edad. Aparentemente los cambios estructurales en los compuestos a partir de estas edades, mientras continúen ocurriendo, no son tan significativos al punto de haber sido detectados por el equipo.

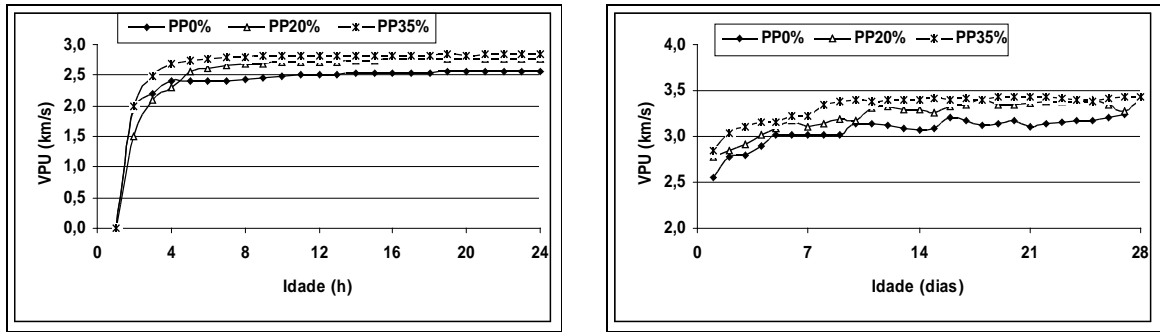


Figura 2. Pasta pura (sin adición de cáscara de arroz).

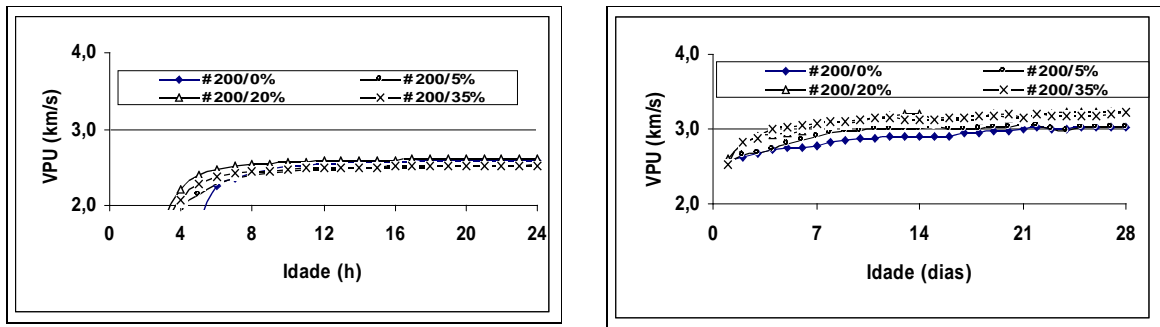


Figura 3. Pasta con adición de cenizas y cáscara de arroz #200.

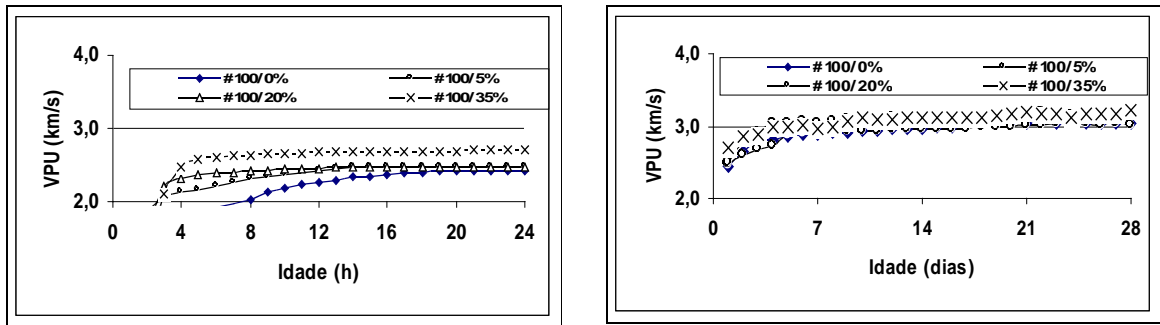


Figura 4. Pasta con adición de cenizas y cáscara de arroz #100.

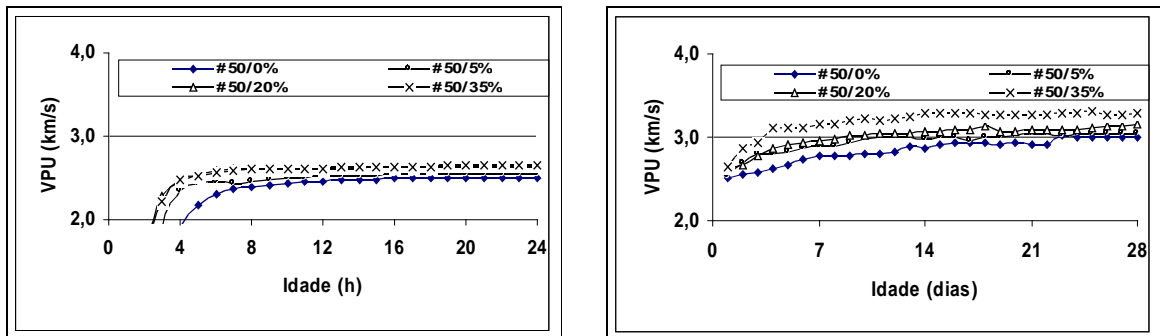


Figura 5. Pasta con adición de cenizas y cáscara de arroz #50.

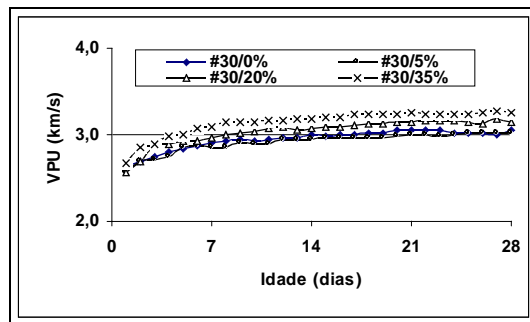
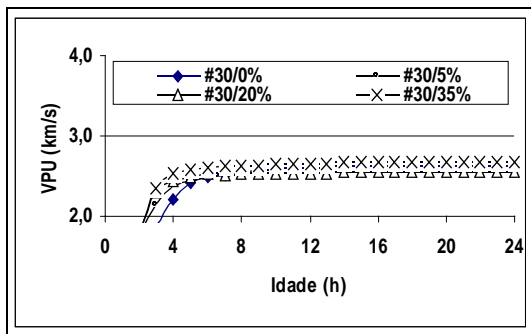


Figura 6. Pasta con adición de cenizas y cáscara de arroz #30.

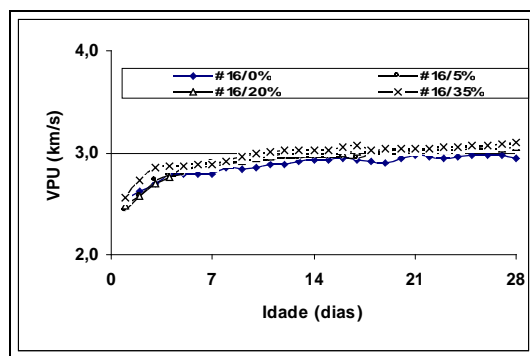
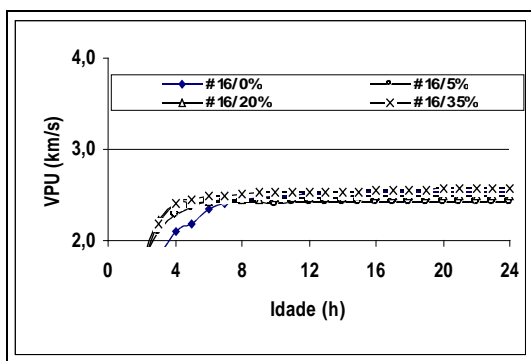


Figura 7. Pasta con adición de cenizas y cáscara de arroz #16.

Tabla 4. Coeficientes de la ecuación (1). Edad de las probetas en horas.

Tratamiento	V_{max}	A	B	R^2	Tratamiento	V_{max}	A	B	R^2
PP-0%	2.552	-1.463	-0.257	0.97	#50-0%	2.510	-0.642	-0.270	0.97
PP-5%	2.568	-2.269	-0.161	0.66	#50-5%	2.547	-1.023	-0.297	0.96
PP-20%	2.773	-1.194	-0.261	0.97	#50-20%	2.624	-2.064	-0.284	0.87
PP-35%	2.838	-2.210	-0.247	0.92	#50-35%	2.648	-1.443	-0.261	0.93
#200-0%	2.586	-0.348	-0.285	0.97	#30-0%	2.629	-0.471	-0.357	0.98
#200-5%	2.530	-0.839	-0.220	0.92	#30-5%	2.569	-1.564	-0.238	0.91
#200-20%	2.611	-0.889	-0.293	0.98	#30-20%	2.565	-1.648	-0.277	0.95
#200-35%	2.527	-0.625	-0.301	0.96	#30-35%	2.674	-1.512	-0.291	0.95
#100-0%	2.434	+0.212	-0.269	0.91	#16-0%	2.537	-0.580	-0.321	0.99
#100-5%	2.479	-0.435	-0.315	0.94	#16-5%	2.435	-2.201	-0.242	0.82
#100-20%	2.484	-1.538	-0.246	0.96	#16-20%	2.486	-1.515	-0.317	0.95
#100-35%	2.711	-1.418	-0.221	0.88	#16-35%	2.564	-1.546	-0.251	0.93

Tabla 5. Coeficientes de la ecuación (1). Edad de las probetas en días.

Tratamiento	V _{max}	A	B	R ²	Tratamiento	V _{max}	A	B	R ²
PP-0%	3.233	-1.939	-0.096	0.85	#50-0%	3.002	-1.599	-0.115	0.84
PP-5%	3.155	-1.958	-0.127	0.81	#50-5%	3.040	-1.675	-0.189	0.91
PP-20%	3.403	-1.460	-0.155	0.93	#50-20%	3.154	-2.062	-0.093	0.83
PP-35%	3.425	-1.701	-0.225	0.91	#50-35%	3.289	-2.042	-0.168	0.83
#200-0%	3.015	-1.419	-0.150	0.83	#30-0%	3.046	-2.216	-0.107	0.90
#200-5%	3.031	-1.452	-0.251	0.85	#30-5%	3.018	-1.915	-0.133	0.94
#200-20%	3.232	-1.793	-0.138	0.74	#30-20%	3.147	-1.642	-0.146	0.95
#200-35%	3.228	-2.196	-0.096	0.86	#30-35%	3.251	-1.962	-0.124	0.93
#100-0%	3.045	-1.199	-0.244	0.74	#16-0%	2.949	-1.165	-0.184	0.86
#100-5%	3.022	-1.922	-0.099	0.86	#16-5%	3.080	-1.622	-0.124	0.74
#100-20%	3.182	-2.190	-0.117	0.90	#16-20%	3.059	-1.850	-0.132	0.96
#100-35%	3.210	-2.157	-0.089	0.81	#16-35%	3.096	-2.026	-0.115	0.79

4.2 Compuestos con bajo contenido (7.5%) de cáscara de arroz (tamaños #5, #10 y combinación de #5 y #10)

Las Figuras 8 a 10 presentan la evolución de la VPU a través de las pastas con bajo contenido de adición de cáscara de arroz gruesa, a lo largo del tiempo (edad de las probetas) en horas (à la izquierda) y en días (à la derecha). En la Tabla 6 son presentados los coeficientes de la ecuación (1). Debido al carácter menos inhibitorio de las partículas gruesas de cáscara de arroz las señales del ultrasonido fueron obtenidas en edades más tempranas comparadas a los casos precedentes. La VPU también se estabilizó entre 8 y 12 horas. En los tramos de la izquierda se puede verificar que el efecto de las diferentes adiciones de cenizas no logró modificar acentuadamente la magnitud de la VPU (alrededor de 2.5 km/s). Todavía en los tramos de la derecha se puede verificar que el efecto de la adición de cenizas fue significativo, sobretodo para los compuestos de partículas de cáscara de arroz más gruesas (#10).

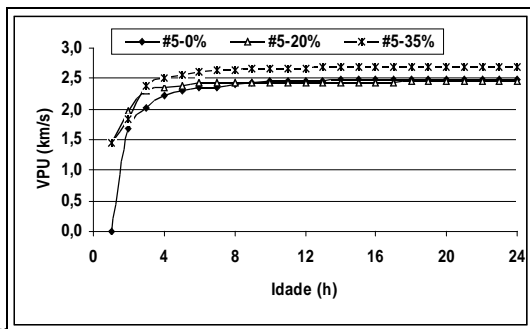


Figura 8. Cáscara de arroz #5 y cenizas.

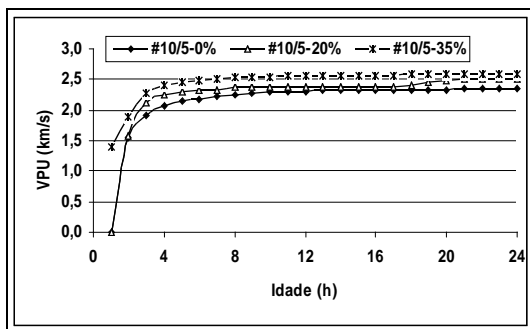
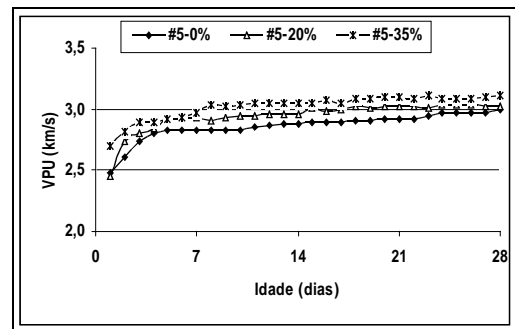
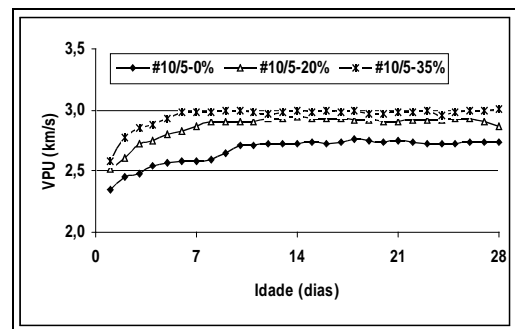


Figura 9. Cáscara de arroz #10-5 y cenizas.



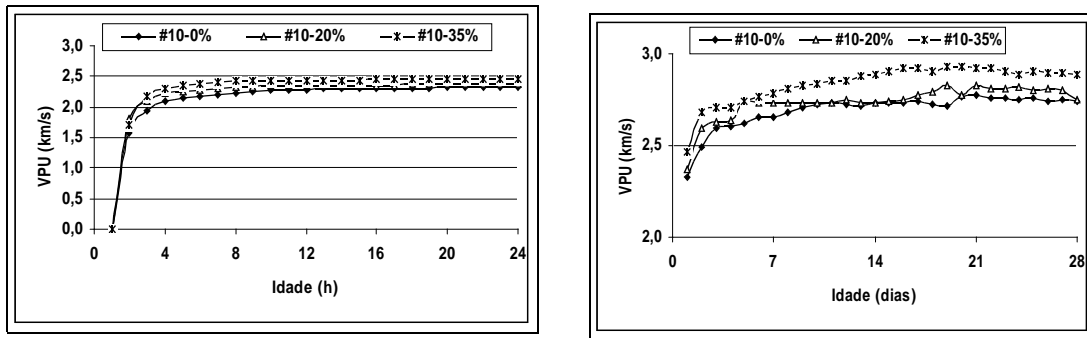


Figura 10. Cáscara de arroz #10 y cenizas.

Tabla 6. Coeficientes de la ecuación (1). Izquierda (en horas) y derecha (en días).

Tratamiento	V_{max}	A	B	R^2	Tratamiento	V_{max}	A	B	R^2
#5-0%	2.482	-0.955	-0.305	0.99	#5-0%	2.995	-2.039	-0.095	0.88
#5-20%	2.451	-1.829	-0.262	0.88	#5-20%	3.025	-1.973	-0.174	0.88
#5-35%	2.694	-1.334	-0.297	0.95	#5-35%	3.107	-2.172	-0.141	0.85
#5#10-0%	2.343	-0.927	-0.255	0.92	#5#10-0%	2.734	-2.144	-0.206	0.77
#5#10-20%	2.521	-1.223	-0.153	0.75	#5#10-20%	2.870	-2.749	-0.135	0.72
#5#10-35%	2.582	-1.442	-0.247	0.96	#5#10-35%	3.010	-3.464	-0.072	0.40
#10-0%	2.328	-1.347	-0.210	0.97	#10-0%	2.745	-2.345	-0.191	0.71
#10-20%	2.371	-1.676	-0.263	0.97	#10-20%	2.754	-2.049	-0.153	0.80
#10-35%	2.463	-1.466	-0.263	0.95	#10-35%	2.891	-2.382	-0.132	0.55

4.3 Compuestos con elevado contenido (alrededor del 40%) de cáscara de arroz gruesa

Las Figuras 11 a 13 presentan la evolución de la VPU a través de las pastas con elevado contenido de adición de partículas gruesas de cáscara de arroz, a lo largo del tiempo (edad de las probetas) en horas (à la izquierda) y en días (à la derecha). Los coeficientes de la ecuación (1) son presentados en la Tabla 7. Para adiciones importantes de partículas gruesas de cáscara de arroz ocurre un cambio significativo en la estructura de los compuestos, pues su estructura se acerca a la de aquella de un “hormigón cavernoso o *graute*”, o sea, la matriz cementante no es suficiente para rellenar los importantes espacios existentes entre los granulados. De esta manera la señal del ultrasonido mientras pueda ser detectada en tempranas edades, la magnitud de la VPU se reduce acentuadamente, fruto de la heterogeneidad del medio, resultando en una importante disipación de la energía de propagación de la onda de ultrasonido. La VPU se estabilizó alrededor de las 12 horas.

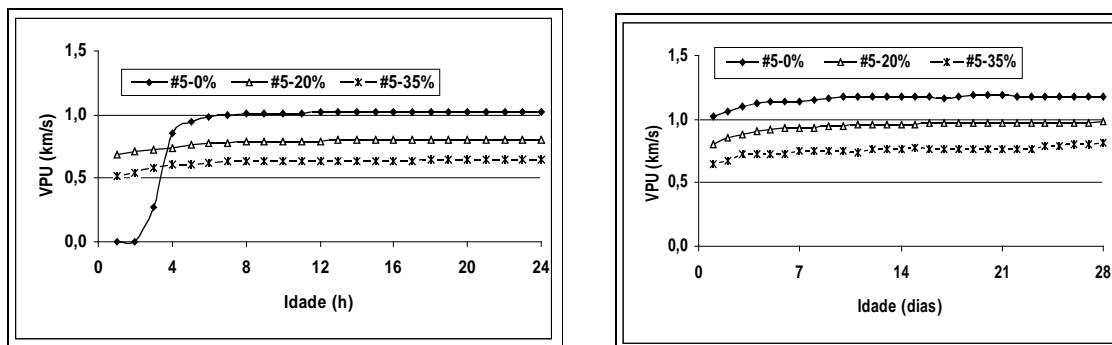


Figura 11. Cáscara de arroz #5 y cenizas.

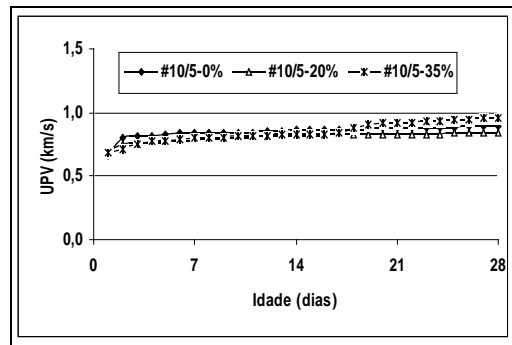
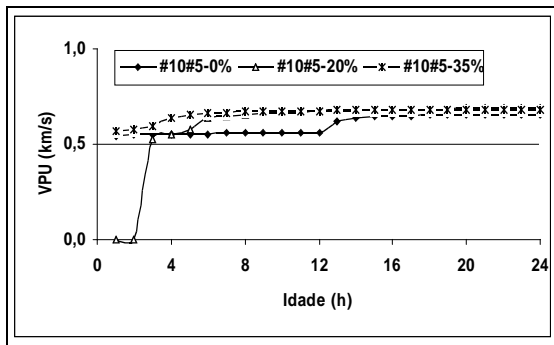


Figura 12. Cáscara de arroz #10-5 y cenizas.

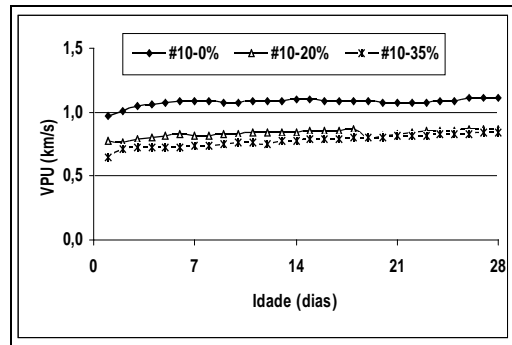
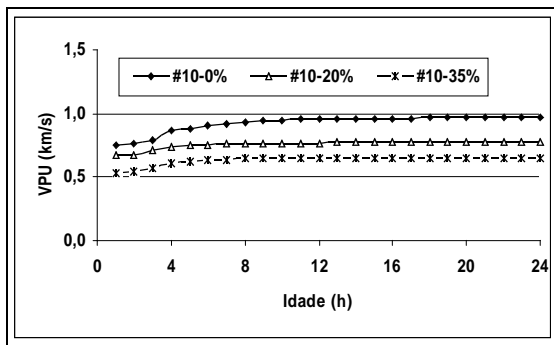


Figura 13. Cáscara de arroz #10 y cenizas.

Tabla 7. Coeficientes de la ecuación (1). Izquierda (en horas) y derecha (en días).

Tratamiento	V_{max}	A	B	R^2	Tratamiento	V_{max}	A	B	R^2
#5-0%	1.021	-0.756	-0.351	0.92	#5-0%	1.173	-2.084	-0.228	0.76
#5-20%	0.799	-1.614	-0.285	0.99	#5-20%	0.977	-1.932	-0.154	0.95
#5-35%	0.641	-1.649	-0.276	0.98	#5-35%	0.819	-1.789	-0.056	0.81
#5#10-0%	0.659	-0.725	-0.194	0.85	#5#10-0%	0.890	-1.690	-0.136	0.91
#5#10-20%	0.689	-0.848	-0.237	0.87	#5#10-20%	0.844	-1.915	0.103	0.98
#5#10-35%	0.683	-1.606	-0.264	0.98	#5#10-35%	0.954	-0.645	-0.139	0.76
#10-0%	0.966	-1.074	-0.278	0.98	#10-0%	1.116	-2.666	-0.065	0.37
#10-20%	0.780	-1.693	-0.231	0.92	#10-20%	0.866	-1.972	-0.138	0.93
#10-35%	0.652	-1.757	-0.264	0.96	#10-35%	0.840	-1.201	-0.119	0.81

5. Conclusiones

El desarrollo de los cambios estructurales en compuestos de cemento Pórtland y subproductos del beneficio de arroz (cáscara y cenizas resultantes de su combustión) puede ser evaluado por medio de la medida de la velocidad del pulso ultra-sónico (VPU). El método empleado es suficientemente sensible para detectar la interferencia del tamaño de las partículas de cáscara de arroz y del contenido en cenizas en la magnitud de la VPU así como permite evaluar su estabilización a lo largo del tiempo (edad) de la probeta.

6. Referencias

- (1) Baker, P. New burning law will cost californians more. Rice Journal, Raleigh, U.S.A., v. 95, n. 4. p. 16-18, may. 1992.
- (2) Freire, W. J. Materiais Alternativos de Construção. In: Beraldo, A. L.; Naas, I. A.; Freire, W. J. Construções rurais: materiais. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991. p. 105-161.
- (3) Freire, W. J. Cimento produzido a partir da cinza da casca de arroz. In: Toledo Filho, R. D.; Nascimento, J. W. B.; Ghavami, K. Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande, UFPb / SBEA, 1997. p. 83-111.
- (4) Tashima, M. M.; Rufino Da Silva, C. A.; Akasaki, J. L.; Barbosa, M. B.; Da Silva, E. J. Avaliação do teor de cinza de casca de arroz no concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 46^o – COBRACON, Florianópolis. 2004. SC. Anais... p. 378-388. CD-ROM.
- (5) Beraldo, A. L.; Zucco, L. L. Casca de arroz e cimento Portland: possibilidade de utilização em construções. In: VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 1998. Florianópolis, SC. Anais ... v.1, p.29-34.
- (6) Beraldo, A.L. Ultrasonic speed wave: cure type influence on compression strength of wood-cement composite.1999. Proc. of International Symposium on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems. Torres, RS, Brasil, p. 86-90.
- (7) Phillipidis, T.P.; Aggelis, D.G. An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. Cement and Concrete Research. 33 (2003) 525–538
- (8) Zucco, L. L. Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz. 118 p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- (9) Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial. Especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.