

MORTERO DE CEMENTO PÓRTLAND Y ARENA, MODIFICADO POR LA ADICIÓN DE PARTÍCULAS DE BAMBÚ.

PORTLAND CEMENT MORTAR MODIFIED BY BAMBOO PARTICLES.

ANTONIO BERALDO¹

RESUMEN

Como una consecuencia del desarrollo industrial, se generan cantidades significativas de residuos de las más variadas naturalezas. Además, se marcha para un rápido agotamiento de los recursos naturales, pues la mayoría de ellos no es obtenida de fuente renovable. Por su vez, el bambú presentase como una excelente alternativa para disminuir la explotación de las florestas nativas; todavía, diversos sectores tecnológicos brasileños aún no despertaron para las potencialidades de esa materia prima. Además también se destaca la posibilidad de utilización de partículas de bambú en el remplazo parcial o total de los agregados de origen mineral (arena y ripio). El objetivo de ese trabajo fue la evaluación de las características físicas y mecánicas de compuestos a base de mortero de cemento Pórtland y arena, modificado por la adición de partículas de bambú. El compuesto fue sometido a los ensayos de absorción del agua, de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) y de las resistencias a la compresión simple y diametral. Los resultados obtenidos indicaron el efecto del tratamiento aplicado a las partículas de bambú, del tipo de cemento empleado y del contenido de las partículas de bambú en las propiedades del compuesto.

Palabras-Chave: bambú, compuesto, VPU, END.

¹FEAGRI/UNICAMP, Caixa Postal 6011, Cidade Universitária Zeferino Vaz, s/n. CEP 13083-875, Campinas – SP. Fone 19-35212900. e-mail: beraldo@agr.unicamp.br

ABSTRACT

Significant amounts of residues are generated as a consequence of the industrial development. Besides, it is running for a shortage of natural resources, because most of them are not renewable. On the other hand, bamboo is an excellent alternative to minimize the natural forest exploitation. However, in Brazil several technological sectors are not yet sensitive to the potentialities of this raw material. Among these potentialities it can be suggested the replacement of mineral aggregates by bamboo particles. The aim of this work was to evaluate the physical and mechanical characteristics of a Portland cement-sand mortar composite with bamboo particles. The composite was tested after water immersion, and the ultrasonic pulse velocity across the samples was measured along 28 days. The compression and splitting test were also applied to the specimens. Results showed the effect of the parameters treatment applied to the bamboo particles, the cement type and the particle contents on composite properties.

Keywords: bamboo, composite, UPV, NDE.

INTRODUCCIÓN

Bambú es una gramínea de gran desarrollo y cuyo tejido resistente es un compuesto natural lignocelulósico de baja densidad, pero que presenta una elevada resistencia mecánica además de una gran trabajabilidad. Algunas especies de bambúes son disponibles en gran cantidad, sobretodo en regiones tropicales y sub-tropicales del Asia (LIESE, 1980).

En Brasil ocurren varias especies de bambúes. Todavía, Beraldo et al. (2003) relataron que, contrariamente al lo que ocurre en países asiáticos y en algunos países de América, en Brasil los bambúes solamente tienen una gran aceptación en el medio rural. Los empleos de esa gramínea son los más variados: tutor para plantas, demarcación de curvas-de-nivel, cercos, comedores, esterillas, cestos, forros, protección de terrenos, quiebra-vientos, control de la erosión, carbón, drenaje, riego, alimentación, laser, abrigo para la vida silvestre, de entre otros. En el medio urbano, ha sido destacado el uso de especies de bambúes de pequeño porte en ornamentación, o en pequeñas industrias de fabricación de muebles y de artículos para los deportes. Mientras tanto, las posibilidades del uso del bambú pueden ser ampliadas se aumentando su durabilidad, por medio del empleo de métodos más adecuados de cosecha, del secado de los tallos y de su protección ante los organismos xilófagos.

El bambú presenta muchas ventajas comparado a los materiales convencionales de construcción. Puede ser combinado al cemento Pórtland, con el objetivo de reemplazar el acero, o substituyendo los agregados minerales (áridos), tras su empleo directo en la construcción, reemplazando la madera, conforme se observa en algunos países de la América Latina y sobretodo en gran parte del continente asiático (www.brasilis.pro.br). En el caso específico de los agregados minerales, su obtención implica en un serio problema ambiental. De ese modo, la utilización de partículas de bambú en la producción de compuesto a base de cemento puede mostrarse una alternativa ecológicamente menos impactante en el remplazo de materias primas no renovables (arena y grava).

Constituyó el objetivo de ese trabajo evaluar las propiedades físicas y mecánicas de un compuesto de mortero de cemento Pórtland y arena, modificado por la adicción de partículas de bambú.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los procedimientos adoptados tuvieron por base, en la medida del posible, en las recomendaciones de las normas brasileñas, aplicadas a los ensayos de los agregados y de los morteros.

Determinación de la masa específica aparente de las partículas de bambú

Fue realizada con un becker graduado de 1 L. La masa específica aparente de las partículas de bambú, en la condición seca y no compactada, presentó un valor promedio de 0.14 g/cm^3 , siendo del orden de los 10% del valor normalmente presentado por la arena.

Ensayo de absorción de agua por las partículas de bambú

Las partículas de bambú permanecieron en el agua por un período de 72 h. A seguir, el material fue secado superficialmente con un tejido, y pesado. La absorción promedio del agua fue del orden de los 122%; todavía, se trata solamente de un valor-referencia, pues la razón agua-cemento utilizada en la confección de los morteros se ubica alrededor de 0.40.

Ensayo de granulometría del bambú y de la arena

Para el ensayo de granulometría (o, de una forma más apropiada para el caso del bambú, de la distribución del tamaño de las partículas), fue adaptada la norma NBR 7217. Fueron efectuadas tres repeticiones para cada material (partículas de bambú y arena). La dimensión máxima de las partículas de bambú (en ese caso, un valor convencional, por no se tratar de un agregado mineral) fue de 2.4 mm. Para la arena, ese valor fue de 1.2 mm. El módulo de finura para el bambú fue de 2.45 y para la arena de 2.31, siendo ambos considerados como se fueran "agregados" de textura media. Además, los dos materiales presentan morfologías muy distintas, tocando a las partículas de bambú (mucho más largas) probablemente desarrollar una función muy importante al momento el compuesto sea sometido a los esfuerzos de tracción; las partículas pueden modificar el comportamiento del compuesto pos-fisuración, impidiendo la aparición y el desarrollo de grietas.

Tratamientos aplicados a las partículas de bambú

Debido a los extractivos presentes en las partículas naturales de bambú, perjudiciales al fraguado del cemento Portland (BERALDO &

MARTINS, 2007), fueron empleados tres tipos de tratamiento para eliminar parcialmente los extractivos presentes en las células parenquimatosas:

- lavado en el agua tibia (2 h a 80°C);
- lavado en solución de cal hidratada (5% de concentración);
- lavado en solución de soda cáustica (5% de concentración).

Para el caso del empleo de los tratamientos de las partículas en un medio alcalino, mientras tales tratamientos teóricamente puedan se mostrar más eficaces en la eliminación de los extractivos, se debe atentar cuanto a la necesidad de la neutralización o de la reutilización de los residuos producidos, que pueden ser perjudiciales al medio ambiente. Ese problema no es observado al fin del tratamiento con agua caliente; sin embargo, en ese caso se necesita un abono de energía, parte de la cual puede obtenerse por la quema de la propia biomasa (ramas y hojas).

Determinación de la proporción

La proporción cemento: arena fue establecida en 1:3 (en masa); el contenido de las partículas de bambú fue de 5% y 8% (en relación a la masa de cemento). Ensayos preliminares fueron realizados con base en trabajos anteriores (BERALDO & MARTINS, 2007), para determinar la razón agua: cemento. De esta forma fueron adoptados dos proporciones (en masa, cemento: arena: partículas de bambú: agua):

- 1: 3: 0,05: 0,34
- 1: 3: 0,08: 0,38

Las probetas fueran moldeadas y fueran identificadas de acuerdo con: tipo de cemento utilizado (CP-II-E-32 - NBR 11578; CP-V-ARI - NBR 5733), tratamiento efectuado y contenido de partículas de bambú (Tabla 1).

TABLA 1 - Esquema para la confección de las probetas.

Código	Tipo de Cemento	Tratamiento de las partículas	Contenido de partículas (%)
T 01	CP V	Soda cáustica	5
T 02	CP V	Água tibia	5
T 03	CP V	Cal hidratada	5
T 04	CP V	Soda cáustica	8
T 05	CP V	Água tibia	8
T 06	CP V	Cal hidratada	8
T 07	CP II	Soda cáustica	5
T 08	CP II	Água tibia	5
T 09	CP II	Cal hidratada	5
T 10	CP II	Soda cáustica	8
T 11	CP II	Água tibia	8
T 12	CP II	Cal hidratada	8

Las probetas fueron moldeadas de acuerdo a los procedimientos descritos en la norma NBR 7215, siendo obtenidas tres repeticiones para cada tipo de combinación de los parámetros. Las probetas fueron sometidas a los siguientes ensayos:

a) No destructivo (END - ultrasonido). Fue utilizado el equipo Ultrasonic Tester BP-7 (Steinkamp), con transductores de sección exponencial, de 45 kHz de frecuencia de resonancia, posicionados en las bases de las probetas. Las mediciones de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) fueron efectuadas diariamente durante las dos primeras semanas y después solamente antes de la ejecución de los ensayos mecánicos.

b) Compresión simple (NBR 7215), a los 7, 14 y 28 días;

c) Compresión diametral (NBR 7222) a los 7, 14 y 28 días;

d) Absorción del agua (NBR 9778) a los 28 días.

Los datos obtenidos en los ensayos precedentes fueron analizados estadísticamente por medio del software Statgraphics 4.1. El análisis de variancia fue aplicado para detectar la influencia de los diferentes factores (edad, tipo de cemento, tratamiento aplicado a las partículas de bambú y de su porcentaje en la mezcla) y de sus interacciones en las propiedades del compuesto. Los promedios fueron comparados por medio del teste de Tukey al nivel de 95% de probabilidad estadística.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 presenta los valores promedios estadística entre ellos, por medio del test de Tukey de las propiedades evaluadas y la comparación al nivel de los 95% de probabilidad.

TABLA 2 – Resumen de las propiedades evaluadas. Efecto del contenido de las partículas (%), de la edad de la probeta (días), del tipo de cemento y del tratamiento aplicado a las partículas de bambú.

Factor	Contenido(%)		Edad (días)			Cemento		Tratamiento		
	5	8	7	14	28	CPII	ARI	AQ	LC	LS
Absorción (%)	8,54 ^a	10,23 ^b	-----			8,51 ^a	10,26 ^b	9,68 ^a	8,75 ^b	9,73 ^a
VPU (km/s)	3,49 ^a	3,28 ^b	3,37 ^a	3,40 ^b	3,41 ^b	3,30 ^a	3,48 ^b	3,31 ^a	3,43 ^b	3,43 ^a
CS (MPa)	14,66 ^a	12,92 ^b	12,24 ^a	14,54 ^b	14,59 ^b	11,99 ^a	15,59 ^b	11,83 ^a	15,08 ^b	14,46 ^b
CD(MPa)	2,38 ^a	2,35 ^a	2,12 ^a	2,41 ^b	2,56 ^b	2,01 ^a	2,72 ^b	2,08 ^a	2,49 ^b	2,53 ^b

Leyenda: AQ (agua caliente), LC (lavado en cal), LS (lavado en soda), VPU (velocidad del pulso ultrasónico), CS (compresión simple) y CD (compresión diametral).

*Misma letra en la horizontal y por la misma propiedad significa que no hubo diferencia estadística al nivel de los 95% de probabilidad por medio del test de Tukey.

a) Absorción del agua

Las Tablas 3 a 6 presentan los *p*-valores para los factores: contenido de partículas, tratamiento aplicado, edad de la probeta, tipo de cemento, y de sus interacciones, indicando los respectivos efectos. Aparentemente, el tratamiento de las partículas de bambú en soda cáustica puede haber causado daños superficiales en las partículas, provocando un aumento de la absorción del agua por el compuesto. O, entonces, que el involucramiento de las partículas de bambú por la cal puede haberse mostrado más efectivo disminuyendo, de ese modo, la capacidad de absorción del agua por las partículas de bambú. Analizando-se as melhores condições, ou seja, buscando minimizar a absorção de

água, observou-se que o CP-II-E-32 (fator cemento), 5% de fibras (fator teor) e cal hidratada (fator tratamento) proporcionam as melhores condições para a confecção dos compósitos.

TABLA 3 - Análisis de variancia para la absorción del agua.

Fuente	Suma de los cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Value
Efectos principales					
A:Cemento	27,5275	1	27,5275	170,22	0,0000
B:Tratamiento	7,2118	2	3,6059	22,30	0,0000
C:Contenido	25,5025	1	25,5025	157,70	0,0000
Interacciones					
AB	5,6671	2	2,8335	17,52	0,0000
AC	42,3801	1	42,3801	262,06	0,0000
BC	0,8745	2	0,4372	2,70	0,0858
Residuos	4,2047	26	0,1617		
TOTAL (corrigido)	113,368	35			

a) Velocidad del pulso ultrasónico (VPU).

Las Figuras 1 y 2, presentan las curvas de evolución de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) a través de las probetas cilíndricas. De una forma general, observase una elevación considerable en la magnitud de la VPU hasta alcanzar un valor estable entre las edades de 7 y 9 días; a partir de esas edades ocurre tendencia a la estabilización de las curvas. Probablemente, el secado de las probetas provocó la interrupción de la hidratación del cemento, motivo por lo cual la VPU se tornó prácticamente constante. Otra hipótesis es la de que los nuevos cambios estructurales del compuesto son muy pequeños y no sean detectables por el tipo de equipo empleado. De la misma manera, se observa en la Figura 1 una ligera predominancia de los valores de la VPU en los compuestos referentes a los tratamientos T01 (CP-V-ARI, soda, 5% de partículas), T02 (CP-V-ARI, agua tibia, 5% de partículas) y T03 (CP-V-ARI, cal, 5% de partículas).

Para el caso del empleo del CP-II-E-32 (Figura 2), los tratamientos T07 (soda, 5% de partículas) y T09 (cal, 5% de partículas) se destacaron. De acuerdo con los resultados de la VPU, dichos tratamientos podrían permitir un mejor desempeño de los respectivos compuestos en los ensayos de caracterización mecánica.

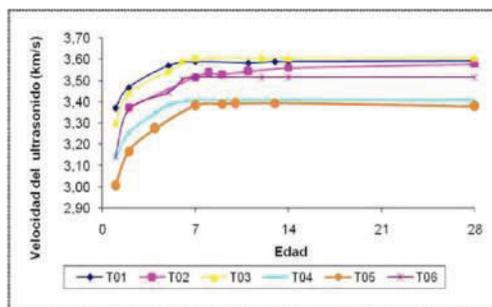


FIGURA 1- Evolución de la VPU (en km/s) vs edad de la probeta (en días), para compuestos de cemento CP-V-ARI, 5% y 8% de partículas de bambú, para los tres tratamientos (lavado en agua caliente, en solución de cal y en solución de soda).

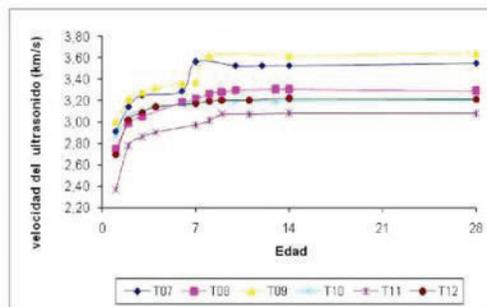


FIGURA 2- Evolución de la VPU (en km/s) vs edad de la probeta (en días), para compuestos de cemento CP-II-E-32, 5% y 8% de partículas de bambú, para los tres tratamientos (lavado en agua caliente, en solución de cal y en solución de soda).

El análisis global de los resultados de la VPU permiten destacar que los factores y los niveles de mayor importancia fueron el contenido de 5% de partículas de bambú, el cemento CP-V-ARI, y el tratamiento de las fibras con cal hidratada o

con soda cáustica (no diferentes entre si, pero ambos superiores estadísticamente al tratamiento con agua caliente). A partir de los 14 días de edad de la probeta, la VPU no presentó variaciones significativas.

TABLA 4 – Análisis de variancia de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU).

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Value
Efectos principales					
A: Tratamiento	1,1161	2	0,5581	85,59	0,0000
B: Edad	0,1556	2	0,0778	11,93	0,0000
C: Cemento	2,8664	1	2,8664	439,62	0,0000
D: Contenido	3,8529	1	3,8529	590,91	0,0000
Interacciones					
AB	0,1413	4	0,0353	5,42	0,0003
AC	0,8717	2	0,4359	66,85	0,0000
AD	0,3211	2	0,1605	24,62	0,0000
BC	0,1991	2	0,0996	15,27	0,0000
BD	0,0261	2	0,0130	2,00	0,1368
CD	0,8929	1	0,8929	136,94	0,0000
Residuos	2,6863	12	0,0065		
TOTAL (corrigido)	15,5616	31			

c) **Resistencia a la compresión simple:** edades de 7, 14 y 28 días, para los diferentes tratamientos aplicados a las partículas de bambú. en la Figura 3 presentase el resultado del ensayo de resistencia a la compresión simple, en las

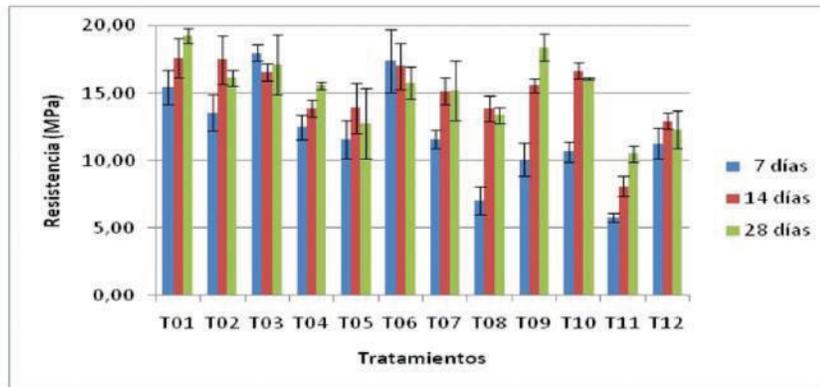


FIGURA 3 - Resistencia a la compresión simples en las edades de 7, 14 y 28 días para compuestos de CP-V-ARI (T01-T06) y CPII-E-32 (T07-T12), 5% y 8% de partículas de bambú, para los tres tratamientos (lavado en agua caliente, en solución de cal y en solución de soda).

Ocurrió una ligera elevación en la resistencia a compresión simple del compuesto con la edad de la probeta, siendo que, para algunos tratamientos, se observó una estabilidad en los resultados del ensayo, a partir de los 14 días (Figura 3). Además, de una forma general, se observó que a medida que aumentó el contenido de las partículas de bambú también ocurrió una disminución de la resistencia del compuesto (excepción al tratamiento T10 (CP-II-E-32, soda cáustica, 8% de partículas de bambú)).

De una forma global, los factores que más contribuyeron para una mejor performance de los

compuestos en compresión simple fueron: el cemento CP-V-ARI, el contenido de fibras de 5% y los tratamientos alcalinos aplicados a las partículas de bambú (cal hidratada y soda cáustica), los cuales no presentaron diferencias estadísticas entre sí; mientras tanto ambos fueron superiores al tratamiento en agua caliente. No hubo diferencia significativa entre las edades 14 y 28 días, siendo ambas superiores estadísticamente a la edad de 7 días. Tal resultado corrobora con las informaciones obtenidas en el ensayo no destructivo por ultrasonido.

TABLA 5 – Análisis de variancia para la compresión simple (CS)

Fuente	Soma de cuadrados	GL	Cuadrado médio	F-Ratio	P-Value
Efectos principales					
A:Contenido	81,5018	1	81,5018	22,80	0,0000
B:Tratamiento	214,881	2	107,44	30,05	0,0000
C:Edad	129,796	2	64,898	18,15	0,0000
D:Cemento	349,128	1	349,128	97,65	0,0000
Interacciones					
AB	22,3339	2	11,167	3,12	0,0489
AC	8,6865	2	4,34327	1,21	0,3017
AD	4,4165	1	4,41653	1,24	0,2694
BC	37,3364	4	9,33411	2,61	0,0408
BD	24,8679	2	12,4339	3,48	0,0352
CD	35,4329	2	17,7165	4,96	0,0091
Residuos	314,63	88	3,57535		
TOTAL (corrigido)	1223,01	107			

a) Resistencia a la tracción por compresión diametral

La misma tendencia del ensayo anterior pudo ser observada en los resultados del ensayo de tracción por compresión diametral (Figura 4), que es un indicador global de todos los tipos de solicitaciones que actúan en un material; normalmente observase una relación directa con la resistencia a la compresión simple. Para probetas de cemento (mortero y hormigón), normalmente la razón entre las resistencias a la compresión diametral y simple, es de alrededor 0.10. Todos los tratamientos aplicados a los compuestos ultrapasaron ese valor. Además,

excepto para el tratamiento T06 (CP-V-ARI, cal, 5% de partículas de bambú), ocurrió una tendencia al aumento de la razón con el aumento del contenido de partículas de bambú.

De una forma general, los factores que más contribuyeron para la mejor performance de los compuestos en compresión diametral fueron: el cemento CP-V-ARI, las edades de 14 y 28 días (sin diferencia estadística entre si) y los tratamientos con cal hidratada y soda cáustica (también sin diferencia estadística entre si); de nuevo ambos fueron superiores estadísticamente al tratamiento con agua caliente.

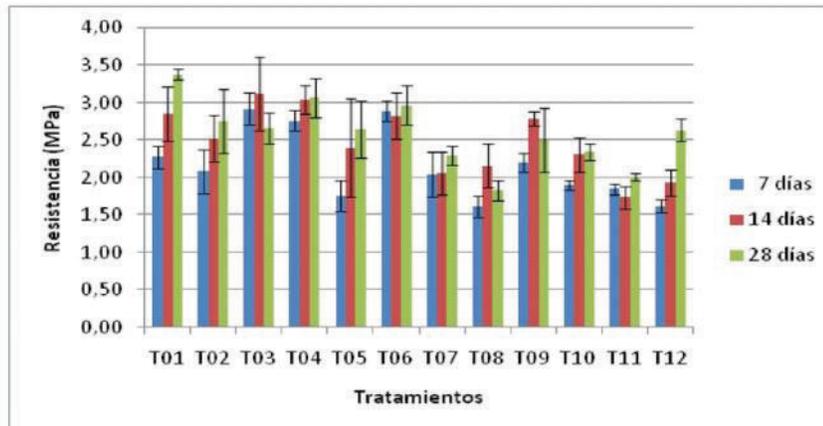


FIGURA 4 - Resistencia a la compresión diametral en las edades de 7, 14 y 28 días para compuestos de CP-V-ARI y CPII-E-32, 5% y 8% de partículas de bambú, para los tres tratamientos (lavado en agua caliente, en solución de cal y en solución de soda).

TABLA 6 – Análisis de variancia para la compresión diametral (CD).

Fuente	Soma de cuadrados	GL	Cuadrado médio	F-Ratio	P-Value
Efectos principales					
A:Edad	3,6603	2	1,8302	13,93	0,0000
B:Cemento	13,4338	1	13,4338	102,24	0,0000
C:Tratamiento	4,3638	2	2,1819	16,61	0,0000
D:Contenido	0,0310	1	0,0310	0,24	0,6283
Interacciones					
AB	0,0527	2	0,0264	0,20	0,8185
AC	0,5620	4	0,1405	1,07	0,3766
AD	0,1245	2	0,0623	0,47	0,6242
BC	0,3294	2	0,1647	1,25	0,2906
BD	0,0030	1	0,0030	0,02	0,8801
CD	0,2078	2	0,1039	0,79	0,4567
Residuos	11,5632	88	0,1314		
TOTAL (corrigido)	34,3315	107			

CONCLUSIONES

Compuestos de mortero de cemento Portland y arena, modificado por la adición de partículas de bambú, presentan características tales que los califican para la ejecución de obras sometidas a pequeñas cargas, típicas de algunas construcciones rurales. Los ensayos aplicados a los compuestos permitieron detectar el efecto del tipo de cemento empleado, de los tratamientos aplicados a las partículas de bambú, además de evaluar la influencia del contenido de partículas de bambú utilizadas en las mezclas.

El método no destructivo por ultrasonido se mostró adecuado para monitorear el endurecimiento de la mezcla, permitiendo que la medición de la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) sea una importante herramienta de análisis del comportamiento del compuesto, principalmente en las tempranas edades.

Considerando los resultados obtenidos en los análisis estadísticos se pudo observar una respuesta positiva a la combinación del empleo del cemento CP-V-ARI, con la adición de 5% de partículas de bambú, tratadas con soda cáustica o cal hidratada (indiferentes entre si).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CNPq por las becas obtenidas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

NBR 5733. *Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

NBR 721. *Cimento Portland: determinação da resistência à compressão, método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1986. 8p.

NBR 7217. *Agregado: determinação da composição granulométrica, especificação*, Rio de Janeiro, 1983. 5p.

NBR 7222. *Argamassas e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*, São Paulo, 1982. 8p.

NBR 9778. *Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005. 4p.

NBR 11578. *Cimento Portland composto, especificação*. Rio de Janeiro, 1991. 8p.

BERALDO, A. L.; MARTINS S. C. F. Destructive and non-destructive evaluation of bamboo chips : portland cement composite. *Journal of Bamboo and Rattan*, Boston , MA, n.1, v.6, n. 191, 27-40, nov/dec. 2007.

BERALDO, A. L.; AZZINI A.; GHAVAMI K.; PEREIRA M; A. R. Bambu: características e aplicações. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Coord.). *Tecnologias e materiais alternativos de construção*. Campinas, SP. Livraria Editora da Unicamp. 2003, cap. 9, p. 253-299.

LIESE, W. Anatomy of bamboo. In: BAMBOO RESEARCH IN ASIA: proceedings of a workshop, 1980, Singapura. *Proceedings ...Ottawa, ON: IDRC*, mai, 1980, p.165-172. Disponível em: <www.brasilis.pro.br>. Acessado em : 10/12/2007.