

Evaluación físico-mecánica de ladrillos de mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz

Physical and mechanical evaluation of bricks of soil-cement-rice husk mixtures

Ana Paula da Silva Milani*, Wesley Jorge Freire*

* Facultad de Ingeniería Agrícola FEAGRI/Unicamp, Campinas, BRAZIL
ana.silva@agr.unicamp.br

Fecha de recepción: 07/ 06/ 2005
Fecha de aceptación: 28/ 07/ 2005
PAG. 91 - 100

Resumen

El presente informe sobre un esfuerzo de investigación que buscó soluciones de construcción que ayuden a reducir la degradación ambiental. Para esto se decidió investigar el uso de mezclas de suelo - cemento - cáscara de arroz para obtener un material alternativo de construcción. Para conseguir este objetivo, los suelos fueron tratados con diferentes mezclas de cemento y cáscara de arroz, siendo posteriormente estudiadas sus propiedades físico-mecánicas. La cáscara de arroz fue fraccionada, tamizada y tratada en solución de cal; se estudiaron las dosificaciones posibles para las mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz a través de ensayos de compactación normal de Proctor, ensayos de compresión simple, de tracción a la compresión diametral, en las edades de 7 y 28 días y además se realizaron ensayos de absorción de agua. A partir de este estudio preliminar, se fabricaron ladrillos con las diferentes mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz los cuales, después de curados, fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión simple a los 7, 28 y 60 días y a ensayos de absorción de agua. Después de determinadas las principales características físicas y mecánicas de todas las mezclas, se puede concluir que las del suelo arenoso con el agregado de un 12% de la combinación del cemento y la cáscara de arroz, se destacaron como materiales factibles a ser empleados en la fabricación de ladrillos prensados, los que podrían ser utilizados en construcciones e instalaciones rurales.

Palabras Clave: Residuo agroindustrial, suelo-cemento, ladrillos, cáscara de arroz, resistencia a la compresión, absorción de agua

Abstract

This work informs about a research effort with the aim of proposing construction solutions that help reducing the environmental degradation the research studied the utilization of rice husk added to mixtures of soil and cement to obtain an alternative construction material. For this purpose, the soil was treated with different amounts of cement and rice husk and then the physical and mechanical properties of each mix were studied. The rice husk preparation consisted of grinding, sieving, and pre-treatment with a lime solution followed by physical analysis in laboratory conditions. The different mixtures of soil, cement and rice husk were tested for Proctor compaction, unconfined compression and splitting tensile strength at the age of 7 and 28 days as well as to water absorption. The soil-cement-husk mixtures presenting the best results in terms of mechanical strength were utilized for specimen brick manufacturing. Compressive strength tests at the age of 7, 28 and 60 days were applied to the specimens and the water absorption was measured. The obtained data was then statistically analyzed and the results showed that the sandy soil with the addition of 12% of the cement and rice husk combination was the best treatment in terms of physical and mechanical properties, pointing out its promising use as an alternative material for brick be used in rural construction.

Keywords: Agricultural residue, soil-cement brick, rice husk utilization, mechanical strength, water absorption

1. Introducción

Utilizando racionalmente los recursos naturales, el rescate del uso del suelo como material de construcción se ha intensificado últimamente y su comportamiento físico-mecánico ha mejorado a través de la estabilización con aglomerantes minerales.

Nascimento (1992) estudió ladrillos confeccionados con suelos arcilloso (A_4), areno-arcilloso (A_{2-6}), y arenoso (A_{2-4}) estabilizados con cemento (7%, en masa). Los resultados de resistencia a la

compresión simple a los 28 días y de absorción de agua de los ladrillos fueron en promedio 3 MPa y 15%, respectivamente.

Arini (1999), con base en las experiencias prácticas efectuadas en laboratorios y canterios de obra, expuso sobre la tecnología de producción de la albañilería estabilizada por cementación, concluyendo que ladrillos de suelos estabilizados con 6% de cemento, en volumen, son más indicados para ser utilizados como ladrillos

estructurales, y ladrillos estabilizados con 1% ó 2% de cemento, en volumen, para ser utilizado como material de veda.

Todavía concentrada en la fabricación de un material de menor impacto ambiental, la utilización conjunta de residuos vegetales y matrices cementantes ha revelado una potencial alternativa de utilización. Dentro de estos residuos se destaca la elevada producción del residuo cáscara de arroz proveniente de la actividad agroindustrial del proceso de separación de la cáscara de arroz.

Silveira et al., (1996) definieron la cáscara de arroz como una capa leñosa, liviana, oca, dura y silicosa, compuesta por 50% de celulosa, 30% de lignina y 20% de SiO₂. Pero su gran contenido de silica presenta una estructura física (forma cristalina) inadecuada para reactivar en medio alcalino, dado que las silicas en estado amorfo son las que presentan actividad puzolánica en presencia de Ca(OH)₂ y corrientemente son encontradas en cenizas de cáscara de arroz. Destácase que el residuo cáscara de arroz puede ejercer una función de relleno o de refuerzo de la matriz cementante (dar ductibilidad al material).

Zucco (1999) sometió diferentes fracciones de cáscara de arroz a algunos tratamientos con el objetivo de la fabricación de placas de compósito¹ a base de cemento CP V-ARI y cáscara de arroz. Después de prensadas y curadas las placas, éstas fueron sometidas a ensayos de compresión, los datos obtenidos mostraron que los mejores resultados se alcanzaron por los compósitos fabricados con partículas de cáscara de arroz lavadas en solución de cal.

Akasaki y Silva (2001) estudiaron diferentes composiciones de la mezcla de suelo arcilloso y cal (10% en masa) adicionadas en 5%, 10%, 15% y 20% (en masa) de cáscara de arroz (en su estado natural), con el objetivo de confeccionar ladrillos; de un modo general, los autores constataron la necesidad de fragmentación del residuo cáscara de arroz para poder obtener ladrillos con mejor desempeño mecánico.

Milani (2005) estudió mezclas de suelo-cal-cáscara de arroz para confección de ladrillos y observó que la adición de combinaciones de cal-cáscara de arroz en suelos arenoso y arcilloso no confirió mejoras significativas en terminos de resistencia a la compresión para ambos suelos, alcanzándose valores insatisfactorios de resistencia a la compresión simples (0,18 a 0,29 MPa para las mezclas de suelo arcilloso-cal-cáscara de arroz, de 0,26 a 0,38 MPa para las mezclas de suelo arenoso-

cal-cáscara de arroz). La autora indicó para futuras pesquisas la estabilización de estos suelos con mezclas de cemento o cemento-cáscara de arroz.

Así, la presente investigación se reviste de especial importancia porque envuelve el estudio de mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz para su posible utilización como materiales no convencionales, así como la búsqueda de condiciones para minimizar la posible degradación ambiental cuando aquellos materiales son producidos a partir del aprovechamiento de residuos agrícolas y/o agroindustriales.

2. Materiales y métodos

Para la realización de la presente investigación se utilizaron los siguientes materiales: cáscara de arroz, recogida directamente en la máquina beneficiadora de arroz; dos tipos de suelo, uno perteneciente a la clase de textura arcillosa y otro a la clase arenosa; y aglomerantes minerales; cemento común Portland y cal hidratada. Para el moldeado de los ladrillos se utilizó una máquina manual de fabricación de ladrillos y para la determinación de las resistencias mecánicas se utilizó una máquina universal de ensayo con capacidad de carga de 250.000 kN.

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realizó a través de un análisis de varianza, con delineamiento experimental enteramente aleatorio, con esquema factorial, y con la aplicación de la prueba de Tukey para la comparación de las medias, al nivel de 5% de probabilidad estadística. Todo el trabajo fue realizado con tres réplicas para cada mezcla de suelo-cemento-cáscara.

• Procedimientos aplicados a la cáscara de arroz

La cáscara de arroz, inmediatamente recibida, pasó por el proceso de trituración en molino de martillo y tamizado para la determinación de la fracción utilizable (comprendida entre 4,8 mm y 0,42 mm de aberturas de malla), eliminación de los finos para lograr uniformidad y mejoría de la adhesión de la cáscara de arroz al sistema suelo-aglomerante. Después de este proceso, la cáscara fue sumergida en solución de cal concentrada a 5% por un período de 24 hrs, para minimizar la incompatibilidad química entre la biomasa vegetal y el aglomerante mineral, ya que la cáscara de arroz contiene constituyentes (almidón) inhibidores de la pega del cemento. A continuación de este período,

¹Término técnico aplicado para los materiales compuestos con fibras

la cáscara pasó por lavado en agua corriente y secado al aire libre, determinándose, entonces su masa unitaria, contenido de humedad y distribución en tamaño.

• **Procedimientos aplicados al suelo**

Los suelos fueron sometidos a ensayos de caracterización para la determinación de sus principales índices físicos, como son: análisis granulométrico, límites de liquidez (LL) y de plasticidad (LP), índice de plasticidad (IP), y masa específica de los sólidos (M_{esp}), de acuerdo con las normas técnicas brasileñas.

• **Estudios de dosificación de las mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz**

En base a la literatura y con el objetivo de adicionar la máxima cantidad de cáscara de arroz y disminuir el consumo de cemento en la mezcla suelo-cemento-cáscara de arroz, se adoptó, para estudios de dosificación, las siguientes composiciones (% en relación a la masa del suelo seco): contenidos de 8% y 12% (en masa) de la combinación de cemento y cáscara para ser adicionados al suelo arenoso, y contenidos de 8%, 12%, 14% y 18% (en masa) de la combinación de cemento y cáscara para ser adicionados al suelo arcilloso. En las combinaciones se modificaron los contenidos, en masa, de cemento y de cáscara desde 100% de aglomerante y 0% de cáscara, hasta 60% de aglomerante y 40% de cáscara, con incrementos de 10%, siendo los mayores porcentajes de cáscara de arroz los que afectaron negativamente la trabajabilidad y la compactación de la mezcla. Partiendo de estas mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz, fueron ejecutados ensayos de compactación normal Proctor, y determinadas la humedad óptima (h_{ot}) y la masa específica aparente seca máxima (M_{max}) de cada mezcla. Con la utilización de estos parámetros fueron confeccionados, para cada mezcla, probetas de 127 mm de altura y 100 mm de diámetro, moldeados de acuerdo con las normas técnicas brasileñas. Después de 7 días curados en cámara húmeda, las mismas fueron sometidas al ensayo de compresión simple (R_p), a los 7 días de edad.

Las mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz escogidas para fines de caracterización físico-mecánica fueron las que presentaron mayor cantidad de cáscara incorporada, con un valor preliminar de resistencia a la compresión simple mayor que 1,5 MPa, este valor fue considerado el mínimo necesario para que la mezcla de suelo-cemento-cáscara de arroz fuese aceptable, en

términos de resistencia, como componente constructivo.

• **Procedimientos aplicados a las probetas y ladrillos confeccionados a partir de las mezclas de suelo-aglomerante-cáscara de arroz**

Se confeccionaron probetas (127 mm de altura y 100 mm de diámetro) y ladrillos (23 cm x 11 cm x 5 cm) con las mezclas escogidas, los cuales fueron curados durante 7 días en cámara húmeda y conservados en ambiente de laboratorio hasta la edad del ensayo. Tanto para las probetas como para los ladrillos fue exigido un grado de compactación no menor que 95% y no mayor que 105% en relación a los valores de masa específica aparente seca máxima. Para garantizar que los ladrillos fuesen sometidos a la energía de compactación semejante a la del Proctor, fue efectuada la regulación de la prensa de fabricación de ladrillos relacionando, entonces, la masa del ladrillo con la masa de la probeta y admitiendo que ambos tuvieran la misma masa específica aparente seca máxima y la misma humedad óptima.

Cuando se alcanzaron las edades de 7 y 28 días, las probetas se sumergieron en agua por un período de cuatro horas y después se le aplicaron los ensayos de compresión simple (Figura 1) y de tracción a la compresión diametral, siguiendo las normas brasileñas. Las probetas fueron también sometidas al ensayo de absorción de agua a los 7 días de edad. Este ensayo consistió en el peso de los mismos después de la inmersión en agua durante 24 horas (peso saturado), seguido del secado en estufa a 105°C hasta que el peso se mantuviera constante (peso seco). La diferencia porcentual entre los pesos saturado y seco correspondió al valor de la capacidad total de absorción de agua, calculada con la base seca.

Respecto a los ladrillos, los mismos fueron primeramente cortados al medio y superpuestos, con sus caras unidas por una capa de pasta de cemento y revestidos en la cara superior e inferior con la misma pasta. Los ladrillos, así preparados, se sumergieron en agua por un período de 24 hrs y después sometidos al ensayo de compresión simple a los 7, 28 y 60 días de edad (Figura 2). También fue aplicado a los ladrillos el ensayo de absorción de agua, procediendo de forma similar al ensayo de absorción de agua en las probetas.

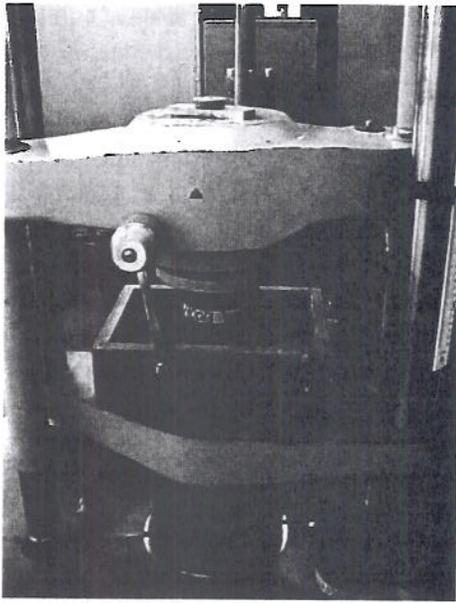


Figura 1. Probeta sobre compresión simple

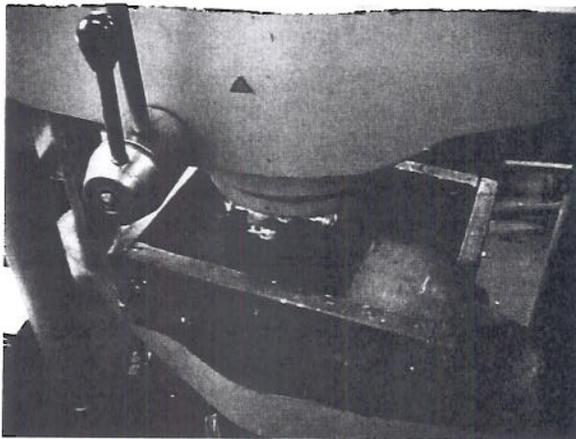


Figura 2. Ladrillos sobre compresión simple

3. Resultados y discusión

La cáscara de arroz en su condición natural, se presentó como un material liviano (masa unitaria de 110 kg/cm^3) y de granulometría uniforme (83% de su tamaño comprendido entre las mallas de 2,4 mm y 1,2 mm). Por otro lado, después de pasar por los procesos de fraccionamiento, tamizado y pre-tratamiento, la masa unitaria de la cáscara de arroz aumentó hasta $0,20 \text{ g/cm}^3$, con aproximadamente 85% de su masa presentándose con un tamaño superior a 0,6 mm, siendo considerada esa la fracción utilizable. Después de los procedimientos aplicados a la cáscara de arroz, la misma presentó un contenido de humedad próximo a 6,5% y fue

acondicionada en sacos plásticos para su posterior utilización en las mezclas de suelo-cemento. Los índices físicos de los suelos estudiados (Tabla 1) mostraron que el suelo arenoso utilizado es adecuado para la estabilización con cemento, pues posee granulometría no uniforme y cantidad suficiente de finos (arcilla + sílice) que confiere a la mezcla mayor plasticidad. El suelo arcilloso presentó un porcentaje alto de finos y un elevado Índice de Plasticidad, lo que, según la literatura, dificulta el proceso de estabilización del suelo. Por tanto hubo la necesidad de adoptar altos contenidos de aglomerante (14% y 18%) para que las mezclas con suelo arcilloso alcanzaran valores de resistencia mínima para la utilización como componente constructivo.

Tabla 1. Caracterización física de los suelos utilizados

Suelos	Distribución Granulométrica				Índices físicos			Clasificación
	arena	silíce	arcilla	M_{esp}	LL	LP	IP	
arenoso	72,1%	18,9%	8,9%	$2,67 \text{ g/cm}^3$	NP	NP	NP	A ₂₋₄
arcilloso	27,6%	34,5%	37,9%	$3,06 \text{ g/cm}^3$	43,6%	32,2%	11,4%	A ₇₋₅

La Tabla 2 se refiere a los valores de humedad óptima (h_{ot}), masa específica aparente seca máxima (M_{max}) y resistencia a la compresión simple (R_p), a los 7 días de edad, de cada mezcla suelo-cemento-cáscara de arroz estudiada en la fase preliminar del trabajo, o sea, en el estudio de la dosificación de las mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz.

Puede notarse en la Tabla 2 que los valores de resistencia a compresión simple de las probetas de mezclas de suelo arenoso-cemento-cáscara y de suelo arcilloso-cemento-cáscara presentaron comportamiento semejante a los valores de masa específica aparente seca máxima (M_{max}), siendo que, al adicionar las combinaciones con el contenido de 100% de cemento y 0% de cáscara de arroz a los suelos arenoso y arcilloso, se elevaron los valores de resistencia y M_{max} . Por otro lado, al adicionar a los suelos las combinaciones que contenían cáscara de arroz, los valores de resistencia y de M_{max} disminuyeron en la misma proporción que se incorporaba cáscara a la mezcla. Esta semejanza de comportamiento puede ser explicada por la relación existente entre las propiedades físico-mecánicas del sistema suelo-aglomerante compactado, pues cuanto menos vacíos tenga el sistema, mejor será la interacción entre el suelo y la adición y consecuentemente, mayores serán las resistencias alcanzadas.

Tabla 2. Resultados del ensayo de compactación y de compresión simple de las mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz

Combinaciones de cemento + cáscara	Suelo arenoso			Suelo arcilloso		
	M_{max} (g/cm ³)	h_{ot} (%)	R_p (MPa)	M_{max} (g/cm ³)	h_{ot} (%)	R_p (MPa)
Testigo	1,847	13,50	0,16	1,572	26,50	0,21
C ₁ - 8% (100% cemen + 0% cásc)	1,864	13,40	2,35	1,578	25,95	0,65
C ₂ - 8% (90% cemen + 10% cásc)	1,822	13,82	1,84	1,549	26,37	0,44
C ₃ - 8% (80% cemen + 20% cásc)	1,803	14,10	1,69	1,516	27,37	0,43
C ₄ - 8% (70% cemen + 30% cásc)	1,772	14,57	0,95	1,498	28,33	0,38
C ₅ - 8% (60% cemen + 40% cásc)	1,750	15,67	0,59	1,481	28,38	0,37
C ₆ - 12% (100% cemen + 0% cásc)	1,852	13,45	3,45	1,575	25,92	1,26
C ₇ - 12% (90% cemen + 10% cásc)	1,789	14,02	2,98	1,527	27,13	0,93
C ₈ - 12% (80% cemen + 20% cásc)	1,765	14,83	2,47	1,495	27,67	0,61
C ₉ - 12% (70% cemen + 30% cásc)	1,729	15,63	1,92	1,483	27,67	0,48
C ₁₀ - 12% (60% cemen + 40% cásc)	1,704	16,57	1,48	1,462	28,17	0,38
C ₁₂ - 14% (100% cemen + 0% cásc)	-	-	-	1,580	24,20	1,36
C ₁₃ - 14% (90% cemen + 10% cásc)	-	-	-	1,546	25,60	1,15
C ₁₄ - 14% (80% cemen + 20% cásc)	-	-	-	1,504	26,00	0,90
C ₁₅ - 18% (100% cemen + 0% cásc)	-	-	-	1,584	24,80	1,81
C ₁₆ - 18% (90% cemen + 10% cásc)	-	-	-	1,550	26,30	1,76
C ₁₇ - 18% (80% cemen + 20% cásc)	-	-	-	1,505	26,80	1,60

* Suelo sin adición de combinaciones de cemento + cáscara de arroz

El análisis estadístico de los datos de la Tabla 2 reveló un aumento no significativo de la masa específica aparente seca máxima (M_{max}) de los suelos que contenían las combinaciones con el contenido de 100% de cemento. Hubo una disminución significativa de la M_{max} con el aumento del contenido de cáscara de arroz. En relación a la humedad óptima, ocurrieron aumentos significativos cuantos mayores fueron las adiciones de cáscara de arroz.

En cuanto a los valores preliminares de resistencia a la compresión simple, el mejor resultado se alcanzó por el suelo arenoso adicionado de la combinación C₆ (3,45 MPa) y los peores resultados los presentaron los testigos y

el suelo arcilloso adicionado a las combinaciones C₄ (0,38 MPa), C₅ (0,36 MPa) y C₁₀ (0,38 MPa).

La estabilización de suelos depende de las cantidades de arcillas tipo caulinita, ilita y montmorilonita, presentes en lo suelo, pues indica el mejor tipo de estabilizante a ser adicionado a ese suelo. Los relatos de Barbosa y Tolêdo Filho (1997) enfatizaron el cemento como el mejor agente estabilizador para suelos calificados como arenosos, pues estos suelos presentan arcillas tipo caulinita y ilita, las que fijan menos cal, posibilitando una mejor hidratación del cemento. Los resultados de la presente pesquisa confirmaran estos

relatos, pues se produjo la estabilización del suelo arenoso a partir de la adición de cemento. Ya la adición de cal y cal + cáscara de arroz en lo suelo arenoso (A₂₋₄) no tuvo éxito, conforme datos de Milani (2005).

Analizando el suelo arenoso con un contenido de 8% de la combinación de cemento + cáscara, solamente las combinaciones C₁, C₂ y C₃ presentaron resistencia a la compresión mayores que 1,5 MPa, mientras que, para el contenido de 12% de la combinación cemento + cáscara, esto ocurrió con las combinaciones C₆, C₇, C₈ y C₉. Estadísticamente, no existieron diferencias significativas entre las combinaciones C₂ y C₃ y entre las combinaciones C₇ y C₈. Por tanto, siguiendo los criterios de mayor contenido de cáscara aliado al valor mínimo de resistencia de 1,5 MPa, las primeras mezclas escogidas para fines de caracterización físico-mecánica y posterior fabricación de ladrillos fueron:

- T₁ – Suelo arenoso sin adición
- T₂ – Suelo arenoso + 8% (100% cemento + 0% cáscara)
- T₃ – Suelo arenoso + 8% (80% cemento + 20% cáscara)
- T₄ – Suelo arenoso + 12% (100% cemento + 0% cáscara)
- T₅ – Suelo arenoso + 12% (80% cemento + 20% cáscara)
- T₆ – Suelo arenoso + 12% (70% cemento + 30% cáscara)

En el caso de los suelos arcillosos, Milani (2005) no logró estabilizar el suelo arcilloso (A₇₋₅) con adición de cal y cal + cáscara de arroz, a pesar de diversas descripciones sobre su buena estabilización con tal aglomerante. Acreditando que el suelo utilizado en las mezclas de poca cantidad de arcilla montmorilonita, según Milani (2005), hay una unión interfoliar endeble, es ideal para fijar la cal y resultar en una buena estabilización del sistema suelo-cal.

El suelo arcilloso con un contenido de 8% de la combinación cemento + cáscara y con un contenido de 12% de la combinación cemento + cáscara no alcanzó el valor de resistencia a la compresión mínima de 1,5 MPa (Tabla 2). Por tanto, dos contenidos más de la combinación de cemento + cáscara se adoptaron para ser incorporados al suelo arcilloso. Los contenidos fueron 14% y 18% de la combinación de cemento + cáscara, las variaciones de cemento y cáscara fueron de 100% de cemento a 0% de cáscara y 80% de cemento a 20% de cáscara, con incrementos de 10%. Se adoptó el incremento máximo de 20% de cáscara ya que los contenidos de 14% y 18% de la combinación cemento + cáscara ya eran por sí elevados.

Los resultados indicaron que solamente el contenido de 18% de la combinación de cemento +

cáscara alcanzó el valor de resistencia mínima de 1,5 MPa; siendo, entonces, confirmada a constatación de la etapa de caracterización del suelo, o sea, el suelo arcilloso necesitó de grandes contenidos de estabilizador para alcanzar la resistencia mecánica impuesta en lo presente trabajo. Nuevamente los resultados presentados reafirmaron que el suelo solo arcilloso contén bajo contenido de montmorilonita, pues se el mismo presentase alto cantidad de este tipo de arcilla, la su resistencia mecánica no sofreiría alteraciones cuando tratado con cemento.

En base a este resultado las demás muestras para ser caracterizadas fueron:

- T₇ – Suelo arcilloso sin adición
- T₈ – Suelo arcilloso + 18% (100% cemento + 0% cáscara)
- T₉ – Suelo arcilloso + 18% (90% cemento + 10% cáscara)
- T₁₀ – Suelo arcilloso + 18% (80% cemento + 20% cáscara)

La Tabla 3 y las Figuras 3 y 4 muestran los resultados de los ensayos de caracterización físico-mecánica aplicados a las probetas y a los ladrillos confeccionados a partir de las mezclas escogidas en la etapa de estudio de la dosificación.

Tabla 3. Resistencia a la compresión simple (MPa) y resistencia a la tracción en la compresión diametral (MPa) de las probetas de mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz

Tratamientos	Resistencia a la compresión simple (MPa)		Resistencia a la tracción en la compresión diametral (MPa)	
	7 días	28 días	7 días	28 días
T ₁ - suelo arenoso (testigo)	0,16	0,86	0,01	0,10
T ₂ - aren+8% (100%cem+0% cásc)	1,90	2,30	0,33	0,56
T ₃ - aren+8% (80%cem+20% cásc)	1,26	1,66	0,20	0,32
T ₄ -aren+12% (100%cem+0% cásc)	2,70	3,48	0,52	0,57
T ₅ -aren+12% (80%cem+20% cásc)	2,00	2,81	0,41	0,43
T ₆ -aren+12% (70%cem+30% cásc)	1,83	2,18	0,33	0,34
T ₇ - suelo arcilloso (testigo)	0,23	1,62	0,04	0,25
T ₈ -arc+18% (100%cem+0% cásc)	1,37	1,94	0,21	0,23
T ₉ -arc+18% (90%cem+10% cásc)	1,36	1,64	0,18	0,20
T ₁₀ - arc+18% (80%cem+20% cásc)	1,14	1,40	0,14	0,14

Con relación a los valores de resistencia a la compresión simple de las probetas de suelo-cemento-cáscara de arroz, a los 7 días de edad (Tabla 3), la prueba de Tukey mostró que el mayor valor fue presentado por el tratamiento T₄, seguido de los tratamientos T₅, T₆ y T₂,

estadísticamente iguales entre sí. Por otro lado, los menores valores fueron alcanzados por los testigos y los tratamientos T_3 , T_9 , T_8 , T_{10} , los cuales también no presentaron diferencias significativas entre ellos. A los 28 días de edad, los valores de resistencia a la compresión tuvieron una tendencia al mismo comportamiento confiriéndole al cemento los mayores valores de resistencia y a los tratamientos con mayor cantidad de cáscara los menores valores.

A pesar de los bajos valores de resistencia a la tracción en la compresión diametral, a los 7 y 28 días de las probetas de suelo-cemento-cáscara de arroz, las mismas presentaron un comportamiento semejante a los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión simple, destacándose nuevamente los tratamientos T_4 , T_5 , T_6 y T_2 por presentar el mejor desempeño en el ensayo de resistencia a la compresión diametral.

Con excepción del tratamiento T_{10} , los demás presentaron diferencias estadísticas significativas entre los valores de la resistencia a la compresión simple a los 7 y 28 días. En la mayoría de los tratamientos, no existieron diferencias significativas para los valores de la resistencia a la tracción y a la compresión diametral a los 7 y 28 días.

Para efectos de uniformidad, las probetas de suelo sin adición (T_1 y T_7) también fueron colocados en cámara húmeda durante 7 días y dejados secar en el ambiente de laboratorio. Por eso se puede explicar el aumento de sus resistencias a 28 días, adquirido mediante secado, después entrarán en equilibrio con la humedad ambiente.

Se observó que, durante la ejecución de los ensayos de compresión, las probetas que llevaron cáscara de arroz en su composición sufrieran grandes deformaciones con la aplicación de la carga, mostrando que la cáscara de arroz actuó como relleno (carga mineral) y absorbiendo energía. Se puede afirmar que la cáscara de arroz atribuyó ductibilidad al material suelo-cemento.

Para los valores de resistencia a la compresión simple de los ladrillos de suelo-cemento-cáscara de arroz (Figura 3), la prueba de Tukey mostró que el mayor valor lo alcanzó el tratamiento T_4 (3,90 MPa), seguido de los tratamientos T_2 (2,62 MPa) y T_5 (2,26 MPa), diferentes estadísticamente entre sí. Por otro lado los menores se alcanzaron por los testigos T_1 (0,48 MPa) y T_7 (0,67 MPa) y por el tratamiento T_{10} (0,96 MPa), los cuales no presentaron diferencias significativas entre ellos. A los 28 y 60 días de edad, los valores de resistencia a la compresión tuvieron tendencia al mismo comportamiento, ya explicado para las probetas de suelo-cemento-cáscara de arroz.

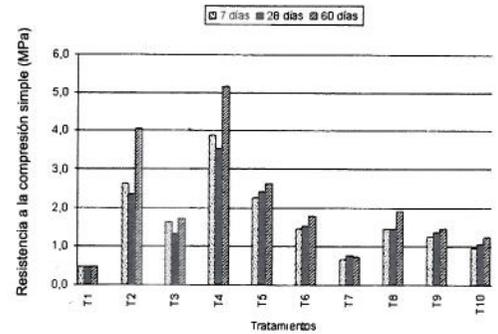


Figura 3. Valores de la resistencia a la compresión simple de los ladrillos confeccionados a partir de mezclas de suelo-cemento-cáscara

Cuando se analiza la evolución de la resistencia a la compresión simple de los ladrillos a lo largo de 60 días (Figura 3), se verifica que, de 7 a 28 días algunos tratamientos sufrieron disminución en su resistencia mientras que otros tuvieron tendencia al aumento de la misma, pero de forma no significativa. Igualmente, para todos los tratamientos con excepción de los testigos, los valores de resistencia presentados por los ladrillos fueron siempre mayores a los 60 días comparados con los 7 y 28 días. Este aumento de resistencia mecánica ocurrido en las mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz, indica la formación a lo largo del tiempo de compuestos cementantes que mejoran las propiedades mecánicas de las mezclas (PICCHI et al., 1984). Se supone que el efecto de la estabilización del suelo con cemento fue más significativo que las reacciones negativas (vacíos) que ocurrieron entre el sistema suelo-cemento y cáscara de arroz.

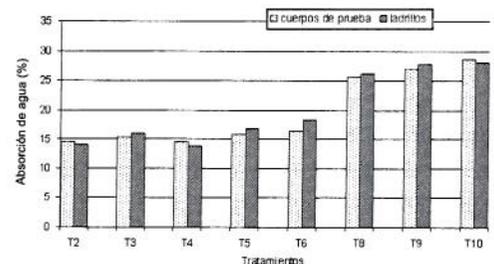


Figura 4. Valores de absorción de agua de las probetas y de los ladrillos confeccionados a partir de mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz

Respecto a la absorción de agua (Figura 4), tanto para las probetas como para los ladrillos, los menores valores se alcanzaron por los tratamientos T_2 , T_3 , T_4 , T_5

y T₆, los que entre ellos no presentaron diferencias estadísticas. Los tratamientos T₈, T₉ y T₁₀, o sea, tratamientos con suelo arcilloso presentaron elevados valores de absorción de agua, dado que el suelo presenta grande cantidad de finos. Puede notarse por la Figura 4 que tanto para las mezclas con suelo arenoso como para las mezclas con suelo arcilloso, los valores de absorción de agua tuvieron tendencia a aumentar en la medida que aumentaba la cáscara de arroz incorporada a la mezcla, pues la misma proporcionó aumentos en la porosidad del material.

Los resultados sobre la caracterización físico-mecánica mostraron comportamientos semejantes entre las probetas y los ladrillos y para ambos casos los tratamientos T₂, T₄ y T₅ se destacaron con los mejores desempeños frente a la resistencia a la compresión simple

y a la absorción de agua.

Ferreira (2003) estudió la resistencia a la compresión simple y absorción de agua del material suelo-cemento a través de la determinación experimental en probetas cilíndricas y ladrillos. Los suelos utilizados fueran A₂₋₄ (arenoso) y A₇₋₅ (arcilloso), siendo adicionados a la estos suelos los contenidos de 6% y 10% de cemento Portland. Los resultados encontrados por el autor para compresión simples y absorción de agua, están mostrados en la Tabla 4. El referido autor, con base en los valores, recomendó suelos con características semejantes a aquella del suelo arenoso estudiado para estabilización con cemento, siendo un material factible para atender las demandas por tecnologías apropiadas.

Tabla 4. Caracterización físico-mecánica de mezcla de suelo-cemento

Tratamientos	Probetas				Ladrillos			
	Resistencia (MPa)			Absorción (%)	Resistencia (MPa)			Absorción (%)
	7 días	28 días	56 días	7 días	7 días	28 días	56 días	7 días
aren + 6% cem	0,73	1,31	2,04	10,70	0,77	0,83	0,72	11,86
aren +10%cem	2,09	2,74	4,50	11,00	1,39	1,84	1,83	11,53
arc + 6% cem	0,30	0,44	0,67	27,00	0,50	0,39	0,37	26,09
arc +10% cem	0,67	1,07	1,10	27,80	1,01	0,67	0,60	25,21

Fuente: Ferreira (2003)

Independiente de la edad, cuando se comparan los resultados encontrados en el presente trabajo con las pesquisas realizadas por Ferreira (2003), los valores de resistencia a la compresión simple y absorción de agua de las probetas y ladrillos de suelo-cemento presentan grandes similitudes, indicando comportamientos semejantes entre los materiales de los dos trabajos.

En términos de la resistencia a la compresión simple, solamente los tratamientos T_4 y T_5 , o sea, la mezcla de suelo arenoso + 12% de cemento y la mezcla de suelo arenoso + 12% de la combinación (80% de cemento + 20% de cáscara de arroz) siguieron las especificaciones de la norma técnica brasileña empleada para ladrillos prensados de suelo-cemento; esta norma establece como mínimo el valor médio de 2,0 MPa y no son aceptados valores inferiores a 1,7 MPa a los 7 días de edad. En términos de capacidad de absorción de agua, solamente los tratamientos con suelo arenoso atendieron a las especificaciones de la norma que establece, como máximo el valor medio de 20% y no se aceptan los superiores a 22%. Se destaca que los tratamientos de suelo arenoso-cemento-cáscara (T_2 al T_6) mostraran ser adecuados para su utilización en la fabricación de ladrillos prensados para ser utilizados en construcciones e instalaciones rurales.

4. Conclusiones

Puede afirmarse que, independiente del contenido de cemento y de la cáscara de arroz adicionados, el suelo arenoso fue siempre superior al suelo arcilloso en términos de desempeño físico-mecánico, evaluado por resistencia a la compresión simple, resistencia a la tracción en la compresión diametral y capacidad de absorción de agua.

Se supone que la cáscara de arroz utilizada en la presente pesquisa presenta contenido de SiO_2 con estructura física (forma cristalina) inadecuada para la ocurrencia de reacciones puzolánicas en presencia de $Ca(OH)_2$. La misma sólo actuó como relleno afectando negativamente el comportamiento mecánico de ambos suelos. Sin embargo, su utilización combinada con el cemento mostró que las reacciones de estabilización química que ocurrieran entre el suelo y el cemento fueran mas significativas del que los efectos negativos (ocurrencia de vacíos) provocados por la presencia de la cáscara de arroz.

De modo general, los valores de masa específica aparente seca máxima, de resistencia a la compresión simple y de tracción en la compresión diametral de las

mezclas de suelo-cemento-cáscara de arroz, disminuyeron con el aumento del contenido de cáscara de arroz. Los valores de humedad óptima y absorción de agua aumentaron en la medida del crecimiento del contenido de cáscara de arroz. En todos los tratamientos de suelo-cemento-cáscara de arroz, los valores de resistencia mecánica fueron siempre mayores a los 60 días que a los 7 y 28 días de edad.

Los resultados más alentadores para la futura confección de ladrillos están dados por los tratamientos con suelo arenoso destacándose la adición al suelo de 12% de la combinación (80% de cemento + 20% de cáscara). A la luz de los resultados obtenidos, el suelo arenoso estudiado, adicionado con combinaciones adecuadas de cemento-cáscara de arroz, mostró ser factible como material alternativo de construcción, toda vez que racionaliza el uso de la tierra y minimiza el descarte de la cáscara de arroz en condiciones y locaciones inadecuadas.

Para proseguir con el presente trabajo se sugiere estudiar más profundamente, aspectos técnicos como durabilidad, variación dimensional y propiedades termofísicas de los ladrillos de suelo-cemento-cáscara de arroz.

5. Referencias

- Akasaki J. L. y Silva A. P. (2001)**, Estudio de la mezcla suelo-cal-residuos agroindustriales para fabricaciones de ladrillos. In: 2nd Conferencia Internacional Ecomateriales, Santa Clara. Anais.Santa Clara: CIDEM, 1 CD-ROM.
- Arini R. (1999)**, Arquitetura de terra: solo/cimento/cal. 287 p. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Barbosa N. P. y Tolêdo Filho R. D. (1997)**, Construção com terra crua. In: Tolêdo Filho, R. D.; Nascimento, J. W. B.; Ghavami, K. Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande: UFPB/SBEA. cap. 4, p. 113-43.
- Ferreira R. C. (2003)**, Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos. 204 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Milani A. P. S. (2005)**, Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz. 113 p. Dissertação (Mestrado em

Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil

Nascimento A. A. P. (1992), Estudo de fissuras em paredes de tijolos de solo-cimento destinadas a edificações habitacionais. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Picchi F. A., Cincotto M. A. y Barros J. M. C. (1990), Tijolos de solo-cal. Revista A Construção, São Paulo, p. 93-8. Tecnologia de edificações IPT / Ded90.

Silveira A., Ferreira A. A. y Dalmolin D. C. C. (1996), A cinza da casca de arroz como adição mineral. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, São Paulo. Anais... São Paulo: [s.n.] p. 39-45.

Zucco L. L. (1999), 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, SP, Brasil.