

Eixo Temático ET-11-012 - Outros

APROVEITAMENTO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ NA PRODUÇÃO DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO PARA PAVIMENTAÇÃO

Joe Villena¹, Glicério Trichês², Luiz Roberto Prudêncio Jr.², Vanessa Marie Salm³

¹Universidade Federal do Paraná, Departamento de Transportes, PR; ²Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, SC.

³Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Governança Pública, PR.

RESUMO

Anualmente, no mundo, são produzidas 678 milhões de toneladas de arroz. A casca do arroz é, geralmente, queimada com a finalidade de produzir energia para o beneficiamento do cereal. Após queima se obtém uma cinza com alto teor de sílica e que representa, aproximadamente, 4% da produção total do arroz. O concreto compactado com rolo, muito utilizado na construção de pavimentos rígidos e semirrígidos, está constituído basicamente de cimento Portland, agregados pétreos e água para hidratação. Como todo concreto, permite a incorporação de diversos materiais e subprodutos da indústria que promovam ganhos na sua resistência seja devido ao refinamento da sua granulometria ou ao incremento de silicato de cálcio hidratado na sua composição final. Este artigo apresenta um estudo laboratorial sobre misturas de concreto compactado com rolo com adição de 5% cinza de casca de arroz em substituição parcial do agregado pétreo e diversos consumos de cimento. As misturas produzidas foram ensaiadas para determinar a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade das mesmas. Os resultados mostraram que, independente do consumo de cimento ou da idade das misturas, um incremento nos valores das propriedades mecânicas avaliadas pode ser atingido com a incorporação da cinza de casca de arroz no concreto compactado com rolo. Em consequência, é possível uma economia de cimento e agregados ao mesmo tempo que a cinza é reaproveitada na produção do concreto compactado com rolo. Desta forma, o uso deste material na construção de pavimentos nas regiões produtoras de arroz permitiria contribuir com a gestão ambiental do resíduo o qual, atualmente, não tem uma política adequada de gestão.

Palavras-chave: Concreto compactado com rolo; Cinza de casca de arroz; Propriedades mecânicas; Redução do consumo de cimento; Reaproveitamento de rejeito agrícola.

INTRODUÇÃO

A cinza de casca de arroz é um material de rejeito agrícola originado da combustão da casca de arroz com a finalidade de produção de energia para fornos de secagem do arroz. Esta cinza é rica em sílica. Cada tonelada de arroz produz aproximadamente 200 kg de casca que, posteriormente queimada origina 40 kg de cinza (MEHTA, 1992). A produção mundial do arroz chega a 678 milhões de toneladas ao ano. (FAO, 2009). As cascas representam 20% desse valor, o que significa que a produção do rejeito chega a 132,4 milhões de toneladas anuais. Ao ser queimado, 20% deste rejeito se transforma em cinza o que representa um passivo ambiental de 26,48 milhões de toneladas, sendo que a maioria da cinza de casca de arroz não tem uma

política adequada para sua gestão. Uma grande parte é utilizada como adubo na agricultura ou simplesmente jogado na beira dos rios causando o fenômeno de poluição orgânica.

A casca de arroz é formada por uma capa lenhosa, dura e altamente silicosa. É composta por cerca de 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. A celulose e a lignina podem ser removidas por combustão controlada, deixando para trás a sílica numa forma vítrea e microporosa de altíssima superfície específica (DAFICO, 2001). Quando a cinza de casca de arroz é utilizada em adição às misturas de concreto, a porosidade origina o acúmulo de água entre os grãos da cinza que não participa da hidratação do cimento e é responsável pela baixa massa específica das misturas de concreto. Para solucionar este problema é recomendável moer a cinza de casca de arroz para de esta maneira quebrar as ligações entre os grãos e evitar o acúmulo excessivo de água (SANTOS, 1997). No Brasil, a grande maioria dos trabalhos sobre o uso de cinzas de casca de arroz como material pozolânico foi realizada com cinzas residuais oriundas da queima da casca em beneficiadoras do cereal. De um modo geral, os resultados obtidos nas pesquisas brasileiras concluíram que a cinza de casca de arroz é uma excelente pozolana, com desempenho comparável ao da sílica ativa (resíduo da fabricação do ferro-silício e/ou do silício metálico). Uma constatação importante e, até certo ponto, surpreendente dos trabalhos nacionais é que esse desempenho foi satisfatório mesmo para cinzas que exibiam picos cristalinos nos ensaios de difração de raios X, contrariando a opinião de muitos especialistas internacionais (PRUDÊNCIO JR. Et al., 2003).

O efeito químico da cinza de casca de arroz no concreto está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado C-S-H adicional, que é o principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas. Como efeitos físicos podemos mencionar: o efeito microfíler causado pelo aumento da massa específica da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas da cinza de casca de arroz; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento causado pelas pequenas partículas da cinza de casca de arroz que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; e, a alteração da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado pétreo promovida quando a cinza de casca de arroz finamente dividida reduz ou elimina o acúmulo de água livre que normalmente fica retido sob os agregados. Todos estes efeitos, químicos e físicos, melhoram significativamente a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, refletindo num aumento de desempenho do concreto sob o ponto de vista mecânico e de durabilidade.

O concreto compactado com rolo é uma mistura “seca” de agregados, água e materiais cimentícios compactados por rolos vibratórios (ACI COMMITTEE 325, 1995). No Brasil, o concreto compactado com rolo, tem sido utilizado em sua maioria na construção de barragens. Porém, este concreto também foi bastante utilizado na construção de pavimentos, principalmente no Estado de São Paulo na época dos anos 1950 (ANDRIOLO, 1998). O concreto compactado com rolo pode ser produzido com os mesmos agregados usados para a produção de concretos simples, sempre que se encaixarem na granulometria especificada. Os teores de cimento podem variar entre 80 kg/m^3 a 200 kg/m^3 para camadas de base e sub-base de pavimentos. A porcentagem de água pode variar de 4% a 7% da massa total dos materiais secos. No caso do concreto compactado com rolo para ser utilizado como camada de sub-base de pavimentos

rígidos, a Norma DNIT 056/2013-ES (BRASIL, 2013) estabelece que a resistência à compressão simples aos 7 dias deve ser de no mínimo 5,0 MPa.

O concreto compactado com rolo é um material que permite a incorporação de subprodutos da indústria. O uso destes materiais pode se dar de duas formas: adicionando o material em substituição de uma parte do cimento; ou em substituição de uma parte do agregado pétreo. Considerando que a produção de uma tonelada de cimento gera uma tonelada de CO₂ que é expulsa ao meio ambiente, no primeiro caso, uma economia no cimento se traduz numa menor agressão à natureza. No segundo caso, um benefício ao meio ambiente é alcançado não só pelo uso destes subprodutos senão também pela diminuição da demanda de agregados naturais.

OBJETIVO

O objetivo deste estudo é analisar a influência da adição da cinza de casca de arroz nas propriedades mecânicas do concreto compactado com rolo com vistas ao seu uso na pavimentação de rodovias.

METODOLOGIA

Materiais

Para o presente estudo foi utilizado cimento tipo CP II Z 32 (com adição de pozolana), o qual apresenta uma massa específica de 2,99 kg/dm³ e uma área específica Blaine de 370 m²/kg.

A cinza, proveniente do sul do Estado de Santa Catarina, foi coletada de fornos de queima de casca de arroz sem controle de temperatura. A cinza foi submetida a um processo de moagem por um espaço de tempo de quatro horas na máquina *Los Angeles*. A Figura 1 mostra a aparência da cinza *in natura* (sem moer) e após moagem.

Figura 5: Cinza de casca de arroz.



Fonte: O autor (2010)

Legenda: a) Cinza *in natura*.

b) Cinza após moagem.

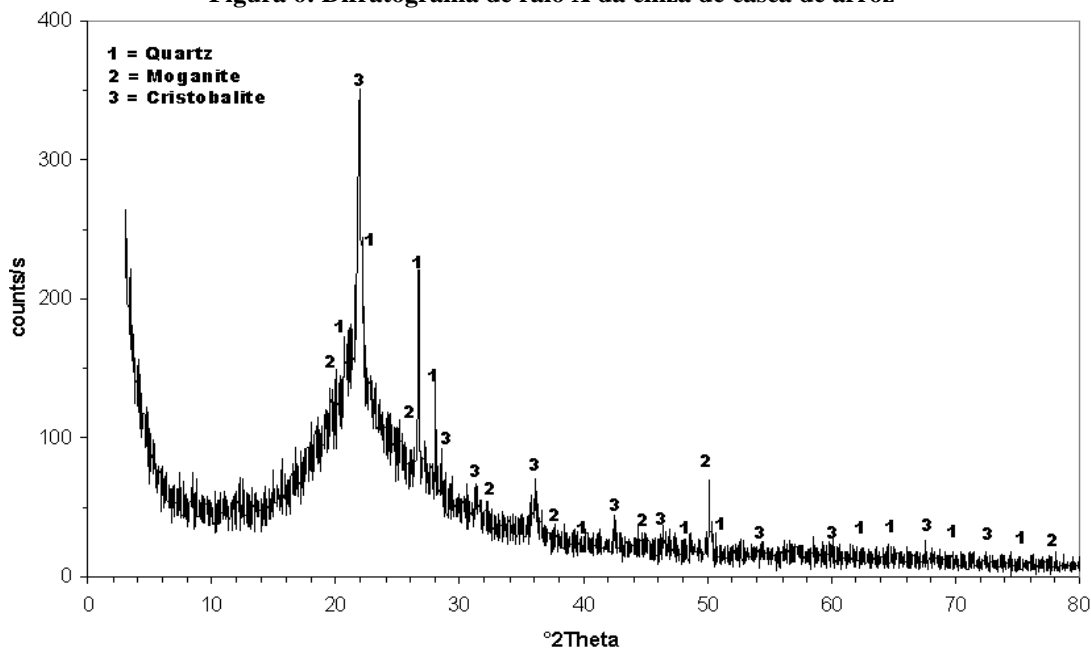
As características químicas do cimento e da cinza de casca de arroz utilizada são mostradas na Tabela 1. A Figura 2 apresenta o difratograma de Raios-X da cinza de casca de arroz.

Tabela 1: Características químicas do cimento e da cinza de casca de arroz.

	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Perda ao fogo (%)
Cimento	54,60	20,87	5,96	5,89	3,20	3,03	1,01	5,06
Cinza de casca de arroz	0,26	62,96	22,73	0,01	0,21	0,04	0,45	12,76

Fonte: O autor (2010)

Figura 6: Difratoograma de raio X da cinza de casca de arroz



Fonte: O autor (2010)

Na Figura 2, podemos observar que a cinza de casca de arroz apresenta uma estrutura pouco cristalina o que beneficia a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio – Ca (OH)₂ – formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado C-S-H adicional e melhorar a resistência mecânica do concreto compactado com rolo.

Os agregados pétreos (Figura 3) são de origem granítica e foram fornecidos pela empreiteira IVAI da jazida localizada na região de Paulo Lopes, km 265 da BR 101. A granulometria dos agregados pétreos e da cinza de casca de arroz é mostrada na Tabela 2 e na Figura 4.

Figura 7: Agregados pétreos: a) brita 1 1/2", b) brita 3/4" e c) pedrisco.



(a)

(b)

(c)

Fonte: O autor (2010)

Legenda: a) brita 1 1/2".

b) Brita 3/4".

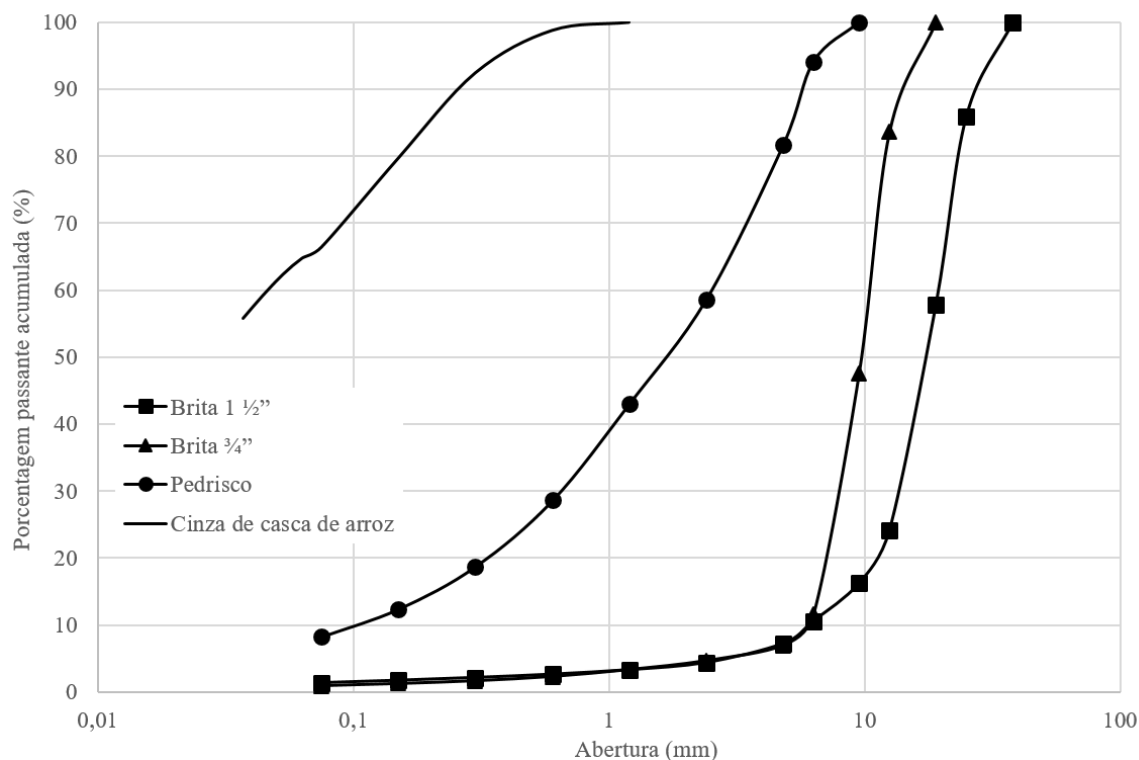
c) Pedrisco.

Tabela 2: Granulometria e características físicas dos agregados pétreos e da cinza de casca de arroz.

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante acumulada (%)			
		Agregados pétreos			Cinza de casca de arroz moída
		Brita 1 1/2"	Brita 3/4"	Pedrisco	
1 1/2"	38	100	-	-	-
1"	25	85,99	-	-	-
3/4"	19	57,88	100	-	-
1/2"	12,5	24,18	83,59	-	-
3/8"	9,5	16,21	47,53	100	-
1/4"	6,3	10,56	11,55	94,14	-
# 4	4,8	7,22	6,96	81,75	-
# 8	2,4	4,36	4,66	58,63	-
# 16	1,2	3,28	3,32	43,04	100
# 30	0,6	2,61	2,29	28,59	98,79
# 50	0,3	2,12	1,65	18,72	92,43
# 100	0,15	1,70	1,24	12,37	79,70
# 200	0,075	1,34	0,91	8,24	66,39
# 230	0,063	-	-	-	64,74
# 270	0,053	-	-	-	62,31
# 325	0,044	-	-	-	59,07
# 400	0,037	-	-	-	55,74
Massa específica (kg/m ³)		2640	2630	2630	2210

Fonte: O autor (2010)

Figura 8: Granulometria do agregado pétreo.



Fonte: O autor (2010)

Métodos

Dosagem das Misturas de Concreto Compactado com Rolo

No presente estudo foram avaliadas as seguintes misturas:

Misturas sem adição de cinza de casca de arroz.

M 0/80: Mistura de concreto compactado com rolo com 0% de adição de cinza de casca de arroz e 80 kg/m³ de cimento;

M 0/120: Mistura de concreto compactado com rolo com 0% de adição de cinza de casca de arroz e 120 kg/m³ de cimento; e

M 0/160: Mistura de concreto compactado com rolo com 0% de adição de cinza de casca de arroz e 160 kg/m³ de cimento.

Misturas com adição de cinza de casca de arroz.

M 5/80: Mistura de concreto compactado com rolo com 5% de adição de cinza de casca de arroz e 80 kg/m³ de cimento;

M 5/120: Mistura de concreto compactado com rolo com 5% de adição de cinza de casca de arroz e 120 kg/m³ de cimento; e

M 5/160: Mistura de concreto compactado com rolo com 5% de adição de cinza de casca de arroz e 160 kg/m³ de cimento.

Com base na granulometria, na massa específica e proporção de cada fração de agregado pétreo e da cinza de casca de arroz na granulometria final de cada mistura, foi calculada a quantidade de cada um destes materiais para a produção de um metro cúbico

de concreto compactado por rolo. As proporções dos materiais, assim calculadas, para a dosagem das misturas são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3: Quantidade (kg) de agregados pétreos e cinza de casca de arroz por metro cúbico de concreto compactado com rolo.

Mistura	Cimento	Agregado pétreo				Cinza de casca de arroz
		Brita 1 ½"	Brita ¾"	Pedrisco	Total agregados	
M 0/80	80	824,8	206,4	1031,2	2062,4	-
M 0/120	120	810	202,8	1012,8	2025,6	-
M 0/160	160	795,2	198,4	995,2	1988,8	-
M 5/80	80	868	181,6	868	1917,6	100,8
M 5/120	120	852	178,8	852	1882,8	99,6
M 5/160	160	835,2	174,4	835,2	1844,8	97,6

Fonte: O autor (2010)

Na Tabela 3 pode-se observar que a adição da cinza de casca de arroz nas misturas diminui a quantidade de agregado pétreo necessário para a elaboração do concreto compactado com rolo, quando comparadas misturas com o mesmo consumo de cimento com e sem adição de cinza.

Propriedades Mecânicas avaliadas

- Resistência à compressão simples segundo a Norma ASTM C39/C39M (ASTM, 2016a). Para este ensaio foram moldados corpos de prova cilíndricos de 15x30 cm e ensaiados aos 7, 14, 28 e 90 dias de idade.
- Resistência à tração na flexão segundo a Norma ASTM C78 (ASTM, 2016b). Para este ensaio foram moldados corpos de prova prismáticos de 15x50x50 cm e ensaiados aos 28 e 90 dias de idade.
- Módulo de elasticidade segundo a Norma ASTM C469 (ASTM, 2014). Para este ensaio foram moldados corpos de prova cilíndricos de 15x30 cm e ensaiados aos 28 dias de idade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

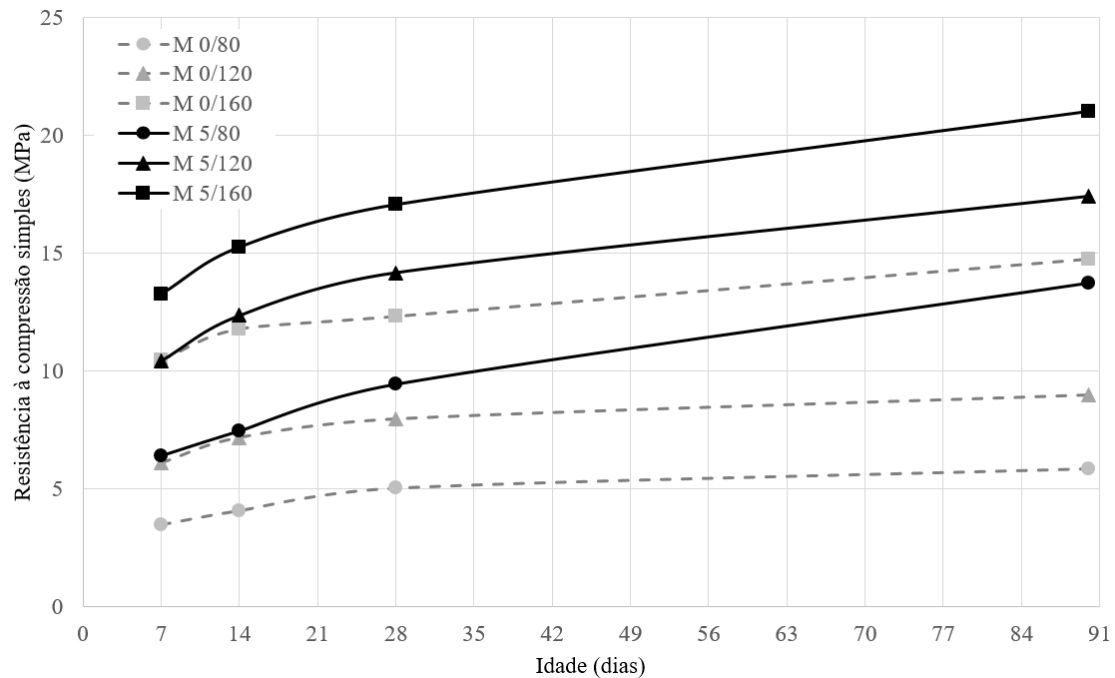
Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração na flexão (RTF) e módulo de elasticidade (E) das misturas estudadas, a diversas idades de cura, são mostrados na Tabela 4, na Figura 5, na Figura 6 e na Figura 7 respectivamente.

Tabela 4: Resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração na flexão (RTF) e módulo de elasticidade (E) das misturas estudadas.

Mistura	RCS (MPa)				RTF (MPa)		E (GPa)	Massa específica aparente seca (kg/m ³)
	Idade de cura (dias)				Idade (dias)		Idade (dias)	
	7	14	28	90	28	90	28	
M 0/80	3,5	4,1	5,0	5,8	1,1	1,2	6,2	2250
M 0/120	6,1	7,2	8,0	9,0	1,8	1,9	14,6	2270
M 0/160	10,5	11,8	12,3	14,7	2,5	2,7	16,8	2270
M 5/80	6,4	7,4	9,4	13,7	1,6	2,0	10,8	2190
M 5/120	10,4	12,3	14,2	17,4	2,5	2,9	17,5	2200
M 5/160	13,3	15,3	17,1	21,0	3,0	4,1	19,8	2210

Fonte: O autor (2010)

Figura 9: Resistência à compressão simples das misturas de concreto compactado com rolo.



Fonte: O autor (2010)

Figura 10: Resistência à tração na flexão das misturas de concreto compactado com rolo.

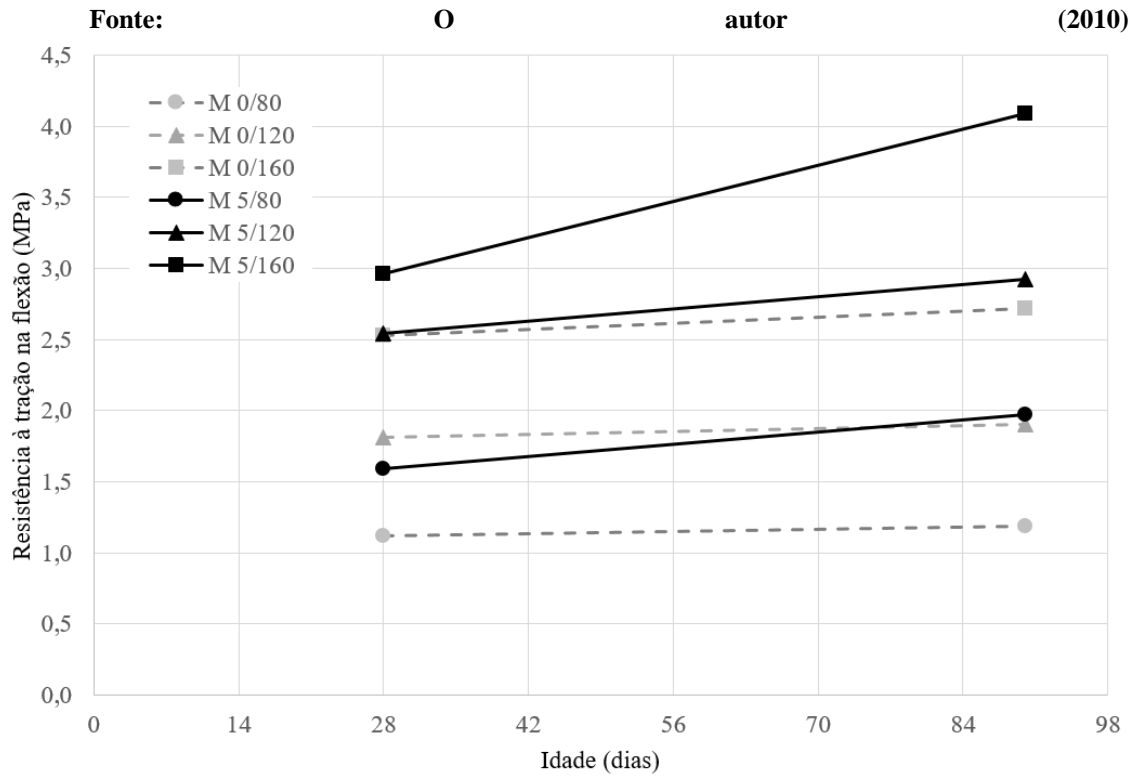
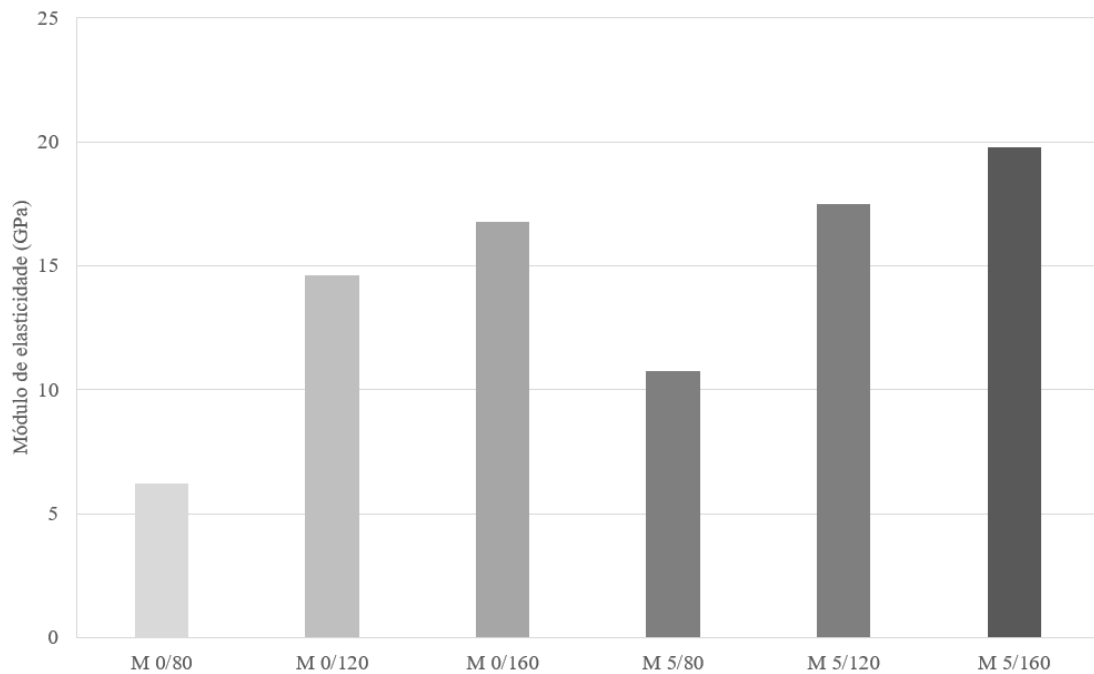


Figura 11: Módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade, das misturas de concreto compactado com rolo.



Fonte: O autor (2010)

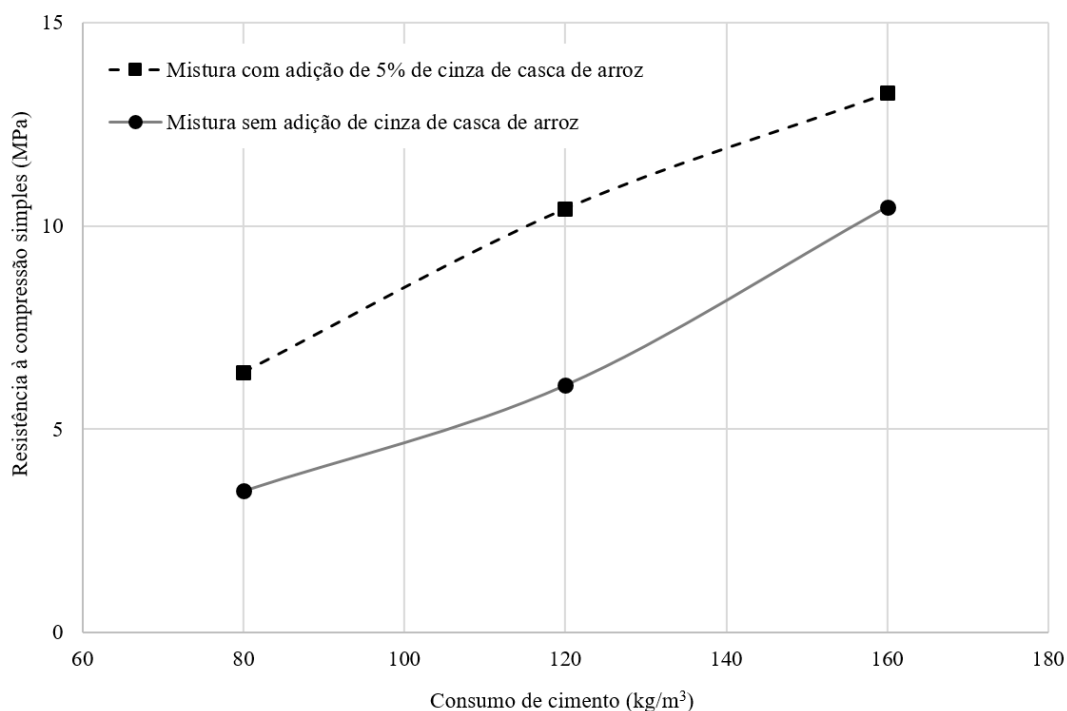
Os resultados acima apresentados mostram que, para qualquer idade de cura, a adição de 5% de cinza de casca de arroz promove o incremento das propriedades

mecânicas do concreto compactado com rolo. A influência da cinza de casca de arroz é mais apreciável para maiores idades, devido, possivelmente, ao efeito pozolânico da cinza, o qual se manifesta, principalmente, após os 28 dias de cura. Para ter uma ideia do incremento da resistência, pode-se analisar as misturas com consumo de cimento de 120 kg/m^3 sem e com adição de cinza aos 90 dias de cura. Neste caso, a resistência à compressão simples da mistura com adição de cinza de casca de arroz é, aproximadamente, $8,4 \text{ MPa}$ (93%) maior do que a mistura sem adição.

A Figura 8 apresenta a influência do consumo de cimento na resistência à compressão simples das misturas sem e com adição de cinza de casca de arroz. Como mencionado na Introdução do presente artigo, caso a mistura de concreto compactado com rolo fosse ser utilizada como camada de sub-base de pavimentos rígidos, a mesma deveria atingir um valor de resistência à compressão simples de, no mínimo, $5,0 \text{ MPa}$ (BRASIL, 2013).

Tomando como referência a Figura 8, verifica-se que para atingir o valor mínimo de resistência à compressão simples de $5,0 \text{ MPa}$, o consumo de cimento da mistura de concreto compactado com rolo sem adição de cinza deveria ser de, aproximadamente, 105 kg/m^3 . No caso da mistura com adição de 5% de cinza, o consumo de cimento cairia para, aproximadamente, 70 kg/m^3 ; considerando que a relação entre consumo de cimento e resistência à compressão simples obedece-se a linha de tendência mostrada na Figura 8. Com base nos dados apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3, pode-se calcular a quantidade de agregados pétreos e de cinza de casca de arroz a serem utilizados para a produção de um metro cúbico de concreto compactado com rolo para misturas com consumo de cimento de 105 kg/m^3 sem adição de cinza e para misturas com consumo de cimento de 70 kg/m^3 e adição de 5% de cinza (Tabela 5).

Figura 12: Resistência à compressão simples das misturas de concreto compactado com rolo aos 7 dias de idade.



Fonte: O autor (2010)

Tabela 5: Quantidade (kg) de agregados pétreos e cinza de casca de arroz por metro cúbico de concreto compactado com rolo com consumos de cimento de 105 e 70 kg/m³ de cimento e adição de zero e 5% de cinza respectivamente.

Mistura	Cimento	Agregado pétreo				Cinza de casca de arroz
		Brita 1 ½"	Brita ¾"	Pedrisco	Total agregados	
M 0/105	105	815,6	204,2	1019,7	2039,4	-
M 5/70	70	872	182,3	872,0	1926,3	101,1

Fonte: O autor (2010)

Realizando uma análise quantitativa, para esta situação hipotética, se poderia afirmar que para atingir o valor mínimo de resistência à compressão simples especificado pela Norma DNIT 056/2013-ES (BRASIL, 2013), a adição de 5% de cinza de casca de arroz no concreto compactado com rolo permitiria a economia de quase 35 kg de cimento, economia de 113,1 kg de agregados pétreos e reaproveitamento de 101,1 kg de cinza de casca de arroz; sendo esta comparação realizada entre as misturas de concreto compactado com rolo M 0/105 (consumo de cimento de 105 kg/m³ sem adição de cinza) e M 5/70 (consumo de cimento de 70 kg/m³ com adição de 5% de cinza) (Tabela 6).

No local da obra rodoviária, caso se considerasse a construção de uma camada de sub-base de pavimento de dez centímetros de espessura e largura de sete metros, seriam economizados: 24,5 toneladas de cimento; 79,17 toneladas de agregados pétreos; e ainda, seriam reaproveitadas 70,77 toneladas de cinza de casca de arroz por quilômetro de pavimento construído (Tabela 6). Considerando que a produção de uma tonelada de cimento gera uma tonelada de CO₂ que é expulsa ao meio ambiente, se pouparia o meio ambiente de 24,5 toneladas de CO₂ decorrentes da construção da estrutura de pavimento mencionada.

Tabela 6: Quantidades de materiais (kg) economizadas e reaproveitada para produção de um metro cúbico de mistura e um quilômetro de rodovia construída.

	Cimento	Agregado pétreo	Cinza de casca de arroz
Economizado/m ³ de mistura produzida	35	113,1	-
Reaproveitado/m ³ de mistura produzida	-	-	101,1
Economizado/km de rodovia construída	24 500	79 170	-
Reaproveitado/km de rodovia construída	-	-	70 770

Fonte: O autor (2010)

CONCLUSÕES

Ao termo deste estudo, conseguiu-se demonstrar que a adição de cinza de casca de arroz promove o incremento das propriedades mecânicas de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade do concreto compactado com rolo. Especificamente concluiu-se que:

- A adição de 5% de cinza de casca de arroz incrementa a resistência mecânica do concreto compactado com rolo independentemente da idade de cura das misturas ou do consumo de cimento utilizado. Este incremento é mais apreciável a

maiores idades devido, possivelmente, ao efeito pozolânico da cinza no concreto.

- A adição de 5% de cinza de casca de arroz no concreto compactado com rolo diminui o consumo de cimento necessário para atingir um valor específico de resistência mecânica desejada; a adição de cinza produz também uma diminuição da quantidade de agregados pétreos além do reaproveitamento de uma quantidade apreciável de cinza para produção do concreto compactado com rolo. Em consequência, um grande benefício é alcançado devido, sobretudo, à diminuição das quantidades de cimento e agregados, colaborando desta forma com a preservação do meio ambiente.
- Finalmente, pode-se concluir que o uso da cinza de casca de arroz na elaboração do concreto compactado com rolo nas regiões produtoras de arroz pode contribuir na gestão ambiental deste subproduto agrícola.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao programa CNPq pela bolsa de mestrado do primeiro autor, à Cooperativa COOPERSULCA pelo fornecimento da CCA e à empreiteira IVAI pelo fornecimento dos agregados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 325.10R-95: State-of-the-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements**. 1995.

ANDRIOLO, F.R. **The Use of Roller Compacted Concrete**. São Paulo: Oficina de Textos, 1998.

ASTM C39 / C39M-16b, **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ASTM C78 / C78M-16, **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016b, www.astm.org

ASTM C469 / C469M-14, **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **DNIT 056/2013 - ES: Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2013. 11 p.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

FAO. **Estatísticas da produção de arroz para o 2007 e 2008**. Food and agriculture organization. Relatório, 2008.

MEHTA, P. K., Rice husk ash- a unique supplementary cementing material. In: MALHOTRA, V.M. (ed) **Advances in concrete technology**. CANMET. Ottawa. p. 407-432, 1992.

PRUDÊNCIO Jr., L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. Cinza de casca de arroz. Coletânea Habitare - vol. 4 - **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Porto Alegre, p. 241-261, 2003.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.