

AREIA LITORÂNEA ESTABILIZADA COM CINZAS E CAL PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO

Saymon Porto Servi

Acadêmico do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande
saymon_servi@hotmail.com

Victor Ferreira Nunez

Acadêmico do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande
vferreiranunez@gmail.com

Cezar Augusto Burkert Bastos

Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande
cezarbastos@furg.br

Resumo. A região litorânea do Estado do Rio Grande de Sul caracteriza-se pela presença de solos predominantemente arenosos com baixa capacidade de carga. Com isso, são necessárias técnicas que venham a atender os requisitos de projeto com tal material. Optou-se pela estabilização do solo natural a partir da adição de cinza de casca de arroz (CCA) e cal hidratada, por dois motivos: (a) a cal por si só não é capaz de gerar as reações de estabilização pela baixa presença de argilominerais, com isso é necessário a adição de um material pozolânico na mistura; (b) a cinza de casca de arroz é um resíduo altamente presente na região, devido à alta produção orizícola do Rio Grande do Sul. O trabalho busca analisar o uso de misturas solo-cinza-cal em pavimentação a partir dos ganhos de resistência à compressão simples. Os tratamentos térmico e físico aplicados à cinza de casca de arroz mostraram aumentar a reatividade do material. Os resultados da estabilização com a CCA se mostram satisfatórios com mistura atingindo 3 MPa de resistência a compressão simples aos 28 dias de idade, superior à obtida com a sílica comercial empregada na pesquisa para fins de comparação.

Palavras-chave: Estabilização de solos. Pavimentação. Cinza de casca de arroz.

1. INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul tem como característica geomorfológica a ocorrência de cinco grandes domínios bem definidos (Fig. 1), sendo eles: Planalto Meridional (ao norte), Cuesta do Haedo (extremidade a oeste), Depressão Central (centro do estado), Escudo Cristalino Sul-Rio-Grandense (ao sul) e Planície Costeira (zona litorânea que se estende no sentido geral norte-sul).



Figura 1. Domínios Geomorfológicos do RS (Secretaria de Gestão, Planejamento e Governança do RS, 2018)

A cidade do Rio Grande se encontra na região litorânea do estado que, por sua vez, está localizada na província geomorfológica da Planície Costeira.

O município tem como característica predominante depósitos arenosos de origem eólica. Esses depósitos superficiais são compostos por uma faixa de areias finas, de granulometria uniforme, de compactidade fofa e sem coesão (DIAS, 1997). A formação geológica desse tipo de solo ocorre em função da baixa altitude (próxima ao nível do mar) e da topografia plana. Dentro desse contexto, é possível notar a ausência de formações rochosas e solos residuais, devido ao substrato rochoso da cidade do Rio Grande encontrar-se, aproximadamente, a 520 metros de profundidade (CLOSS, 1970).

De acordo com Tomazelli e Villwock (2005), na Fig. 2 é possível verificar os sistemas deposicionais, do tipo laguna-barreira, responsáveis pela modelagem da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. A constituição do solo em estudo são depósitos eólicos na forma de cordões, cujos terrenos recentes compõe a barreira IV holocênica.

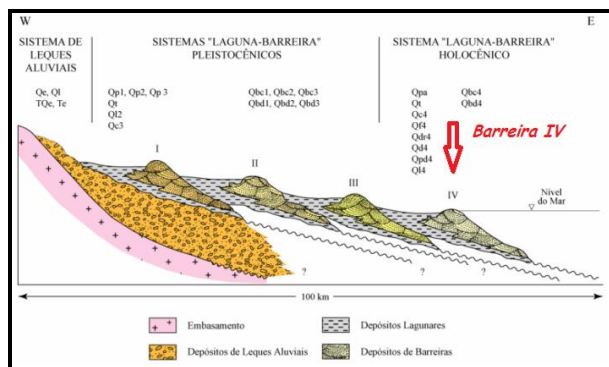


Figura 2. Perfil esquemático (W-E) transversal aos sistemas deposicionais da Planície Costeira do RS (TOMAZELLI e VILLWOCK, 2005)

O solo natural é um material de grande abundância e com baixo custo, porém também é um material extremamente heterogêneo, apresentando as mais diversas propriedades.

Com isso, o solo torna-se um elemento fundamental em obras de engenharia, recebendo grande atenção e necessitando uma análise criteriosa de suas características. Por muitas vezes, o solo local não satisfaz as necessidades estabelecidas em projeto, sendo necessário buscar alternativas que atendam essa demanda.

Os solos oriundos da região litorânea do Rio Grande do Sul se destacam pela sua baixa capacidade de suporte, mesmo quando compactados, não atendendo requisitos para o emprego como base e sub-base de pavimentos. Então, é preciso o estudo de técnicas alternativas que venham a atender as necessidades técnicas envolvidas no projeto.

Segundo Senço (1997), a camada de base se destina a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. O autor, por sua vez, determina diversas terminologias para composição de bases de pavimento onde se destacam: (a) solos estabilizados granulometricamente; (b) solos melhorados com cimento; (c) solos estabilizados com cimento (ou solo-cimento); (d) solos melhorados com cal; (e) solos estabilizados com cal (solo-cal); e (f) brita graduada com ou sem cimento. A partir das técnicas acima explicitadas podem-se perceber alguns aspectos positivos e negativos, com base na realidade geológica da região de estudo. Em relação às técnicas que fazem uso de rocha britada, destaca-se a possível satisfação do ponto de vista técnico, entretanto há um déficit no aspecto econômico, devido ao fato de que as jazidas de extração desse material se encontram em municípios vizinhos (região geomorfológica do Escudo Cristalino Sul-Rio-Grandense), e assim tem-se um acréscimo no custo das obras, em função do transporte desses materiais.

A região litorânea ainda apresenta limitações quanto ao uso de técnicas de estabilização a partir da adição de cimento e/ou cal devido ao solo da região ser

composto, predominantemente, por areia com baixa presença de finos (silte e argila). De acordo com Ruver *et al.* (2013), a estabilização de solos com adição de cimento necessita de teores acima de 10%, o que torna o método uma solução antieconômica. Já para a estabilização de solos com a adição de cal, não é possível a obtenção das reações pozolânicas, devido à ausência de argilominerais. Logo, torna-se necessária a adição de um material que, junto com a cal, gere as reações de estabilização. Nesse contexto, as cinzas podem vir a se apresentar como um recurso alternativo (PINTO, 1970; MALLMANN, 1996), podendo ser caracterizadas como adições pozolânicas.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015), material pozolânicos, ou pozolanas, como também são chamadas, se caracterizam como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, isolados, possuem baixa ou nenhuma propriedade aglomerante, apresentando propriedades ligantes na presença de água a partir da reação com hidróxido de cálcio. De acordo com a mesma norma, as pozolanas podem ser classificadas como pozolanas artificiais ou pozolanas naturais, sendo as pozolanas artificiais, materiais provenientes de tratamentos térmicos ou subprodutos industriais, com atividade pozolânica, enquanto que as pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica com atividade pozolânica.

O arroz é um dos principais cereais consumidos pela população mundial. Segundo Sosbai (2016), é o segundo cereal mais cultivado no mundo, ficando atrás somente do milho. O Brasil, por sua vez, toma destaque como o principal produtor entre os países ocidentais (BARATA, 2005), sendo 70% da produção orizícola nacional oriunda do estado do Rio Grande do Sul. Na etapa de beneficiamento dos grãos do arroz são gerados diversos resíduos, dentre eles se destaca a casca do arroz – CA (Fig. 3). A CA pode vir a

gerar grande impacto ambiental devido ao grande volume gerado, pela sua lenta biodegradação e por não ter valor comercial. Com isso, tem-se estudado uma melhor destinação para a CA, de forma a reduzir a poluição gerada pelo descarte inadequado do resíduo.



Figura 3. Casca de arroz

A CA, por sua vez, apresenta um aspecto positivo, o seu alto poder calorífico e, com isso, o material passa a se tornar um biocombustível. Segundo Pouey (2006), a CA naturalmente surgiu como combustível alternativo dentro da própria indústria de beneficiamento de arroz. O processo de queima da CA, por sua vez, gera um novo resíduo, a cinza da casca do arroz – CCA.

A CCA (Fig. 4) se apresenta como um material leve (em torno de 25% do peso da casca queimada), volumoso e altamente poroso. Esse novo resíduo gerado apresenta problemas quanto ao seu descarte, pois devido às suas características é necessário que esse material seja levado a aterros específicos. Entretanto esse processo envolve altos custos de transporte e, assim, a CCA muitas vezes acaba por ser descartada em locais indevidos.

A CCA recebe destaque devido a ser uma fonte renovável de sílica, contendo aproximadamente 95% de sílica (DALMOLIN, 1995 *apud* POUHEY, 2006). Então, passa a se apresentar como um recurso

alternativo em diversas áreas, em especial no campo da construção civil. Diversos autores relatam a viabilidade do uso de CCA como material pozolânico para aplicação em argamassas e concretos (PEREIRA, 2008; COLLATTO *et al.*, 2011; LUDWIG, 2014), bem como agente estabilizante de solos (DIAS, 2004; BEHAK, 2007; RUYER *et al.*, 2013), associada a adição de cal.

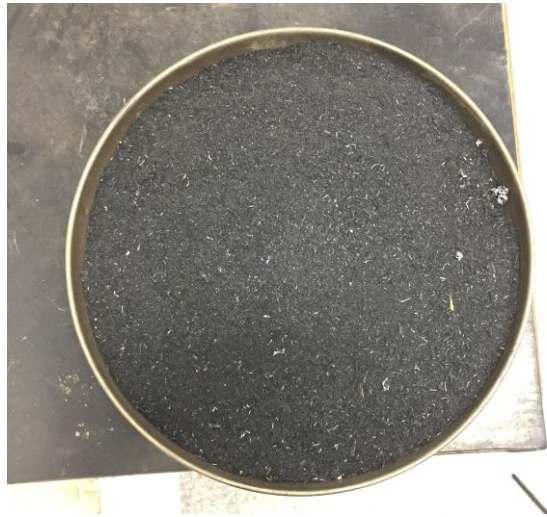


Figura 4. Cinza de casca de arroz

O estudo tem como foco analisar o comportamento mecânico de CCA residual e CCA tratada em laboratório, junto à cal para estabilização de solos arenosos, comparando os resultados com uma sílica comercializada para adições pozolânicas em concreto. Em suma, a pesquisa busca avaliar a resistência mecânica dos solos estabilizados para o emprego em camadas de pavimento.

2. MATERIAIS DO ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Geotecnia e Concreto professor Claudio Renato Rodrigues Dias da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, logo foi tomado o município de Rio Grande/RS como referência, optando-se pela utilização de materiais da região. Para o estudo foram utilizados: (a) areia dos

depósitos arenosos superficiais da barreira IV; (b) CCA originada de caldeiras de uma empresa do polo industrial do município; (c) sílica comercial de uso em concreto; (d) e cal hidratada comercializada na região.

A areia empregada foi extraída de uma jazida situada na localidade do Povo Novo, no interior da cidade do Rio Grande/RS.

A cinza – CCA *in natura* – é originária de uma indústria graneleira do polo industrial de Rio Grande. A empresa utiliza a CA como biocombustível para geração de energia através de uma caldeira a vapor. O processo de queima do material na caldeira é realizado de forma automatizada, conforme a demanda produtiva cresce mais material é adicionado à caldeira para uma maior geração de energia. Entretanto, o processo de queima acaba por não ter um tempo de queima controlado, bem como, a temperatura interna da caldeira é instável ficando na faixa de 200°C a 300°C. Devido a esses fatores, a CCA gerada no processo se caracteriza como um material de cor escura que, segundo Rodrigues (2008), indica presença elevada de matéria orgânica. Também é possível perceber a presença de casca não queimada no resíduo.

De modo geral, pode-se dizer que CCA *in natura* gerada nesse processo industrial é um material heterogêneo. Logo, são necessárias técnicas que venham a buscar a uniformidade desse resíduo e a redução dos aspectos negativos citados. Pouey (2006) relata a possibilidade de utilização de tratamentos físicos, químicos e térmicos sobre a CCA, a fim de buscar a homogeneização da mesma. A partir desse estudo, optou-se pela aplicação de tratamento térmico e, posteriormente, tratamento físico sobre a CCA *in natura* a fim de avaliar a viabilidade técnica dos processos na estabilização de solos.

Conforme Behak (2007), a calcinação da CCA *in natura* em altas temperaturas contribui para a diminuição da parcela de matéria orgânica do material. Com base no

autor e em contribuições de Pouey (2006), optou-se pela aplicação de tratamento térmico a uma temperatura constante de 600°C em um tempo controlado de 3 horas. Esse processo foi realizado em um forno elétrico tipo mufla (Fig. 5). O resultado do procedimento foi uma CCA tratada termicamente – CCAT – que apresentou coloração mais clara, em relação à CCA *in natura*, e sem a presença visível de material orgânico residual.



Figura 5. Forno elétrico tipo mufla

A partir do tratamento térmico do material, iniciou-se a fase de tratamento físico. O tratamento físico busca a diminuição do tamanho dos grãos de CCA que, conseqüentemente, aumenta a superfície específica do material e, por fim, eleva sua reatividade. O procedimento foi executado em um moinho de bolas (Fig. 6) em um tempo controlado de 2 horas, utilizando relação entre material moído e corpos moedores de 1:5.

Por fim, obteve-se uma CCA tratada termicamente e fisicamente - CCATF - de granulometria muito mais fina, em relação à CCA *in natura* e a CCAT, tendo 100% do material passante na peneira #200. A Fig. 7 apresenta os três materiais em estudo (CCA *in natura*, CCAT e CCATF), onde é possível perceber visualmente a influência dos tratamentos térmico e físico sobre cada amostra.



Figura 6. Moinho de bolas (esquerda) e corpos moedores (direita)



Figura 7. CCA *in natura* (esquerda), CCAT (meio) e CCATF (direita)

Foi utilizada uma sílica verde de casca de arroz para alto desempenho no concreto – SV, da empresa Ekosil. A sílica é um produto obtido a partir da calcinação controlada da casca de arroz, sendo posteriormente submetida a tratamentos industriais de modo que o material garanta características físicas e químicas de alto desempenho para a aplicação em concretos, argamassas e outros materiais cimentantes. As características da SV são apresentadas na Tabela 1. A sílica verde nesse estudo tem como finalidade traçar um comparativo entre um material industrial (SV), próprio para uso comercial, com um resíduo agroindustrial, em sua forma *in natura* e com beneficiamentos realizados em laboratório (CCA *in natura*, CCAT e CCATF).

Tabela 1. Características da SV

Características	Análise
Óxido de sílica (SiO ₂)	91,20%
Perda ao fogo	5,50%
Diâmetro médio de grão	21,24µm

A cal utilizada para o estudo, da empresa Dagoberto Barcelos (DB), é um produto comum no comércio de materiais de construção no município. Segundo Dagoberto Barcelos (2019), o material é uma cal dolomítica bi-hidratada e suas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características da cal hidratada

Características	Análise
Classificação normativa (NBR 7175/2003)	CH-II
Densidade aparente	0,7 g/cm ³
Óxidos totais	88%
Óxidos não hidratados	15%
Retido em #30 (0,600 mm)	0,5%
Retido em #200 (0,075 mm)	15%
Plasticidade	110%
Cor	Branca

3. MÉTODOS EMPREGADOS

Definidos os materiais necessários para o estudo, iniciaram-se os ensaios de caracterização com os mesmos. Foram realizados ensaios de caracterização para a areia, a CCA *in natura*, a CCAT e a CCATF.

Primeiramente, deu-se início a determinação de umidade dos materiais pelo método da estufa, seguido da determinação da densidade real dos grãos, a partir do ensaio de picnômetro (segundo NBR 6508/84 – ABNT 2016a), e da análise granulométrica através

dos peneiramentos grosso e fino e do ensaio de sedimentação (segundo NBR 7181/16 – ABNT 2016b). Os ensaios citados são ensaios voltados para solos, entretanto optou-se pela aplicação dos mesmos também para as cinzas (CCA *in natura*, CCAT e CCATF).

Caracterizados os materiais, foi realizado o estudo de dosagens para as misturas. A ABNT não apresenta nenhuma normatização relacionada a misturas solo-cal, nem tanto relacionada a misturas solo-cinza-cal.

De acordo com a NBR 12253 (ABNT, 2012b), para aplicação de solos estabilizados com cimento para camadas de pavimento, são exigidos teores de cimento Portland que atinjam a resistência à compressão simples mínima (RCS) de 2,1 MPa para um tempo de cura de 7 dias. O estudo das misturas areia-cinza-cal foi realizado com a supracitada norma. Sabendo que as reações pozolânicas da cal são mais lentas em relação às reações do cimento, foi estipulado tempo de cura de 28 dias para atingir a RCS mínima de 2,1 MPa.

De acordo com Ruver *et al.* (2013) a dosagem do traço areia-cinza-cal deve ter uma proporção tal que potencialize as reações pozolânicas e diminua o índice de vazios do material estabilizado. Dias (1997) realizou misturas experimentais nas proporções entre cinza:cal de 3:1 e 4:1 em substituição ao peso da areia entre 12% e 40%. A partir disso, conclui que os melhores resultados foram apresentados para a mistura cinza-cal de 1:3 para 72% de areia em relação total. Por fim, foi definida uma dosagem de 72% de areia e 28% da mistura cinza-cal. Para a mistura cinza-cal, adotou-se a relação 3:1 para o uso da CCA *in natura*, CCAT e CCATF.

Já a SV destaca-se pelo índice de atividade pozolânica (IAP) consideravelmente alto, sendo superior a 130% (EKOSIL, 2019), enquanto que para as demais cinzas estudadas (CCA *in natura*, CCAT e CCATF) estima-se, com base em estudos realizados por Pouey (2006), que o IAP se encontre na faixa de 80%

a 100%. Logo, admitiu-se a hipótese de que o alto IAP pode resultar em uma mistura em que as reações pozolânicas sejam tão intensas que toda a cal hidratada reaja com a SV e, por fim, ainda reste material pozolânico na mistura. Então, optou-se pela diferenciação da relação cinza-cal em misturas com SV, adotando o traço padrão de 3:1 e ainda os traços 2:2 e 1:3.

Foram definidas seis misturas para estudo. Sendo quatro misturas de mesmo traço, porém com alteração da cinza utilizada, enquanto que as outras duas misturas recebem uma alteração na relação cinza-cal. Para as misturas que utilizaram SV e tiveram alteração do traço padrão, foi adicionada a relação cinza-cal na nomenclatura. Sendo assim, tem-se:

Mistura 1 (M1): Areia-CCA *in natura*-Cal

Mistura 2 (M2): Areia-CCAT-Cal

Mistura 3 (M2): Areia-CCATF-Cal

Mistura 4 (M2): Areia-SV31-Cal

Mistura 5 (M2): Areia-SV22-Cal

Mistura 6 (M2): Areia-SV13-Cal

Definidas as misturas, foram realizados os ensaios Proctor de compactação com a finalidade de determinar os pesos específicos secos máximos e os teores de umidade ótima de cada uma das misturas. Os ensaios foram realizados na energia normal, logo, conforme especifica a NBR 12023 (ABNT, 2012a), foi necessário o uso de cilindro de compactação pequeno (diâmetro 10 cm e altura 12,71 cm), com soquete pequeno (massa 2,5 kg e altura de queda 30,5 cm).

Com base nos dados obtidos no ensaio Proctor de compactação, cada mistura foi colocada na sua respectiva umidade ótima para a moldagem dos corpos de prova que, posteriormente, foram submetidos aos ensaios de compressão simples. Os corpos de prova foram moldados utilizando um molde de aço tripartido (diâmetro 5 cm e altura 10 cm) e o mesmo soquete pequeno. O material foi compactado em três camadas, sendo aplicados cinco golpes por camada. A Figura 8 apresenta o corpo de prova moldado. Após moldagem,

cada corpo de prova foi colocado em um saco plástico, a fim de evitar a perda de umidade por evaporação e a carbonatação superficial dos mesmos. Os corpos de prova foram mantidos na câmara úmida do laboratório, de modo a manter a temperatura média de 20°C, sob umidade higroscópica elevada. Foram moldados três corpos de prova para cada idade de cura de cada mistura.

Para as misturas M1, M2 e M3 foram avaliados os tempos de cura de 7, 14, 28 e 90 dias, com a finalidade de verificar a RCS mínima no tempo estipulado e também analisar o ganho de resistência no tempo além dos 28 dias de cura. Para as misturas M4, M5 e M6 foram avaliados os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Com isso, foram moldados 12 corpos de prova para cada uma das misturas M1, M2 e M3, e 9 corpos de prova para cada uma das misturas M4, M5 e M6.



Figura 8. Corpo de prova moldado

Num período de 24 horas antes de cada ensaio de compressão simples os corpos de prova foram retirados dos sacos plásticos e imersos em água. Esse procedimento tem a finalidade de saturar os corpos de prova e,

com isso, eliminar os efeitos de coesão aparente sobre a resistência medida.

Os ensaios de compressão simples foram executados em uma prensa eletro-hidráulica com velocidade constante de 1,00 mm/min, utilizando uma célula de carga de 50 kN para a medida da força média aplicada e um transdutor de deslocamento tipo LVDT para a quantificação da deformação vertical. A leitura dos instrumentos foi realizada por um sistema de aquisição de dados Spider® da HBM. A Fig. 9 ilustra a execução do ensaio.



Figura 9. Execução do ensaio de RCS

A RCS de cada mistura em cada idade é definida a partir da média dos três resultados individuais ensaiados.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios de determinação do teor de umidade higroscópica e de peso específico dos grãos para a areia, CCA *in natura*, CCAT e CCATF são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Teor de umidade e peso específico dos grãos dos materiais

Material	w (%)	γ_s (gf/cm ³)
Areia	0,20	2,64
CCA <i>in natura</i>	4,00	2,23
CCAT	0,29	2,11
CCATF	0,48	2,18

A curva granulométrica da areia é apresentada na Fig. 10. A partir dos resultados obtidos e com base na NBR 6502 (ABNT, 1995) foi possível caracterizar esse material como uma areia, uniforme e mal graduada.

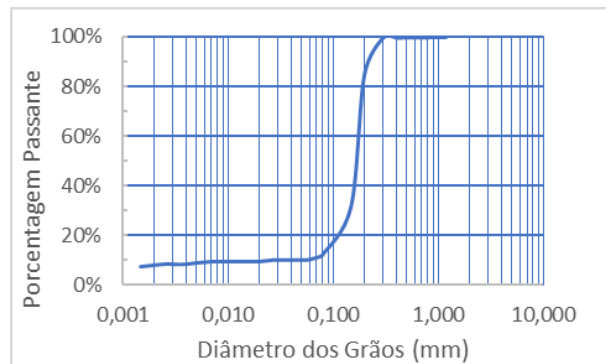


Figura 10. Curva granulométrica da areia

A Tabela 4 apresenta as frações granulométricas e a classificação geotécnica da areia. Cabe destacar que o solo é não plástico (NP) não sendo possível a obtenção de limites de Atterberg.

Tabela 4, Frações granulométricas e classificação geotécnica da areia

Composição granulométrica	
Pedregulho	0,0%
Areia	88,8%
Silte	3,5%
Argila	7,7%
Classificação geotécnica	
HRB	A-2-4 (0)
SUCS	SP

Para as cinzas estudadas, os resultados obtidos no ensaio de sedimentação não se

mostraram compatíveis. Acredita-se que para as cinzas não se aplique a hipótese da lei de Stokes, que considera o grão do material como uma esfera perfeita caindo em um meio aquoso. Logo, analisaram-se somente os dados obtidos nas etapas de peneiramento. A CCA *in natura* e a CCAT apresentaram resultados muito próximos, com isso pode-se concluir que o tratamento térmico não alterou a granulometria do material. A Figura 11 ilustra a curva granulométrica da CCA *in natura*. Já a CCATF teve toda amostra passante na peneira #200, com isso não possível fazer uma avaliação por peneiramento da granulometria desse material segundo a NBR 7181/16.

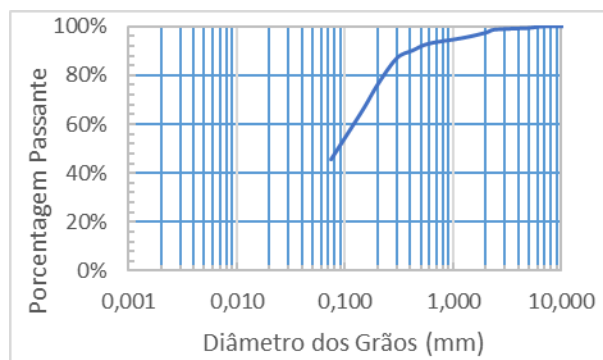


Figura 11. Curva granulométrica CCA *in natura*

Na determinação do teor de umidade ótima ($w_{ótima}$) e peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dmáx}$), a partir do ensaio Proctor de compactação, além das seis misturas estudadas, o mesmo ensaio foi realizado para a areia. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Percebe-se que os resultados dos ensaios de compactação diferenciam-se em função do tipo de mistura. As misturas M3, M4, M5 e M6 apresentam teores de umidade ótima mais próximos ao da areia e mais baixos em relação às misturas M1 e M2. Isso se deve ao fato de que essas misturas são compostas por cinzas de granulometria mais fina, que melhor preenchem os vazios da areia e, por sua vez, reduzem o espaço disponível para a água.

Tabela 5. Parâmetros de compactação da areia e misturas

Mistura	W ótima (%)	γ_d máx (gf/cm ³)
Areia	11,0	1,74
M1	26,5	1,33
M2	23,4	1,39
M3	15,0	1,67
M4	14,4	1,68
M5	14,3	1,68
M6	15,2	1,74

Os resultados de RCS são apresentados na Tabela 6 e ilustrados na Figura 12.

Tabela 6. Resultados de RCS (em MPa)

Idade (dias)		7	14	28	90
RCS (MPa)	M1	0,05	0,08	0,10	0,11
	M2	0,06	0,18	0,44	0,51
	M3	0,38	1,30	3,31	5,05
	M4	0,40	1,40	2,92	--
	M5	0,27	1,01	2,24	--
	M6	0,33	0,77	1,16	--

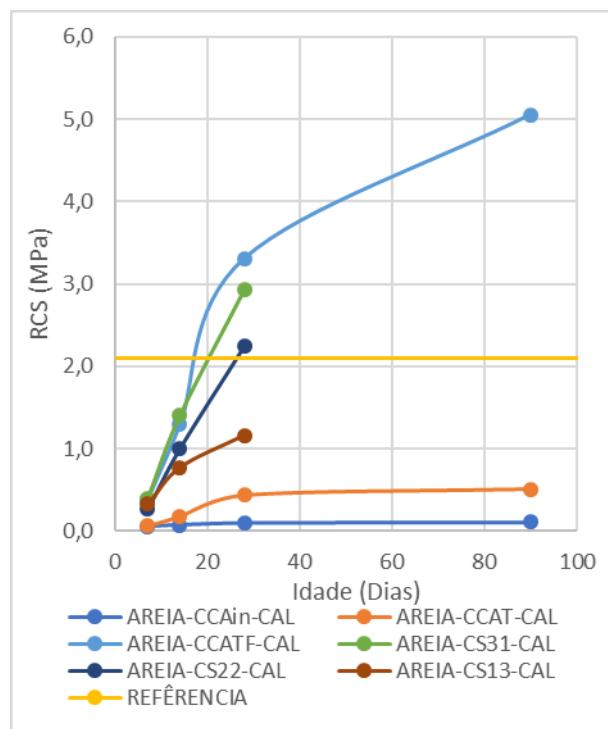


Figura 12. Curva RCS x Tempo

Com base nos dados Tabela 6, foi estipulado um comparativo percentual da RCS das misturas analisadas com relação a RCS mínima de 2,1 MPa. Os dados constam na Tabela 7 e Figura 13.

Tabela 7. RCS mistura/RCS referência (em %)

Idade (dias)		28
$\frac{RCS_{mistura}}{RCS_{referência}}$ (%)	M1	4,83
	M2	20,79
	M3	157,67
	M4	139,21
	M5	106,79
	M6	55,33

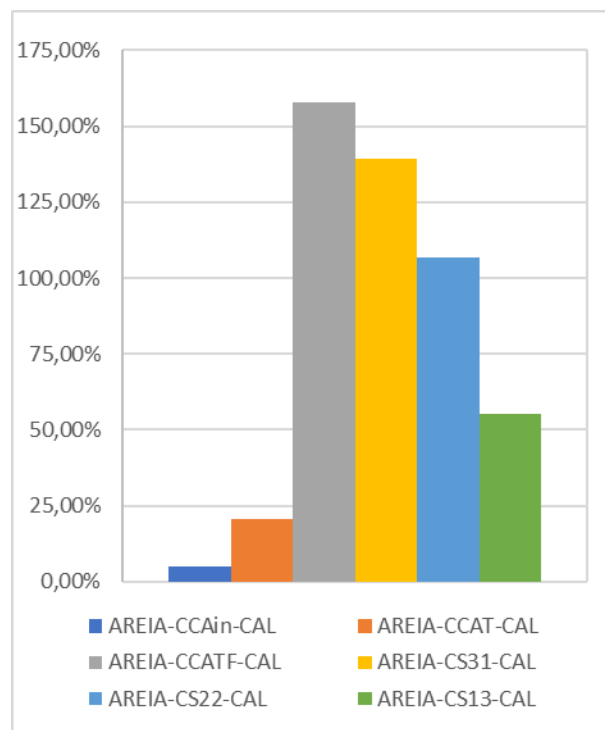


Figura 13. $\frac{RCS_{mistura}}{RCS_{referência}}$

5. CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado é possível concluir que:

- O tratamento térmico à cinza da casca de arroz gerou um material mais reativo, a mistura M2 apresentou mais resistência do que a M1, entretanto não

atingiu a RCS mínima de 2,1 MPa na idade de 28 dias de cura;

- O tratamento físico aplicado após o tratamento térmico gerou um material bem mais reativo, apresentando uma mistura M3 com uma RCS muito mais elevada do que aquelas verificadas para as misturas M1 e M2. Com isso, conclui-se que o tratamento físico é procedimento crucial para ganho de resistência;
- As misturas M3, M4 e M5 verificaram a RCS mínima desejada para a idade de 28 dias de cura. A partir do critério estabelecido no trabalho, essas misturas se apresentam como alternativa na composição de camada de base para pavimentação;
- Analisando as misturas M4, M5 e M6 verificou-se a maior resistência para a mistura M4, entretanto a mistura M5 atingiu a RCS mínima na idade de cura desejada. Logo, pode-se assumir que com a sílica comercial a relação cinza-cal 2:2 é suficiente para verificar a RCS mínima;
- A cinza residuária CCATF (M3) apresenta desempenho superior às sílicas comerciais (M4, M5 e M6), apontando que um beneficiamento junto à geração do resíduo pode torná-lo um produto altamente atraente na estabilização de solos com cal.

6. TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos, a pesquisa apresenta possíveis aspectos a serem analisados no futuro:

- Aplicação de tratamento físico em CCA in natura a fim de avaliar sua aplicação em misturas areia-CCAF-cal;
- Análise das misturas M3, M4 e M5 a partir de métodos mecanísticos para a aplicação dos materiais como

composição de camadas para pavimentação;

- Avaliação do emprego das misturas M3, M4 e M5 em outras aplicações, como em camadas de reforço para assentamento de fundações superficiais;
- Analisar o ganho de RCS para misturas areia-cinza-cal em idades mais avançadas (de até 180 e 300 dias de cura), de modo a verificar a idade em que cessam as reações pozolânicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao corpo técnico do Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG, em especial aos engenheiros Celso Luis da Silva Pedreira e Luciano Lopes da Silva e aos acadêmicos Daniel Gautério Gonçalves da Silva e Danilo Braga Souza, pelo apoio ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT . Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica: NBR 6508**. Rio de Janeiro. 8p. 1984.
- ABNT . Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo – Análise granulométrica: NBR 7181**. Rio de Janeiro. 12p. 2016.
- ABNT . NBR 6502: **Rochas e Solos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 18. 1995.
- ABNT . NBR 12023: **Solo-cimento – Ensaio de compactação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 7. 2012a.
- ABNT . NBR 12253: **Solo-cimento – Dosagem para emprego de camada de pavimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 4. 2012b.
- ABNT . NBR 12653: **Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 6. 2014
- BARATA T. S. **Caracterização do consumo de arroz no Brasil: um estudo na região metropolitana de Porto Alegre**. 2005. 187 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) – CEPAN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.
- BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. 2007. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, 171p.
- CLOSS, D. Estratigrafia da Bacia de Pelotas. 1970. **Iheringia**, Porto Alegre/RS, Brasil, n.3, p. 3-76.
- COLATTO, D.; VIECILI, F. A.; ARNDT, J. A.; JESUS, R.T. Utilização da sílica da casca de arroz na produção de concreto usinado em central. In: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 2011. **Anais...**, Florianópolis/SC, 11p.
- DAGOBERTO BARCELLOS (DB). **Certificado de análise (F-054) – Cal hidráulica Primor**. Caçapava do Sul/RS, 2012.1p.;
- DIAS, C. R. R. **Estudo da utilização da cinza de carvão mineral na construção civil**. 1997. Relatório Técnico. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), Rio Grande/RS, 135p.
- DIAS, C. R. C. **Estudo de misturas de areia-asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentos urbanos**. 2004. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio

Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, 127p.

EKOSIL. Sílica no Concreto – Sílica verde de casca de arroz para alto desempenho no concreto. Disponível em:

<<https://ekosil.com.br/veraplicacao/1/s%C3%8Dlica-no-concreto>>. Acesso em 12 abril. 2019.

LUDWIG, D. G. **Concreto com adição de Cinza de Casca de Arroz.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado/RS, 59p.

MALLMANN, J. E. C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia.** 1996. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, 164p.

PEREIRA, I. G. **Cinza de Casca de Arroz – Uma adição sustentável.** 2008. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto – Portugal, 134p.

PINTO, S. **Estabilização de areia com adição de cal e cinza volante.** 1971. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio De Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ, 153p.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, 345p.

RODRIGUES, M. S. **Caracterização de cinza residual da queima de arroz para a produção de argamassa.** 2008. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.

RUVER, C. A.; MACHADO C. R.; BASTOS C. A. B.; DIAS C. R. R. Viabilidade técnico-econômica da areia eólica estabilizada com agentes aglomerantes para emprego em pavimentação. 2013. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 13, n. 21, p.13-24.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Hipsometria e unidades geomorfológicas.** Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/hipsometria-e-unidades-geomorfológicas>>. Acesso em 5 nov. 2018.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 1a ed. São Paulo: PINI, 2001. 671 p.

SOSBAI. **Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil.** In: XXXI REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO, 200., 2016. Bento Gonçalves/RS. **Anais...** Bento Gonçalves/RS: SOSBAI, 2016.

TOMAZELLI L. J.; VILLWOCK, J. A. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. 2005. **Gravel**, Porto Alegre/RS, n.3, p. 109-115.