

ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM CINZA DA CASCA DE ARROZ PARA A UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTO

Lorran Jaines (1), Pedro Arns (2).
UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)lorranjaines@hotmail.com, (2)par@unesc.net

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo verificar a viabilidade da estabilização de um solo de classificação A 2-4 com cinza de casca do arroz (CCA) para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Foram estudadas misturas de solo com dosagens de CCA de 5 %, 10 % e 15 % em peso. As amostras foram compactadas nas energias de compactação Proctor Normal (PN) e Intermediário (PI) e foram submetidas a ensaios de expansão e medição do Índice de Suporte Califórnia (ISC). Também foi variado o tipo de tratamento dado as amostras antes da realização destes ensaios. Um grupo de amostras ensaiou-se após 96 horas de submersão; um segundo grupo foi ensaiado após exposição ao ar livre durante 7 dias com posterior submersão; e um terceiro agrupamento de corpos de prova foi ensaiado apenas após 7 dias de exposição ao ar livre sem submersão. Os resultados obtidos permitiram concluir que o solo aditivado com três porcentagens de CCA consegue atingir valores de expansão menores que 1%, em quaisquer das condições testadas (energia de compactação e tratamento das amostras), cumprindo os requerimentos para material de camadas de base e sub-base. Com respeito ao valor do ISC, foram obtidos valores maiores para as amostras compactadas na energia PI devido a serem amostras com maior massa específica seca aparente. A exposição das amostras ao ar livre não promoveu significantes ganhos de resistência, indicando assim a ausência de reações pozolânicas entre o solo e a CCA. Os maiores valores de ISC foram observados em amostras sem submersão, nas quais não acontece saturação dos poros com água responsável por menores valores de ISC.

Palavras chave: Solo, cinza da casca do arroz, dosagens, ISC, base, sub-base.

1. INTRODUÇÃO

Em função dos altos custos dos materiais utilizados na pavimentação, como também os grandes impactos ambientais, e da falta de recursos na grande maioria dos órgãos públicos contratantes, é cada vez mais necessário, buscar alternativas no melhoramento dos solos, para redução dos custos finais da pavimentação (CORRÊA 2015).

Uma das alternativas é o uso da reciclagem e incorporação de resíduos industriais, como novos produtos ou componentes que têm se intensificado nos últimos anos no

Brasil. A principal justificativa na utilização destes resíduos é a minimização dos problemas ambientais e econômicos, causados pela sua disposição, tais como: ocupação de espaço, custo do recolhimento, processamento e degradação dos recursos naturais (MEDEIROS 2010). Segundo Saraiva (2006), dentro desse contexto, a adoção de materiais alternativos de inserção regional que, mesmo não se enquadrando totalmente as condicionantes normativas, assegurem um desempenho estrutural muito satisfatório, quando comparado aos sistemas usuais, pode ser utilizada sem maiores restrições.

Na região sul catarinense, os resíduos que se destacam são as cinzas produzidas pela mineração do carvão mineral, as quais segundo alguns autores demonstraram serem viáveis a sua utilização para uso rodoviário, pois apresentaram características mecânicas adequadas, a também a cinza da casca de arroz (CCA) produzida durante o processo de beneficiamento do arroz (BONFANTE 2015). Conforme Viel (2012), a casca do arroz é um material fibroso e com alto teor de sílica, de difícil degradação, sendo problemático o seu depósito final, devido ao grande volume. Permanecendo inalteradas, suas características físicas e químicas por longo tempo, causando grandes danos ao meio ambiente. Busca-se reduzir os volumes da casca do arroz, através da técnica de incineração da mesma, produzindo um novo subproduto residual a CCA. Segundo Viel (2012, apud Della, 2005), para cada tonelada de arroz produzida: 23% é casca e deste, 4% é CCA. O estado de Santa Catarina, segundo maior produtor nacional de arroz, quantificou uma produção de 1.054.768 toneladas no mês de Março de 2016 (IBGE 2016). Baseando-se nesta hipótese seriam produzidas 9.703,87 toneladas de cinza da casca de arroz no estado ao mês, projetando para 12 meses atinge-se 116.446,44 toneladas. Dessa maneira com este resultado é clara a diminuição do impacto do resíduo se houver um destino correto para o mesmo. O destino do material vem sendo utilizado como solução para diversos processos, por exemplo, como agente estabilizante de solos (BEHAK 2007).

A adição de CCA aos solos apresenta vantagens como permitir melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos, habilitando seu emprego como materiais em pavimentos (BEHAK 2007). Estudos anteriores demonstraram que um solo arenoso misturado com CCA e cal vêm obtendo grande resultados na estabilização do solo. Segundo Bonfante (2015), o incremento do Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo arenoso estudado é significativo. A causa do incremento se

deve as reações pozolânicas entre a sílica da CCA e a cal que produzem melhoria na capacidade de suporte do solo estabilizado. A composição da cinza é cerca de 90 % sílica, ou seja, ao entrar em contato com água e a cal ocorre a pozolana. Uma técnica a qual pode substituir a clássica estabilização do solo feita com cimento Portland misturado com cal.

A partir destes resultados o presente trabalho buscou a estabilização do solo com a mistura do resíduo agrícola CCA sem a adição da cal, tornando a técnica mais benéfica ao meio ambiente. Segundo Behak (2007, apud Rahman, 1986), a adição unicamente de CCA produz melhorias na resistência do solo devido a efeitos de correção granulométrica do que propriamente a reações pozolânicas as quais não podem ocorrer devido à falta da presença da cal. O estudo realizado por Behak (2007, apud Muntohar e Hantoro, 2000), concluiu que o acréscimo na resistência a compressão simples do solo foi devido ao incremento no valor do ângulo de atrito interno quando o solo é misturado com a CCA.

O solo, objeto do estudo, foi coletado de um talude de corte da Rodovia SC-446, com as coordenadas 28°29'56,11"S e 49°27'36,04"O, localizado no município de Treviso-SC. Após a coleta, o material foi encaminhado ao Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT), localizado no Parque Científico e Tecnológico (I-PARQUE) pertencente à Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), onde se iniciou todo o processo de caracterização do material.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar a melhor dosagem do solo aditivado com CCA para se utilizar como camada de pavimento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterização física do solo coletado e a CCA;
- Caracterização química do solo coletado e a CCA;

- Dosagem de misturas de solo com adição de cinza da casca de arroz em três proporções;
- Determinação do grau de compactação na energia de Proctor Normal e Intermediário, a umidade ótima e a massa específica seca do solo sem adição dos resíduos;
- Determinação o Índice Suporte Califórnia (ISC) do solo sem e com adição do resíduo CCA, utilizando-se de três processos diferentes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado de um talude de corte da Rodovia SC-446, no município de Treviso, região sul do estado de Santa Catarina. A extração da amostra do solo ocorreu com auxílio da Construtora Confer que forneceu a escavadeira hidráulica. As amostras foram colocadas em sacos plásticos, com objetivo de evitar a contaminação do material, e levadas até o LMS do IDT. Iniciou-se o processo de secagem, destorroamento e peneiramento para os ensaios necessários para o estudo proposto. A figura 1 mostra por meio da imagem de satélite a localização da extração do solo estudado.

Figura 1: Localização do talude de corte da Rodovia SC - 446.



Fonte: Google Earth. Acesso em: 31 mai. 2016.

A figura 2 exibe o solo no local de extração e após ter sido peneirado, conduzido a estufa e identificado no LMS.

Figura 2: Vista frontal do talude; solo seco e peneirado.



Fonte: Do autor (2016)

2.1.2 Cinza da casca de arroz

A cinza de casca de arroz utilizada no presente estudo foi fornecida pela empresa Festicasca de Substrato, localizada no bairro Morro Chato, no município do Turvo, região sul do estado de Santa Catarina. Foi utilizado apenas um tipo casca de arroz que recebeu um processo de moagem antes da incineração. Depois de moída, foi submetida ao processo de queima tornando-a cinza, pelo período de aproximadamente de 10 horas, sem temperatura controlada, que no final resultou numa cinza de coloração mais clara, com alguns pontos escuros indicando resquícios da queima. O processo como um todo é bastante simples, não existindo uma preocupação de limpar o forno antes de iniciar outra queima. A temperatura, provavelmente, atingiu temperaturas máximas entre 500°C e 800 °C, podendo não manter-se nestes valores por perder calor pela simplicidade do processo e do tipo de material que é feito o forno. A figura 3 exibe o resultado do processo da queima da casca do arroz.

Figura 3: CCA



Fonte: Do autor (2016)

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Caracterização física do solo coletado

Para a caracterização do solo foram realizados os seguintes ensaios físicos: Limite de Liquidez (LL – NBR 6459:1984), Limite de Plasticidade (LP – NBR 7180:1984), análise granulométrica (NBR 7181:1987). De posse dos resultados classificou-se o solo conforme a High Research Board (HRB).

2.2.2 Caracterização química do solo e da CCA

Para a análise química do solo e da CCA, foram encaminhadas amostras de 80 g e 500 g, respectivamente, para o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI). A análise foi feita através da espectrometria de fluorescência de raios x (FRX) e espectrometria de absorção atômica, no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização dos Materiais (LDCM), com um espectrômetro de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF). Os ensaios determinaram os teores dos compostos químicos presentes nas amostras estudadas. O objetivo deste ensaio foi quantificar o percentual de sílica da CCA e quais compostos existentes no solo coletado. Para constatação uma eventual melhora nas características mecânicas da mistura através da reação entre a CCA e o solo.

A difração de raios X (DRX) ocorreu visando determinar as espécies cristalinas da CCA estudada. A análise foi realizada com a amostra da CCA passada na peneira nº 200 (#0,075 mm), cerca de 100 g.

2.2.3 Dosagem e Mistura

Foram feitas três combinações do solo coletado com a cinza CCA estudada, e uma sem adição. Procurou-se saber qual das misturas do solo e CCA provocaria a melhor reação. Bonfante (2015), em sua pesquisa utilizou a cal como agente estabilizante e definiu uma porcentagem fixa da CCA. No presente trabalho não se adicionou cal, sendo assim, o número de misturas foram maiores, buscando-se a obtenção da melhor dosagem da CCA como estabilizante do solo. As dosagens definidas para o presente estudo são nomeadas e demonstradas através tabela 1.

Tabela 1: Percentuais das dosagens utilizadas

Nomeclatura	Solo [%]	CCA [%]
SOLO100	100	0
CCA5	95	5
CCA10	90	10
CCA15	85	15

Fonte: Do autor (2016)

O solo e a CCA foram secos na estufa do LMS. A precisão da balança que pesou os materiais foi de 0,01g. Os teores da CCA foram definidos em relação ao peso do solo seco. A homogeneização dos materiais ocorreu de forma manual com o material no estado seco, embalados em sacos plásticos, para serem utilizadas nos ensaios de compactação e de Índice de Suporte Califórnia (ISC).

2.2.4 Ensaio de compactação

Inicialmente foi realizado o ensaio de compactação do solo no seu estado natural, nas energias de compactação Proctor Normal (PN) e Intermediário (PI), de acordo a NBR 7182:1986, para a obtenção do teor ótimo de umidade.

2.2.5 Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Para determinação do ISC, moldaram-se corpos de prova nas energias PN e PI, nas respectivas umidades ótimas, obtidas no ensaio de compactação. Com tal característica moldaram-se corpos de prova, em seu estado natural, e nas misturas com CCA pré-definidas, para verificação do comportamento do solo aditivado, com relação ao seu ISC.

Conforme o que estabelece a NBR 9895:1987 os corpos de prova permaneceram submersos pelo período de 96 horas. Fugindo ao que determina a norma citada acima, o presente estudo propôs mais duas formas de análise do comportamento do solo com a CCA. Para a verificação da ocorrência de uma possível reação química do solo moldaram-se corpos de prova que ficaram expostos ao tempo, pelo período de 7 dias, que posteriormente ao cumprimento do período de exposição os corpos

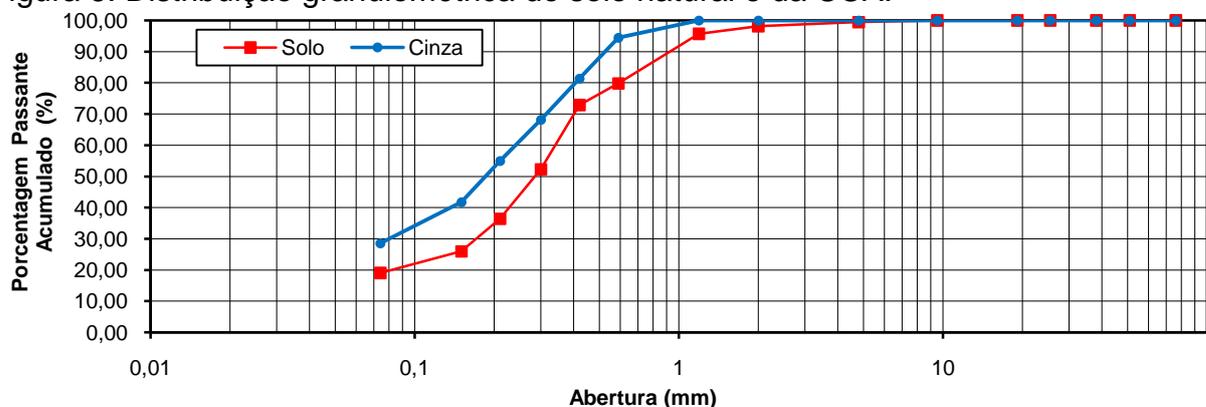
de prova foram encaminhados a submersão de 96 horas. Sendo assim, se os resultados do ISC obtidos forem superiores, ao da análise segundo a norma, houve o início de uma possível cura da mistura do solo com a CCA. A segunda proposta de análise, além da norma, da presente pesquisa foi novamente posicionar os corpos de prova durante 7 dias de exposição ao tempo, todavia não levar posteriormente a submersão. Este procedimento, não previsto em norma, foi realizado buscando reproduzir o que acontece em campo, quando se executa uma camada de pavimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 GRANULOMÉTRIA

Na figura 6, estão representados as curvas granulométricas do solo natural e da CCA.

Figura 6: Distribuição granulométrica do solo natural e da CCA.



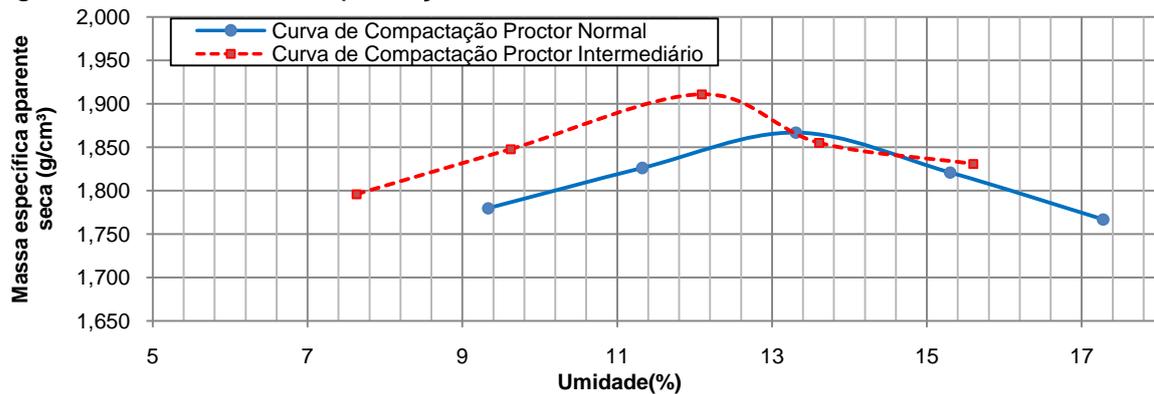
Fonte: Do autor (2016)

A CCA e o solo coletado apresentaram uma curva granulométrica fina. Nota-se na figura 6 que a CCA é um material ainda mais fino se comparado ao solo. E, de acordo a classificação HRB o solo foi definido como A 2-4.

3.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Na figura 7 constamos as curvas de compactação do solo natural nas energias PN e PI.

Figura 7: Curvas de compactação



Fonte: Do autor (2016)

Os resultados encontrados de massa específica aparente seca máxima e os teores de umidade ótima ($w_{ót}$) foram respectivamente 1,867 g/cm³ e 13,3 %, no PN, e 1,911 g/cm³ e 12,0 %, no PI.

3.3. ANÁLISE QUÍMICA

3.3.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) da CCA

Conforme a pesquisa prévia de Nascimento (2011), a composição química da cinza da casca do arroz varia de acordo com o manejo e cultivo do arroz, em função do tipo e quantidade de fertilizante utilizado na plantação, das condições climáticas durante os meses de cultivo e, também do tipo de arroz escolhido. A tabela 2 apresenta os teores dos compostos químicos presentes na CCA, determinados pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios x (FRX).

Tabela 2: Resultados do FRX da CCA

Elementos	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Perda Fogo
Teor (%)	0,12	93,59	*	0,69	0,94	0,13	0,13	0,18	1,69	0,56	1,79

Fonte: Do autor (2016)

*Valores menores que 0,05%

O elemento majoritário, fornecido através do ensaio, da composição foi o teor de sílica. Além deste elemento de maior percentual, verificaram-se pequenos percentuais de fósforo, potássio, magnésio e cálcio. E os demais elementos da amostra apresentaram traços abaixo de 0,20%. Todos os elementos encontrados na amostra estavam na forma de óxidos, ou seja, todos com a presença de oxigênio.

Segundo Nascimento (2011), os percentuais presentes de P_2O_5 e K_2O são oriundos de fertilizantes tradicionais utilizados para a correção de pH e adubação do solo na plantação do arroz, e os demais minerais são provenientes das impurezas do solo.

A temperatura e o tempo de queima são fatores essenciais para definir o teor de sílica na CCA, bem como a moagem da amostra. Conforme a pesquisa de Della (2005), houve um aumento de 20% no percentual de sílica ao realizar a moagem. Manter a casca do arroz durante um longo tempo de queima em temperatura alta provoca a cristalização da sílica amorfa. O sódio e o potássio presentes na CCA provocam aceleração da fusão entre as partículas e a cristalização do material, devido a estes elementos químicos proporcionarem o decréscimo do ponto de fusão. A temperatura apontada como mais provável para o início da cristalização do material é de 800 °C.

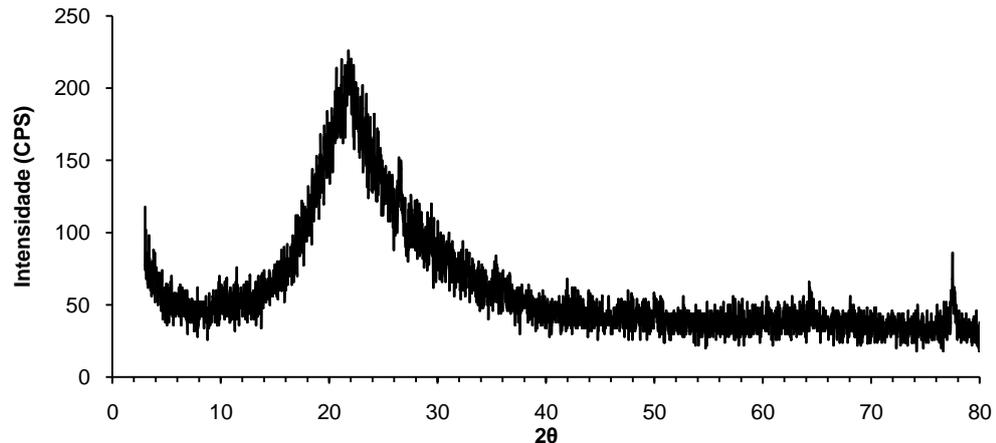
Conforme Della (2005), a coloração da CCA é mais um fator a se analisar, pois a mesma se altera conforme o teor de carbono presente. As cinzas com coloração preta possuem alto teor de carbono, a cor branca indica teor menor, e quando tom é levemente rosado indica que praticamente está isento do mesmo. A amostra de CCA utilizada no presente trabalho apresentou coloração branca com pontos pretos demonstrando a presença de carbono.

O processo da queima da CCA, descrito nos materiais e métodos, demonstra que dificilmente os fornos utilizados chegam durante a queima a uma temperatura de 800 °C, e se chegar não se mantêm neste nível de calor alcançado durante um longo tempo. O processo é simples e não controlado, às vezes pode até o forno apresentar impurezas de outros processos. Portanto, a CCA utilizada neste estudo provavelmente não atingiu estado de cristalização da sílica amorfa.

3.3.2 Difração de Raios-X (DRX) da CCA

Para a análise da fase de cristalização de uma amostra executa-se o ensaio de DRX. No difratograma é necessário haver picos de alta intensidade para existir processo de cristalização da amostra. A figura 8 evidencia os resultados obtidos do DRX da CCA estudada.

Figura 8: Difratoograma da CCA



Fonte: Do autor (2016)

Analisando os resultados do DRX da amostra, evidencia-se a falta de um pico específico. Conclui-se com este fato, novamente que a sílica presente na CCA é amorfa, devido às temperaturas de queima não atingirem os 800 °C como requerido segundo as pesquisas prévias (DELLA 2005).

3.3.3 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) do solo natural

Os percentuais dos compostos químicos do solo natural constam na tabela 3, valores que se diversificam conforme a origem geológica do solo e do cultivo da vegetação.

Tabela 3 Resultados do FRX do solo natural

Elementos	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Perda Fogo
Teor (%)	29,81	53,37	1,06	*	*	*	*	2,39	3,12	0,42	9,43

Fonte: Do autor (2016)

*Valores menores que 0,05%

Analisando os teores fornecidos pelo FRX do solo natural nota-se que dois elementos representam mais de 80% da composição química são eles, a sílica em maior percentual e a alumina. O óxido de cálcio, que ao reagir com a sílica da CCA resulta na reação pozolânica, apresentou um teor praticamente nulo.

3.4 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Através dos ensaios do Índice de Suporte Califórnia e a determinação das porcentagens de expansão é possível verificar se um solo é apto como material para camadas de pavimentação rodoviária.

Desta forma, foram ensaiadas amostras compactadas nas energias de compactação PN e PI, preparadas segundo as dosagens descritas previamente na tabela 1.

Além da dosagem de CCA, foi também examinado o efeito das condições de cura das amostras. Para este fim, os ensaios tanto de expansão como de determinação de ISC foram realizados em amostras submetidas às seguintes três condições:

- Amostras submersas durante 96 horas;
- Amostras expostas ao ar livre durante 7 dias com posterior submersão durante 96 horas;
- Amostras sem submersão expostas ao ar livre durante 7 dias.

3.4.1 Resultados de expansão

Na tabela 4 constam os resultados das leituras de expansão.

Tabela 4: Valores de expansão

Mistura/ PN	Valores de expansão (%)		Mistura/ PI	Valores de expansão (%)	
	Tempos de análise			Tempos de análise	
	96 horas submerso	7 dias exposto + 96 horas submerso		96 horas submerso	7 dias exposto + 96 horas submerso
SOLO100	0,12	0,43	SOLO100	0,67	0,70
CCA5	0,86	0,13	CCA5	0,69	0,12
CCA10	0,44	0,71	CCA10	0,49	0,49
CCA15	0,63	0,15	CCA15	0,52	0,18

Fonte: Do autor (2016)

Os resultados evidenciados na tabela acima mostram que as leituras de expansão em todos os corpos de prova foram menores que 1 %. Portanto, segundo as especificações do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) todas as misturas cumpriram com os requerimentos de porcentagens de expansão para materiais de base e sub-base de pavimentos. Para o solo natural (SOLO100), os resultados mostraram maiores valores de expansão na amostra

submetida à exposição prévia do ar livre durante 7 dias, comparada com a expansão da amostra sem exposição prévia (apenas submersa 96 horas antes da medição da expansão).

De forma contrária, para as misturas de solo com CCA, tendência geral observada foi à diminuição do valor da expansão quando as amostras foram submetidas à exposição prévia ao ar livre, antes do período de submersão (com exceção dos resultados obtidos para a mistura CCA10).

O parágrafo anterior sugere que a exposição dos materiais ao ar livre, promove o desenvolvimento de reações físico-químicas entre a CCA e o solo favoráveis para a diminuição da expansão. Portanto, a metodologia estabelecida pela NBR 9895:1987, que estabelece submergir os corpos de prova 96 horas imediatamente após a compactação para a respectiva medição da expansão, fornecerão resultados conservadores quando se trate de amostras com adição de CCA. Nas condições reais de campo, que neste estudo foram representadas pelas amostras expostas ao ar livre previamente a submersão, os resultados de expansão serão menores que as obtidas em laboratório seguindo os regulamentos da NBR 9895:1987, obtendo-se resultados a favor da segurança.

3.4.2 Resultados do ISC

Na tabela 5 são apresentados os valores de ISC obtidas nos corpos de prova compactadas nas energias PN e PI para diferentes condições de cura.

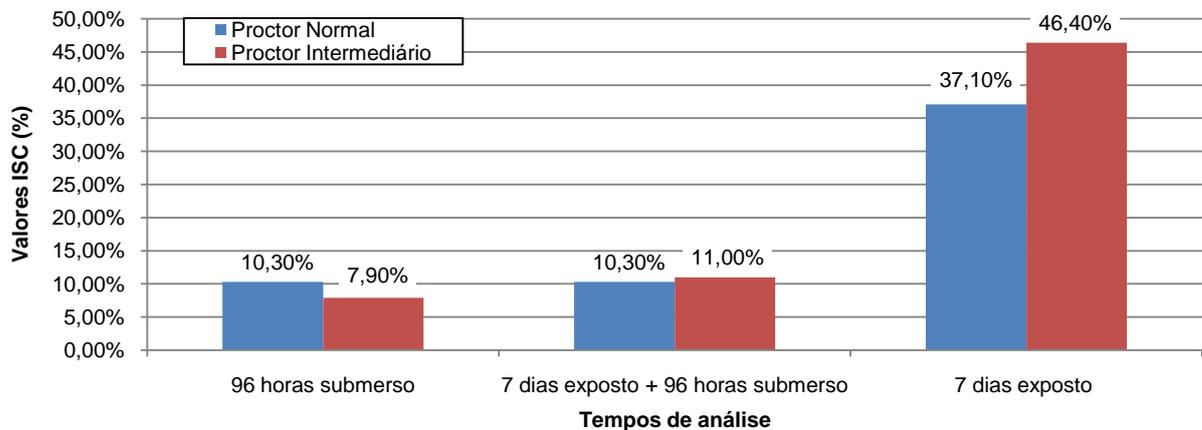
Tabela 5: Valores de ISC

Mistura	Energia de Compactação	Valores de ISC (%)		
		Tempos de análise		
		96 horas de submerso	7 dias exposto + 96 horas submerso	7 dias exposto
SOLO100	Normal	10,30	10,30	37,10
SOLO100	Intermediário	7,90	11,00	46,40
CCA5	Normal	23,40	23,20	66,70
CCA5	Intermediário	42,80	18,60	88,70
CCA10	Normal	10,30	29,10	20,50
CCA10	Intermediário	29,70	27,20	30,30
CCA15	Normal	8,60	5,80	39,70
CCA15	Intermediário	27,50	35,40	38,50

Fonte: Do autor (2016)

Analisando os resultados obtidos com as amostras do solo natural (SOLO100), expostos na figura 8, pode-se concluir que o valor do ISC foi mais elevado nas amostras sem submersão e com exposição de 7 dias ao ar livre, com valores de 37,10% para a amostra compactada na energia PN e 46,40% para a amostra compactada na energia PI.

Figura 8: Valores de ISC (%) da amostra SOLO100

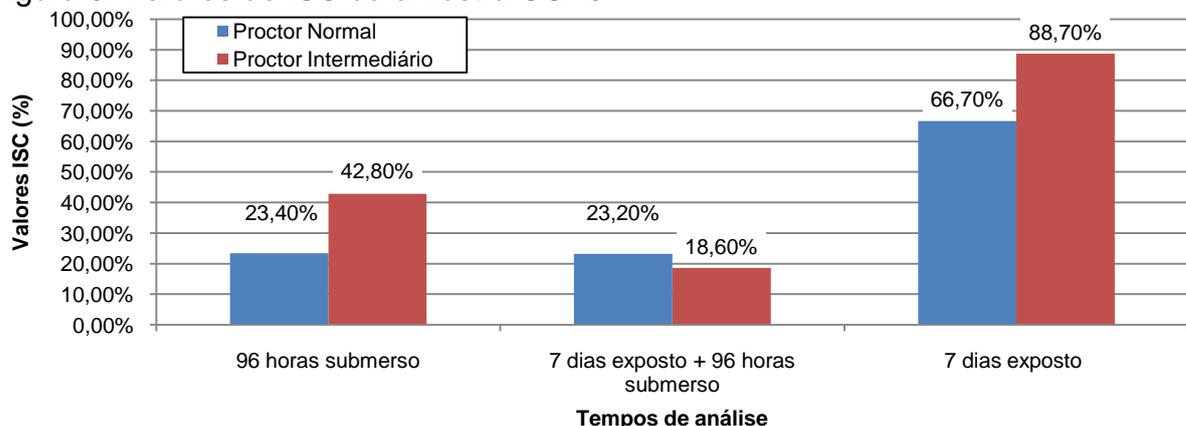


Fonte: Do autor (2016)

Estes resultados são coerentes com o esperado, pois as amostras submetidas à submersão atingem o estado de saturação total, onde a resistência é menor devido aos poros do solo estarem preenchidos com água.

Comportamento similar foi observado nas amostras aditivas com 5% de CCA (CCA5), como mostrado na figura 9, onde as amostras sem submersão apresentaram os maiores valores de ISC.

Figura 9: Valores de ISC da amostra CCA5

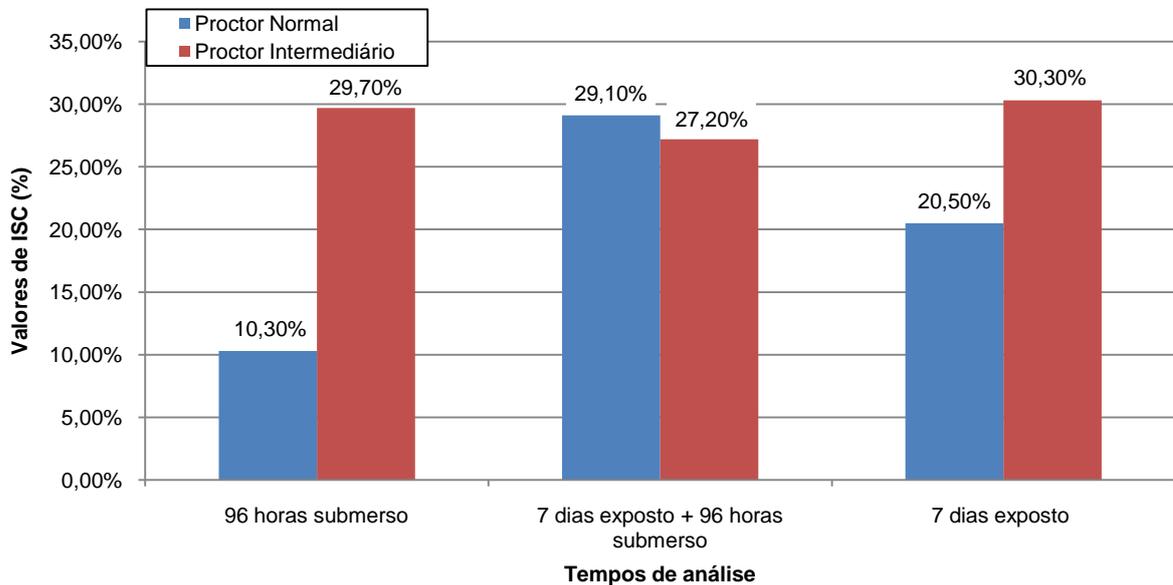


Fonte: Do autor (2016)

Também pode ser observado na figura 9 que as amostras compactadas na energia PI apresentaram maiores valores de ISC se comparadas as do PN, tanto nas amostras com 96 horas de submersão como nas apenas com 7 dias de exposição ao ar livre. A energia de compactação intermediária gera materiais com maior massa específica seca aparente, contribuindo ao ganho de resistência.

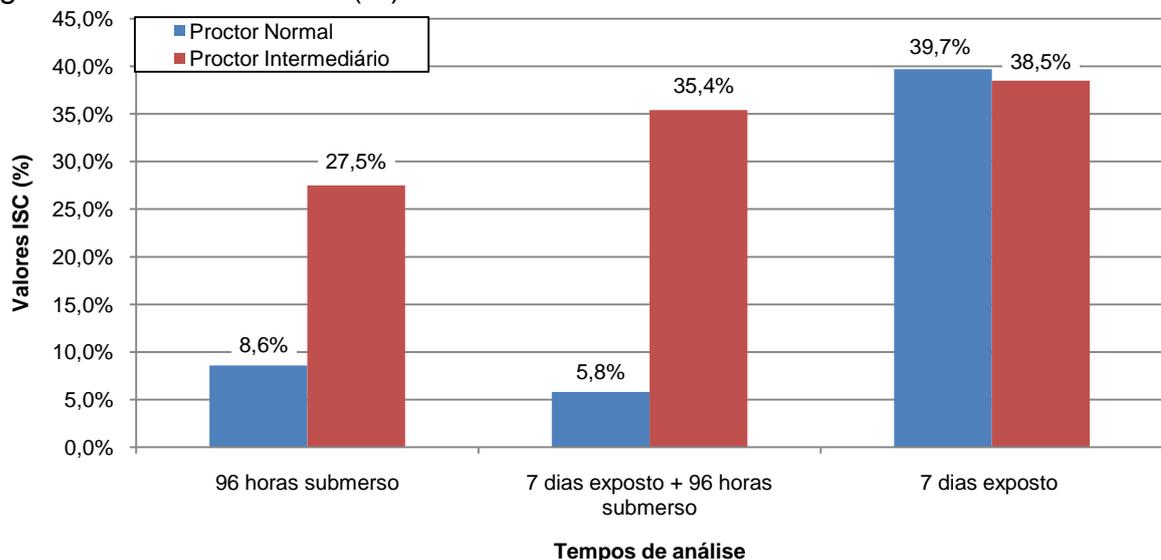
Finalmente, para adições de CCA de 10% e 15%, os resultados são evidenciados nas figuras 10 e 11, respectivamente. Em geral, o comportamento do solo com a energia PI continuou apresentando índices mais elevados que as amostras no PN.

Figura 10: Valores de ISC (%) da amostra CCA10



Fonte: Do autor (2016)

Figura 11: Valores de ISC (%) da amostra CCA15



Fonte: Do autor (2016)

Com a finalidade de verificar possíveis reações entre o solo e a CCA, neste estudo foram analisados os valores de ISC em amostras imediatamente submersas após a compactação (procedimento recomendado pela NBR 9895:1987) e em amostras expostas 7 dias ao tempo previamente as 96 horas de submersão. Os resultados obtidos evidenciaram que a exposição dos corpos de prova ao ar livre não promoveu significantes ganhos na resistência. As maiores resistências apenas foram observadas em amostras sem submersão (7 dias expostas ao ar livre). Como dito anteriormente, os valores de ISC mais elevados eram esperados nestas amostras porque na submersas é atingida a total saturação dos corpos de prova, motivo pelo qual a resistência é inferior.

Conforme a caracterização química da CCA estudada, a mesma apresenta-se como substância amorfa e apresentava teor de sílica acima de 90%, itens os quais favorecem o acontecimento das reações pozolânicas descritas nas pesquisas de Behak (2007) e Bonfante (2015). O incremento do valor do ISC corresponde ao uso do óxido de cálcio. Todavia o solo utilizado no presente estudo não apresentou elevados níveis deste composto químico necessário para ocorrência da pozolana, e os demais teores não reagiram com a CCA.

Alguns valores de ISC apresentaram problemas durante o processo de rompimento do corpo de prova na prensa, possivelmente a falta de calibração do anel dinanométrico ou de alguma bolha de ar no interior do corpo de prova. Essa falha provocada altera valor da carga aplicada no corpo de prova consequentemente no percentual final do ISC.

A partir dos dados obtidos, pode-se afirmar que todas as misturas dosadas, nas duas análises propostas e conforme a NBR 9895:1987, podem ser utilizadas como sub-base ($ISC \geq 20\%$) quando compactadas na energia de PI, e a amostra CCA5 também pode ser utilizada no PN. A CCA5 alcançou valores aplicáveis, quando não submetido à imersão, em camadas de base ($ISC \geq 80\%$), na energia de PI.

A causa do incremento do valor da capacidade de suporte do solo estudado ocorreu devido ao efeito filler, a mesma resposta obtida por Behak (2007, apud Rahman, 1986). A cinza da casca do arroz preencheu os vazios presentes no solo, com tal característica provocou uma correção granulométrica, desta maneira elevou o ISC do solo.

4. CONCLUSÕES

Os valores finais encontrados a partir dos ensaios laboratoriais e a posteriores análises de resultados permitem resumir as seguintes conclusões.

- A classificação de solos High Research Board (HRB), definiu a amostra estuda como A 2-4. A CCA e o solo apresentaram curva granulométrica fina, sendo que o resíduo agrícola apresentou percentual maior passante na peneira nº 200.
- A partir da mistura dos dois materiais ocorreu o fenômeno físico de efeito filler, o qual provocou o aumento da capacidade de suporte do solo natural.
- Relatou-se que a CCA possui características favoráveis a reação pozolânica, pois o processo de cristalização é amorfo e existe grande percentual de sílica. O solo, no entanto não evidenciou compostos químicos em teores elevados para uma possível reação com a CCA.
- Constatou-se a viabilidade de utilizar a CCA pesquisada como aditivo em camadas de pavimento. As misturas propostas CCA5, CCA10 e CCA15 apresentaram valores acima do exigido em norma para sub-base ($ISC \geq 20\%$) no PI.
- A amostra CCA5 alcançou os maiores valores de ISC conforme o ensaio estabelecido pela NBR 9598:1987. Sendo que atendeu o exigido pelo DNIT para sub-base no PN e PI. Desta forma analisando a capacidade de suporte, de todas as amostras, foi à melhor mistura a se utilizar.
- A amostra CCA15 atendeu aos limites exigidos pelo DNIT para sub-base no PI como já citado anteriormente. Mas também analisando a dosagem em forma que consumo da CCA, esta dosagem foi a que mais utilizou, sendo assim tornou-se a melhor no ponto de vista ambiental.
- Desta forma destinando de forma correta os resíduos agrícolas e diminuindo a exploração de jazidas de rochas e solos.
- Para futuras pesquisas adicionar a mistura da CCA com o solo natural, algum composto químico favorável a reação, como óxido de cálcio. E manter as técnicas de moer a casca do arroz para aumentar o teor de sílica antes do processo de queima, e este não ultrapassar os 800°C.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502 – Rochas e solos.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182 – Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9895 – Solo – Índice de Suporte Califórnia – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1987.

BEHAK, Leonardo. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal.** 2007. Dissertação de mestrado (Universidade Federal de Rio Grande do Sul).

BONFANTE, Marcelo. **Estabilização de um solo arenoso com cinza de casca de arroz e cal para a utilização de camadas de pavimento.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

CORRÊA, Ana Paula. **Estudo do Dynacal® para análise do comportamento do solo aditivado, juntamente com o reagente sulfato de alumínio.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

DELLA, Viviana Possamai. **Estudo comparativo entre a sílica obtida por lixívia ácida da cinza da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza da casca do arroz.** 2005. Artigo científico – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos (Universidade Federal de Santa Catarina).

MEDEIROS, E. N. M. **Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de ETA.** 2010. Dissertação - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia (Universidade de Brasília).

NASCIMENTO, Guilherme Colle. **Estudo da adição da cinza da casca do arroz como carga mineral em poliprepileno**. 2011. Dissertação de mestrado (Universidade Federal de Santa Catarina).

SARAIVA, S. L. C. **Metodologia e Análise Experimental do comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários**. 2006. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal de Ouro Preto).

VIEL, Walmor Barbosa. **Uso de cinza de casca de arroz e de eucalipto na composição de um vidrado Cru**, 2012. 18f. Trabalho de Conclusão de Estágio (Curso de Tecnologia em Cerâmica e Vidro) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.