

Viabilidade técnico-econômica da areia eólica estabilizada com agentes aglomerantes para emprego em pavimentação

Technical and economical viability of eolic sand stabilization by cementation products to use in pavements layers

Cesar Alberto Ruver, Cíntia Rodales Machado, Cezar Augusto Burkert Bastos, Claudio Renato Rodrigues Dias

Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, RS

e-mail: cesar.ruver@furg.br, cintiarodales@hotmail.com, cezarbastos@furg.br, claudiodias@furg.br

Resumo: Na região costeira sul do Estado do Rio Grande do Sul não existem materiais adequados para compor as diferentes camadas dos pavimentos. Como solução, são empregados: (a) rocha britada, proveniente de outras regiões ou (b) solo local (areia eólica) estabilizado com cimento e/ou cal mais cinzas. Apesar dos resultados bem sucedidos de ambas as técnicas, não existem estudos indicando qual é mais economicamente viável. Este trabalho apresenta os resultados do material estabilizado com cimento e com cinza adicionando duas cais, confrontando seus custos com a brita graduada. Os resultados indicam que a areia eólica estabilizada com mais de 10% de cimento Portland CP IV 32 (aos 7 dias de cura) e com teores de 28% de misturas de cinza volante e cal hidratada (aos 28 dias de cura) ou cal hidráulica (aos 120 dias de cura) atingem a resistência de 2,1 MPa. Em termos de custos, verificou-se que somente o tratamento com cinza e cal hidráulica torna-se mais barata que a brita graduada.

Abstract: In the south coast of the Rio Grande do Sul State, Brazil, don't have appropriate materials that can use in pavements layers. As solutions has been adopted: (a) crushed stone from others regions or (b) stabilization of local soil (eolic sand) with Portland cement and/or lime more fly ash. Despite the successful results, don't have economic studies that indicate that of the two technics is cheaper. This research will show the results of the stabilizations materials with Portland cement and two kinds of lime, comparing their costs with those of crushed stone. The results indicate that stabilizations of eolic sand with more than 10% of Portland cement (Brazilian type: CP IV 32) (7 days seasoning) and with 28% a mixture of fly ash and hydrated lime (28 days seasoning) or hydraulic lime (120 days seasoning), reach simple compression resistance about 2,1 MPa, at the respective seasoning time. Only stabilization with fly ash and hydraulic lime is cheaper than other mixtures.

1. INTRODUÇÃO

A planície costeira sul do estado do Rio Grande do Sul tem passado nos últimos anos por grandes transformações econômicas, podendo-se destacar a ampliação do Superporto de Rio Grande, implantação do Estaleiro Rio Grande, ambos no município de Rio Grande/RS, e suas futuras ampliações, assim como a implantação de diversos parques eólicos (como já ocorre nos municípios de Rio Grande/RS e Santa Vitória do Palmar/RS). Com isso, vislumbra-se um aumento do trânsito de pessoas e mercadorias, saturando a atual malha viária, tanto de competência nacional, estadual e municipal. Inevitavelmente, há a necessidade de

ampliação de tal malha, como em alguns casos, já está sendo feito: duplicação das rodovias BR-392, BR-116 e RS-734. Além da ampliação da capacidade das rodovias, existe também a necessidade de ampliação da infraestrutura urbana, como por exemplo, a criação de novos bairros, que demanda, por exemplo, a implantação de ruas internas e estradas de acesso. Estas obras rodoviárias trazem grandes desafios à Engenharia Geotécnica: buscar alternativas à inexistência de materiais de construção em jazidas locais com características técnicas adequadas para compor as camadas dos pavimentos.

Os municípios que compõem a região de estudo estão localizados na província geológica

denominada de Planície Costeira, formada no período neogeno (CPRM [1]). Segundo a ref. [1], a planície costeira do Rio Grande do Sul é formada por quatro sequências de depósitos sedimentares (denominadas de barreiras) que compreendem (na direção da costa para o continente): holocênica (mais recente), pleistocênica 3, pleistocênica 2 e pleistocênica 1; sendo os depósitos superficiais predominantemente de origem eólica. Segundo Dias [2] estes depósitos são compostos por uma extensa faixa de areias finas, de granulometria muito uniforme, de compactação fofa na superfície e sem coesão. Esta formação geológica é propiciada pela topografia plana e baixas cotas (próximo ao nível do mar), além de um complexo sistema hidrológico marinho e lagunar, que propicia a formação de outros solos sedimentares não consolidados (depósitos coluvionares, aluvionares, deltaico, lagunar, praias e/ou turfosos) (ref. [1]). Ainda neste contexto geológico, verifica-se a ausência de formações rochosas (materiais pétreos) aflorantes e solos residuais (saprolíticos até solos mais intemperizados). Conforme Pedreira [3], o substrato rochoso na cidade de Rio Grande encontra-se a cerca de 520 m de profundidade. Dias *et al* [4] descrevem o subsolo da região portuária de Rio Grande como uma camada superficial de areia fina mediamente compacta, com alguns bolsões de argila ou solo argiloso isolados, até cerca 20 m de profundidade.

Em pavimentação, conforme Bernucci *et al* [5], uma estrutura típica de pavimento flexível (asfáltico) é composta por um conjunto sucessivo de camadas: (a) revestimento (concreto betuminoso); (b) camada de ligação; (c) base – camada de suporte estrutural; (d) sub-base – camada estrutural complementar com a mesma função da base; (e) reforço de subleito; e (f) subleito. Conforme os mesmos autores, um pavimento rígido (em concreto) é composto das seguintes camadas: (a) placas de concreto; (b) imprimação; (c) sub-base; e (d) subleito. Conforme o DNIT [6], norma 142/2010 ES, a base de um pavimento constitui uma “... *camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado...*”. A base pode ser composta (a) pela mistura de diferentes materiais, estabilizados

granulometricamente, de origem natural (como solos de comportamento laterítico, solos saprolíticos ou rochas alteradas) ou oriunda da britagem de rochas sãs; (b) solo melhorado com cimento; ou (c) solo estabilizado com cimento (ou solo-cimento), segundo as especificações das normas rodoviárias n^{os} 098 (DNIT [7]), 139 (DNIT [8]), 141 (DNIT [9]), 142 (ref. [6]), 143 (DNIT [10]). Quanto às especificações técnicas, levando em consideração a capacidade de suporte, os materiais estabilizados granulometricamente devem possuir um Índice de Suporte Califórnia (ISC) igual ou maior a oitenta por cento (ISC \geq 80%), para um número de operações equivalentes um eixo padrão de 8,2 toneladas (N) superior a 5×10^6 , ou, igual ou maior a sessenta por cento (ISC \geq 60%), para um $N \leq$ a 5×10^6 (ref. [7] e ref.[8]). Já para o solo-cimento é exigido um teor de cimento, por meio de dosagem em laboratório, suficiente para uma resistência a compressão simples (RCS) igual ou superior a 2,1 MPa (ref. [10]; NBR [11]).

Os materiais naturais (britados ou não) para a construção rodoviária nos municípios litorâneos da região sul do Estado do Rio Grande do Sul, que atendam as especificações rodoviárias, são transportados de municípios vizinhos como Capão do Leão/RS, Cerrito/RS ou Pedro Osório/RS. Estes últimos integram a região geomorfológica denominada de Escudo Sul Rio-Grandense, formada basicamente por rochas graníticas e gnaisses (ref. [1]). Os solos formados sobre as rochas são essencialmente residuais. Embora estes municípios sejam limítrofes, as distâncias médias de transporte (DMT) podem chegar até 300 km, o que onera consideravelmente os custos das obras rodoviárias.

Assim, considerando que a geologia da região costeira sul do estado do Rio Grande do Sul, formada por depósitos sedimentares inconsolidados, não favorece solos com características técnicas naturais adequadas para emprego como camadas de base e sub-base de pavimentos, realizou-se uma pesquisa que visa avaliar a viabilidade técnica de estabilização das areias eólicas locais com a adição de cimento Portland e cinza volante mais cal. Uma vez estabelecidas as dosagens para atingir a resistência mecânica requerida pelas especificações rodoviárias brasileiras, verificou-se se as areias tratadas são economicamente viáveis em

comparação com a brita graduada, solução normalmente empregada na região.

2. MATERIAS EMPREGADOS

Como a pesquisa foi realizada no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, localizado no centro da cidade de Rio Grande, tomou-se o município como referência, quanto à escolha dos locais para a coleta das amostras de areia, como para levantamento de custos de aquisição e de transporte dos insumos a serem utilizados na pesquisa. Para a realização do estudo foram utilizados dois tipos de areias eólicas: (a) areia “limpa” e (b) areia “contaminada”. Do ponto de vista geológico as duas areias são as mesmas (pertencentes à barreira holocênica), sendo inclusive, coletadas em locais próximos; no entanto, o que as diferencia é o posicionamento topográfico do ponto de coleta. A primeira foi coletada no cume de uma duna, apresentando uma cor clara, isenta de materiais pulverulentos e/ou matéria orgânica. A segunda foi coletada em zona de várzea (topografia baixa), sujeita a acúmulo de sedimentos finos e material orgânico. Também vale frisar, que estas areias são comercializadas como sendo o mesmo material, sendo utilizadas, basicamente, para a construção de aterro em obras de construção civil e rodoviárias.

A figura 1 mostra a distribuição granulométrica e a tabela 1 apresenta as características geotécnicas das duas areias empregadas no estudo. Analisando as características das areias é possível verificar que embora a areia seja a mesma, ocorrem diferenças em algumas características, ocasionadas pela fração fina (argila e fina). Embora haja um percentual de 9,1% de finos na areia “contaminada”, esta quantidade não é suficiente para conferir plasticidade a areia. Na determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC), verificou-se valores próximos para ambas as areias, variando entre 10% e 22%, para as energias de compactação normal e intermediária. Como pode ser visto estes valores de ISC estão muito abaixo do especificado pelas normas rodoviárias para emprego como base (ISC > 60%).

Como materiais aglomerantes, utilizou-se o cimento Portland CP IV-32 puro e misturas de cinza volante com cal hidratada e cal hidráulica.

Conforme a ABCP [12], o cimento utilizado é do tipo pozolânico, tendo em sua composição

(proporções em massa): 45% a 85% de clínquer mais gesso, 15% a 50% de material pozolânicos e 0% a 5% de material carbonático. Segundo a ref. [12], o cimento CP IV-32 deve apresentar resistência mecânica mínima de 20 MPa para 7 dias de cura, de 32 MPa para 28 dias e de 40 MPa para 91 dias, determinada por meio de ensaios de compressão simples de corpos-de-prova moldados a partir de argamassa padronizada.

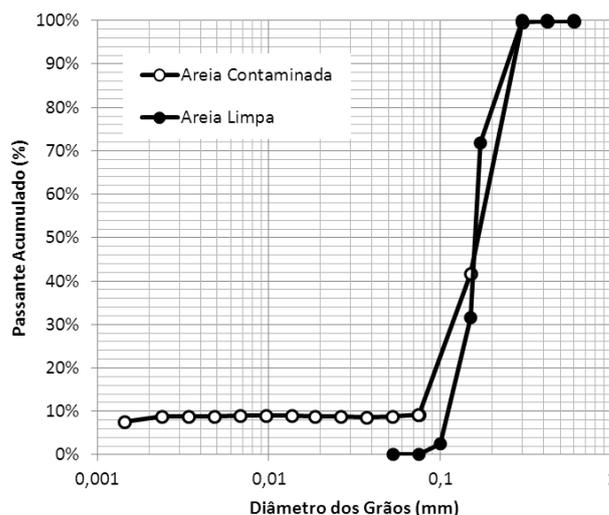


Figura 1: Curvas granulométricas das areias

A cinza volante utilizada é um resíduo gerado na queima do carvão mineral utilizado nas usinas termelétricas no município de Candiota/RS (distância rodoviária de 211 km do centro de Rio Grande/RS). Segundo a ref. [2], a cinza volante é um material complexo e heterogêneo, cujas características dependem do carvão e das condições de queima. Conforme a ref. [2], a cinza volante de Candiota/RS apresenta a seguinte composição química predominante: 42% a 50% de SiO₂ (sílica), 16% a 30% de Al₂O₃ (alumina), 5% a 10% de Fe₂O₃. A ref. [2] ainda apresenta as seguintes características físicas da cinza: diâmetro médio dos grãos de 7,9µm; 24% de material retido na peneira #325 e densidade real dos grãos (γ_s) de 22 kN/m³. O peso específico aparente seco natural solto (γ), obtido em laboratório, é de 8,9 kN/m³.

Quanto à cal, foram empregados dois tipos: (a) cal hidratada e (b) cal hidráulica. As tabelas 2 e 3 apresentam as características químicas e físicas das cal empregadas, obtidas junto com o fabricante, localizado em Caçapava do Sul/RS (distância rodoviária de 243 km do centro de Rio Grande/RS). Como pode ser visto pelos limites

estabelecidos pela NBR 7175 (ABNT [13]), a cal hidratada empregada é do tipo CH – II. Conforme DB [14], a cal hidráulica é obtida a partir da edição de cinza mineral à cal hidratada CH-II.

Tabela1: Características geotécnicas das areias estudadas

Parâmetro	Areia	
	Contaminada	Limpa
D ₁₀	0,078 mm	0,120 mm
D ₃₀	0,120 mm	0,150 mm
D ₆₀	0,180 mm	0,160 mm
C _u	2,3 (Uniforme)	1,3 (Uniforme)
C _c	1,0	1,2
Composição Granulométrica (NBR 6502/95)		
Pedregulho	0,0%	0,0%
Areia	90,9%	99,3%
Silte	0,8%	0,7%
Argila	8,3%	0,0%
Nomenclatura (ABNT)	Areia Argilosa	Areia: fina (79,3%) e média (20,0%)
Cor (material seco)	Acinzentada	Amarelada
γ_s (kN/m ³)	25,9	25,9
Classificação Geotécnica		
HRB	A-3	A-3
SUCS	SP-SM	SP

Tabela 2: Características químicas e físicas da cal hidratada (DB [15])

Amostra Nº 186 silo 02, de 09 de março de 2012.			
EXIGÊNCIAS QUÍMICAS	REQUISITOS	LIMITES	ANÁLISE
	Densidade	≤ 600 g/l	552,69g/l
	Perda ao Fogo	—	20,78%
	Resíduo Insolúvel	—	8,14%
	CO ₂ (Anidrido Carbônico)	≤ 5%	2,21%
	Oxidos Totais	≥ 88%	88,01%
	Ox.ñ hidratado	≤ 15%	14,00%
	CaO	—	43,81%
	MgO	—	25,91%
	Umidade	≤ 1,5%	0,34%
EXIGÊNCIAS FÍSICAS	FINURA (%retida acumulada)		
	ABERTURA	LIMITES	ANÁLISE
	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	0,00%
	Peneira 0,075 mm	≤ 15%	8,64%

Tabela 3: Características químicas e físicas da cal hidráulica (DB [16])

Amostra Nº 242 - silo 05 de 02 de abril de 2012.			
EXIGÊNCIAS QUÍMICAS	REQUISITOS	LIMITES	ANÁLISE
	Densidade	—	560,59 g/l
	Perda ao Fogo	—	12,70%
	Resíduo Insolúvel	—	43,01%
	CO ₂ (Anidrido Carbônico)	—	1,69%
	Oxidos Totais	—	61,20%
	Ox.ñ hidratado	—	18,14%
	CaO	—	32,55%
	MgO	—	28,80%
EXIGÊNCIAS FÍSICAS	FINURA (%retida acumulada)		
	ABERTURA	LIMITES	ANÁLISE
	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	0,00%
	Peneira 0,075 mm	≤ 15%	14,16%

3. DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS

Uma vez definidos e caracterizados o solo a ser tratado (areia fina eólica) e os agentes aglomerantes a serem empregados na estabilização, o passo seguinte foi a dosagem – proporções adequadas entre os materiais secos e água - para satisfazer o critério de resistência mecânica (resistência à compressão simples) necessária para emprego como camada base e/ou sub-base de pavimentos.

Para solos estabilizados com cimento, são exigidos teores de cimento Portland para atingir a resistência à compressão simples mínima de 2,1 MPa para sete dias de cura (ref. [10] e ref. [11]), requisito também adotado nesta pesquisa.

Como para a estabilização com cal não existe nenhuma normatização ou regulamentação brasileira, adotou-se o mesmo critério utilizado para o cimento Portland, ou seja, uma resistência à compressão simples de 2,1 MPa. Embora não haja normas técnicas brasileiras elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou pelos órgãos rodoviários (por exemplo, o DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes), existem várias experiências bem sucedidas com o emprego da estabilização de solos com cal ou cinza-cal. Como exemplos de aplicação, inclusive com a mesma areia empregado no presente estudo, pode-se citar os trabalhos da ref. [2] e da ref. [3]. Ambos os trabalhos tratam sobre estabilização de solos com cinza-cal de reaterros de cavas experimentais e fundações de algumas obras na cidade de Rio Grande/RS, sendo o bom desempenho verificado por meio de provas de carga em diversas idades e com a verificação de recalques ao longo do tempo. A ref. [2] também relata a execução de um trecho de pavimentação urbana com 30 m de extensão na Praia do Laranjal, em Pelotas/RS, e vários trechos

de base para pavimentos com blocos intertravados no interior do Campus Carreiros da Universidade Federal do Rio Grande – FURG e no centro urbano do município de Rio Grande.

A NBR 12.253 (ref. [11]) recomenda que sejam moldados corpos-de-prova com teores crescentes de cimento Portland, sendo definido o teor ideal como aquele que forneça uma resistência à compressão simples mínima de 2,1 MPa. Para solos A-2 e A-3, a mesma norma recomenda que a dosagem seja realizada a partir de teores mínimos de 7% e 9%, respectivamente. Nesta pesquisa empregou-se teores de 3%, 6%, 9% e 12% de cimento Portland, para que fosse possível, além de definir a dosagem, verificar qual a evolução da resistência com o aumento progressivo dos teores de cimento. Para cada teor e tipo de areia (“limpa” e “contaminada”) foram moldados cinco corpos-de-prova nas dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, os quais foram rompidos após 7 dias de cura.

Diferentemente do que ocorre na estabilização com cimento Portland - aglomerante hidráulico, cujas reações pozolânicas, responsáveis pelo aumento da resistência mecânica, ocorrem simplesmente pela adição de água; na estabilização com cal hidratada, as reações pozolânicas dependerão da sílica e alumina reativas, presentes na fração fina dos solos. Como a areia “limpa” é praticamente isenta de material fino (menos de 1% de silte), nenhuma ou poucas reações pozolânicas irão ocorrer, de modo a não ocorrer um aumento significativo na resistência mecânica. Neste caso, a estabilização com cal hidratada somente é justificável se for acrescido material rico em óxidos reativos capazes de proporcionar reações pozolânicas. No entanto, o material a ser acrescido não pode alterar negativamente as demais características geotécnicas (exemplo: limites de Atterberg, Índice de Suporte Califórnia, etc.). Assim, pode-se lançar mão da adição de cinzas, como a cinza volante de carvão mineral utilizada neste estudo, a qual pode chegar até 80% de sílica-alumina reativa (até 50% de SiO_2 e até 30% de Al_2O_3).

Geralmente a definição da dosagem de solos naturais (sem adições de materiais reativos, como as cinzas) para estabilização com cal, pode ser feita de duas formas: (a) método do pH, desenvolvido por Eades e Grim [17] e (b) método da reatividade, desenvolvido por Thompson [18]. O primeiro método consiste em adicionar

diferentes percentuais de cal, de modo a obter o menor teor com pH de 12,4 (condição necessária para que ocorram as reações pozolânicas). O segundo consiste em moldar corpos-de-prova com diferentes teores de cal e rompe-los aos 28 dias de cura, sendo o teor mínimo para estabilização aquele que proporcionar um aumento da resistência de 345 kPa. No caso específico da areia estudada, há a adição, não somente de cal, mas também de cinza volante. Os métodos citados não contemplam esta segunda variável.

A proporção ideal entre a cal hidratada e a cinza volante, e o percentual de adição desta mistura em relação ao solo, deve ser tal que potencialize as reações pozolânicas e proporcione o melhor fechamento da matriz (menor índice de vazios) do material a ser estabilizado. Como não existe regra, a dosagem deve ser feita por experimentação em laboratório por meio de ensaios de compressão simples. Para os materiais empregados neste estudo (areia “limpa”, cal hidratada e cinza volante), ref. [2], no ano de 1982, realizou misturas nas proporções entre cal:cinza de 1:3 e 1:4 em substituição ao peso da areia “limpa” entre 12% e 40%. Por meio deste estudo, verificou-se que os melhores resultados foram para a mistura de 1:3 para 72% de areia “limpa” seca em relação à massa total. Desta forma, para a estabilização da areia “limpa” com cal, os ensaios de compressão simples foram realizados para uma única dosagem com proporção de 28% de mistura de cal-cinza e 72% de areia.

Os resultados da resistência à compressão simples dos ensaios realizados com cal hidratada aqui apresentados foram obtidos do relatório emitido pela ref. [2]. Nos ensaios realizados pela ref. [2], no mesmo ano da referência, foi adotada uma mistura de cal hidratada:cinza volante na proporção 1:2,33 (e não 1:3, como definido em 1982), para aproveitar a mistura que vinha de fábrica e que foi utilizada para realização de trechos de pista experimentais realizadas nas cidades de Rio Grande/RS e Pelotas/RS.

Já os ensaios com a cal hidráulica realizados seguiram a proporção de 1:3 estabelecida pela ref. [2] em 1982. Da mesma forma como para o cimento Portland, foram moldados corpos-de-prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, os quais foram rompidos em diferentes tempos de cura, variando entre 7 dias e 181 dias.

Os estudos com areia “contaminada” estabilizada com cal estão em fase inicial, ainda não tendo resultados conclusivos.

Uma vez definidas as proporções entre os materiais e os respectivos tempos de curas, foram realizados ensaios de compactação para definição das proporções de materiais secos e água, energia de compactação, bem como os pesos específicos máximos e teores ótimos de umidade. Os ensaios de compactação foram realizados conforme a NBR 12.023 (ABNT [19]) na energia normal, sendo utilizado o cilindro de compactação pequeno (diâmetro 100 mm e altura de 127,3 mm). Optou-se pela utilização da energia normal (menor) para facilitar a execução de futuros trechos experimentais com a utilização de compactadores de menor desempenho. Para a mistura com o cimento Portland utilizou-se somente o teor de 6%, em substituição a massa da areia “limpa” (94%), independente do teor de cimento utilizado a posteriori para a moldagem dos corpos-de-prova, cujo peso específico seco máximo obtido foi de $17,8 \text{ kN/m}^3$ e umidade ótima de 8,5%.

Para a mistura com cal, utilizou-se os resultados obtidos pela ref. [2] para 28% de cal hidratada e cinza volante (proporção de 1:2,33) e 72% de areia “limpa”: peso específico aparente seco máximo de $18,0 \text{ kN/m}^3$ e de umidade ótima de 13%. Os mesmos foram aplicados para as misturas de 28% de cal hidráulica e cinza volante (proporção de 1:3) e 72% de areia “limpa”.

4. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Os corpos-de-prova foram moldados em um molde de aço tripartido com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm (figura 2). A moldagem foi realizada de forma dinâmica, por meio de golpes do soquete pequeno, o mesmo utilizado para os ensaios de compactação (massa de 2,5 kg e altura de queda de 30,5 cm). A moldagem foi realizada em três camadas compactadas de igual altura (3,33 cm), com a aplicação de 5 golpes por camada que corresponde a energia normal de compactação, conforme Nogami e Villibor [20].

Inicialmente, pesava-se areia seca em estufa, aglomerante(s) (cimento Portland ou cal hidráulica e cinza volante) e água destilada necessária para a moldagem de cinco corpos-de-prova, para as misturas com cimento Portland, e seis, para as misturas com cal hidráulica mais cinza volante.

Em seguida, misturavam-se os materiais secos em uma bandeja de alumínio com uma espátula. E por fim, misturava-se a água, até obter uma massa homogênea. Para a moldagem, o molde era limpo, untado com vaselina e montado. A seguir era colocada a primeira porção com auxílio de um funil e compactava-se a camada. Após, a superfície da camada era escarificada, sendo colocada a segunda porção. E assim, repetido o procedimento até a terceira e última camada. Após a moldagem, o molde era desmontado (figura 2) e o corpo-de-prova era colocado em um saco plástico hermeticamente fechado. O corpo-de-prova ensacado era imerso em uma bandeja com água. Este procedimento tinha por objetivo evitar a perda de água por evaporação, bem como reduzir variações térmicas acerca de uma temperatura média de 20° C .



Figura 2: Corpo-de-prova após a moldagem e desmolde no cilindro tripartido (Rabassa *et al* [21])

Para as misturas com cimento Portland, conforme as recomendações da NBR 12025 (ABNT [22]), após a cura de 7 dias, os corpos-de-prova eram retirados das embalagens e colocados em imersão na água por 4 horas antes de serem rompidos. Já para as misturas de cal hidráulica mais cinza volante, um dia antes do tempo de cura previsto (24 horas antes do ensaio de compressão simples), três corpos-de-prova eram imersos em água e os outros três eram ensaiados sem imersão.

Os corpos-de-prova eram rompidos em uma prensa eletro-hidráulica com velocidade constante de $1,14 \text{ mm/min}$. A carga aplicada era medida por meio de um anel dinamométrico com capacidade de carga de 10 kN, com resolução de $5,7 \text{ N/}\mu\text{m}$. Na figura 3 é mostrado o aparato para o rompimento

dos corpos-de-prova e a figura 4 mostra o aspecto de um corpo-de-prova após a ruptura.

5. RESULTADOS

A figura 5 e a tabela 4 apresentam os resultados médios das resistências à compressão simples para os quatro teores de cimento adotados (3%, 6%, 9% e 12%), para um tempo de cura de 7 dias e com imersão de 4 horas em água. Cada ponto do gráfico ou da tabela corresponde a uma média de cinco corpos-de-prova. Na tabela 4, também consta o teor de cimento necessário para uma resistência a compressão simples de 2,1 MPa (indicado pela linha tracejada na figura 5).

A figura 6 e a tabela 5 apresentam os resultados médios das resistências à compressão simples para os diferentes tempos de cura para a cal hidráulica (com imersão de 24 horas antes da ruptura e sem imersão dos corpos-de-prova) e cal hidratada (sem imersão prévia dos corpos-de-prova). Neste caso, cada ponto do gráfico ou da tabela corresponde a uma média de três corpos-de-prova. Na tabela 5, também consta o tempo de cura necessário para atingir a resistência à compressão simples de 2,1 MPa (indicado pela linha tracejada na figura 6).



Figura 3: Aparato (prensa mais anel dinâmico) durante o rompimento dos corpos-de-prova



Figura 4: Aspecto dos corpos-de-prova após a ruptura

Na figura 6 também está representada a função resistência à compressão simples versus teor de cimento, obtida por regressão simples (método dos mínimos quadrados), para cada uma das areias. O melhor ajuste, em ambos os casos, foi o polinomial quadrático com coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,999. Este ajuste sugere que o aumento da resistência à compressão simples tem crescimento quadrático com o teor de cimento Portland. Interessante observar, que embora haja diferença de granulometria (tabela 1) entre a areia “contaminada” (9,1% de passante na peneira #200) e “limpa” (quase isento de material pulverulento), as duas areias tem características semelhantes, que também é refletido na resistência à compressão simples (diferença média de apenas 7%). Como a areia eólica é muito uniforme (ver figura 1 e tabela 1 – coeficiente de uniformidade (c_u) igual a 1,3), o acréscimo de material pulverulento, contribui de certa forma para o aumento dos pontos de contato e assim, gera um leve aumento da resistência à compressão simples. Uma possível presença de matéria orgânica na areia contaminada (dada a coloração escura do material fino) mostra não afetar as reações pozolânicas do cimento, ou seja, não compromete a resistência mecânica. Em termos de consumo de cimento, verifica-se que o teor necessário é maior que 10%, o que conforme a ref. [5] pode ser antieconômico, em se tratando de estabilização de solos com cimento. A ref. [5] considera que teores entre 5% e 9% podem

tornarem-se viáveis economicamente para emprego como base e sub-base de pavimentação. Este fator econômico será analisado na próxima seção.

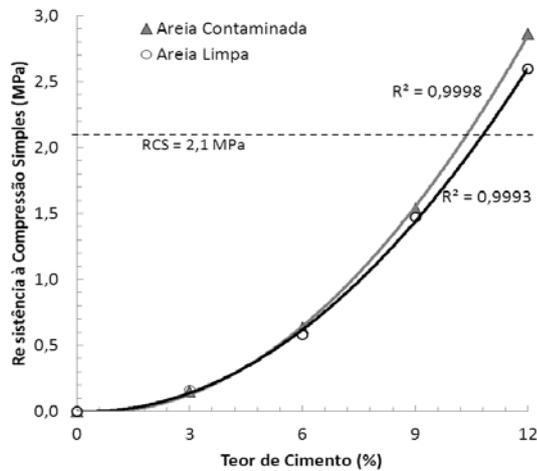


Figura 5: Resistência a compressão simples para diferentes teores de cimento Portland

Tabela 4: Resistência à compressão simples para diferentes teores de cimento Portland

Cimento	Resistência à compressão simples RCS (MPa)	
	Areia	
	“Contaminada”	“Limpa”
0%	0,0	0,0
3%	0,154	0,164
6%	0,638	0,579
9%	1,537	1,471
12%	2,863	2,597
Cimento para RCS de 2,1 MPa	10,4%	10,8%

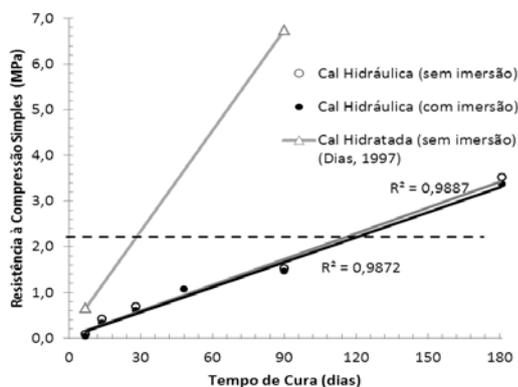


Figura 6: Resistência a compressão simples para as areias “limpa” com cal hidráulica (com e sem imersão) e com cal hidratada (sem imersão) para diferentes tempos de cura

Analisando a figura 6 (excluindo os resultados com a cal hidratada, pois somente tem-se dois tempos de cura), o melhor ajuste da resistência à compressão simples para a estabilização com cal hidráulica pelo tempo de cura foi o linear, com coeficientes de determinação (R^2) da ordem de 0,98. Com isso, confirma-se que as reações pozolânicas são extremamente lentas, sendo que a resistência aumenta de forma linear até no mínimo 6 meses de cura. Analisando em detalhe a resistência nas primeiras idades, verifica-se que a resistência tende a aumentar de forma logarítmica entre os tempos de cura de 7 dias e 28 dias.

Tabela 5: Resistência à compressão simples para as areias “limpa” com cal hidráulica (com e sem imersão) e com cal hidratada (sem imersão) para diferentes tempos de cura

Tempo de cura (dias)	Tipo de Cal		
	Hidráulica	Hidratada (ref. [2])	
	Com Imersão	Sem Imersão	
	Resistência à Compressão Simples RCS (MPa)		
7	0,038	0,081	0,662
14	0,333	0,413	--
28	0,602	0,685	--
48	1,066	--	--
90	1,458	1,516	6,747
181	3,365	3,514	--
Tempo para RCS de 2,1 MPa	120 dias	114 dias	28 dias

Analisando a imersão ou não dos corpos-de-prova estabilizados com cal hidráulica, verifica-se que o efeito da imersão é minimizado com o aumento do tempo de cura. Para 7 dias de cura tem-se perda de mais da metade de resistência (54%), reduzindo para um quinto (19,3%) para 14 dias de cura e chegando a uma perda insignificante (cerca de 4%) para 90 dias e 181 dias de cura.

Comparando-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para os dois tipos de cal, verifica-se que o uso da cal hidratada apresenta resultados superiores se comparados com a cal hidráulica (ver figura 6).

Ainda, verifica-se que a resistência obtida nos ensaios da presente pesquisa corresponde a 12,3% e 22,5%, respectivamente para 7 dias e 90 dias de cura, da resistência obtida pela ref. [2]. Esta

diferença de resistência pode ser explicada pela influência de dois fatores: (a) reações de carbonatação e (b) proporção diferente de cal hidratada e cinza volante. Os resultados da ref. [2] correspondem a corpos-de-prova curados em câmara úmida sem a proteção por sacos plásticos, favorecendo as reações de carbonatação, que de certa forma são inibidas por embalagens hermeticamente fechadas que impedem o contato com o ar exterior. A própria ref. [2] mostra que a diferença entre as resistências de corpos-de-prova não revestidos é de até 23% e 63%, respectivamente, para 28 dias e 90 dias de cura, em comparação aos armazenados em sacos plásticos fechados.

A rigor, como já foi visto, as duas cais utilizadas neste estudo são na realidade a mesma cal, porém o que muda é a proporção entre a cal hidratada CH-II e a cinza volante. Se forem analisados os percentuais de resíduos insolúveis de cada uma das cais (tabela 2 e 3), verifica-se uma diferença de 34,87%, que leva a crer que seja o teor de cinza volante adicionado pelo fabricante à cal hidratada, sendo esta mistura comercializada como cal hidráulica. Vale lembrar que embora a cal hidráulica não tenha normatização brasileira, a maior parte dos fabricantes brasileiros de cal adotam a norma europeia EN-459-1 (CEN [23]), sendo inclusive adotada mesma nomenclatura (HL 2; HL 3,5 e HL 5). A partir desta dedução, é possível estabelecer uma comparação entre as proporções dos materiais e os traços das misturas de cal hidratada e cinza volante (ver tabela 6).

Tabela 6. Proporções de materiais entre as misturas de cal, cinza e areia

	Tipo de Mistura	
	Cal hidratada	Cal hidráulica
	Ref. [2]	Presente estudo
Proporção		
Cal hidratada CH-II (a)	8,41%	4,56%
Cinza volante (b)	19,59%	23,44%
Mistura (a+b)	28,00%	28,00%
Areia "limpa"	72,00%	72,00%
Traço da mistura (massa)		
Cal hidratada CH-II	1,00	1,00
Cinza volante	2,33	5,14

Através da tabela 6, é possível verificar que o traço usado por ref. [2] (1:2,33) é mais rico em cal hidratada (superior em 100%) em relação ao

adotado nesta pesquisa (1:5,14). Presume-se que esta proporção diferenciada de cal hidratada e cinza volante acabou se refletindo na resistência à compressão simples verificada.

6. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Já foi mostrado que tanto as areias “limpa” e “contaminada” não atendem as especificações rodoviárias para emprego como camada de base e/ou sub-base de pavimentos. Neste caso, para atender a exigência pode-se lançar mão do emprego de (a) matérias naturais estabilizados granulometricamente (ref. [9]), utilizando somente materiais pétreos ou mistura de solos com características apropriadas; ou (b) realizar a estabilização físico-química da areia local.

Como o escopo deste trabalho visa estudar a areia eólica estabilizada quimicamente – (a) com teores mínimos de cimento Portland necessários, apresentados na Tabela 4 para sete dias de cura ou (b) com 28% de mistura de cal e cinza para tempos de cura elevados - a análise econômica visa verificar qual técnica de estabilização oferecerá um menor custo entre as soluções adotadas, bem como verificar se os custos de estabilização são competitivos com materiais pétreos, neste caso, a brita graduada comercializada na região de estudo.

Para a compilação dos custos foram utilizados os valores comerciais médios praticados por empresas de terraplenagem e de construção rodoviária e lojas de materiais de construção, para o mês de setembro/2012, com entrega dos insumos no centro da cidade de Rio Grande/RS. O custo da carga de 12 m³ de areia (“limpa” ou “contaminada”) era de R\$ 372,00 (R\$ 31,00/m³), já contemplando os custos dos serviços de escavação, carga, transporte e descarga, bem como licenças, impostos e taxas. Os aglomerantes apresentaram os seguintes valores médios: (a) cimento Portland CP IV 32 - R\$ 22,30 por embalagem de 50 kg (R\$ 0,446/kg); (b) cal hidratada CH-II – R\$ 9,95 por embalagem de 20 kg (R\$ 0,498/kg); (c) cal hidráulica – R\$ 8,05 por embalagem de 20 kg (R\$ 0,403/kg). Já a brita graduada é comercializada à R\$ 91,00/m³. A cinza volante por ser um resíduo industrial, não foi considerado seu custo de aquisição, sendo somente considerado o custo de transporte (R\$ 0,091/kg, como demonstrado na equação 1).

$$cc = ct * DMT = \\ = R\$ 0,43/t.km * 211km \quad (1)$$

onde: cc = custo do transporte da cinza volante (R\$/kg); ct = custo do serviço de transporte comercial com caminhão basculante com capacidade de 10m³ em rodovia pavimentada (código SICRO2 do DNIT: 2 S 09 002 91) para construção rodoviária, referente ao mês maio/2012 (DNIT [24]) (R\$/ton.km); DMT = distância rodoviária média de transporte em rodovia entre a usina termoeletrica localizada em Candiota/RS até o centro de Rio Grande/RS (km)

O custo da areia estabilizada contempla somente os materiais ou os insumos envolvidos, não sendo considerados os custos dos serviços de mistura *in situ* ou em usina. Também não está sendo analisada a questão de licenciamento ambiental para uso das jazidas de areia ou para uso e transporte da cinza volante.

De modo a comparar os custos do material estabilizado com a brita graduada, expressou-se o custo daqueles por m³. A equação 2 mostra como foi feito o cálculo do custo do material estabilizado, considerando os valores unitários apresentados anteriormente. A tabela 7 apresenta os valores dos custos da estabilização das areias estudadas.

$$CAE = \rho * \left(A\% * ca / \rho + \sum E\% * ce \right) \quad (2)$$

onde: CAE = custo da areia tratada (R\$/m³); ρ = massa específica aparente da mistura não compactada, sendo adotado 1.400 kg/m³; A% = proporção de areia (97%, 94%, 91%, 88% ou 72%) na mistura; ca = custo da areia (R\$ 31,00/m³); E% = proporção de cimento Portland (3%, 6%, 9% ou 12%) ou cal hidráulica (7%) ou cal hidratada (8,41%) ou cinza (21% ou 19,59%) na mistura; ce = custo do cimento Portland (R\$ 446/kg), da cal hidráulica (R\$ 0,403/kg), da cal hidratada (R\$ 498/kg) ou da cinza volante (R\$ 0,091/kg)

Pelos custos apresentados na tabela 7 é possível verificar que somente a estabilização da areia eólica com cal hidráulica se torna viável economicamente (custo de 2,8% menor em relação à brita graduada), no entanto é necessário um tempo de 4 meses para atingir a resistência requerida. Embora o uso da cal hidratada reduza este tempo para 28 dias, seu custo é extremamente elevado (custo de 16,2% maior em relação à brita graduada). Os custos da estabilização com cimento se aproximam dos custos da pedra britada, no entanto, são levemente superiores (em 1,9% a 4,5%), mas tem a vantagem de um reduzido tempo de cura (7 dias) em relação à estabilização com cal.

Vale lembrar que na comparação de custos está sendo realizada por m³, ou seja, não está se levando em consideração diferentes espessuras das camadas que venham a ser definidas pelo cálculo estrutural e adotadas em campo.

Tabela 7. Proporções de materiais entre as misturas de cal, cinza e areia e custo correspondente

Material	Custo
Brita Graduada	R\$ 91,00/m ³
89,6%*AC+10,4%*CP	R\$ 92,71/m ³ (↑ 1,9%)
89,2%*AL+10,8%*CP	R\$ 95,09/m ³ (↑ 4,5%)
72%*AL+(7%*CHu+21%*CV)	R\$ 88,44/m ³ (↓ 2,8%)
72%*AL+(8,41%*CHa+19,59%*CV)	R\$ 105,8/m ³ (↑ 16,2%)
72%*AL+(4,56%*CHa+23,44%*CV)	R\$ 83,85/m ³ (↓ 7,9%)

Onde: AL = areia “limpa”, AC = areia “contaminada”, CP = cimento Portland, CV = cinza volante, CHu = cal hidráulica, CHa = cal hidratada CH-II

A título de exemplo, realizou-se um estudo comparativo entre a utilização com cal hidráulica e com a cal hidratada. Como a cal hidráulica é uma mistura de cal hidratada e cinza volante, foi simulado qual seria o custo da estabilização, se ao invés de utilizar 7% de cal hidráulica e 21% de cinza, fosse utilizado 4,56% de cal hidratada e 23,44% de cinza volante, de modo a manter a mesma proporção (ou traço) expressa na tabela 6. Como se manteve a mesma proporção é de se esperar que o desempenho (resistência a compressão simples x tempo de cura) seja o mesmo. Neste caso, o custo de R\$ 88,44/m³ baixaria para R\$ 83,85/m³, gerando uma redução de custo de 7,9% em relação à brita graduada, embora o tempo permanecendo em torno de 4 meses.

7. CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que é possível, tecnicamente, a estabilização da areia eólica, abundante na região litorânea sul do Estado do Rio Grande do Sul, para emprego em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos.

Com o uso do cimento Portland verifica-se um crescimento quadrático da resistência a compressão simples com o aumento do teor de cimento, sendo exigidos teores acima de 10%, para que num tempo de cura de 7 dias sejam atendidas as normativas.

Para as cais, com uso de 28% de mistura de cal hidratada e cal hidráulica mais cinza volante, nas

proporções de 1:2,33 e 1:3, respectivamente, as exigências de resistência são atingidas para tempos de cura, respectivamente, de 28 dias e de 120 dias.

Do ponto de vista econômico, a concorrência com materiais convencionais (brita graduada), somente se mostra competitiva para a técnica que utiliza cal hidráulica ou cal hidratada, desde que mantidas as mesmas proporções de cal:cinza (1:5,14) empregadas na dosagem da cal hidráulica.

Vale lembrar que o estudo econômico foi realizada especificamente para a cidade de Rio Grande/RS, para o mês de setembro de 2012, cuja demanda e a distância entre os fornecedores de insumos causa elevação dos custos destes em relação à média estadual praticada (ref. [24]). Vale ainda observar que os valores dos insumos utilizados neste trabalho correspondem a valores médios de varejo, e que custos reais da estabilização poderão ser menores se houver negociação direta com os fabricantes, o que também dependerá da extensão da obra.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao PIBIC/CNPq pelas bolsas de Iniciação Científica concedidas ao projeto PROPESQ/FURG 250.650/2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). *Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre/RS, 2006;
2. DIAS, C. R. R. *Estudo da Utilização da Cinza de Carvão Mineral na Construção Civil*. Relatório Técnico. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), Rio Grande/RS, 1997, 135p.;
3. PEDREIRA, C. L. S. *Uso de material de rejeito como fundação em solos compressíveis: caso de obra*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, 2000, 143p.;
4. DIAS, C. R. R.; BASTOS, C. A. B.; PEDREIRA, C. L. S. Variações no comportamento geotécnico da camada argilosa profunda ao longo do Porto de Rio Grande: Influência da energia durante o processo sedimentar. In: XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado/RS. *Anais ...* (em CD);
5. BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATI, J. A. P.; SOREA, J. P. *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. 3ª Reimpressão. Petrobras; Adebá: Rio de Janeiro/RJ, 2010, 504p.;
6. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Norma DNIT 142/2010 - ES: Pavimentação - Base de solo melhorado com cimento - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro/RJ, 2010, 9p.;
7. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Norma DNIT 098/2007 - ES: Pavimentação - base estabilizada granulometricamente com utilização e solo laterítico - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro/RJ, 2007, 7p.;
8. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Norma DNIT 139/2010 - ES: Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro/RJ, 2010, 8p.;
9. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Norma DNIT 141/2010 - ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro/RJ, 2010, 9p.;
10. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Norma DNIT 143/2010 - ES: Pavimentação - Base de solo-cimento - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro/RJ, 2010, 10p.;
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Norma ABNT NBR 12253: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento*. Rio de Janeiro/RJ, 1992, 4p.;
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). *Guia básico de utilização do cimento Portland*. Boletim Técnico. 7ª Ed. São Paulo/SP, 2002, 28p.;
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Norma ABNT NBR 7175: Cal hidratada para argamassas - Requisitos*. Rio de Janeiro/RJ, 2003, 4p.;

14. DAGOBERTO BARCELLOS (DB). *Ficha de Informação de segurança de produto químico – FISPQ*. Caçapava do Sul/RS, 2012. 3p.;
15. DAGOBERTO BARCELLOS (DB). *Certificado de análise (F-054) – Cal hidratada Primor Extra*. Caçapava do Sul/RS, 2012. 1p.;
16. DAGOBERTO BARCELLOS (DB). *Certificado de análise (F-054) – Cal hidráulica Primor*. Caçapava do Sul/RS, 2012. 1p.;
17. EADES, J.L.; GRIM, R.E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Record*. N. 139, p. 61-72, 1996;
18. THOMPSON, M. R. Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures. *Highway Research Record*, Washington, D.C., n. 139, p. 1-14, 1966;
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Norma ABNT NBR 12023: Solo-cimento - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro/RJ, 1992, 6p.;
20. NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. *Pavimentação de baixo custo com solos com solos lateríticos*. Editora Villibor: São Paulo/SP, 1995, 213p.;
21. RABASSA, C. M.; SOUZA, M. S de; HOLZ, R.; BASTOS, C. A. B. Dimensionamento de uma estrutura de pavimento econômico utilizando como base solo arenoso fino laterítico estabilizado com cal. XXII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e VII Feira de Protótipos (CRICTE 2007). *Anais...*, Passo Fundo/RS, 2007;
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Norma ABNT NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro/RJ, 2012, 2p.;
23. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). *EN-459-1 Building Lime – Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria (English Version)*. Bruxelas/Bélgica, 2010, p. 52;
24. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Sistema de Custos Rodoviários – SICRO2*. Mês de Referência: Maio/2012. Rio de Janeiro/RJ.