

Estudo da Viabilidade Tecnológica do Emprego da Cal em um Solo da Formação Guabirotuba para Fins de Pavimentação

Vitor Reinaldo Bordignon

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitorb33@yahoo.com.br

Rogério Francisco Kuster Puppi

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, rfkpuppi@utfpr.edu.br

Ronaldo Luiz dos Santos Izzo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

Amanda Dalla Rosa Johann

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, amandajohann@utfpr.edu.br

RESUMO: A pavimentação constitui um dos mais importantes itens para o desenvolvimento dos centros urbanos. Os pavimentos urbanos, não diferentes dos chamados pavimentos rodoviários, são constituídos por um conjunto de camadas horizontais sobrepostas ao solo, o qual deve suportar as tensões induzidas pelos veículos. Assim, o solo se torna um dos principais materiais utilizados para a execução de uma pavimentação, entretanto, as suas propriedades muitas vezes não cumprem os requisitos necessários à execução dessa infraestrutura. Sendo assim, como reforço para estes solos, tradicionalmente materiais granulares são utilizados para a execução das camadas de sub-base e até mesmo da base do pavimento. Contudo, muitas vezes essas jazidas estão localizadas a uma grande distância do local da obra, o que acaba inviabilizando a sua utilização. Neste caso, uma alternativa seria a técnica de estabilização de solos, sendo que a mais prática e eficiente é a técnica da estabilização química, que engloba o solo-betume, o solo-cimento e o solo-cal. Além de poder solucionar o problema da distância entre a jazida e a obra, a estabilização de solos também auxilia na preservação das jazidas, diminuindo o impacto ambiental inerente a este tipo de obra. Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo estudar o efeito da adição de diferentes porcentagens de cal na estabilização de um solo da formação Guabirotuba, coletado na região urbana da cidade de Curitiba, Brasil. Para a realização desta pesquisa as seguintes porcentagens de cal foram utilizadas: 3%, 6%, 8% e 16%. As misturas solo-cal foram definidas através de dois métodos de dosagem, um verificando o comportamento químico das amostras, por meio da evolução dos valores de pH, e o segundo analisando o comportamento mecânico através dos valores de resistência à compressão simples. Para o estudo da viabilidade tecnológica da adição de cal no solo estudado, ensaios de resistência à compressão simples foram realizados nos seguintes tempos de cura: 0, 7, 14, 28 e 56 dias, assim como os ensaios de CBR e Expansão nas energias de compactação do ensaio proctor normal e intermediário. Após a realização destes ensaios, verificou-se que a estabilização química realizada através da adição da cal, proporcionou um aumento significativo da resistência à compressão simples das amostras do solo estudado. Além disso, a partir das normas vigentes, uma das misturas de solo-cal estudadas nesta pesquisa apresenta comportamento aceitável para utilização como camada de sub-base de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: solo-cal, resistência à compressão simples, pavimentação.

1 INTRODUÇÃO

São encontrados em várias regiões do país solos do tipo sedimentar, ou transportados, os quais não possuem características adequadas para a utilização como bases e sub-bases de pavimentos. Neste caso, é necessário a remoção total ou parcial do material existente, instalando no local um material granular compactado em camadas distintas, fornecendo, assim, a resistência adequada descrita em projeto.

A estabilização química de um solo é definida, como sendo a adição de substâncias que melhoram as propriedades do material, empregando-se normalmente a cal ou o cimento. É uma técnica muito interessante pela sua facilidade de aplicação, por sua versatilidade e, principalmente, pelos resultados apresentados em campo, como o aumento na resistência à compressão simples, ao cisalhamento e à impermeabilidade (OLIVEIRA, 2000; CORDEIRO, 2007; MARQUES, 2009; VIZCARRA, 2010).

Pode-se assim definir que a estabilização de solos para pavimentação compreende procedimentos que visam a melhoria e estabilização das propriedades destes como: resistência, deformabilidade e permeabilidade. A estabilidade é um processo no qual confere-se ao solo maior resistência às cargas oriundas dos veículos ou ao desgaste, por meio da correção da granulometria, da plasticidade, ou por meio da adição de materiais ou substâncias que propiciem uma maior coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos do solo.

Partindo destes conceitos, esta pesquisa se propôs a estudar a estabilização de um solo da formação Guabirotuba com a utilização da cal hidratada em pó, determinando as vantagens, benefícios ou restrições observados com a estabilização do solo local, para a execução de obras de base e sub-base para pavimentação urbana no município de Curitiba.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

O solo estudado é denominado de solo da formação Guabirotuba, formação subjacente à

grande parte da região de Curitiba, alcançando ainda algumas regiões metropolitanas da capital Paranaense. Com os resultados através da curva granulométrica, a amostra de solo estudada indica 2% de pedregulho, 42% de areia grossa, 16% de areia média, 19% de areia fina, 9% de silte e 12% de argila. A massa específica real dos grãos é de 26,16 kN/m³, para os limites físicos de consistência do material os valores são de limite de liquidez 45%, plasticidade 39% e o índice de plasticidade em 6%, isso indica um solo pouco plástico ($1 < IP \leq 7$). Portanto, o solo da formação Guabirotuba, de acordo com a classificação HRB (Highway Research Board) e IPR-719 (DNIT, 2006), é classificado como um solo (A2-5), sendo o seu funcionamento como sub-base de excelente a bom.

A cal utilizada na pesquisa é uma cal hidratada dolomítica (CH-III), comercializada pelo nome Itabranca, produzida em Almirante Tamandaré região metropolitana de Curitiba – PR. A água potável utilizada nos ensaios e moldagem dos corpos de prova é proveniente da rede de abastecimento pública local, e para os ensaios específicos de caracterização foi utilizada água destilada quando especificada pela norma.

2.2 Métodos

2.2.1 Curvas de Compactação e Índices de Suporte Califórnia (ISC)

Para se determinar o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_d \text{ máx}$), a umidade ótima do material e de suas respectivas misturas, foram realizados os ensaios de compactação de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986), para a amostra de solo natural bem como para as misturas de solo com adição da cal hidratada em pó, nas quantidades 0, 3, 6, 8 e 16%. Neste item, foram utilizados dois tipos de energia de compactação: energia do Proctor Normal e Intermediária.

A capacidade de suporte e expansibilidade foi avaliada utilizando o ensaio de CBR, medindo a resistência à penetração da amostra saturada compactada, conforme metodologia proposta pela NBR 9895 (ABNT, 1987). Foram confeccionados e ensaiados dois corpos de prova para cada porcentagem de cal: solo

natural, 3, 6, 8 e 16%. Os corpos de prova foram moldados da seguinte forma: um corpo de prova moldado no cilindro de CBR na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo do proctor normal, e um corpo de prova confeccionado em molde de CBR na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo do proctor intermediário

Imediatamente após a moldagem, os corpos de prova foram imersos em um tanque com água potável, por um período de 96 horas, sendo que a cada 24 horas eram realizadas as medições das expansões, com extensômetro de 0,01 mm de precisão.

2.2.2 Ensaio de pH do Material e das Misturas

O método do pH preconizado por Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991) fundamenta-se no pH da mistura solo-cal, sendo que o princípio básico deste procedimento é adicionar uma quantidade suficiente de cal de modo a assegurar um pH de 12,4 para a ocorrência das reações pozolânicas que proporcionam resistência à mistura. Este método foi desenvolvido para solos de climas temperados.

O método de Thompson (1966 *apud* Núñez, 1991) define que um solo é reativo quando for adicionada cal suficiente para que a sua resistência à compressão simples atinja, pelo menos, 345 kN/m², ou 0,345 MPa, após 28 dias de cura a 22,8 °C, precedidos por uma imersão prévia de 24 horas, em água potável, antes do rompimento do material. Nesta pesquisa, foram utilizados os métodos propostos por Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), e Thompson (1966 *apud* Núñez, 1991), apenas como referência, devido às limitações destes dois métodos para utilização em solos tropicais.

Nesta análise, verificou-se que todas as misturas de solo-cal ensaiadas apresentaram valores elevados de pH, em relação ao solo natural que se fixou em 7,9 elevando-se para 9,5 de pH com 3% de adição da cal, 11,1 de pH acrescentando 6% de cal na mistura, 12,1 de pH com 8% da cal sobre o solo e 12,2 de pH com 16% de cal hidratada no solo. A Figura 1 apresenta um gráfico da evolução das amostras de solo com as respectivas adições da cal hidratada.

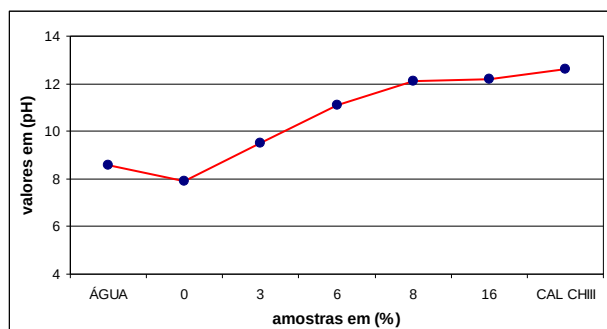


Figura 1. Análise do pH das amostras.

2.2.3 Moldagem e cura das amostras

Para os ensaios de resistência à compressão simples, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura obedecendo à relação de 2:1. Após a pesagem dos materiais, o solo e a cal foram misturados até os materiais atingirem uma consistência uniforme, sem incorporação de cal e nas percentagens 3, 6, 8 e 16% de cal. Após a uniformidade da mistura a água era então adicionada, continuando o processo de mistura até a perfeita homogeneidade dos materiais.

Com o processo de mistura concluído, o material era então depositado em um molde cilíndrico de aço, compactado em três camadas iguais de modo que cada amostra atingisse o seu peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\text{ máx}}$) desejado. Foram confeccionadas amostras nas energias de compactação normal e intermediária, sendo 4 amostras de cada série, porcentagem e período de cura. Além disso, uma pequena quantidade de material de cada série era separado para conferir a sua umidade.

Após o processo de moldagem, a amostra era extraída do molde, seu peso, diâmetro e altura medidos com precisão de cerca de 0,01 g e 0,1 mm. A amostra era então envolvida em um plástico filme, e acondicionada em um saco plástico vedado em sua superfície com um elástico, para evitar variações significativas do teor de umidade. Em seguida as amostras eram colocadas em uma câmara úmida, à temperatura constante de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ com umidade relativa do ar acima de 95%, para que todo o material fosse então curado por até 56 dias.

Os corpos de prova para os ensaios de RCS foram moldados nas condições ótimas de compactação, com variação de peso específico de $\pm 0,5\%$ e de teor de umidade de $\pm 0,5\%$, para

as duas formas de energia de compactação, normal e intermediária.

Todas as amostras foram consideradas aptas para os ensaios de resistência à compressão simples, considerando os limites de variação de seus pesos, medidas e umidade. O ensaio se procedeu da seguinte forma: no primeiro dia de moldagem de cada série era realizado o ensaio de RCS em 4 amostras, depois aos 7, aos 14 e aos 28 dias. Apenas para as amostras da série de compactação normal o ensaio foi também executado aos 56 dias.

O tempo de cura foi definido a partir da norma de pavimentação ES-141 (DNIT, 2010), ressaltando ainda que as amostras não permaneceram imersas em água pelo período de quatro horas, antes de sua ruptura, como o recomendado pelas NBR 12024 (ABNT, 1990) e NBR 12025 (ABNT, 1990). Se as amostras fossem mergulhadas em água no período relacionado, haveria absorção de água pelas mesmas e com isso parte de sua umidade seria modificada e o ensaio de RCS em relação à umidade ótima perderia sua precisão.

2.2.4 Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Após a cura em câmara úmida, as amostras não foram submetidas ao tanque com água por 24 horas para saturação, pois se pretende manter os moldes nas condições e características ideais de umidade, não se perdendo assim a umidade ótima com relação ao tempo de cura do material.

Os ensaios de RCS e de CBR foram executados no laboratório de materiais da UTFPR Campus sede Ecoville. Tanto para os ensaios de RCS como para os de CBR utilizou-se a prensa universal, da marca EMIC, modelo DL 30000N, com célula de carga calibrada, velocidade de deformação de 0,20 mm por minuto e capacidade máxima de 300 kN.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Ensaios de Compactação e Índices de Suporte Califórnia (CBR)

3.1.1 Curvas de Compactação

Na curva de compactação do solo natural com energia normal a umidade ótima ($\omega_{ót}$) ficou em 26,42% e a massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{d \text{ máx}}$) igual a 15,15 kN/m³, com adição de 3% de cal a ($\omega_{ót}$) foi de 27,02% e a ($\gamma_{d \text{ máx}}$) em 15,10 kN/m³, para 6% de cal a ($\omega_{ót}$) ficou em 27,32% e a ($\gamma_{d \text{ máx}}$) em 14,91 kN/m³, já para a percentagem de 8% de cal hidratada a ($\omega_{ót}$) ficou em 25,62% e a ($\gamma_{d \text{ máx}}$) em 15,09 kN/m³, e para uma adição de 16% de cal na mistura a ($\omega_{ót}$) foi de 26,51% e a ($\gamma_{d \text{ máx}}$) de 14,81 kN/m³.

As curvas de compactação do proctor normal do solo com as misturas nos teores da cal hidratada apresentam uma leve elevação no teor ótimo de umidade, em função do aumento do percentual da cal nas adições de 3% e de 6% em relação ao solo natural, com exceção da adição de 8% em que, neste ensaio a umidade ótima caiu em relação às demais adições. Este fato pode ter sido causado por imprecisões intrínsecas ao ensaio, como por exemplo, alguma alteração no tempo de mistura do material em relação ao tempo de execução da compactação da série. O mesmo fato ocorreu com a massa específica desta porcentagem de cal.

Os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, na curva de compactação da série do Proctor intermediário do solo natural foi de 25,55% e 15,55 kN/m³, respectivamente, para o solo com adição de 3% de cal hidratada o valor da ($\gamma_{d \text{ máx}}$) é de 15,98 kN/m³, e a ($\omega_{ót}$) de 24,48%, para uma adição de 6% da cal a ($\omega_{ót}$) de 25,27%, e a ($\gamma_{d \text{ máx}}$) é de 15,65 kN/m³, já para 8% de cal na mistura o valor da ($\omega_{ót}$) foi de 24,75%, e a ($\gamma_{d \text{ máx}}$) de 15,78 kN/m³, assim para uma adição de 16% da cal o valor da ($\omega_{ót}$) foi de 24,08%, e a ($\gamma_{d \text{ máx}}$) de 15,61 kN/m³. A Tabela 1 apresenta o resumo dos valores dos ensaios das duas séries de compactação.

Tabela 1. Relação teor de umidade x peso específico aparente seco.

Medidas	Solo + adição para a energia normal de compactação				
Teor de Cal	0%	3%	6%	8%	16%
$\omega_{ót}$ (%)	26,42	27,02	27,32	25,62	26,53
$\gamma_{d \text{ máx}}$ (kN/m ³)	15,15	15,10	14,91	15,09	14,81
Medidas	Solo + adição para a energia intermediária de compactação				
Teor de Cal	0%	3%	6%	8%	16%
$\omega_{ót}$ (%)	25,55	24,48	25,27	24,75	24,08
$\gamma_{d \text{ máx}}$ (kN/m ³)	15,54	15,98	15,63	15,78	15,61

3.1.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Os ensaios de CBR ou Índice de Suporte Califórnia - ISC e Expansão, do solo natural e nos teores 3, 6, 8 e 16% da cal hidratada na mistura em peso seco do material, foram realizados com o intuito de verificar os reais incrementos nos valores da capacidade de suporte ocorridos após a adição da cal ao solo. Foram moldados dois corpos de prova por amostra de material, para assim se obter uma média mais precisa do ensaio, seguindo as recomendações do ME-049 (DNER, 1994) e da NBR 9895 (ABNT, 1987).

Com relação aos valores de expansão, os resultados foram para o solo com 0% de cal igual a 1,66; para 3% o valor ficou em 1,40; para 6% foi de 1,05; já para 8% igual a 0,79 e para uma adição de 16% de cal o valor da expansão foi de 0,35. Observa-se que após a adição da cal, nos teores de 8% e 16% a expansão reduziu significativamente. O resultado obtido com o ensaio de expansão apresentou apenas a amostra com adição de 16% da cal aceita como parâmetro especificado pelo DNIT (2006), para sub-base e base ($\leq 0,5\%$) o que, levando-se em conta apenas este parâmetro, permitiria apenas esta porcentagem de cal para o uso nas camadas especificadas.

Os resultados de CBR para as amostras de solo natural e de solo com as respectivas adições da cal encontram-se resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado dos ensaios de CBR das amostras

	0 %	3 %	6 %	8 %	16 %
CBR (%)	2,32	2,57	7,56	21,07	29,80

Contudo, analisando-se todos os resultados apresentados das amostras de solo com as respectivas adições da cal hidratada, percebe-se que os mesmos não são suficientes ao uso em camadas de base de rodovias, pois não se enquadram nas especificações exigidas pelo IPR-719 (DNIT, 2006). Apenas as adições de 8% e 16% são consideradas aprovadas para a execução de sub-base de pavimentação (mínimo de 20%).

3.2 Resistência à Compressão Simples (RCS)

3.2.1 RCS para a Série do Proctor Normal

Os resultados dos ensaios de RCS realizados com o solo natural, bem como com as misturas pré-estabelecidas em porcentagens da cal hidratada em pó, apresentam-se descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Resultado dos ensaios de RCS com energia de compactação normal

Solo-Cal (%)	Ensaio de RCS em (MPa)				
	0 dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
0 (%)	0,140	0,135	0,163	0,158	0,158
3 (%)	0,153	0,168	0,185	0,208	0,223
6 (%)	0,163	0,440	0,525	0,570	0,573
8 (%)	0,223	0,870	0,988	1,060	1,145
16 (%)	0,218	1,130	1,613	2,370	2,858

Em termos de RCS, para a energia de compactação normal, a adição de 16% de cal no solo proporcionou um aumento considerável para os períodos compreendidos entre 14 e 28 dias de cura, com resultados de 1,6 MPa e 2,37 MPa, respectivamente, demonstrando uma elevação 48% maior sobre o período de cura dos 14 dias anteriores. A Figura 2 apresenta graficamente a correlação da evolução da resistência à compressão simples da série proctor normal pelo período de cura das amostras de solo-cal.

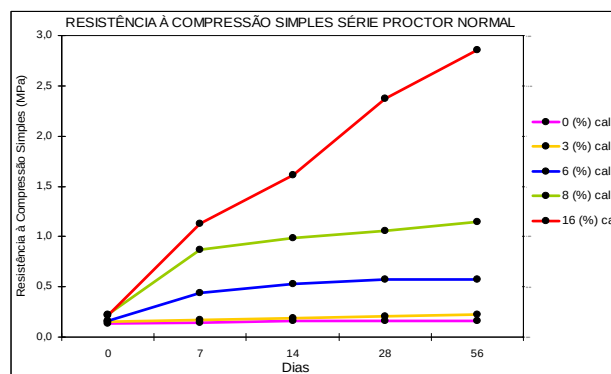


Figura 2. Análise gráfica dos resultados relacionando tempo x resistência.

Com base nos resultados de RCS apresentados na Figura 2, observa-se que as amostras de solo tratadas com cal hidratada em pó, apresentaram de um modo geral ganhos de resistência com o aumento dos períodos de cura. Contudo, verificou-se que a mistura de solo com 3% de adição de cal alcançou apenas 32% a mais no valor da resistência aos 28 dias, em relação ao solo natural com o mesmo

período de cura, o que se diferencia das misturas de 6%, 8% e 16% de cal que no mesmo período de cura, obtiveram 261%, 571% e 1.400% a mais de RCS, respectivamente, em relação ao solo com 0% de adição de cal.

3.2.2 RCS para a Série do Proctor Intermediário

A série de ensaios para a obtenção da RCS, realizada com a energia de compactação do proctor intermediário, se encontra resumida na Tabela 4, esta tabela apresenta o tempo de cura das amostras nos períodos de 0, 7, 14 e 28 dias.

Tabela 4 - Resultado dos ensaios de RCS com energia de compactação intermediária

Solo-Cal (%)	Ensaio de RCS em (MPa)			
	0 dia	7 dias	14 dias	28 dias
0 (%)	0,243	0,255	0,283	0,295
3 (%)	0,395	0,335	0,353	0,333
6 (%)	0,418	0,563	0,573	0,540
8 (%)	0,460	0,938	0,978	1,043
16 (%)	0,355	0,805	1,988	2,708

O maior valor médio de RCS foi de 2,71 MPa, obtidos pela adição de 16% da cal hidratada, isso aos 28 dias de cura. Os maiores valores de RCS do solo sem e com adição da cal, tomando como base o mesmo período de cura, foi de 0,29 MPa, 0,33 MPa, 0,54 MPa e 1,04 MPa, para as porcentagens de 0, 3, 6 e 8% da cal, respectivamente. A Figura 3 apresenta uma análise gráfica relacionando o tempo de cura das amostras com a RCS.

Analisando-se a Figura 3 observa-se que, em geral, a RCS cresce com o aumento do tempo de cura e com o aumento da quantidade de cal, fato semelhante ao observado nos resultados apresentados para a série de proctor normal.

Contudo observa-se na Figura 3 que para a adição de 8% de cal no primeiro dia e aos sete dias de cura, a RCS foi superior ao da adição de 16%, saindo de 0,46 MPa no primeiro dia e alcançando 0,94 MPa aos sete dias de cura, sendo que com 16% de cal os resultados foram de 0,35 MPa e 0,80 MPa, respectivamente para os mesmos prazos. Já nos períodos de cura restantes esta mesma série de corpos de prova apresentou uma inversão deste fato, onde nos resultados de 8% de cal são inferiores aos de 16%.

Além disso, verifica-se que a mistura de solo com 3% de adição da cal alcançou apenas 13% a mais no valor da resistência aos 28 dias, em

relação ao solo natural com o mesmo período de cura, o que se diferencia das misturas de 6%, 8% e 16% de cal que no mesmo período de cura, obtiveram 83%, 254% e 818% a mais de RCS, respectivamente, em relação ao solo com 0% de adição de cal.

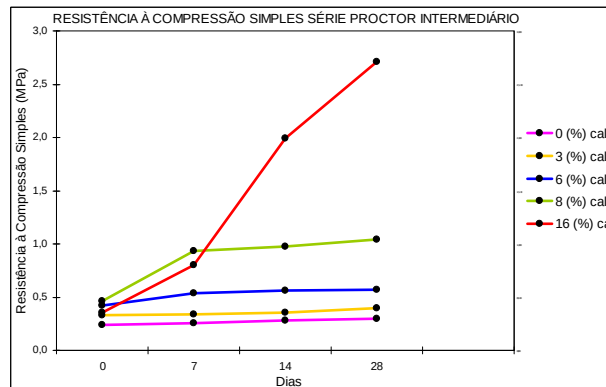


Figura 3. Análise gráfica dos resultados relacionando tempo x resistência.

A eficiência da adição da cal no comportamento mecânico de solos é um fato confirmado por diversos autores. Dalla Rosa (2009), que estudou um solo residual de arenito da formação Botucatu no estado do Rio Grande do Sul estabilizado com cal, relata em sua pesquisa que a RCS da mistura solo-cal aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal. A autora defende ainda que pequenas adições da cal são suficientes para gerar ganhos de resistência, onde em seu estudo, elevando-se a quantidade de cal de 3% a 9% a RCS cresceu em média 55%.

Destaca-se que o DER/PR (2005), especifica para o emprego de bases e sub-bases de pavimentações os seguintes limites: quando sua resistência à compressão simples for superior a 1,2 MPa este material poderá ser utilizado como sub-base, a partir de 1,7 MPa este solo pode ser utilizado como base para pavimentação.

Para o DNIT nas especificações IPR-719 (DNIT, 2006) e ES-143 (DNIT, 2010), o solo estabilizado para uso em camadas de bases de pavimentos deve apresentar resistência mínima de compressão de 2,1 MPa, isso aos sete dias de cura do material. Contudo, este tempo de cura está inserido em uma normatização específica federal para uso de fiscalização no aceite de pavimentações de âmbito rodoviário, com uma carga de tráfego entre alta e média, e veículos normalmente com sobrepeso em seus eixos.

Sendo assim, a partir das normas vigentes e dos ensaios de RCS pode-se afirmar que para as duas energias de compactação estudadas se faz necessário uma quantidade de 16% de cal hidratada em pó, com no mínimo 28 dias de cura, para aplicação deste material em camadas de sub-base e de base de pavimentação.

Os autores, pelos resultados obtidos, esperam confirmar com o emprego de energia do proctor modificado, que o uso de teores de 6% a 8% já permitam o emprego do solo para construção de sub-bases de pavimentos.

4 CONCLUSÕES

Após a apresentação e a análise dos resultados as seguintes conclusões são apresentadas abaixo.

Os estudos realizados com o solo sedimentar da região de Curitiba, misturado à cal hidratada do tipo CH-III em pó, demonstra a importância da estabilização deste solo através da adição da cal hidratada, uma vez a adição deste material melhora a sua trabalhabilidade e as suas propriedades mecânicas e estruturais.

Em relação aos valores obtidos nos ensaios de CBR, as amostras de solo-cal que atingiram o valor mínimo de 20% estabelecido por norma para uso de sub-base foram as com adição de 8 e 16% da cal. Com o solo natural e mesmo com nenhuma das adições da cal hidratada foi possível atingir os valores mínimos de 60% de CBR para compor camadas de base para pavimentação rodoviária. Apenas as amostras com 16% de cal apresentaram valor satisfatório para os ensaios de expansão (menor que 0,5%) para uso como base e sub-base.

Todas as amostras de solo estabilizado pela cal hidratada apresentaram resultados de resistência à compressão simples superiores aos obtidos pelo solo natural, compactado tanto pela energia normal quanto pela energia intermediária. Contudo, segundo as normas vigentes, apenas a mistura de 16% é aceita para fins de pavimentação, tanto para base como para sub-base. As amostras com 16% da cal obtiveram os melhores resultados de resistência, sendo de 2,71 MPa, aos 28 dias de cura, com a energia intermediária, e de 2,37 MPa com a energia normal, no mesmo período.

Sendo assim, os resultados de CBR, expansão e RCS apontam apenas a possibilidade de uso da mistura de 16% de cal como sub-base na pavimentação rodoviária.

Através das análises dos ensaios realizados, pode-se concluir que com apenas pequenas adições da cal hidratada sobre o solo permitem a melhora gradativa de suas propriedades. Em face aos problemas constantes verificados em grande parte da malha rodoviária do país, e na grande quantidade de arruamentos com anti-pó verificados na cidade de Curitiba, vale avaliar esta alternativa, que permite melhorar os materiais existentes no local a fim de estarem propícios para receberem estruturas de pavimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores demonstram agradecimento ao suporte financeiro da CAPES, CNPq, UTFPR, e aos colaboradores do Laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 7182 (1986). Solo - *Ensaio de Compactação*, Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- ABNT NBR 9895 (1987). Solo - *Índice de Suporte Califórnia*. Rio de Janeiro, RJ, 14 p.
- ABNT NBR 12024 (1990). Solo-Cimento - *Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos*, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABNT NBR 12025 (1990). Solo-Cimento - *Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos*, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- Cordeiro, J.F.S. (2007). *Estabilização Química e Solidificação do Resíduo Oleoso Gerado nas Atividades de E & P de Petróleo, com Solo para o Uso em Camadas de Bases e/ou Sub-Bases de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, PB, 136 p.
- Dalla Rosa, A. (2009). *Estudo dos Parâmetros-chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal*, Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 198 p.
- DER/PR - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. (2005). *Pavimentação: Solo-Cal-Cimento*. Especificações de Serviços Rodoviários. DER/PR ES-P14/05. Curitiba, PR, 14 p.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Ministério dos Transportes. (1994). *Solos* –

Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas. DNER-ME 049, 14 p.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. (2010). *Pavimentos Flexíveis*. Base Estabilizada Granulométricamente. Especificação de Serviço. – Norma DNIT 141-ES - Revisão da Norma DNER-ES 303/97. Rio de Janeiro, RJ, 9 p.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. (2006). *Manual de Pavimentação*. 3 ed. Publ. IPR-719. Rio de Janeiro, RJ, 274 p.

Marques, G.L.O. (2009). *Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação*. Notas de Aula, Capítulo 4. UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Juiz de Fora, MG, 204 p.

Núñez, W.P. (1991). *Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação*, Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil) Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

Oliveira, J.C. (2000). *Caracterização Geotécnica de Materiais Inconsolidados Arenosos do Distrito Federal Utilizados como Material de Construção*. Dissertação de Mestrado, Unb - Universidade de Brasília, DF.

Vizcarra, G.O.C. (2010). *Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos*. M.Sc. Civil Engineering Departament of Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio, RJ, Brazil.