



Durabilidade de Misturas Alternativas de Solo, Pó de Pedra e Cal através do Método IOWA.

Juliana Azoia Lukiantchuki

Professor Associado, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, jalukiantchuki@uem.br

Juliana Maria de Souza

Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, jmaria.eng@gmail.com

Gleicy Loany de Alencar Cardoso

Doutoranda, UEM, Maringá, Brasil, pg56011@uem.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a avaliação do comportamento de um solo laterítico mediante a ensaios de durabilidade em misturas de solo (100%, 75%, 50% e 25%), pó de pedra (25%, 50% e 75%) e cal hidratada (9% e 11%), utilizando o método IOWA. Para isso, corpos de prova foram submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, e comparou-se os valores de resistência à compressão simples dessas amostras com corpos de prova mantidos em câmara úmida sem serem submetidos aos ciclos. Cada ciclo durou 48 horas, com 24 horas de imersão e 24 horas de secagem ao ar, totalizando 12 ciclos completos. A análise dos resultados revelou que o pó de pedra exerceu uma influência positiva na degradação dos corpos de prova, sendo que quanto maior seu teor, menor foi a degradação ao longo dos ciclos. Os resultados indicam ainda que mesmo com a redução da quantidade de cal, a degradação permaneceu semelhante em corpos de prova que continham 50% ou 75% de pó de pedra. Com base nessas considerações, torna-se claro o benefício da utilização do pó de pedra na estabilização de solos lateríticos.

PALAVRAS-CHAVE: Cal, Pó de pedra, Ensaio de durabilidade, Método IOWA.

ABSTRACT: This work presents the evaluation of the behavior of lateritic soil through durability tests on mixtures of soil (100%, 75%, 50%, and 25%), quarry dust (25%, 50%, and 75%), and hydrated lime (9% and 11%), using the IOWA method. For this purpose, specimens were subjected to wetting and drying cycles, and the compressive strength values of these samples were compared with those of specimens kept in a humid chamber without undergoing the cycles. Each cycle lasted 48 hours, consisting of 24 hours of immersion and 24 hours of air drying, for a total of 12 complete cycles. Analysis of the results showed that quarry dust exerted a positive influence on the degradation of the specimens, with the higher its content, the lower the degradation over the cycles. The results also indicate that even with the reduction in the amount of lime, degradation remained similar in specimens containing 50% or 75% stone dust. Based on these considerations, the benefit of using quarry dust in the stabilization of lateritic soils becomes clear.

KEYWORDS: Lime, Quarry dust, Durability test, IOWA method.

1 INTRODUÇÃO

Quando o solo natural não atende aos requisitos necessários para o seu emprego em obras de pavimentação e ou geotecnica, é possível recorrer a técnicas de correção de algumas propriedades para melhorar o seu desempenho. O processo de melhoramento do solo e ajuste do seu comportamento pode ser conduzido por meio de três principais tipos de estabilizações: a mecânica, que visa a aplicação de diferentes tipos de energias de compactação; a estabilização química, que através da adição de produtos químicos irá promover a alteração na textura original do solo; e a estabilização granulométrica, que se dá através da adição de outros tipos de solos ou materiais alternativos, corrigindo sua estrutura original (Senço, 2007).

Dentre as técnicas de estabilização química destaca-se o uso do cimento Portland e da cal hidratada. A cal hidratada promove a estabilização do solo através de trocas catiônicas, aglomerações, floculações e reações



pozolânicas, que por sua vez são responsáveis por mudanças texturais, de resistência e da trabalhabilidade na mistura solo-cal (Silva, 2016).

Adicionalmente, o aumento dos custos dos materiais de construção aliado a redução da disponibilidade de materiais naturais e nova exigências e limitações impostas na construção de obras geotécnicas torna fundamental a busca por novos materiais que possam ser desenvolvidos aliando um bom desempenho e um custo relativamente baixo. Neste sentido, muitas pesquisas tem buscado incorporar o uso de resíduos sólidos visando reduzir os teores de cal necessários à estabilização do solo.

Considerando que o Paraná é o terceiro estado com maior quantidade de usinas de britagem no Brasil (Souza, 2020) e que na região da cidade de Maringá (PR) existe uma grande geração de resíduos de pó de pedra, torna-se interessante o desenvolvimento de estudos voltados para a destinação adequada desses resíduos. O pó de pedra, resultante da britagem das rochas, apresenta baixa demanda e consequentemente um baixo valor comercial. Este material muitas vezes fica alocado em lugares suscetíveis a ocorrência de processos de intemperismo. Isso resulta no surgimento de diversos problemas, tais como: alteração da paisagem, geração de poeiras, assoreamento de rios e lagos, e até mesmo o comprometimento de lençóis freáticos (Costa e Silva, 2012).

O emprego desses materiais alternativos necessita de estudos experimentais que avaliem o seu comportamento sobre diferentes condições. Sendo assim, o desempenho dos materiais pode ser analisado através da sua durabilidade. Diversas abordagens podem ser empregadas neste processo, porém em laboratório essa avaliação normalmente é conduzida pela análise da perda de peso e/ou da redução da resistência nos corpos de prova, submetidos a ensaios de umedecimento e secagem do material, ou através de processos de degelo e congelamento, sendo este último menos aplicável em regiões tropicais e subtropicais (Marcon, 1997). Com base em todo o contexto discutido este trabalho apresenta a avaliação da durabilidade de misturas de solo, pó de pedra e cal através do método IOWA afim de analisar o efeito da adição de cal e pó de pedra na durabilidade do solo natural.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Solo

A amostra de solo deformada utilizada na pesquisa foi coletada na cidade de Xambrê, no estado do Paraná. A região que compreende o município de Xambrê possui um solo caracterizado como argissolos vermelho-amarelos eutróficos e latossolos vermelhos distróficos. As propriedades geotécnicas do solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do solo.

Parâmetro	
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,600
pH (H ₂ O)	7,7
pH (CaCl ₂)	6,8
Argila (%)	17
Silte (%)	7
Areia fina (%)	54
Areia média (%)	22
Limite de liquidez – L _L (%)	NP
Limite de plasticidade – L _P (%)	NP
Índice de plasticidade – IP (%)	-

Nota: NP – não plástico

2.1.2 Pó de pedra

O pó de pedra utilizado foi fornecido pela EXTRACON Mineração e Obras Ltda, localizada na cidade de Maringá, estado do Paraná. O material é proveniente do processo de britagem de rochas de basalto, que são



originárias dos derrames basálticos da Era Paleozóica. O material encontra-se presente em 75% da Bacia do Paraná. A mineralogia do pó de pedra é composta por feldspato, muscovita, mica, magnetita, hematita, ferro e magnesita. A preparação do material foi feita através do peneiramento, utilizando a peneira nº 10, seguido pelo acondicionamento em tambores para garantir a integridade do material. As propriedades geotécnicas do pó de pedra são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização do pó de pedra.

Parâmetro	
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,920
pH (H ₂ O)	9,82
pH (CaCl ₂)	10,29
Argila (%)	6
Silte (%)	50
Areia fina (%)	44

2.1.3 Cal

O aditivo químico utilizado para o estudo foi a cal hidratada, do tipo CHIII produzida pela empresa Calcário Calponta LTDA, representante da marca Calponta. De acordo com o fabricante, a cal hidratada Calponta é obtida através da hidratação da cal virgem, sendo caracterizado como um hidróxido, apresentando a seguinte formulação química: Ca(OH)₂ + Mg(OH)₂.

A distribuição granulométrica da cal indica que cerca de 6,8 % dos componentes apresentam um diâmetro inferior a 1µm, 53,8 % do material se encontram na faixa de 1µm a 10 µm, 34,4 % estão compreendidos no intervalo de 10 µm e 100 µm, e 5,0 % das partículas possuem diâmetro superior a 100 µm.

2.2 Métodos

2.2.1 Moldagem dos corpos de prova

A preparação das misturas dos corpos de prova foi realizada de acordo com as proporções apresentadas na Tabela 3 e utilizando os parâmetros de compactação: massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot}) apresentados na Figura 4. As proporções dos materiais foram determinadas em termos de massa seca do solo. Inicialmente, foi realizada a mistura do solo, da cal e do pó de pedra, os quais foram misturados até obter a completa homogeneização dos materiais. Em seguida, foi adicionada a água destilada, em quantidade necessária para a obtenção do teor de umidade ótimo das misturas. Posteriormente, a fim de garantir a completa homogeneização dos materiais, a mistura foi passada na peneira nº 10.

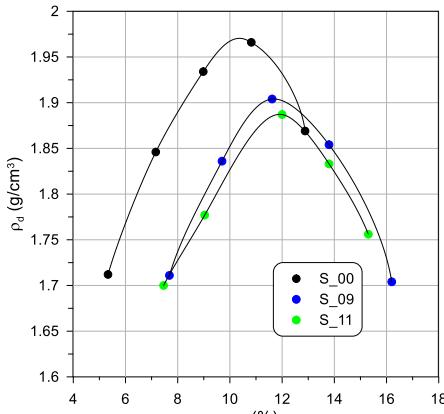
Após o preparo das misturas, realizou-se a compactação dos corpos de prova utilizando um cilindro bipartido, com dimensões padronizadas de 100 mm e altura e 50 mm de diâmetro. A compactação dos corpos de prova foi realizada manualmente em três camadas distintas.

Tabela 3. Proporções dos materiais para as misturas adotadas.

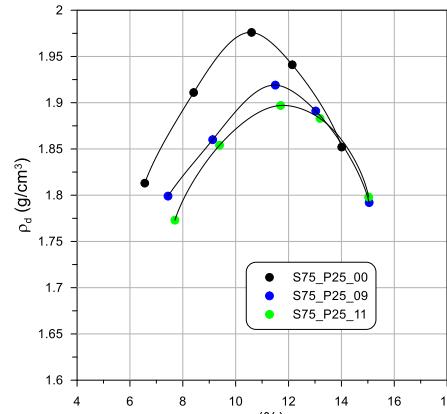
Misturas	% de solo	% de cal	% de pó de pedra
S ₁₀₀ C ₁₁	100	11	-
S ₇₅ P ₂₅ C ₁₁	75	11	25
S ₅₀ P ₅₀ C ₁₁	50	11	50
S ₂₅ P ₇₅ C ₁₁	25	11	75
S ₁₀₀ C ₉	100	9	-
S ₇₅ P ₂₅ C ₉	75	9	25
S ₅₀ P ₅₀ C ₉	50	9	50
S ₂₅ P ₇₅ C ₉	25	9	75

Depois da compactação das camadas, foi realizado o nivelamento do corpo de prova, ainda no molde cilíndrico, posteriormente os corpos de prova foram desmoldados, e em seguida submetidos a medições de altura e pesagens com o auxílio de um paquímetro e uma balança analítica, respectivamente. Após serem devidamente embalados e identificados, os corpos de prova foram transferidos para uma câmara úmida para o

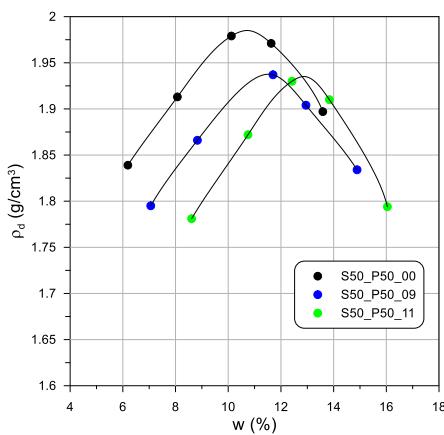
processo de cura por um período de 14 dias, em que permaneceram sob uma temperatura em torno de 21°C, e umidade relativa de aproximadamente 95%.



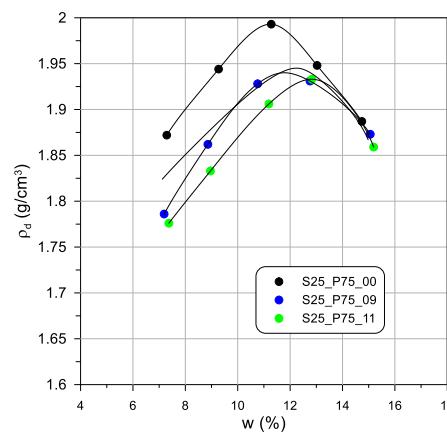
(a) Curvas de compactação (Solo-Cal)



(b) Curvas de compactação (S75_P25)



(c) Curvas de compactação (S50_P50)



(d) Curvas de compactação (S25_P75)

Figura 1. Curvas de compactação das misturas.

2.2.2 Ensaio de durabilidade através do método IOWA

O ensaio de durabilidade foi realizado utilizando o método desenvolvido por Hoover, Handy e Davidson (1958). Este método consiste em avaliar a perda de resistência das misturas através de ciclos de umedecimento e secagem dos corpos de prova. Os ensaios de durabilidade foram conduzidos utilizando 4 misturas distintas para cada porcentagem de cal, conforme apresentado na Tabela 3, onde variou-se as porcentagens de solo, pó de pedra e cal hidratada.

Após o processo de cura dos corpos de prova, metade dos corpos de prova de cada mistura foi submetido a 12 ciclos completos de durabilidade, cada um com duração de 48 horas, sendo 24 horas destinadas a imersão em água destilada, e as outras 24 horas de secagem ao ar livre nas dependências do laboratório. Após cada ciclo completo de umedecimento e secagem do material, também foi realizado o controle das massas dos corpos de prova, que permitiu avaliar a perda de massa em relação aos ciclos, fornecendo assim informações importantes sobre a degradação progressiva do material ao longo do tempo. A Figura 2 apresenta o ensaio de durabilidade em andamento.

Após a finalização dos 12 ciclos, tanto os corpos de prova que permaneceram em câmara úmida, quanto aqueles que passaram pelos ciclos de umedecimento e secagem, foram submetidos a um último ciclo de imersão, com duração de 24 horas. Após esse processo, cada corpo de prova foi cuidadosamente seco e suas massas foram novamente verificadas, e então, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples.



(a) Ciclo de molhagem



(b) Ciclo de secagem

Figura 2. Ensaio de durabilidade em andamento.

As rupturas dos corpos de prova seguiram as diretrizes do método ASTM D5102-09, utilizando-se uma velocidade de deformação de 0,5 mm/min. Durante cada teste de ruptura, tanto a carga aplicada quanto os deslocamentos correspondentes foram registrados continuamente. Esses dados então foram utilizados para construir uma curva que relaciona a tensão aplicada com a deformação do corpo de prova durante a realização do ensaio. A partir dessa curva, foi possível extrair o ponto de ruptura (valor máximo suportado), que determina a resistência à compressão simples do material.

Com base nos resultados dos ensaios de ruptura, foi realizada uma análise comparativa entre as resistências à compressão das misturas submetidas aos ciclos de umedecimento/secagem e aquelas que permaneceram em cura na câmara úmida. De acordo com Hoover, Handy e Davidson (1958), para alcançar uma condição satisfatória de durabilidade, a resistência à compressão das misturas sujeitas aos ciclos deveria representar 80% da resistência das misturas que ficaram em cura na câmara úmida. Esse critério foi adotado como indicativo de que as misturas mantiveram uma resistência adequada, mesmo após serem submetidos aos ciclos de durabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Misturas com 11% de cal

Os corpos de prova contendo 11% de cal apresentaram uma alternância entre a perda e o ganho de massa ao longo dos ciclos, esse fenômeno pode ter sido influenciado pelas variações do teor de umidade das amostras devido à absorção de água durante o processo de umedecimento. A perda de massa entre os ciclos foi realizada através dos valores médios das massas dos corpos de prova que correspondiam às mesmas misturas. Observou-se que, apesar da perda de massa decorrente durante os ensaios de durabilidade, essas reduções se mantiveram dentro da margem estipulada por Núñez (1991), a qual determina que a perda de massa não deve ser superior a 10% da massa inicial das misturas. É possível notar também que a composição que apresentou a menor perda de massa em relação aos ciclos foi a S₂₅P₇₅C₁₁, que apresenta uma maior quantidade de pó de pedra em sua composição, apresentando uma taxa de perda de massa igual a 5,59% (Tabela 4). Em contrapartida, a maior perda de massa foi observada na mistura S₁₀₀C₁₁, totalizando 6,20% (Tabela 4). Esse resultado ressalta a influência do pó de pedra na conservação da massa dos corpos de prova, sugerindo que a adição de pó de pedra pode minimizar a perda de massa em relação aos ciclos.



2 0 2 5

Tabela 4. Perda de massa (%).

Misturas	Perda de massa (%)	
	11% de cal	9% de cal
S ₁₀₀	6,20	11,08
S ₇₅ P ₂₅	5,97	9,74
S ₅₀ P ₅₀	5,95	6,50
S ₂₅ P ₇₅	5,59	5,88

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados de resistência à compressão simples comparando os valores de resistência dos corpos de prova das amostras que foram submetidas aos ciclos de umedecimento e secagem e aquelas que não foram submetidas aos ciclos. Os ensaios indicam que conforme observado visualmente, as amostras de solo-cal foram aquelas que apresentaram menor relação entre a tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), correspondente a 87,5% e representando uma perda de resistência de 12,5%. A adição de pó de pedra indicou que mesmo após os ciclos de umedecimento e secagem, as amostras não perderam resistência. Todas as amostras apresentaram relação entre as $\sigma_{\text{máx}}$ superior a 80% e demonstrando que são adequadas no que se refere a durabilidade do material.

Tabela 5. Resumo dos resultados das misturas com 11% de cal.

S₁₀₀				
$\sigma_{\text{máx.}}$ (kPa)	Sd	Cv (%)	Condição dos ensaios	Relação entre $\sigma_{\text{máx.}}$
357,5	22,91	6	12 ciclos (umed./sec)	87,5%
408,7	33,29	8	Sem ciclos	
S₇₅P₂₅				
$\sigma_{\text{máx.}}$ (kPa)	Sd	Cv (%)	Condição dos ensaios	Relação entre $\sigma_{\text{máx.}}$
455,9	34,71	8	12 ciclos (umed./sec)	100,8%
452,4	25,89	6	Sem ciclos	
S₅₀P₅₀				
$\sigma_{\text{máx.}}$ (kPa)	Sd	Cv (%)	Condição dos ensaios	Relação entre $\sigma_{\text{máx.}}$
636,8	33,52	5	12 ciclos (umed./sec)	103,5%
615,46	22,92	4	Sem ciclos	
S₂₅P₇₅				
$\sigma_{\text{máx.}}$ (kPa)	Sd	Cv (%)	Condição dos ensaios	Relação entre $\sigma_{\text{máx.}}$
740,5	19,51	3	12 ciclos (umed./sec)	100,4%
737,4	35,72	5	Sem ciclos	

onde: Sd é o desvio padrão e Cv é o coeficiente de variação.

3.2 Misturas com 9% de cal

Para os corpos de prova contendo 9 % de cal, também foi observada uma alternância entre a perda e o ganho de massa ao longo dos ciclos, conforme discutido no item 3.1, que representam a variação percentual da massa durante os ensaios de durabilidade (Tabela 4).

É possível observar na Tabela 4, que a mistura que apresentou a maior perda de massa em decorrência dos ciclos foi a S₁₀₀C₉, registrando 11,08 %, sendo a única a ultrapassar o limite estipulado por Núñez (1991). Por outro lado, todas as demais composições com 9% de cal permaneceram dentro do limite de 10%. Nota-se ainda que a mistura que apresentou a menor perda de massa foi a S₂₅P₇₅C₉, com 5,88% (Tabela 4). Os resultados alcançados por meio das composições contendo 9% de cal reforçam a hipótese que destaca a relevância da quantidade do pó de pedra na preservação da durabilidade dos corpos de prova, validando assim, a influência que o pó de pedra exerce sobre a estabilidade da massa das misturas.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados de resistência à compressão simples comparando os valores de resistência dos corpos de prova das amostras que foram submetidas aos ciclos de umedecimento e secagem e aquelas que não foram submetidas aos ciclos. Os ensaios indicam que conforme observado visualmente, as amostras de solo-cal foram aquelas que apresentaram menor relação entre a tensão máxima



($\sigma_{máx}$), correspondente a 77,5%, valor inferior a 80% e recomendado pelo método Iowa para validação do material. A adição de pó de pedra indicou que mesmo após os ciclos de umedecimento e secagem, as amostras S₅₀P₅₀ e S₂₅P₇₅ não perderam resistência, enquanto que a mistura S₇₅P₂₅ apresentou uma perda muito reduzida. Todas as amostras apresentaram relação entre as $\sigma_{máx}$ superior a 80% demonstrando que são adequadas no que se refere à durabilidade do material. A maior relação entre as $\sigma_{máx}$ foi obtida para a mistura S₅₀P₅₀, atingindo cerca de 134% e indicando um aumento de resistência para as misturas que foram submetidas aos ciclos de umedecimento e secagem. Esse comportamento deverá ser melhor investigado em pesquisas futuras.

Tabela 6. Resumo dos resultados das misturas com 9% de cal.

S₁₀₀				
$\sigma_{máx.}$ (kPa)	Sd	Cv (%)	Condição dos ensaios	Relação entre $\sigma_{máx.}$
427,12	25,71	6	12 ciclos (umed./sec)	77,5%
550,91	45,23	8	Sem ciclos	
S₇₅P₂₅				
$\sigma_{máx.}$ (kPa)	Sd	Cv (%)	Condição dos ensaios	Relação entre $\sigma_{máx.}$
419,00	35,85	9	12 ciclos (umed./sec)	98,29%
426,29	9,98	2	Sem ciclos	
S₅₀P₅₀				
$\sigma_{máx.}$ (kPa)	Sd	Cv (%)	Condição dos ensaios	Relação entre $\sigma_{máx.}$
477,75	20,63	4	12 ciclos (umed./sec)	134,25%
355,86	19,87	6	Sem ciclos	
S₂₅P₇₅				
$\sigma_{máx.}$ (kPa)	Sd	Cv (%)	Condição dos ensaios	Relação entre $\sigma_{máx.}$
364,74	42,41	12	12 ciclos (umed./sec)	102,95%
354,28	38,08	11	Sem ciclos	

onde: Sd é o desvio padrão e Cv é o coeficiente de variação.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a durabilidade de misturas compostas por solo, pó de pedra e cal, através do método IOWA. Os resultados indicam que durante os ciclos de umedecimento e secagem, as misturas com 11% e 9% de cal, apresentaram variações nas massas dos corpos de prova. No entanto, apesar dessa variação entre perda e ganho de massa, todas as misturas permaneceram dentro do limite de 10%, conforme estabelecido por Núñez (1991), com exceção da composição S₁₀₀C₉ que registrou a maior perda de massa (11,08%). Em contrapartida, a composição S₂₅P₇₅C₁₁ apresentou a menor perda, registrando 5,58%. Em relação aos valores de relação entre as tensões máximas, as misturas com pó de pedra indicaram que os ciclos de umedecimento e secagem praticamente não alteraram a resistência da amostra, sendo que para algumas amostras os valores de resistência das amostras que foram submetidas aos ciclos foram superiores àquelas que não passaram pelos ciclos. Por fim, os resultados indicam ainda que a presença do pó de pedra nas misturas teve um efeito positivo na resistência à degradação dos corpos de prova. Ou seja, composições com uma proporção maior de pó de pedra demonstraram uma degradação menor em comparação com aquelas que continham menor ou nenhuma quantidade de pó de pedra. Conclui-se, portanto, que o pó de pedra desempenha um papel importante na estabilidade das misturas, e consequentemente, reduz a degradação ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. (2009). ASTM D5102 – 09: Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil – Lime, 7p.
- Costa, J. H. B., Silva, D. C. C. (2012) Aproveitamento dos finos de pedreira do município de Tracuateua/PA - caracterização tecnológica. In: VII CONNEPI - Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. ISBN 978-85-62830-10-5. Palmas, Tocantins, 137-141p.



2 0 2 5

Hoover, J. M; Handy, R. L; Davidson, D. T. (1958). *Durability of Soil-Lime-Fly Ash Mixtures Compacted above Standard Proctor Density*. Highway Research Board Bulletin. Washington, D. C., 11p.

Marcon, A. F. (1977). *Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cal-cinza volante*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 119p.

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 UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 150p.

Senço, W. (2007) Manual de Técnicas de Pavimentação, Vol. 2, 2^a Ed. São Paulo: Editora Pini, 764p.

Silva, M. F. (2016) *Estudo de Estabilização de Cal de um Solo Laterítico e Um Solo Não Laterítico*. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 118p.

Souza, J. M. (2020) *Estabilização de um solo argiloso através da incorporação de cimento Portland, resíduo de construção civil (RCC) e resíduo de pó de pedra*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, 150p.