

Análise de Estabilização Química de Solo Argiloso com Cimento pra Uso na Pavimentação

Juliana Gabrielle Florêncio Gomes Cardoso
UFS, São Cristóvão, Brasil, nana_brielle@hotmail.com

Guilherme Bravo de Oliveira Almeida
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, gbravo1982@gmail.com

Michéle Dal Toé Casagrande
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, michele_casagrande@puc-rio.br

RESUMO: Os materiais utilizados na pavimentação nem sempre apresentam características adequadas para sua aplicação direta na construção de estradas. A fim de modificar as propriedades dos solos, tais quais: a resistência, plasticidade e coesão, uma alternativa que vem sendo bastante usada e estudada é a estabilização química com cimento. A depender da porcentagem, pode-se classificar a mistura como solo melhorado com cimento ou solo-cimento. Este estudo teve como objetivo estabilizar quimicamente um solo argiloso com cimento a fim de adaptar suas características de resistência e plasticidade para o uso como base e/o sub-base na pavimentação. O solo argiloso foi retirado da Jazida Cajueiro, no município de São Cristóvão (SE), cujas propriedades e das misturas solo-cimento foram analisadas e verificadas através dos ensaios de caracterização, compactação, índice de suporte califórnia, resistência à compressão simples. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV) da Universidade Federal de Sergipe (UFS). Apresenta-se um comparativo entre os teores de cimento adicionados ao solo em vários ensaios, avaliando se as melhorias das características foram alcançadas, de forma a viabilizar ou não o uso deste solo estabilizado como material de construção na pavimentação. A determinação de um teor ideal, dentre os estudados, contribui não só para o melhor entendimento do funcionamento do processo de estabilização química, mas também, proporciona uma opção para o uso de um material tido como ruim na construção de pavimentos. Normalmente esse material seria apenas descartado, ao estabilizá-lo, apresenta-se uma alternativa favorável para o meio ambiente e, que, ainda, reduz significativamente os custos da obra.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização química, Solo-cimento, Solo Argiloso, Pavimentação.

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação no Brasil é uma das áreas de infraestrutura mais deficientes. Diante dessa situação, torna-se necessário o investimento em pesquisas que possam colaborar com o avanço do conhecimento e melhor entendimento do comportamento dos pavimentos e dos materiais que o constituem.

Os materiais usados na pavimentação devem possuir características apropriadas, de forma

que garantam bom desempenho, segurança, resistência aos esforços do tráfego, sem trincamentos nem deformações excessivos.

No entanto, nem sempre os solos e os materiais que compõem os pavimentos são encontrados em condições ideais para serem diretamente aplicados na estrutura. Sendo assim, muitas vezes, é necessária a utilização de alternativas, como a adição de outros materiais para adaptar e melhorar certas características dos mesmos, como no caso dos processos de

estabilização.

Segundo Department Of The Army, The Navy and The Air Force (1994), estabilização é o processo de combinação e mistura de materiais com solo com o objetivo de alterar qualquer uma de suas propriedades, podendo ser forma mecânica, física ou química. Este processo pode incluir uma combinação entre solos, afim de alcançar uma graduação desejada; a mistura de aditivos que pode alterar a graduação, textura e plasticidade; ou, ainda, agir como aglutinador para a cimentação do solo.

Para o processo da estabilização química, o agente estabilizador é um produto químico que confere ao solo uma ação aglutinante entre as partículas (MARANGON, 1992). No caso de estabilização com a adição de cimento Portland, prepara-se uma mistura homogênea de solo, cimento e água, em proporções determinadas, em que a ação estabilizante do cimento depende do seu teor (CRUZ, 2004).

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), este tipo de estabilização pode ser dividido nas seguintes categorias: solo-cimento, com teor de cimento de 6 a 10%; e solo modificado ou melhorado, de 2 a 4%. No caso do solo-cimento, há aumento considerável de resistência devido à cimentação das partículas, já para o modificado, há alterações na fração argilosa do solo, diminuindo sua plasticidade, sem que haja ganho significativo de resistência.

O comportamento das misturas de solo-cimento deve garantir os parâmetros básicos exigidos para aplicação em base e/ou sub-base, de forma que o cimento cumpra seu papel de aperfeiçoar determinadas propriedades do solo, tais como textura, graduação, trabalhabilidade e plasticidade; assegurando resistência de no mínimo 2,1 MPa, como determina a DNIT-ES 143/2010, e, também durabilidade.

A estabilização da mistura solo-cimento ocorre a partir de dois tipos de reações: as de hidratação do cimento Portland e as entre os argilominerais e a cal liberada na hidratação do cimento. Portelinha (2008) observou que, inicialmente, em solos argilosos, a reação da mistura solo-cimento se dá com os constituintes anidros, que em presença de água, hidratam-se e

endurecem. Durante essa hidratação, há liberação de cal (hidróxido de cal) que reage com os componentes químicos do solo, havendo, inclusive, variação do pH e alterações nos componentes químicos anteriormente formados na hidratação do cimento. Ou seja, tal como Marques (2006) concluiu, as reações de hidratação do cimento são as mais importantes e respondem pela maior parte da resistência final alcançada para a mistura. No entanto, para os solos argilosos a resistência devido às reações pozolânicas se dão às custas de um decréscimo de contribuição da matriz cimentante.

A análise dos fatores que influenciam no processo de estabilização é fundamental para a garantia da eficiência. Esses principais fatores são: a granulometria do solo usado, o grau de compactação alcançado, o tipo e tempo de cura associado à temperatura, o tempo entre a mistura e sua compactação, a quantidade de água adicionada, homogeneização da mistura e, também, a quantidade de cimento utilizada (MARANGON, 1992).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar as melhorias proporcionadas pela estabilização química com adição do cimento Portland, misturando-o a um solo argiloso. Além de verificar se as misturas de solo-cimento se enquadram nos parâmetros de resistência exigidos para a aplicação como materiais componentes de camadas base e/ou sub-base na pavimentação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo utilizado foi retirado da Jazida Cajueiro, no município de São Cristóvão (SE), nas coordenadas 10° 55' 57" S e 37° 10' 19,6" W, próximo a BR 101. A classificação do solo foi feita de acordo com a Transportation Research Board (TRB), resultando em um solo argiloso, A-7-6.

O cimento Portland usado na estabilização foi o CP V-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial) e a escolha por esse tipo de cimento foi baseada na composição química, sendo o mais puro encontrado no comércio

local.

Para a adição ao solo, os teores foram de 9, 11 e 13% em relação à massa de solo seco, definidos pelo tipo de solo, de acordo o Estudo Técnico da ABCP (ET-35, 2004), baseada na norma geral de dosagem de solo-cimento da Portland Cement Association (PCA).

2.2 Métodos

Os métodos utilizados para os ensaios foram realizados de acordo com suas respectivas normas.

Para o ensaio de granulometria o solo foi seco ao ar, posteriormente, destorroado, quarteado e preparado de acordo com a norma DNER-ME 041/94. Quanto à execução do ensaio, foi feita de acordo com a norma DNER-ME 051/94.

Para os Limites de Atterberg, feitos de acordo com as normas específicas, para o LL, a DNER-ME 122/94; para o LP, DNER-ME 082/94.

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 129/94, de acordo com o método “B” e com energia de compactação intermediária de 26 golpes por camada. Apesar de esta norma descrever a energia normal para solo-cimento, foi utilizada a energia intermediária, uma vez que esta pesquisa faz parte de um estudo experimental no qual será misturada, ao solo-cimento, porcentagens de resíduos de cobre pós-jateado caracterizando, portanto, uma estabilização granulométrica.

Para o Índice de Suporte Califórnia, o procedimento de execução foi feito de acordo com a norma específica, a DNI T-ME 049/2014, apenas para o solo puro, uma vez que o parâmetro de resistência usado para a qualificação do uso do material para a pavimentação, para misturas de solo cimento, é o ensaio de resistência à compressão simples.

E o ensaio de RCS mede a resistência à compressão, cujo parâmetro normativo é DNER-ME 201/94 e a DNER-ME 202/92 para a preparação dos corpos de prova. Aqueles destinados à dosagem do solo-cimento, após o período de cura de sete dias, foram submetidos

à imersão em água por 4 horas. Entretanto, os corpos de prova de solo puro não foram imersos em água por acabarem se desintegrando ao serem mergulhados.

Como forma de avaliar a perda de plasticidade do solo com as porcentagens de cimento Portland, os corpos de prova após serem rompidos foram secos, destorroados e repartidos numa quantidade suficiente para a determinação dos limites de liquidez e plasticidade, segundo as respectivas normas.

Para a aplicação do material ensaiado como base e/ou sub-base para a pavimentação, no caso da mistura de solo-cimento, o resultado do RCS deve ser maior ou igual a 2,1 MPa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização

3.1.1 Granulometria

O ensaio de análise granulométrica foi feito para duas amostras de solo puro. Os resultados obtidos quanto às frações estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados do ensaio de granulometria para o solo puro.

Material	E01	E02
Pedregulho (%)	6,26	5,35
Areia (%)	28,98	29,74
Silte (%)	23,35	22,62
Argila (%)	41,41	42,29

Há uma alta porcentagem de fração fina, formando juntas quase 65% em ambas as amostras. Essa alta porcentagem de finos influencia diretamente no comportamento da mistura solo-cimento. Devido a maior área específica das partículas, os solos coesivos tendem a exigir maior teor de cimento para a estabilização, assim como maior quantidade de água para o processo de hidratação. Além disso, a fração fina determina o comportamento referente às características de plasticidade e coesão, o que será discutido no item a seguir.

3.1.2 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg são os de liquidez e plasticidade, que avaliam as características de plasticidade e coesão. Foram realizados dois ensaios tanto para o solo puro, quanto para as misturas com 9% (SC9), 11% (SC11) e 13% (SC13) de cimento. Os resultados encontrados estão representados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para solo puro e misturas.

Mistura	Ensaio	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo Puro	E01	47	21	26
	E02	45	22	23
	Média	46	21	24
Solo + 9% de cimento	E01	33	24	9
	E02	33	26	7
	Média	33	25	8
Solo + 11% de Cimento	E01	32	27	5
	E02	32	28	4
	Média	32	27	4
Solo + 13% de cimento	E01	-	-	-
	E02	-	-	-
	Média	NP	NP	NP

Os resultados apresentaram uma acentuada queda nos valores dos limites de liquidez e de plasticidade, como já esperado e descrito na Tabela 2, devido à ação aglutinante que o acréscimo do cimento provoca na mistura. Houve, também, redução quanto ao índice de plasticidade do solo, em que o IP foi de 24%, do solo puro, para 8, na mistura SC9; 4, para SC11; e até para “Não Plástico (NP)” na SC13.

Este comportamento pode ser melhor explicado devido às reações de hidratação do cimento, em que há uma troca entre os íons existentes nas partículas de argila, alterando assim a distribuição das cargas elétricas. Essa alteração leva a uma atração entre as partículas e, conseqüentemente, à sua floculação, de forma que ao adquirirem maiores dimensões, perdem plasticidade e coesão (CRUZ, 2004).

Com os resultados da caracterização, pode ser feita a classificação dos solos, de acordo com a TRB, que os separa, inicialmente, pela porcentagem de solo que passa na peneira #200, depois são levados em consideração os limites de consistência e índice de grupo.

Como o solo puro apresentou cerca de 65%

passando pela peneira #200; LL=46%; IP= 24% e IG=16, pode, portanto, ser classificado como um solo argiloso, A-7-6.

3.2 Compactação

Para a compactação do solo puro, os resultados referentes tanto ao solo puro quanto às misturas estão na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de compactação para o solo puro e misturas.

Mistura	Ensaio	γ máx (kN/m ³)	W _{ot} (%)
Solo Puro	E01	18,7	14
	E02	18,6	15
	Média	18,63	14,5
Solo + 9% de cimento	E01	18,5	14,5
	E02	18,4	14,7
	Média	18,42	14,6
Solo + 11% de cimento	E01	18,7	14,5
	E02	18,7	14,4
	Média	18,7	14,45
Solo + 13% de cimento	E01	18,7	13,7
	E02	18,4	13,9
	Média	18,55	13,8

Para o caso da umidade, há uma tendência de a adição de cimento ao solo produzir um acréscimo no teor e um decréscimo na massa específica seca máxima, devido a ação floculante do cimento (MARQUES, 2006). No entanto, os resultados para as misturas não apresentaram essa tendência.

No caso da SC9 e da SC13, houve redução da densidade. Para as umidades, houve apenas um ligeiro aumento, como esperado, para a SC9, porém praticamente irrisório.

A razão para que as misturas não tenham apresentado os resultados de acordo com o esperado pode ser justificado por algum erro na preparação das misturas.

Nos solos coesivos, as partículas de argila tendem a consumir parte da água devido a sua maior superfície específica. Quando a quantidade de água não é suficiente para que o cimento se hidrate e aja na floculação, não há redução da densidade máxima. Provavelmente, esta quantidade insuficiente de água é a razão para que os resultados das misturas não

correspondessem ao comportamento esperado. Dessa forma, o teor de umidade ótimo que conduz à máxima massa específica seca na compactação não é necessariamente o mesmo para a máxima resistência. Para os solos argilosos, normalmente, a umidade correspondente à máxima resistência está localizada no ramo úmido, ou seja, acima da ótima (MARQUES, 2006).

3.3 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi realizado apenas para o solo puro, como já explicado nos métodos, uma vez que, para as misturas de solo-cimento, usa-se, como parâmetro de resistência para o dimensionamento, o resultado do ensaio de RCS.

Os resultados obtidos para o ISC e expansão do solo puro estão representados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de ISC e Expansão para o solo puro.

Solo Puro		
Ensaio	ISC (%)	Expansão (%)
E01	16	0,1
E02	19	0,09
Média	18	0,1

De acordo com os parâmetros estabelecidos no Manual de Pavimentação do DNIT (2006), para o solo ser aplicado como base, o mesmo deve possuir ISC > 80%; expansão < 0,5%; Limite de Liquidez (LL) < 25% e Índice de Plasticidade (IP) < 6%. Já para sub-base, ISC > 20%; IG (Índice de Grupo) = 0 e expansão < 1%. Ou seja, ele não se qualifica para aplicação em nenhuma dessas duas camadas.

Dessa maneira, espera-se que com a adição de cimento, sua resistência cresça e sua expansão seja reduzida, formando um material que assegure segurança para o funcionamento adequado do pavimento, assim como, boa resistência e durabilidade.

3.4 Resistência à Compressão Simples

O ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) foi realizado tanto no solo puro, para que se tivesse um parâmetro em relação ao aumento da resistência, quanto para as misturas.

Na preparação das amostras, para se alcançar a maior resistência, observou-se a necessidade de aumentar o valor de água adicionada, já que a tendência é que a quantidade ideal esteja cerca de 1 ou 2% a mais que a umidade ótima. Sendo assim, a preparação dos corpos de prova para os ensaios de RCS foram realizados de acordo com essa observação, ou seja, com valores de água superiores aos calculados.

Quanto maior for o acréscimo de cimento, maior deveria ser o aumento da resistência, no entanto os resultados encontrados não apresentam essa tendência, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados do ensaio de RCS para o solo puro e as misturas.

Ensaio	γ máx. Média (kN/m ³)	Wot (%)	Wmold. (%)	Resist. (MPa)	Média (MPa)
SOLO PURO					
1	18,63	14,50	14,60	2,17	2,20
2		14,50	14,50	2,13	
3		14,50	14,50	2,31	
SOLO + 9% DE CIMENTO					
1	18,42	14,50	16,86	5,36	3,31
2		14,50	15,80	2,43	
3		14,50	15,20	2,13	
4		14,50	14,01	-	
5		14,50	14,60	1,53	
6		14,50	14,80	2,40	
7		14,50	16,40	3,83	
SOLO + 11% DE CIMENTO					
1	18,7	14,40	17,21	5,44	4,28
2		14,40	17,30	4,38	
3		14,40	15,36	3,02	
4		14,40	14,32	-	
SOLO + 13% DE CIMENTO					
1	18,55	13,90	14,30	2,43	3,36
2		13,90	14,80	3,34	
3		13,90	15,10	3,29	
4		13,90	18,18	4,47	
5		13,90	16,80	4,53	
6		13,90	14,85	2,10	
7		13,90	13,19	-	

Para as misturas de 9 e 11% de cimento, houve um aumento de resistência, seguindo a tendência de que quanto maior o teor, maior o valor do RCS. No entanto isso não ocorreu para a mistura SC13.

O fato de não ter havido um aumento de resistência proporcional ao teor de cimento para a SC13, a desintegração de alguns corpos de prova e, ainda, o caso do ensaio 5 da mistura SC9 podem ser justificados por alguma falha no processo de preparação da mistura ou devido a alguma característica específica do solo.

Quanto ao erro na preparação da mistura, uma possível justificativa pode estar relacionada a quantidade de água adicionada. Sabe-se que, para solos argilosos, é necessária uma maior quantidade para que haja a hidratação do cimento. Por causa da maior área específica das partículas, é normal que o solo consuma parte da água adicionada, muitas vezes não deixando o suficiente para o processo de hidratação, prejudicando, assim, a cimentação da mistura (VITALI, 2008). A importância da relação do teor de água com a resistência foi comprovado, uma vez que, para todos as misturas, a maior resistência estava sempre associada a uma umidade maior que a ótima, em média, cerca de 3% a mais.

No entanto, o acréscimo extra de água na preparação não era preciso, afinal foi decorrente de observações, levando em conta a experiência laboratorial. E, justamente, por essa falta de exatidão houve comprometimento da integridade de alguns corpos de prova, além de certa inconstância nos resultados de RCS.

Mesmo com essa inconstância, todos os ensaios, exceto o ensaio 5 da SC9, apresentaram resultados superiores ao exigido, de 2,1 MPa. Entretanto, a grande variação entre as amostras de mesmo teor, causa certa insegurança quanto à eficiência da estabilização.

Ainda outra explicação, tanto para a variação dos resultados, quanto para àqueles corpos de prova que se desintegraram, está relacionada à composição e o tipo do solo. Em relação tipo de solo, por ser argiloso, com a adição do cimento, os minerais reagem com a cal formada na hidratação, ocasionando queda no pH, o que acaba afetando a própria hidratação e endurecimento do cimento. Com essa redução

de pH, há o aparecimento do composto CSH, que é indesejável quando provém do C3S2Hx (responsável pela maior parte da resistência da mistura solo-cimento), porque, assim, as reações pozolânicas acabam acontecendo, como já citado, às custas da matriz cimentante (MARQUES, 2006).

Muito provavelmente, a variação dos resultados está relacionada à quantidade de água adicionada na preparação das amostras. Entretanto, de maneira geral, verificou-se que o acréscimo do cimento promoveu o aumento da resistência, possibilitando o uso desse material como base e/ou sub-base na pavimentação.

Levando em consideração, a análise de todos os resultados, a mistura que apresentou valores mais condizentes com os esperados, tais como: redução da massa específica, aumento do teor de umidade, redução de plasticidade, resistência maior que os 2,1 MPa exigidos foi a de 9% de cimento. Sendo assim, o teor ideal para o uso na estabilização química com cimento.

4 CONCLUSÃO

De acordo com a norma de solo-cimento para uso na pavimentação, este solo não se qualifica diante dos parâmetros relativos à caracterização. Mesmo assim, nesta pesquisa, objetivou-se verificar o aproveitamento de um solo argiloso, classificado como ruim para o uso na pavimentação, dando assim uma alternativa melhor que apenas o descarte, e, inclusive, mais favorável para o meio ambiente.

A análise da estabilização química com cimento para um solo argiloso se mostrou válida, uma vez que os resultados dos ensaios provaram que os objetivos de redução de plasticidade e aumento de resistência foram alcançados.

Para todos os teores experimentados, as misturas alcançaram resistência à compressão simples maior que 2,1 Mpa. Porém, dentre as misturas estudadas, a que respondeu de maneira mais próxima ao esperado foi a de 9% de cimento, apresentando redução de plasticidade, menor massa específica, maior umidade ótima e, também, a resistência adequada. Entretanto, até mesmo com esse teor, os resultados de RCS

foram muito diferentes.

A principal razão, para que a estabilização química com cimento deste solo argiloso, não tenha se comportado da maneira esperada, está relacionada à preparação das amostras, devido à incerteza da quantidade de água, adicionada de maneira empírica, apenas através de observações de ensaios anteriores.

Outras razões podem estar relacionadas à composição mineralógica, que como é citado em Marangon (1992), devido à presença de argilominerais, pode ter prejudicado a hidratação do cimento. Fica, então, uma sugestão para pesquisas futuras, que sejam feitos ensaios, como o de difração de raio X, em busca de um melhor entendimento sobre os argilominerais do solo e sua interação com o cimento.

Por fim, verificou-se que o cimento de fato interfere no comportamento do solo, sendo responsável por redução de plasticidade e ganho de resistência, no entanto, houve grande variação dos resultados, o que, de uma certa forma, causa insegurança quanto à eficiência para a utilização desse material estabilizado como base e/ou sub-base na pavimentação.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Cimento Portland – ABCP. *Dosagem das misturas de solo-cimento: Normas de dosagem e métodos de ensaios (ET-35)*. São Paulo. 2004..
- Cruz, M. L. S. *Novas Tecnologias Da Aplicação De Solo-Cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho. Braga. 2004.
- DNER-ME 041: *solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro. 1994.
- DNER-ME 051: *solos – análise granulométrica*. Rio de Janeiro. 1994.
- DNER-ME 082: *solos – determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro. 1994.
- DNER-ME 122: *solos – determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro. 1994.
- DNER-ME 129: *solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro. 1994.
- DNER-ME 201: *solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro. 1994.
- DNER-ME 202: *solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro. 1994.
- DNIT 049/2014 – ME – *Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: IPR.
- DNIT 139/2010 – ES – *Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: IPR.
- DNIT 143/2010 – ES – *Pavimentação – base de solo-cimento*. Rio de Janeiro. 2010.
- Department Of The Army, The Navy And The Air Force. *Soil Stabilization For Pavements*. Washington, DC, EUA. 1994.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes – DNIT. *Manual de Pavimentação*. 3. Ed. – Rio de Janeiro. 2006.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes – DNIT - ES 143: *pavimentação – base de solo-cimento*. Rio de Janeiro. 2010.
- Macêdo, M. M. *Solos Modificados com Cimento – Efeito no Módulo de Resiliência e no Dimensionamento de Pavimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2004.
- Marangon, M. *Utilização de Solo-cimento em uma Solução Alternativa de Estrutura de Arrimo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1992.
- Marques, G. L. O. *Notas de aula de Disciplina Pavimentação*. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2006.
- Portelinha, F. H. M. *Efeitos Da Cal E Do Cimento Na Modificação Dos Solos Pra Fins Rodoviários: Mecanismos De Reação, Parâmetros De Caracterização Geotécnica E Resistência Mecânica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal De Viçosa. Minas Gerais. 2008.
- Vitali, O. P. M. *Efeito Da Composição De Misturas De Solo-cimento Nos Parâmetros de Rigidez e de Resistência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Porto. 2008.