

INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E COMPACTAÇÃO NA ADIÇÃO DE CIMENTO – EM UM SOLO ARGILOSO

Douglas Luis Carissimo Robaldo

Graduação em Engenharia Civil – Faculdade IMED

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Pontifícia Universidade
Católica do Rio de Janeiro - PUCRJ

douglas.carissimo@gmail.com

Álvaro Pereira

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Docente no Programa de Graduação da Faculdade Dom Bosco

engalvaro@gmail.com

Luis Eduardo Formigheri

Mestre em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUCRJ

Docente no programa de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade Meridional - IMED

luis.formigheri@imed.edu.br

Resumo. *O melhoramento das características físicas do solo através da utilização da técnica solo cimento, torna-se uma solução atrativa quando consegue-se associar o baixo custo, a qualidade da mistura e a integração da obra junto ao meio ambiente. Sua aplicabilidade na geotecnia vai desde a base para pavimentos, barragens de terra, ou suporte de fundações superficiais. Este trabalho tem como objetivo contribuir no aspecto de dosagem da mistura solo cimento, dada a falta de metodologias racionais de dosagem. O presente trabalho buscou avaliar a influência da incorporação de cimento, em diferentes teores, nas propriedades de um solo localizado na cidade de Passo Fundo – RS.*

Palavras-chave: *Solo cimento. Ensaios de laboratório. Estabilização de solos.*

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das características e propriedades dos solos e rochas é fundamental na engenharia geotécnica para a execução de

obras (pequeno a grande porte), tais como barragens, fundações e rodovias. A determinação das propriedades mecânicas do solo garante que as solicitações impostas pelas estruturas sejam suportadas pelo mesmo. Durante o desenvolvimento do projeto, as propriedades do solo local que não atendam as solicitações impostas pelas obras, faz-se necessário alternativas e/ou técnicas econômicas que viabilizem sua execução e durabilidade. As alternativas são inúmeras, que vão desde a transmissão das solicitações a profundidades maiores (fundações profundas) até um horizonte resistente, aumento nas dimensões da fundação superficial e/ou a substituição do material de baixa capacidade por outro que melhore as propriedades do solo.

A melhoria nas características do solo, consiste na alteração de suas características iniciais através do processo de compactação e/ou mistura do solo com outros materiais, podendo ser estes outros tipos de solo, material granular, cal, cimento, RCD-R

(Resíduos de Construção e Demolição Reciclados).

De acordo com *Ingles & Metacalf* (1972) utiliza-se a mistura solo cimento quando não se dispõem de um material ou combinações de materiais com as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade adequadas ao projeto, a estabilização de solos com a adição de cimento são usualmente empregadas na construção de estradas, sendo na maioria das vezes utilizadas como base ou sub-base e leitos para pavimentos. Além de sua aplicação na pavimentação, este tipo de mistura pode ser utilizado como substituição do material de fundação de aterros, tanto para prevenir problemas de recalques, e fundações superficiais.

O propósito do presente trabalho trata especificamente da mistura de um solo argiloso localizado na cidade de Passo Fundo - RS, com material cimentante. Tendo como objetivo avaliar a influência da mistura de cimento nas propriedades físicas do solo, para diferentes teores de cimento (3%, 5%, 7%, 9%) através de resultados dos ensaios de compactação e resistência à compressão simples. Para os ensaios de compressão simples, os corpos foram submetidos ao ensaio nos tempos de 7 e 28 dias de cura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo

O material utilizado está localizado no município de Passo Fundo, situado ao norte do estado do Rio Grande do Sul. As coordenadas (WGS84) aproximadas do local são $28^{\circ}16'13.07''S$ e $52^{\circ}23'1.84''O$. A Figura 1 apresenta uma imagem de satélite com a localização aproximada do ponto de coleta das amostras.



Figura 1 - Foto Satélite Local da Jazida – Passo Fundo/RS (imagem Google Earth).

Geologicamente, de acordo com CPRM (2006), a região está situada na província do Paraná Formação Serra Geral, onde há ocorrência de derrames basálticos com caracterização argilosa, granulares finos, melanocráticos contendo horizontes vesiculares espessos preenchidos por quartzo (ametista), zeolita, carbonatos, seladonita, *Cu* nativo e barita.

Pedologicamente, com a caracterização baseada em IBGE (2007) e *Streck et. al* (2008), o material local trata-se de Latossolo Vermelho Húmico distrófico de textura argilosa. Estes solos caracterizam-se por serem profundos, apresentando em seu perfil uma sequência de horizontes A-Bw-C, onde o horizonte Bw é do tipo latossólico. Possuem pouco incremento de argila e apresentam uma transição difusa ou gradual entre os horizontes, por isso exibem um perfil homogêneo em que é difícil diferenciar os horizontes.

2.1.1 Ensaios de Caracterização Física

Realizados no laboratório de Geotecnia da Faculdade IMED, os ensaios de caracterização físicas do material em questão. O material utilizado foi retirado do horizonte B na forma

remoldada com o auxílio de retroescavadeiras hidráulicas e equipamentos manuais. A Figura 2 apresenta uma imagem do local de coleta das amostras.



Figura 2 - Imagem do local de amostragem em Passo Fundo – RS

As amostras foram preparadas em laboratório de acordo com os métodos apresentados na norma brasileira, NBR 6457. A campanha de ensaios de caracterização constitui-se dos ensaios de massa específica real dos grãos através da normativa do DNER-ME 093/094, ensaio de granulometria e sedimentação, NBR 5734, NBR 7181, ensaios de limites de Atterberg, NBR 6459, limite de liquidez e NBR 7180, limite de plasticidade. A Tabela 1, apresenta os resultados obtidos nos ensaios dos índices físicos.

Tabela 1. Índices físicos do material de pesquisa.

γ_s (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	Granulometria (%)		
			areia	silte	argila
2,70	66,50	42,17	39,58	25,63	34,79

γ_s – Peso específico real dos grãos; LL – Limite de Liquidez; LP – Limite de plasticidade.

Os resultados de caracterização física do material confirmam as características pedológica e geotécnica esperadas para o solo utilizado. O valor do peso específico real dos grãos está dentro da faixa de valores esperada para solos oriundos da decomposição de rochas basálticas. As análises dos Limites de

Atterberg, possibilitam a determinação do Índice de Plasticidade (IP) o qual resulta em um valor de 24,33%, o que se traduz em um material argiloso de alta plasticidade. As características argilosas do material são confirmadas através dos resultados de granulometria.

Os resultados apresentados na Tabela 1, possibilitam a classificação do material de estudo através do sistema de classificação amplamente difundido, principalmente nos meios rodoviários. Sendo utilizada a Classificação Unificada e o Sistema Rodoviário de Classificação.

De acordo com a Classificação Unificada o material de pesquisa está caracterizado como MH, ou um silte de alta compressibilidade.

Já de acordo com o Sistema Rodoviário de Classificação o material de pesquisa é caracterizado com um solo A7-6, o qual consiste em materiais elásticos com alto LL e com grandes variações volumétricas e baixo IP em relação ao LL.

A característica plástica do material, de acordo com a classificação de solos com baixa capacidade de suporte, sendo esta uma justificativa para o desenvolvimento do presente trabalho, com o intuito de melhorar as propriedades do material em questão.

2.2 Solo Cimento

Neste item apresenta-se uma revisão geral da literatura técnica relacionada a mistura solo cimento.

2.2.1 Visão Geral sobre a técnica Solo Cimento.

Conforme SENÇO (2001), a utilização da mistura solo cimento no Brasil, deu início em São Paulo na década de 50, devido ao crescimento acelerado do interior do estado, e diante da necessidade da ampliação da malha rodoviária. A primeira experiência com esta

técnica foi realizada junto ao aeroporto de Bauru, ao qual contemplou um trecho com 500 m de extensão.

Outra aplicação da mistura, tem sido na proteção de taludes contra a erosão em obras hidráulicas, pode-se citar como exemplo as barragens de terra. Embora ainda o “rip-rap” (camadas de fragmentos de rochas) tem sido tradicionalmente empregadas para tal finalidade, há situações onde as rochas adequadas não estão disponíveis ou a distância de transporte inviabiliza a execução de tal obra. Nestes casos o solo cimento tem sido a técnica econômica e apropriada das soluções citadas (USACE, 2000).

Além das aplicações destacadas, utiliza-se tal técnica para aplicações em execução de fundações profundas, reforços de aterros, construções de caminhos de serviços, encapsulamento de solos contaminados, prevenção a liquefação de areias, ou ainda no fechamento de trincheiras abertas para a passagem de canalizações (INGLESES & METCALF, 1972; DUPAS E PECKER, 1979; PORBAHA et al., 1998; CRUZ et al., 2004.)

As características finais da mistura solo cimento estão condicionadas na grande maioria do tipo de solo utilizado, certas diferenças nas propriedades e nas reações do cimento são devidas as variações de composição química e mineralógico do solo, condicionando o êxito em sua estabilização com cimento. Solos com a presença de caolinitas e ilitas podem ser considerados solos inertes e podem apresentar um desenvolvimento adequado da resistência com pouco incremento de material cimentante. Já a presença de elevados teores de argila, principalmente a montmorilonita retarda a hidratação e endurecimento do cimento CROFT (1967).

2.3 Dosagem Solo Cimento

A dosagem de solos tratados com cimento é realizada através de várias baterias de

ensaios em laboratório, com a finalidade de determinar a quantidade mínima de cimento a ser acrescentada ao solo para que este atenda as especificações. Em alguns casos é necessário estabelecer um limite máximo de cimento para prevenir o efeito adverso de trincas por retração (CERATTI E CASANOVA, 1988), (INGLES & METCALF, 1972).

A quantia de água a ser adicionada é determinada através dos ensaios de compactação, para que haja a completa hidratação do cimento na mistura. Estima-se que a porcentagem de água necessária para a completa hidratação do cimento é de 40% em relação a massa de cimento, sendo que destes 20% é efetivamente consumido pela hidratação do material, 20% fica retido na água de gel (NEVILLE, 1997).

2.3.1 Dosagem Físico Químico

Inicialmente proposto por *Central Road Research Institute of India* (1971), este método apresenta uma vantagem em considerar a iteração elétrica entre as partículas de solo com as partículas de cimento. Analisando os resultados obtidos pela realização dos ensaios através deste método em relação ao método proposto pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento *Portland*), verificou-se concordância entre ambos, o que indica que este método ser bastante útil para a dosagem de misturas solo cimento (OLIVEIRA, 2011).

Fajardo (2005), evidencia que o método físico químico avalia a intensidade desta resistência oferecida pelo material (solo) a certa quantidade de cimento adicionada. Este método tem como vantagem a rapidez na verificação da viabilidade se tal material pode ou não ser estabilizado quimicamente, a partir da análise da variação volumétrica máxima aparente em suspensão. Normalmente verifica-se a variação de volume das amostras em até

24 horas, sob uma intensa floculação e estruturação da mistura solo cimento.

A partir das informações citadas, o presente trabalho determinou as seguintes dosagens (teor de cimento): 0%, 3%, 5%, 7%, 9% de cimento em relação a massa de solo.

O cimento utilizado para a realização dos ensaios, consiste em um CP-V ARI (cimentos ITAMBÉ). Este material apresenta um ótimo tempo de pega iniciando no período de ≥ 1 hora, após sua completa hidratação oferece resistência inicial em 3 dias ≥ 24 MPa, e 7 dias ≥ 34 MPa.

3. RESULTADOS DE ENSAIOS

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de compactação, compressão simples e CBR, serão apresentados neste item para o solo em sua condição natural e para os diferentes teores de cimento.

3.1 Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados no laboratório de geotecnia da Faculdade IMED, utilizando os procedimentos descritos na NBR 12023. Todos os corpos de prova para o ensaio de compactação foram moldados utilizando a energia de compactação de Proctor Normal. Utilizou-se um cilindro de volume igual a 1000 cm³, soquete com peso de 2,5kg compactado em 3 camadas de igual altura, com 26 golpes por camada.

A metodologia do ensaio consistiu da permanência do material remoldado em laboratório sob temperatura controlada (22°C) até o equilíbrio com a umidade do ar, resultando em uma umidade aproximada de 5%. Optou-se pela execução dos ensaios de compactação com reuso de material, para a amostra de solo natural.

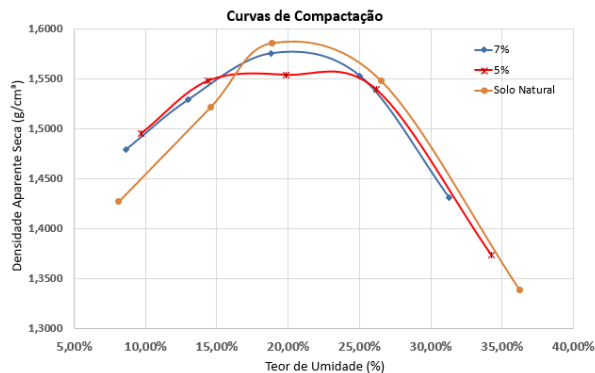


Figura 3 - Curvas compactação normal para o solo na condição natural e com diferentes teores de cimento.

Para apresentação das referidas curvas de compactação, optou-se por utilizar as curvas dos teores de cimento de 5% e 7%, pois a curva do teor de 3% obteve os mesmos resultados para a curva do solo natural.

A Tabela 2, apresenta os resultados (γ_d e w_{ot}) para cada curva de compactação apresentada na Figura 3.

Tabela 2. Índices físicos do material de pesquisa.

Teor Cimento (%)	γ_d (KN/m ³)	w (%)
SN	15,86	18,81
5	15,54	19,88
7	15,75	20,00

Observando as curvas de compactação apresentadas, pode-se perceber comportamentos distintos da curva de solo natural para as curvas da mistura solo cimento. Através de uma análise individual das curvas de compactação, que para misturas de solo cimento há uma redução do peso específico aparente seco (γ_d (g/cm³)) e aumento na umidade ótima (w_{ot} %). O aumento da quantidade de água está associado a necessidade de uma maior quantidade na mistura solo cimento, a fim de realizar a cristalização/cimentação dos grãos sólidos.

3.2 Ensaio Dosagem Físico Químico

Ensaio realizado conforme proposto por *Central Road Research Institute of India*, ao

qual foi citado. Utilizando 5 provetas graduadas Figura 4, quantidades crescentes de cimento (0%, 3%, 5%, 7%, 9%), após inserção de água destilada em cada proveta para garantir a homogeneização completa do material.



Figura 4 – Provetas, ensaio de dosagem método físico químico.

Após 24 horas iniciais, as misturas foram agitadas com o auxílio de um bastão de vidro por um tempo decorrente de 30 segundos com a finalidade de deixar as amostras completamente homogêneas. Posteriormente, deixou-se amostra em repouso por 2 horas e realizou-se a primeira leitura do volume ocupado pelo material, procedimentos estes realizados a cada 24 horas até a obtenção das leituras constantes ou decrescentes.

Calcula-se a variação volumétrica (ΔV) em relação a proveta com solo natural para os diversos teores de cimento, sendo adotada as máximas variações para cada teor. Após isso, gera-se uma representação gráfica Figura 5, $\Delta V(\%) \times C_i (\%)$ onde o ponto máximo da variação volumétrica corresponde ao teor mínimo para a estabilização físico-química.

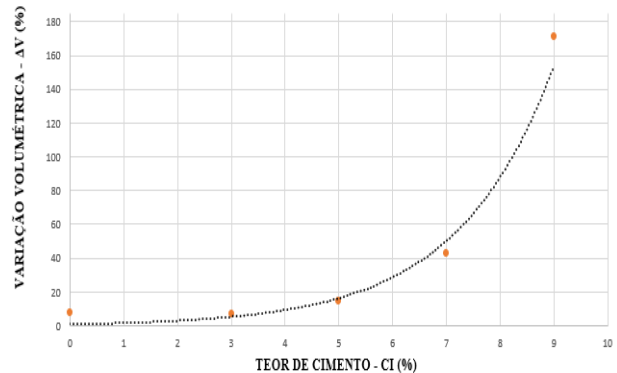


Figura 5 – Gráfico variação volumétrica x teor de cimento, método dosagem físico químico.

O teor de cimento Portland selecionado para a dosagem da mistura é aquele cujo a variação de seu volume máxima. Optou-se por utilizar no presente trabalho os teores de 5% e 7%, pois estes apresentaram estabilidade a sua expansão/variação volumétrica em poucos dias.

3.3 Ensaio de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples tem por finalidade em quantificar a influência do cimento na resistência à compressão para os diferentes teores de cimento.

Os corpos de prova foram moldados nos valores máximos do $\gamma_d(\text{g/cm}^3)$ e $w_{ot}\%$ obtidos através das curvas de compactação. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples no intervalo entre 7 e 28 dias, tempo de cura do cimento.

O rompimento dos corpos de prova foram realizados no laboratório de materiais da Faculdade IMED através de uma prensa hidráulica, acionamento elétrico para ensaios de concreto, modelo PC200C, com capacidade máxima de 200.000Kgf. Leitura processada e controle de dados através de módulo eletrônico, a sequência da apresentação dos resultados para o ensaio de compressão simples, será apresentados os gráficos (Figura 5 e Figura 6) em relação a q_u (MPa) x C_i (%), e q_u (MPa) x tempo de cura (dias)

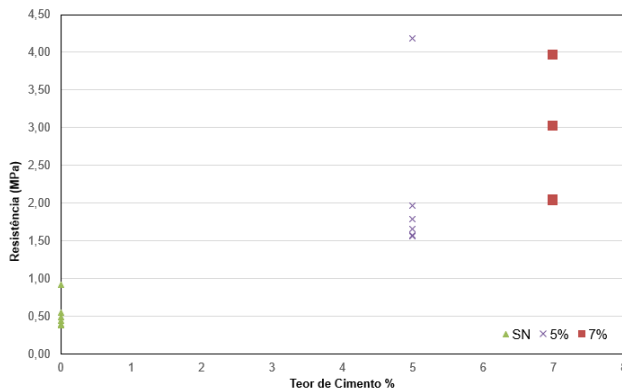


Figura 5 – Gráfico de resistência à compressão simples em diferentes teores de cimento e solo natural.

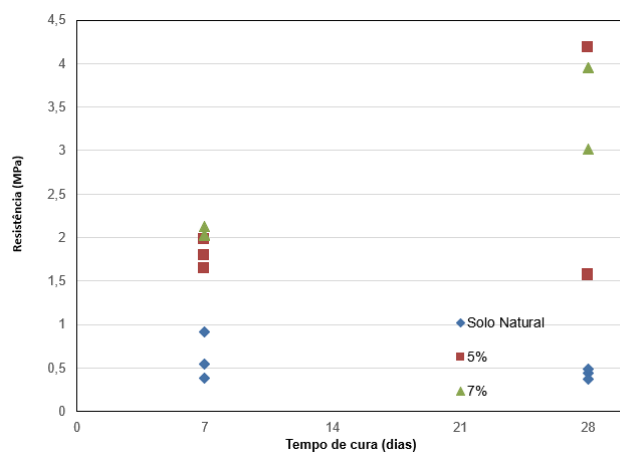


Figura 6 – Gráfico resistência à compressão simples em intervalos de 7 e 28 dias de cura.

Através dos resultados no ensaio de compressão simples, pode-se verificar um acréscimo de resistência nas misturas solo cimento em relação ao solo natural. Nota-se pouca diferença nos resultados obtidos nos ensaios aos 7 dias de cura, porém um ganho significativo de resistência aos 28 dias para ambos os teores de cimento.

A diferença de resistência à compressão simples para a mistura solo cimento nos teores de 5% e 7% aos 7 dias de cura foi de 14%, já para os mesmos teores com 28 dias de cura foi de 49%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se verificar que a adição de

cimento no solo por menor quantidade que seja, provoca ganhos na resistência à compressão simples. E com a incrementação de cimento podemos verificar que ocorre na mistura uma redução do peso específico aparente seco e um aumento no teor de umidade do material.

Para este solo a técnica se mostra viável tecnicamente.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Faculdade Meridional – IMED, pela disponibilidade da ocupação dos laboratórios para realização do trabalho. Os autores agradecem também a Universidade de Passo Fundo – UPF pela contribuição na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6457 – Amostras de solo preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5734 – Peneiras para ensaios especificações. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7181 – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12023 – Solo Cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992.

CERATTI, J. A. P.; CASANOVA, F. J. Um Método Físico Químico para Dosagem de Solo-Cimento. In: SIMPOSIO SOBRE NOVOS CONCEITOS EM ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO EM GEOTECNIA, 1988, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: COPPE/ABMS/ABGE, 1988, 2v, v.1, p.191-200.

CHADDA, L. R. A rapid method of assessing the cement requirement for the stabilization of soils. Indian Concrete Journal, 1971. 45: 298-314.

CPRM (2006) – Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. <http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Basica/Mapa-Geologico-da-America-do-Sul-1025.html>. Acesso em: 19 set. 2017.

CRUZ, Maria de Lurdes Santos da. Novas tecnologias da aplicação de solocimento. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2004.

CROFT, J. B. The Influence of Soil Mineralogical Composition on Cement Stabilization Géotechnique, London, v.17, p.119-135, 1967.

DUPAS, J. M.; PECKER, A. Static and Dynamic Properties of Sand-Cement. Journal of geotechnical engineering Division, New York: ASCE, v.105, n. GT3, p.419-436, 1979.

FAJARDO, B.F. Aproveitamento de dois resíduos industriais – pó de corte do granito e

catalisador do craqueamento do petróleo – na fabricação de elementos construtivos estruturais, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

IBGE. Mapa exploratório de solos do Rio Grande do Sul. ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/rs_pedologia.pdf. Acessado em: 19 set. de 2017.

INGLES, O. G.; METCALF, J.B. Soil Stabilization – Principles and Practice. Sidney Butterworths, 1972.374p.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2.ed. São Paulo: PINI, 1997. 828P.

OLIVEIRA, Rodrigo Fidelis Viana de. ANÁLISE DE DOIS SOLOS MODIFICADOS COM CIMENTO PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS. 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

PROBAHA, A.; TANAKA, H.; KOBAYASHI, M. State of the art in deep mixing technology: part II – Applications. Ground Improvement, Journal of ISSMGE, v.2, n.2, p.125-139, 1998.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. Design and Construction of Levees. Engineer Manual N° 1110-2- 1913, Appendix G: Use of soil cement for levee Protection. Washington D.C., 2000.p.146-162.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. V.2. 1ed. São Paulo: PINI, 2001. P.70-131.

STRECK, E. V. et al. Solos do Rio Grande do
Sul. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008.
222 p.