



Influência da Adição de Óxido de Cálcio na Dosagem de Solo-cimento Utilizada na Técnica de Melhoramento de Solos Moles *Deep Soil Mixing* (DSM)

Lucas Marson Kupferberg

Centro Universitário Metodista IPA, Porto Alegre, Brasil, lucass_marson@hotmail.com

Danielle de Souza Clerman, MSc.

UNISINOS, Porto Alegre, RS, daniellebruxel@unisinós.br

Anelise Schimitz, MSc

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, anelise.schmitz@ufpr.br

Juliana de Azevedo Bernardes

Faculdade Meridional de Porto Alegre IMED, Porto Alegre, RS, julibernardes@yahoo.com.br

Rodrigo Lopes Erhart, MSc.,

Centro Universitário Metodista IPA, Porto Alegre, RS, rodrigo.erhart@ipa.metodista.br

Viviane Gschwenter Lopes, MSc.

Centro Universitário Metodista IPA, Porto Alegre, RS, viviane.santos1@ipa.metodista.br

RESUMO: Essa pesquisa apresenta a técnica de melhoramento de solos moles *Deep Soil Mixing* (DSM). Esta destina-se ao reforço de solos com baixa capacidade de suporte, por meio da mistura de solo natural com cimento injetado, formando colunas com material homogêneo e com propriedades geomecânicas. Esse trabalho propõe um estudo laboratorial de otimização de traço de solo-cimento a partir de dados obtidos em uma obra existente, com objetivo de avaliar a influência da adição de óxido de cálcio na mistura. Foram produzidos em laboratório 4 dosagens variando-se os teores de cimento e cal. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples aos 07, 28 e 70 dias de cura. Os resultados obtidos mostraram um comportamento linear decrescente da resistência à compressão simples, conforme o aumento do teor do óxido de cálcio. Observou-se a importância do tempo de cura no ganho de resistência de misturas com cal e viabilidade do uso na dosagem de um *Deep Soil Mixing*, segundo parâmetros mínimos de resistência estabelecidos.

PALAVRAS-CHAVE: Deep Soil Mixing, Solos Moles, Solo Cimento Cal.

1 INTRODUÇÃO

A construção sobre solos com características desfavoráveis como alta umidade, presença de matéria orgânica, compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento, tende a ser de maior complexidade, devido a sua baixa capacidade de suporte. Hoje as práticas convencionais recorrem à fundações profundas ou a remoção e substituição do solo, tornando-

se métodos onerosos e de lenta execução ou ainda ambientalmente inadequados.

Dependendo do nível de complexidade de uma obra, do perfil do solo e dos riscos envolvidos, diferentes estratégias poderão ser adotadas em uma investigação e projeto geotécnico. Muito embora existam diferentes alternativas técnicas para tratamento de solos moles, ainda é pouco comum projetos



recorrerem a soluções diferenciadas, o que pode ser justificado até mesmo pela ausência de normatizações técnicas.

No entanto o desenvolvimento de novas técnicas de melhoramento de solos vem ganhado espaço no mercado brasileiro em detrimento às técnicas convencionais. Segundo Forsberg, Machado e Köhler (2012), a escolha do tipo mais adequado de fundação para solos compressíveis é fundamental para o êxito da obra, pois, no caso de uma rodovia, por exemplo, o custo da fundação pode chegar à 50% do total do investimento.

Segundo Burró (2015), as técnicas de melhoramento de solos moles incorporam no solo natural, agentes químicos estabilizantes (cimento, cal, brita, etc.) que permite elevar a capacidade de carga, reduzir o recalque e acelerar o adensamento primário. Entre as principais técnicas existentes, destacam-se o *jet grouting*, o *deep soil mixing*, os geodrenos e as colunas de brita.

A técnica para melhoramento de solos *Deep Soil Mixing* (DSM), desenvolvida em 1960 no Japão e na Suécia, é considerada um produto bastante jovem no mercado geotécnico brasileiro. Esse método destina-se ao reforço de solos com baixa capacidade de suporte, por meio da mistura de solo natural com cimento injetado, formando colunas de material homogêneo e com propriedades geomecânicas (FORSBERG; MACHADO; KÖHLER, 2012).

A literatura relata como vantagens da técnica DSM a eliminação de substituição do solo, a produtividade alta, a ausência de vibrações no terreno e o baixo teor de cimento se comparado a outras técnicas de grauteamento de solo. O cimento Portland destaca-se como o agente estabilizador mais utilizado no DSM. No entanto, alternativas como cal, cinza volante e escória de alto forno também poderiam ser utilizados.

Por tratar-se de uma técnica recente no Brasil, poucos estudos validam a adição de outros ligantes diferentes do cimento Portland.

Neste contexto, este trabalho propõe a incorporação de cal em uma dosagem de DSM, avaliando o traço da mistura e a influência nos resultados de resistência à compressão simples.

2 REVISAO BIBLIOGRAFICA

2.1 Solos Moles

Segundo Machado (2012), solos moles consistem na presença de partículas extremamente finas (solos siltosos ou argilosos), com formação geológica recente e comumente encontrada em estado adensado ou ligeiramente pré-adensado.

De acordo com Massad (2003), as origens dos solos moles são das mais variadas superfícies possíveis, desde o fluvial até o costeiro. Eles se diferenciam pelo meio de deposição (água doce, salgada ou marinho); pelo processo de deposição (fluvial ou marinho) ou ainda pelo local de deposição (lugares de inundações, praias, canais de mar etc.).

De forma geral, pode-se afirmar que solos moles possuem baixa capacidade de carga, obtendo-se valores de N_{SPT} inferiores a 5.

2.2 Agentes Estabilizadores

De acordo com Correia (2011), a introdução de agentes estabilizadores no solo natural desenvolve propriedades físicas e químicas que modificam o comportamento mecânico do solo. Essas modificações são vinculadas à quantidade de ligante inserido e às propriedades do solo *in situ*. Correia (2011) relata que a correta escolha do tipo de ligante para melhor estabilizar um determinado solo, está relacionado com o conhecimento das principais propriedades do solo natural (não estabilizado) e do agente estabilizador, por meio de antever as reações do solo-ligante.

Segundo Terashi (1997) os principais fatores que influenciam a resistência do solo tratado são: características do ligante, características e



condições do solo existente, condição da mistura e condição da cura. Entre esses parâmetros, fatores como temperatura, tempo de mistura, tipo de ligante e outros desempenham importante função.

Moretti (2012) afirma que para melhoria de um solo, se faz uso tanto de cal, como de cimento, porém o aumento de resistência decorre em tempos diferentes. No caso do tratamento com cal, a reação pozolânica entre a cal e o solo argiloso é muito lenta, mas constante por anos. Já o tratamento de solo com cimento, ocorre mais rápido (em poucas semanas) devido a hidratação do mesmo. Em ambos os casos, a diminuição na quantidade de água gera um ganho na resistência e também promovem um incremento na plasticidade do solo devido a troca de iônica.

2.3 Solo-cal

De acordo com Ingles e Metcalf (1972 apud DALLA ROSA, 2009), qualquer quantidade de cal adicionada ao solo irá modificar as propriedades iniciais da mistura. Segundo o mesmo autor a alteração na propriedade da mistura é proporcional a quantidade de cal inserida, ou seja, quanto maior a quantidade de cal adicionada, maior será a modificação das propriedades da mistura.

De acordo com Castro (1995), a cal se compatibiliza com o solo por duas fases distintas. A primeira fase acontece de forma muito rápida, na qual, podem durar horas ou alguns dias. Segundo Mateos (1961 apud FOGAÇA, 1996), essa etapa ocorre pelas trocas iônicas, onde os minerais em contato com certas soluções têm a incumbência de absorver ânions ou cátions e retê-los permanentemente ou trocá-los por outros. A segunda fase ocorre de forma mais lenta, na qual, podem durar meses ou anos. Mateos (1961 apud FOGAÇA, 1996) caracteriza essa fase pelas reações pozolânicas, onde os minerais de alumínio e sílica do solo que, em contato com a cal, produzem um gel de

silicatos e aluminatos de cálcio que provocam a cimentação das partículas do solo.

Lopes Junior (2007) aponta que as reações pozolânicas decorrentes do tratamento de solo com a cal, se originam das fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo, quando misturados a cal e a água.

Pinto (1971) verificou que a temperatura de cura afeta diretamente o desenvolvimento da resistência nos ensaios de solo estabilizados com cal e cinza volante. Os ensaios com os corpos de prova curados a uma temperatura de 7°C não ganharam resistência suficiente para o rompimento, enquanto os corpos de provas curados a uma temperatura de 23°C desenvolveram uma resistência razoável no mesmo período de cura. O autor aponta que temperaturas altas aceleram as reações pozolânicas.

De acordo com Pinto (1971), o tempo de cura é um dos fatores que mais contribuem para o aumento da resistência nas reações pozolânicas. Para Dalla Rosa (2009), o aumento da resistência à compressão simples pelo teor da cal é mais representativo nos ensaios com 90 dias de cura devido as lentas reações, as quais podem estender-se por anos.

2.3 Deep Soil Mixing (DSM)

A essência da técnica DSM surgiu nos Estados Unidos, em 1954. No entanto a técnica atual foi desenvolvida no Japão e na Suécia. Em 1975 pela primeira vez foi apresentada à área da engenharia geotécnica num fórum internacional.

Na Suécia, o desenvolvimento das colunas de DSM, iniciou em 1967 com a mistura de solo natural com cal viva. O laboratório *Swedish Geotechnical Institute* (SGI), estudava os possíveis agentes estabilizantes para um DSM. Desde então o método *Deep Soil Mixing* vem evoluindo rapidamente, tanto nos equipamentos da mistura de solo-ligante, bem como na utilização de agentes estabilizadores (cal, cimento, cinzas entre outros). Neste contexto



inúmeras empresas vêm desenvolvendo seus próprios métodos de mistura, resultando numa enorme variedade de técnicas (CRUZ, 2012).

De acordo com Moretti (2012), a técnica DSM refere-se ao melhoramento de solos moles, no qual agentes estabilizantes (cimento Portland, cal, cinza volante, entre outros.) são injetados e misturados no solo natural. A mistura do solo virgem com um ligante resulta num material com resistência superior, baixa permeabilidade e compressibilidade se comparado ao solo original.

Segundo Forsberg, Machado e Kohler (2012), a melhora da resistência ao cisalhamento do solo tratado se deve a redução do teor de umidade do solo *in situ* devido a hidratação da cal e evaporação. O aumento da resistência ao longo do tempo de cura é causado principalmente por reações pozolânicas.

A ferramenta de mistura para solos com maior granulometria requisita equipamentos simples como um trado contínuo, já solos finos ou rígidos solicitam equipamentos e ferramentas mais complexas para desagregação do solo e mistura do ligante (CRUZ, 2012).

De acordo com Moretti (2012), o tratamento de solos moles com utilização da técnica de DSM, aplica-se para várias áreas da geotecnia: aumento da capacidade de carga de solo mole, diminuição dos recalques em solos compressíveis, mitigação do potencial de liquefação, sistemas de contenção, barreiras impermeáveis para remediação de áreas contaminadas, entre outros.

2.4 Processo Executivo de um *Deep Soil Mixing* (DSM)

A execução de um DSM faz uso de equipamento tipo hélice. De acordo Correia (2011), o processo executivo de colunas de DSM inicia-se com o posicionamento do equipamento sobre o local a ser executada a coluna. Após ocorre a penetração da ferramenta no solo até a profundidade de projeto.

Simultaneamente as pás misturadoras que se encontram na ponta da haste, auxiliam na penetração e tem como função desagregar o solo natural. Segundo Sousa (2009), na fase de extração da ferramenta, o ligante começa a ser injetado no solo, ao mesmo tempo em que a ferramenta de mistura continua a girar.

Segundo Keller (2014), a ferramenta de mistura é movimentada diversas vezes para baixo e para cima durante todo o comprimento da coluna com objetivo de melhorar a homogeneização do solo com o ligante.

Segundo Corsini (2014), o diâmetro das colunas executadas pelo método úmido pode variar entre 0,40 m a 2,4 m. Já o método seco o diâmetro usual varia entre 0,60 a 0,80 m.

As colunas de DSM, podem ser posicionadas com diferentes padrões, desde colunas simples, painel de colunas, malhas e blocos. Cada arranjo é utilizado para uma determinada finalidade, baseados na estrutura do solo, requisitos de projeto, estabilidade e gasto (CRUZ, 2012).

De acordo com Keller (2014), após a execução das colunas DSM é necessário esperar de um a três dias para iniciar o preparo da cabeça das colunas e serviços posteriores ao tratamento. O corte/arrasamento da cabeça da coluna até a cota de projeto (Figura 1) deve ser feita com uma chapa lisa acoplada a pá de uma escavadeira hidráulica. O autor frisa que não se deve usar a borda dentada da escavadeira no arrasamento para não danificar a cabeça das colunas, e caso necessário algum reparo utilizar concreto magro.



Figura 1. Superfície da coluna após arrasamento



Fonte: Keller (2014)

O Brasil ainda não dispõe de norma técnica específica do processo DSM. Sendo assim, Keller (2014), afirma que o processo executivo e o controle tecnológico do DSM é normalizado pela norma Europeia EN 14679, que serve de referência a projetos nacionais.

No país, o DSM foi utilizado pioneiramente na obra do pátio de estacionamento de aeronaves do terminal de carga do Aeroporto Internacional Salgado Filho, em Porto Alegre, RS. O local caracteriza-se pela presença de solo mole aluvionar com N_{SPT} variando de 0 a 4. Nesta obra, o DSM foi adotado com objetivo de eliminar os efeitos dos possíveis recalques do solo sobre a estrutura de pavimentação do pátio de aeronaves. Foram executadas 8.025 colunas com profundidade média de 8 m distribuídas em malha quadrada em uma área de 52.734 m², conforme apresenta a Figura 2.



Figura 2. Malha de Colunas de DSM
Fonte: Acervo do Autor

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 Materiais

O solo empregado nesse trabalho foi obtido na região norte de Porto Alegre, RS. Segundo Schnaid, Nacci e Milititsky (2001) a região é reconhecida pela presença de um extenso depósito superficial de argila mole, onde a camada de baixa capacidade de suporte é constituída por intercalações de sedimentos lagunares (areias ricas em matéria orgânica, lamas e restos de conchas e moluscos),

sedimentos de canal e de planície de inundação (areias, lamas e lamas orgânicas).

O solo coletado é predominantemente por argila orgânica, muito mole, com número de SPT variando de 0 a 4, conforme tabela 01, na qual, apresenta um resumo de sondagens SPT executadas na área.

Tabela 1. Resumo de sondagens SPT

Furo	Início/Final	Espessura solo mole
SPT 01	2,20	7,20
	9,40	
SPT 02	2,90	7,90
	10,80	
SPT 03	2,40	7,60
	10,00	
SPT 04	3,15	7,25
	10,40	
SPT 05	2,94	7,06
	10,00	

Fonte: EPC Construções (2015).

Este trabalho utiliza Cimento CII Z-32 RS e cal hidratada dolomítica do tipo CH-III.

3.2 Dosagem de solo-ligante

A dosagem de solo-ligante para DSM, no Brasil, não é normatizada, sendo os traços normalmente realizados conforme parâmetros de normas internacionais. As dosagens propostas nesse trabalho foram baseadas num traço de solo-cimento de uma obra existente, apresentada nas tabelas 2 e 3, como Calda 1. O projeto desta obra seguiu a norma Europeia EN 14679A. A dosagem teve como premissa manter a densidade da mistura solo cimento próxima a 1500 kg/m³ e um consumo de cimento de 350 kg/m³ de solo, com objetivo de atingir valores de resistência à compressão simples de no mínimo 1,35 MPa.

Com intuito de otimizar a dosagem de solo-cimento da obra existente, foram realizados três traços diferentes (Calda 2, Calda 3 e Calda 4), com diferentes proporções de incorporação de óxido de cálcio (cal), diminuindo-se o consumo de cimento, conforme mostra a tabelas 2 e 3.



Tabela 2. Composição das caldas

Calda	Água	Cimento	Cal	Observação
Calda 1	50%	50%	-	Dosagem ref.
Calda 2	50%	30%	20%	-
Calda 3	50%	25%	25%	-
Calda 4	50%	-	50%	-

Tabela 3. Consumo de cimento

Calda 1	Calda 2	Calda 3	Calda 4
350 kg/m ³	210 kg/m ³	175 kg/m ³	-

A mistura homogênea de solo-ligante em laboratório foi obtida pela adoção de uma haste de mistura acoplada a uma furadeira profissional. O processo de mistura é semelhante à ferramenta da técnica *Deep Soil Mixing*, utilizada para incorporação da calda no solo.

Foram moldados seis corpos de prova para cada dosagem, totalizando 24 amostras. Os mesmos foram submetidos ao ensaio de compressão simples. Os corpos de prova permaneceram nas fôrmas, nas condições de cura inicial durante pelo menos 12h antes do processo de desforma e posteriormente foram armazenados em sacos plásticos para o período de cura a 23°C. Antes do ensaio de resistência à compressão simples, foram submetidos à imersão em água por 4 horas. O método de moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos de solo-ligante foi guiado, conforme prescrições de procedimento técnico Keller (2014) e o ensaio de compressão simples conforme as prescrições da NBR 12025/12.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Com base na quantidade de solo mole necessária para realização dos ensaios, foram dimensionadas as caldas a serem misturadas ao solo, respeitando-se o consumo de 350 kg de ligante por m³.

Com a adição da cal hidratada, houve uma pequena queda na densidade das caldas 2, 3 e 4 conforme mostra a Figura 3. No entanto, não foi

observado alteração na trabalhabilidade do material e na fluidez que manteve-se semelhante à calda de referência.

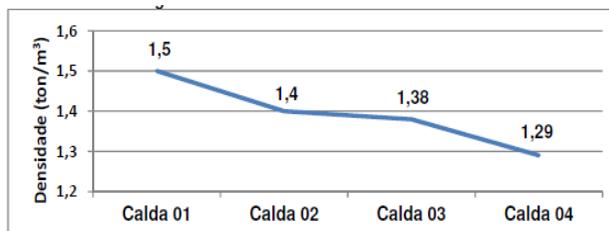


Figura 3. Densidade das Caldas

A Figura 4 apresenta os resultados de rompimento das caldas número 1, 2 e 3 aos sete dias de idade. Pode-se observar uma queda de resistência contínua, conforme a diminuição do teor de cimento nas caldas. As caldas 2, 3 e 4 apresentaram resistências baixas, evidenciando a pouca influência do óxido de cálcio no aumento da resistência aos sete dias de cura.

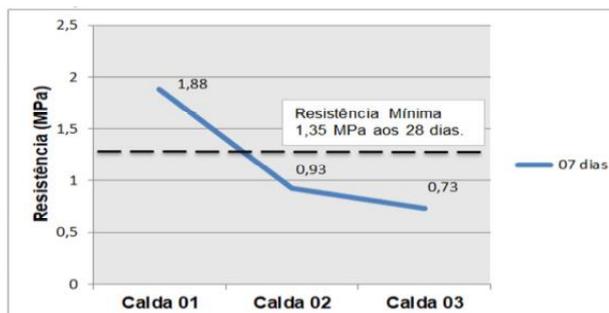


Figura 4. Resistência a compressão simples a 7 dias

A Figura 5 apresenta os resultados de rompimento das caldas 1, 2 e 3 aos vinte e oito dias de idade. Assim como os resultados dos ensaios aos sete dias, o gráfico de linhas apresentou uma queda linear da resistência à compressão simples, conforme a diminuição do teor de cimento nas caldas. Ambos os gráficos apresentam o parâmetro estabelecido em projeto da obra referência de resistência de projeto mínima de 1,35 MPa, considerada como resistência mínima de projeto.

A Tabela 4 apresenta a avaliação estatística do experimento através da metodologia ANOVA.

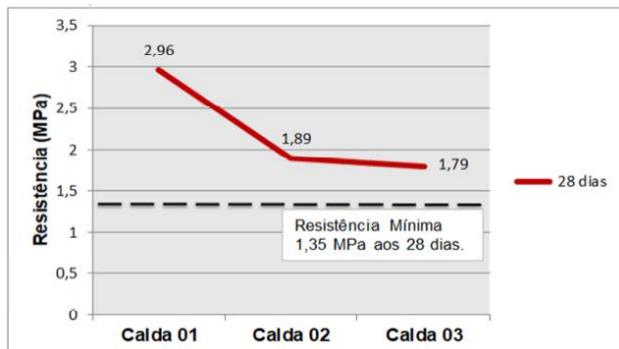


Figura 5. Resistência a compressão simples a 28 dias

Pode-se afirmar, com 95% de segurança, que ambos os fatores: teor de cal e tempo de cura influenciam a variável de resposta resistência à compressão simples. Também obtém-se como resultado que interação entre estes dois fatores não causa alteração nos resultados. A ANOVA comprova através do limite de decisão que quanto maior é o tempo de cura, maior será a resistência da mistura e quanto menor é o teor de cimento, menor será a resistência final da mistura.

Tabela 4. Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob	SIG
A	3.95	1	3.95	45.67	0.0020%	S
B	6.26	2	3.13	36.18	0.0008%	S
AB	0.05	2	0.03	0.30	74.7340%	N
Erro	1.04	12	0.09			
Total						

Os corpos de prova da calda número 04 (50% cal; 50% água) não suportaram a imersão em água prévia a ruptura, não apresentando resistência suficiente para o rompimento aos sete e vinte e oito dias de idade.

Em função dos corpos de prova da calda número 04 (50% cal; 50% água) não atingirem resistência suficiente para o rompimento, optou-se em romper os corpos de prova em idade de cura superior a fim de verificar o aumento da resistência com o tempo de cura. Conforme referências bibliográficas, o tempo de cura é a principal variável para ganhos de resistência nas misturas de solo-cal.

Os corpos de prova da calda número 04 foram submetidos ao ensaio de resistência à

compressão simples com 70 dias de cura. A figura 6 apresenta os resultados obtidos.

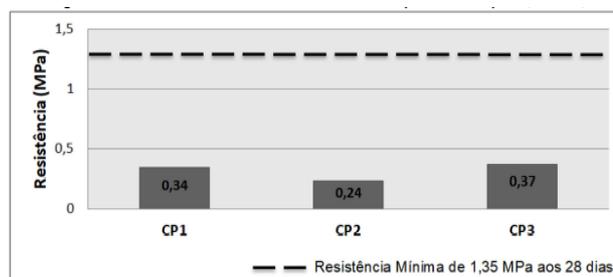


Figura 6. Resistência à compressão simples calda 4 a 70 dias

Observou-se que o ganho de resistência das misturas de solo-cal com 70 dias de cura foram inferiores ao valor de resistência mínima estabelecido de 1,35 MPa.

4. CONCLUSOES

Esse trabalho visava avaliar a técnica *Deep Soil Mixing* (DSM) com o interesse de investigar a influência da adição de óxido de cálcio (cal) na dosagem de solo-cimento utilizada. Com base na experiência de campo de uma obra existente que fez o uso da técnica DSM, foi adotado o parâmetro de resistência de 1,35 MPa. Este valor foi considerado como a resistência mínima a ser atingida pelos corpos de prova aos 28 dias de idade. Foram propostos 4 traços de investigação e a Figura 7 resume os resultados obtidos.

Observa-se que os resultados dos rompimentos dos corpos de prova com adição cal no traço atenderam às premissas de projeto aos 28 dias de cura, superando a resistência estabelecida de 1,35 MPa.

O gráfico também apresenta um comportamento linear decrescente da resistência à compressão simples, conforme o aumento do teor de cal e a diminuição do teor de cimento na dosagem. Esse comportamento é semelhante nos resultados obtidos aos 7 e 28 dias de cura.

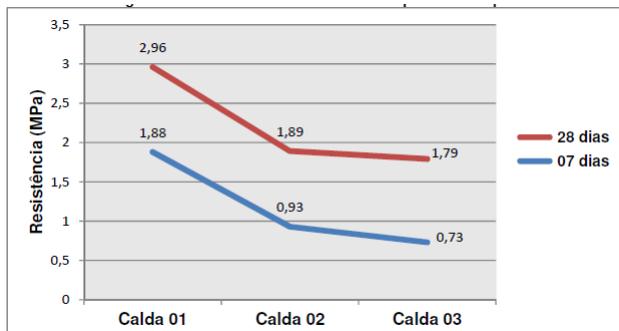


Figura 7. Resultados de resistência à compressão simples

Observa-se também, que a adição de cal não promoveu ganhos consideráveis de resistência nos ensaios com idade até 28 dias, quando comparados à calda referência. Este mesmo tipo de comportamento também foi observado por Pinto (1971), que explica que as reações pozolânicas, responsáveis pelo ganho de resistência nas misturas de solo-cal, são vagarosas e estendem-se por anos depois de sua mistura. Dalla Rosa (2009) explica que os resultados de ensaios com cal são mais expressivos com um tempo de cura mínimo de 90 dias. Thomé, Prietto e Consoli (1999) ao estudar a influência do tempo de cura sobre as reações pozolânicas em ensaios para estabilização de solo com cinza pesada e cal, também observaram que o tempo de cura é a principal variável no desenvolvimento das reações pozolânicas. Estes autores verificaram que para a idade de 28 dias, a resistência atinge somente 28,4% do valor da resistência total, na qual, foi obtida aos 120 dias de cura. Os autores frisam que o ganho de resistência é diferente para diferentes intervalos de tempo. No entanto, é possível observar que não existe um consenso nas pesquisas realizadas sobre a relação do tempo de cura e a resistência à compressão simples para misturas com solo-cal. Dalla Rosa (2009), Lopes Junior (2007), Moretti (2012) e Pinto (1971) apontam que as reações pozolânicas em misturas com solo-cal ganham resistência durante anos, já Thomé, Prietto e Consoli (1999) apontam que aos 120 dias o ganho de resistência praticamente cessa.

Nesse contexto, observou-se um ganho de resistência dos corpos de prova da calda número 04 (50% cal; 50% água) aos 70 dias de cura em relação à falta total de resistência à compressão destes aos 7 e 28 dias de cura (de forma que não puderam ao menos serem rompidos). Percebeu-se *in loco* que, com o passar do tempo, estes CP's tornavam-se mais rijos ao toque e visualmente, sugerindo que, com um tempo de cura maior, poderiam chegar a uma resistência superior. No entanto, esta pesquisa não apresenta dados suficientes para avaliar o ganho de resistência da calda número 04. Ensaios com maiores variações de idades de cura deveriam ser realizados para confirmar tais análises.

Sendo assim, pode-se concluir que a técnica *Deep Soil Mixing* com adição de óxido de cálcio (cal) em sua dosagem é viável para tratamento em solos moles. Entretanto, devido ao lento desenvolvimento de resistência, a adição de teores de cal deverá ser viável em obras que não requerem prazos curtos de execução, pois necessitam de maior tempo de cura para o desenvolvimento de sua resistência.

Por fim, os resultados aqui apresentados, instigam o aprofundamento sobre a utilização do óxido de cálcio em dosagens de DSM.

REFERÊNCIAS

- BURRÓ, María Alicia Arévalo. Capacidade de carga de fundações sobre solos reforçados por colunas submetidas a solicitações inclinadas. 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- CASTRO, Francisco José Casanova de Oliveira e. Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização). 1995. 344f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.
- CORREIA, António Alberto Santos. Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego. 2011. 445f. Dissertação (Doutorado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.
- CORSINI, Rodnei. Infraestrutura Urbana. ed. 40. 2014. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini>>



- com.br/ solucoes-tecnicas/40/coluna-de-solocimento-313548-1.as px >. Acesso em: 11 maio 2017.
- CRUZ, Joana Mónica Martins da. Abordagem às soluções de contenção de escavações usando a técnica *Deep Soil Mixing*. 2012. 92f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- DALLA ROSA, Amada. Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal. 2009. 198f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- EPC CONSTRUÇÕES. Aeroporto Internacional Salgado Filho: memorial descritivo. Porto Alegre, 2015
- FOGAÇA, Bibiana Cardoso. Análise paramétrica de estruturas de pavimento utilizando areia do litoral do Rio Grande do Sul estabilizada com cinza volante e cal. 1996. 143f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- FORSBERG, Tony; MACHADO, Michelle; KÖHLER Tammo. Soluções de melhoramento de solos moles com baixo custo para construção de rodovias. Rio de Janeiro: Keller Engenharia Geotécnica Ltda, 2012.
- LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. Parâmetros de controle de resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada. 2007. 147f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- KELLER, Metodologia executiva: Colunas de solo-cimento. Rio de Janeiro: KEGMS- GR, 2014.
- MACHADO, Layza Verbena de Souza Santos. Avaliação do deslocamento vertical de aterro sobre solo mole executado no projeto de suplicação da BR-101/PE. 2012. 198f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2012.
- MASSAD, Faiçal. Obras de terra: curso básico de geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficinas de Textos, 2003.
- MORETTI, Geraldo Vanzolini. Comportamento à compressão de solo estabilizado com cimento utilizado em colunas de *Deep Soil Mixing*. 2012. 153f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- PINTO, Salomão. Estabilização de areia com adição de cal e cinza volante. 1971. 142f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971.
- SCHNAID, Fernando; NACCI, Diego; MILITITSKY, Jarbas. Aeroporto Internacional Salgado Filho: Infraestrutura Civil e Geotécnica. Porto Alegre: Editora Sangra Luzzatto, 2001.
- SOUSA, Estela Diana Costa. A técnica de cutter soil mixing aplicada a escavações urbanas. Aspectos gerais e caso de estudo. 2009. 183f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2009.
- TERASHI, M. Theme Lecture: Deep Mixing Method- Brief State of the Art. Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.4, pp.2475-2478.1997.
- THOMÉ A.; PRIETTO, P.D.M.; CONSOLI, N.C. Influência do tempo de cura sobre as reações pozolânicas em solos estabilizados com resíduos industriais. 1999. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 4, 1999, Salvador. Anais... Salvador: REGEO, 1999. v.1. p. 267-273.