



Effect of Water Content, Binder Content and Curing Time on the Behaviour of a Soft Soil Chemically Stabilised

Jorge Villaroel-Ortega, Nicole Santos,
António Alberto S. Correia, Luís Lemos and Paulo Oliveira

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

July 16, 2022

EFEITO DO TEOR DA ÁGUA, QUANTIDADE DE LIGANTES E TEMPO DE CURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO MOLE ESTABILIZADO QUIMICAMENTE

EFFECT OF WATER CONTENT, BINDER CONTENT AND CURING TIME ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF A SOFT SOIL CHEMICALLY STABILISED

Villarroel-Ortega. J., *Universidad de Magallanes, Chile e Universidade de Coimbra, Portugal, jorge.ortega@uc.pt*

Santos, Nicole Costa; *Universidade de Coimbra, Portugal, nicole.santos@uc.pt*

Correia. A.A.S, *CIEPQPF, Universidade de Coimbra, Portugal, aalberto@dec.uc.pt*

Lemos. L.J.L, *CGEO, Universidade de Coimbra, Portugal, llemos@dec.uc.pt*

Venda Oliveira. P.J, *ISISE, Universidade de Coimbra, Portugal, llemos@dec.uc.pt*

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do teor da água, teor em ligante e tempo de cura no comportamento mecânico de um solo mole estabilizado quimicamente. O solo em estudo é um solo mole português, recolhido na área do Baixo Mondego o qual foi estabilizado quimicamente com cimento Portland. No estudo experimental, o teor da água varia entre 100 a 120%, o teor em ligante entre 5% a 15% (expresso pela razão entre as massas secas de ligante e do solo) e as amostras forma ensaiadas aos 7 e aos 28 dias de tempo de cura. Os resultados mostraram que a resistência à compressão não confinada aumenta com o teor em ligante, devido ao maior nível de cimentação, mas diminui à medida que o teor da água aumenta, refletindo assim uma menor densidade e maior índice de vazios do material compósito. Os resultados também mostraram que a resistência e a rigidez aumentam com o tempo de cura, devido ao desenvolvimento de interações físico-químicas ao longo do tempo, permitindo a construção de uma estrutura mais resistente e mais rígida.

ABSTRACT

This paper aims to identify the effect of water content, curing time and binder content on the mechanical properties of a soft soil chemically stabilized. The soil under study is a Portuguese soft soil collected in Baixo Mondego area and the binder selected to its stabilization is an Ordinary Portland Cement. In the experimental study the water content varies from 100 to 120%, the binder content ranges from 5% to 15% (expressed as the ratio of the binder dry weight to soil dry weight), and the samples were tested at 7 and 28 days of curing time. The results showed that the unconfined compressive strength increases with the binder content due to the higher level of cementation but decreases as the water content increases reflecting the lower density and the higher void ratio of the composite material. The results also showed that the strength and the stiffness increase with the curing time due to the development with time of the physico-chemical reactions allowing the construction of a stronger and stiffer matrix.

1. INTRODUÇÃO

A estabilização química de solos é uma técnica de melhoramento de solos que consiste na mistura mecânica *in situ* do solo natural com ligantes. A estabilização química de solos pode ser aplicada com ligantes em calda (método húmido) ou em pó (método seco). Quando os ligantes são misturados com o solo, as interações físico-químicas ocorrem e são responsáveis pelo efeito de estabilização, exercendo uma grande influência no comportamento mecânico do material melhorado. Esse efeito estabilizador depende de uma série de parâmetros que devem ser analisados através de um extenso programa de laboratório e ensaios de campo, conforme descrito na norma europeia EN 14679 (2005).

Alguns dos parâmetros que influenciam fortemente o comportamento de um solo estabilizado são o tipo de ligante (cimento, cal viva, escória, cinzas volantes, etc.), tipo de solo (granulometria, matéria orgânica, pH, teor da água, composição química e mineralógica), condições de mistura (teor em ligante, tempo de mistura), condições de cura (tempo de cura, temperatura, humidade), entre outras (Kitazume et al. 2015). No presente artigo, o foco será dado a apenas 3 parâmetros: teor de ligante, teor da água e tempo de cura.

O tipo de ligante exerce uma forte influência no comportamento mecânico de um solo estabilizado. De fato, é fruto das interações físico-químicas desencadeadas pelo ligante que ocorrem mudanças na estrutura do solo estabilizado (Janz & Johansson, 2002; Stab, 2002). A escolha do(s) ligante(s) mais eficiente(s) para um determinado solo deve ser baseada em estudo específico de laboratório, conforme especificado em (British Standards Institution, 1990). O teor em ligante pode ter uma enorme influência nas propriedades finais do material compósito, porque, em geral, um elevado teor em ligante promove o desenvolvimento de uma maior quantidade de produtos cimentícios, responsável pela melhoria das propriedades do material compósito (Correia, 2011).

O efeito do teor da água no comportamento mecânico de um solo estabilizado pode ser descrito da seguinte forma: a resistência à compressão diminui quase linearmente com o aumento do teor da água, independentemente do tipo e quantidade de ligante. Este facto é justificado pelo aumento do índice de vazios com o teor da água, o que induz uma matriz mais aberta, portanto com menor resistência (Kitazume et al. 2015).

As interações físico-químicas que ocorreram entre o(s) ligante(s), as partículas do solo e a água dependem do tempo, ocorrendo ao longo de dias, meses ou até anos, com impactos óbvios nas propriedades mecânicas do solo estabilizado. Em geral, a resistência à compressão não confinada aumenta quase linearmente com o tempo de cura (Horpibulsuk et al., 2003; Correia, 2011).

O estudo aqui apresentado é baseado em trabalho de laboratório desenvolvido na Universidade de Coimbra, tendo-se recorrido a ensaios de compressão não confinada (UCS) para caracterizar o impacto dos parâmetros teor em ligante, teor da água e tempo de cura no comportamento mecânico das amostras estabilizadas.

2. MATERIAIS

O solo utilizado foi recolhido num local perto de Coimbra, na zona do Baixo Mondego, a uma profundidade 2,5 m. O solo natural possui uma distribuição granulométrica predominantemente siltosa (areia = 14%; silte = 61%; argila = 25%), baixo peso volúmico (14,6 kN/m³), elevado índice de vazios (> 2,0) e teor da água (80,8%). O solo apresenta um elevado teor de matéria orgânica (13,1%), o que afeta negativamente o comportamento geral do solo por induzir uma baixa resistência ao corte não drenado (<25 kPa) e uma elevada compressibilidade e plasticidade ($w_L = 68,0\%$; $w_P = 41,9\%$), de acordo com Coelho (2000) e Correia (2011). Este solo é classificado como um solo orgânico de elevada plasticidade OH (ASTM D 2487, 1998).

A composição química do solo revela um elevado teor de sílica ($\text{SiO}_2 = 62\%$) e alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 16\%$), o que confere propriedades pozolánicas ao solo (Janz e Johansson, 2002). O solo apresenta um valor reduzido de pH (3,5), o que pode restringir e/ou retardar algumas reações durante a estabilização química (Edil e Staab, 2005; Correia, 2011; Kitazume e Terashi, 2013). O Quadro 1 resume as principais propriedades do solo mole do Baixo Mondego.

Quadro 1: Principais propriedades do Solo de Baixo Mondego

Propriedades Físicas		Propriedades Químicas	
w_{nat} (%)	80.8	pH (BS1377-3)	3.5
G_s	2.57	SiO_2 (%)	62
e_{nat}	2.03	Al_2O_3 (%)	16
γ (kN/m ³)	14.5	Fe_2O_3 (%)	4.8
OM (%)	9.3	CaO (%)	0.74
Granulometria		MgO (%)	1.1
Argila (%)	10	Na ₂ O (%)	0.9
Silte (%)	71	K ₂ O (%)	3
Areia (%)	19	TiO ₂ (%)	0.69
w_L (%)	71	MnO (%)	< 0.3
w_p (%)	43	P ₂ O ₅ (%)	< 0.5
PI (%)	28	TOC (%)	2.79
LI (%)	1.35	CTC (emol+/kg)	11
USCS* (ASTM D2487)	OH		

* USCS: Unified Soil Classification System (Sistema Unificado de Classificação de Solos)

O solo mole foi quimicamente estabilizado com cimento Portland tipo I 42.5 R (EN 197-1, 2000) , cujas principais características são apresentadas no Quadro 2. O cimento Portland reage espontaneamente com a água (material hidráulico) produzindo uma grande quantidade de produtos de reação a curto prazo. Com o tempo, as reações físico-químicas vão-se desenvolvendo a baixa velocidade, promovendo a produção de maior quantidade de produtos cimentícios responsáveis pela melhoria das propriedades mecânicas a longo prazo (Janz e Johansson, 2002).

Quadro 2: Composição química de cimento Portland (CEM I 42,5 R) (dados da CIMPOR)

Características Químicas	CEM I 42,5 R
SiO ₂ (%)	19,3
Al ₂ O ₃ (%)	5,1
Fe ₂ O ₃ (%)	3,15
CaO Total (%)	63,9
MgO (%)	1,9
SO ₃ (%)	3,5
K ₂ O (%)	1,1
Na ₂ O (%)	0,1
CaO livre (%)	2,2
Perda ao fogo (%)	1,3

Para avaliar a influência do teor em ligante, teor da água e do tempo de cura na estabilização química do solo mole do Baixo Mondego, foram preparadas várias amostras de laboratório para diferentes teores de ligante (5, 10 e 15%), teores de água (100, 110, 120%) e deixadas em cura por 7 e 28 dias. As amostras estabilizadas de foram preparadas de acordo com (Stab, 2002) com as modificações propostas por (Kitazume et al. 2015):

(i) para ajustar o teor da água do solo mole foi adicionada água da torneira e misturada com o teor especificado de ligante, produzindo uma pasta;

(ii) a amostra de solo mole remexida e o ligante foram cuidadosamente misturadas usando uma misturadora mecânica a uma velocidade de 142 rpm por 4 min em duas fases de 2 min cada, criando assim uma pasta homogênea de ligante, água e solo;

(iii) a pasta foi introduzida diretamente num molde de PVC (37 mm de diâmetro) em 3 camadas (na parte inferior havia um filtro geotêxtil não tecido);

(iv) cada camada foi introduzida e levemente ajustada com uma vara de madeira, tendo-se aplicado 20 pancadas contra o chão;

(v) a superfície da camada foi levemente escarificada e a camada seguinte foi introduzida (um filtro geotêxtil não tecido foi introduzido na superfície superior da última camada);

(vi) imediatamente após a introdução da pasta no molde de PVC, o conjunto foi transferido para um tanque com água, tendo sido aplicada no topo da amostra uma pressão vertical de 24 kPa (através de um peso, simulando as condições de campo a uma profundidade de 5 metros) e a amostra foi deixada em cura sob condições submersas dentro de uma sala com temperatura controlada ($20 \pm 2^\circ\text{C}$);

(vii) as amostras foram removidas do molde em PVC após 7 ou 28 dias de cura e, em seguida, as duas superfícies foram aparadas para obter amostras com uma relação altura/diâmetro de 2, tendo a amostra sido montada no equipamento de ensaios UCS;

(viii) os dispositivos eletrônicos (célula de carga e transdutor LVDT) foram montados e ajustados, dando-se início ao ensaio UCS, registrando-se automaticamente os resultados a partir dos quais se avalia a resistência à compressão não confinada ($q_{u\max}$).

Todos os testes UCS foram realizados sob uma velocidade de deformação constante de 1 %/min. Para garantir a reprodutibilidade do estudo, foram realizados pelo menos três ensaios para cada condição da mistura (teor em ligante, teor da água e tempo de cura), utilizando-se como critério de aceitação que cada resultado individual estivesse dentro da gama de variação $\pm 15\%$ em relação ao valor médio (EN 206-1 2007).

Como o filtro de geotêxtil não tecido fornece um canal para que a água flua livremente para dentro da amostra, é de esperar que as amostras estejam aproximadamente saturadas no final da cura e, portanto, o efeito da sucção matricial deverá ser insignificante (Consoli et al., 2011).

Foi utilizada a seguinte nomenclatura para identificar cada ensaio UCS: o teor em ligante, o teor da água e o tempo de cura são referidos pelas letras 'C', 'w' e 'T', respetivamente, cada letra imediatamente seguida da quantidade respetiva.

3. RESULTADOS FINAIS

O Quadro 3, resume os principais resultados da estabilização química do solo mole do Baixo Mondego, sendo cada ensaio caracterizado pelos parâmetros medidos no final do tempo de cura: o teor em água final (w_f), a máxima resistência à compressão não confinada ($q_{u\ max}$) e a extensão correspondente (ϵ_f), e o módulo de deformabilidade não drenado definido para 50% de $q_{u\ max}$ ($E_{u\ 50}$). As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as curvas tensão-deformação obtidas a partir dos ensaios UCS para o mesmo teor em ligante ($C = 15\%$), mas variando o teor da água e o tempo de cura. Em geral, cada gráfico UCS é descrito por um aumento acentuado da tensão até que ocorra rotura, após a qual há uma diminuição gradual da tensão à medida que a extensão continua a aumentar.

Tabela 3: Solo Mole de Baixo Mondego estabilizado quimicamente (valores médios).

Ensaio	$q_{u\ max}$ (kPa)	$E_{u\ 50}$ (MPa)	w_f (%)	ϵ_f (%)
C5w100T7	7.2	1.2	85.1	4.6
C5w110T7	18.1	2.2	84.3	2.2
C5w120T7	9.4	0.9	85.6	5
C10w100T7	58	6.3	80.9	2.3
C10w110T7	43.8	3.2	86.3	2.5
C10w120T7	39.8	4	85.4	4.1
C15w100T7	148.5	23.3	78.4	2.9
C15w110T7	91.1	9.8	84	1.7
C15w120T7	38	2.8	-	3.6
C5w100T28	11.3	1.6	81.1	3.2
C5w110T28	7.4	1.5	84.9	3
C5w120T28	11.5	1.7	85	2.7
C10w100T28	70	7.7	83.5	2
C10w110T28	61.1	3.8	85.8	4.1
C10w120T28	70.4	5.6	89.5	3.3
C15w100T28	178.2	28.4	80.1	1.5
C15w110T28	174.1	13.7	87.4	2.5
C15w120T28	149.7	18.2	87.7	2.1

Independentemente das condições de ensaio, é claro que o comportamento mecânico (caracterizado por $q_{u\ max}$ ou $E_{u\ 50}$) melhora com o tempo de cura (Quadro 3 e Figuras 1 a 3). Nas Figuras 1 a 3 também é possível observar que o comportamento mecânico evolui levemente de dúctil para frágil à medida que o tempo de cura aumenta, o que está de acordo com o observado por (Miura et al., 2001; Correia et al., 2015). A melhoria do comportamento mecânico com o aumento do tempo de cura está relacionada com as interações que ocorrem entre as partículas do solo, a água livre e

o ligante, que se desenvolvem com o tempo (Correia, 2011), ou seja, a quantidade de produtos cimentícios produzidos pelas reações físico-químicas aumentam com o tempo. Assim, à medida que o tempo de cura aumenta, a matriz do material compósito torna-se mais resistente e rígida, ou seja, exibindo um maior $q_{u\ max}$ e $E_{u\ 50}$. No entanto, observou-se que, para o menor teor em ligante ($C = 5\%$), o comportamento não é bem definido (Quadro 3 e Figura 4), sugerindo que a quantidade de produtos cimentícios produzida é muito pequena, incapaz de modificar significativamente a matriz do material compósito.

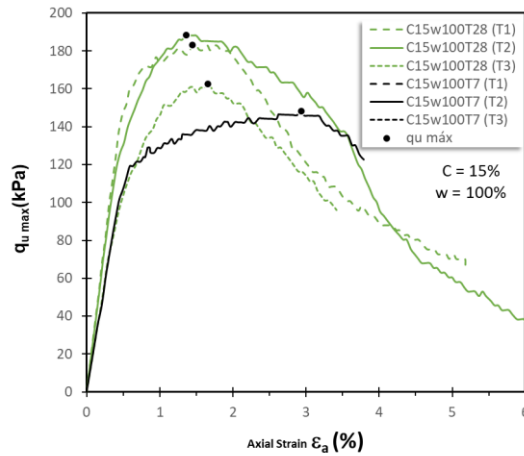


Figura 1 – Curvas tensão-deformação dos ensaios UCS (teor em ligante = 15%, teor em água = 100%)

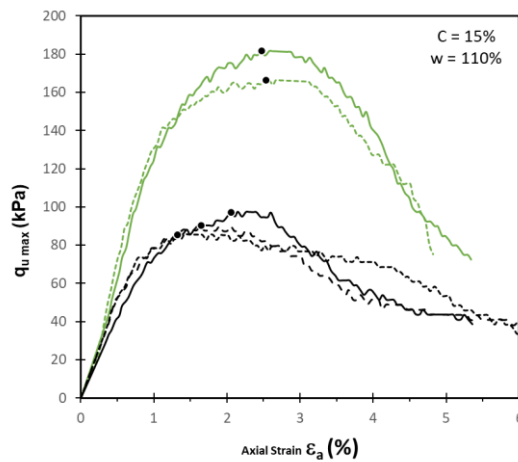


Figura 2 – Curvas tensão-deformação dos ensaios UCS (teor em ligante = 15%, teor em água = 110%)

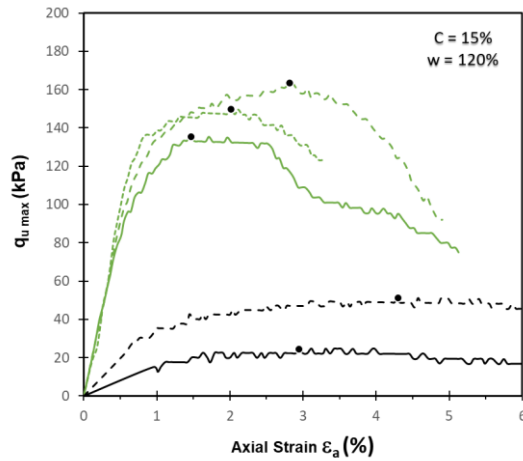
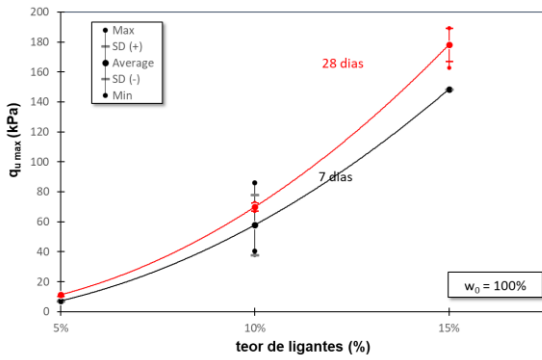
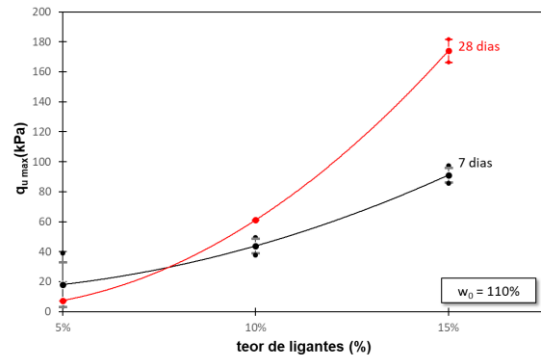


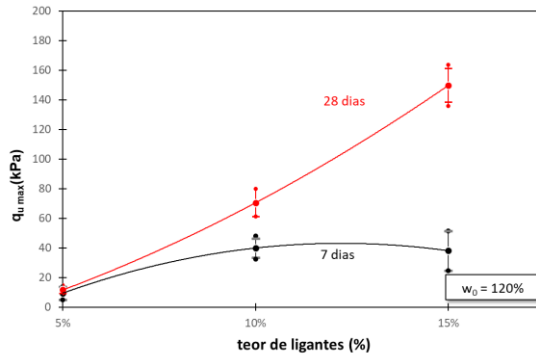
Figura 3 – Curvas tensão-deformação dos ensaios UCS (teor em ligante = 15%, teor em água = 120%)



a) teor em ligante vs $q_{u \max}$ ($w=100\%$)



b) teor em ligante vs $q_{u \max}$ ($w=110\%$)



c) teor em ligante vs $q_{u \max}$ ($w=120\%$)

Figura 4: Efeito de tempo de cura na resistência à compressão não confinada ($q_{u \max}$) para diferentes teores de água ($w\%$)

Os resultados também mostram que o teor da água tem um papel importante no comportamento mecânico do material estabilizado, embora não tenha sido possível identificar uma tendência clara (Figura 4 e Quadro 3). Isto pode estar relacionado ao facto de que o aumento do teor em água origina um material com um maior índice de vazios e uma estrutura menos densa, portanto, com um pior comportamento mecânico, embora, por outro lado, a quantidade de ligante requer uma quantidade de água livre que permita o desenvolvimento de todas as reações de hidratação,

melhorando assim o comportamento mecânico do material. Assim, se a água livre estiver presente numa quantidade abaixo ou acima da exigida pelo teor em ligante, o comportamento mecânico do material compósito pode ser comprometido. No entanto, deve-se ressaltar que, para elevados teores de ligante, existe uma significativa modificação da matriz do material, desde que se assegure que o teor da água esteja acima de um valor limite.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se o efeito do teor em ligante, teor em água e tempo de cura no comportamento mecânico de um solo mole estabilizado quimicamente. Os resultados dos ensaios UCS mostram que as curvas tensão-deformação são descritas por um aumento pronunciado da tensão com a extensão até que ocorra a rotura, após a qual há uma diminuição gradual da tensão à medida que a deformação continua a aumentar. Com o aumento do tempo de cura, o comportamento mecânico evolui levemente de dúctil para um frágil, devido melhoria do comportamento mecânico (quer seja escrito por $q_{u\ max}$ ou $E_{u\ 50}$). Os resultados mostram igualmente que, à medida que o teor em ligante aumenta, o comportamento mecânico melhora dependendo do teor da água e do tempo de cura. Por fim, observou-se que o teor da água tem um papel importante no comportamento mecânico do material estabilizado, embora não tenha sido possível identificar uma tendência clara.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à CIMPOR pelo fornecimento do cimento utilizado no trabalho e às instituições que apoiaram financeiramente a pesquisa: CONICYT PAI / INDÚSTRIA 79090016; Universidade de Magallanes; ISISE (projeto UID/ECI/04029/2013), FCT (projeto PTDC/ECI-CON/28382/2017). CIEPQPF (UIDB/00102/2020) e ACIV.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM, D. 2487 1998. Classification of soil for engineering purposes. In Proceedings of the American Society for Testing Materials.
- British Standards. 1377-5: 1990, Part 5: compressibility, permeability and durability tests. British Standards Institute, 389 Chiswick High Road, London, W4 4AL. 2000.
- British Standard. 197-1: 2000, Cement: Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements”, British Standards Institute, 389 Chiswick High Road, London, W4 4AL. 2000.
- Consoli, N. C., Rosa, D. A., Cruz, R. C. & Rosa, A. D. (2011) Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil. *Engineering Geology*, 122 (3-4), pp. 328-333.
- Correia, A. A. S. (2011) Aplicabilidade da Técnica de Deep Mixing aos Solos Moles do Baixo Mondego. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Correia, A. A. S., Venda Oliveira, P. J. & Custódio, D. G. (2015) Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. *Geotextiles and Geomembranes*, 43 (2), pp. 97-106.

- EuroSoilStab. (2002) Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils: Design guide for soft soil stabilization. CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III) Bryssel.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. & Nagaraj, T. (2003) Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis. *Geotechnique*, 53 (4), pp. 439-444.
- Janz, M. & Johansson, S. (2002) The function of different binding agents in deep stabilization, 9th Report of Swedish Deep Stabilization Research Centre. Linköping, Sweden.
- Kitazume, M. & Terashi, M. (2013) *The deep mixing method*. CRC press.
- Kitazume, M., Grisolia, M., Leder, E., Marzano, I. P., Correia, A. A. S., Oliveira, P. J. V., Åhnberg, H. & Andersson, M. (2015) Applicability of molding procedures in laboratory mix tests for quality control and assurance of the deep mixing method. *Soils and Foundations*, 55 (4), pp. 761-777.
- Miura, N., Horpibulsuk, S. & Nagaraj, T. (2001) Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. *Soils and Foundations*, 41 (5), pp. 33-45.
- Staab, D. A., Alumbaugh, D. L. & Edil, T. B. (2005) Defect detection in deep-mixed columns using geophysical methods: A computer modeling study. In *Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, pp. 1-13.