

# **DETERMINAÇÃO DO TEOR EM CIMENTO EM TRATAMENTOS DE SOLOS POR MISTURA SOLO-CIMENTO – VALIDAÇÃO DE METODOLOGIA**

## **DETERMINATION OF CEMENT CONTENT IN SOIL TREATMENTS FOR SOIL-CEMENT MIXTURE - THE VALIDATION OF METHODOLOGY**

Jorge, Celeste; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, cjorge@lnec.pt*  
Sousa, Filipa; *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, cs.filipa@gmail.com*  
Mendes, Bruno; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, bfmendes@sapo.pt*

### **RESUMO**

A utilização de cimento para melhoramento das características mecânicas de solos moles é uma prática conhecida. Nesta prática são estabelecidos teores de cimento para os tratamentos, de acordo com os solos a tratar e os resultados a obter. As misturas solo-cimento necessitam de ser aferidas periodicamente durante a execução do tratamento, para confirmação da homogeneidade da mistura e do teor real de cimento encontrado no solo tratado. Com o objetivo de definir o teor de cimento de diversas misturas solo-cimento, foi estabelecida uma metodologia laboratorial expedita baseada na determinação da concentração de cálcio, pela utilização de um detetor portátil de Fluorescência de RX (FRX). Este estudo de formulação laboratorial mostrou-se ser um processo iterativo de tentativa e erro, ao longo do qual se foram excluindo diversos procedimentos, e que culminou com a definição da metodologia estabelecida para a determinação da fração percentual de cimento e do teor de cimento final do solo.

### **ABSTRACT**

The use of cement for improvement of the mechanical characteristics of soft soils is a practice known. In this practice the cement amounts are established for the treatment, in accordance with the soil to be treated and the results to be achieved. The soil-cement mixtures need to be assessed periodically during the execution of the treatment, to confirm the homogeneity of the mixture and the real cement content found in the treated soil. In order to define the content in cement of various soil-cement mixtures, was established a laboratory methodology expedite based on calcium concentration, by the use of a portable detector X-ray Fluorescence (XRF). The laboratory formulation study proved to be an iterative process of trial and error, that was excluding various procedures and that led to the definition of the established methodology for the determination of percentage fraction of cement and the final cement content in soil.

### **1 - INTRODUÇÃO**

O melhoramento de terrenos pela aplicação da técnica cutter soil mixing (CSM) foi introduzido em Portugal em 2009. Esta técnica baseia-se na metodologia deep mixing (DM), que foi desenvolvida desde o início da década de setenta no Japão e que consiste na mistura mecânica de um ligante (cimento, cal, etc.) com o terreno, possibilitando a execução de painéis com características resistentes e químicas ajustadas às particularidades de cada local.

A metodologia DM pode ocorrer com misturas secas ou em meio aquoso. Nas misturas que ocorrem em meio aquoso, o ligante mais comum é o cimento. Este tratamento é principalmente usado em solos coesivos, para melhorar as características de resistência e de deformabilidade de terrenos, de aterros e de fundações; para suporte de taludes e de escavações; (...) (Rutherford et al., 2005).

A utilização das misturas solo-cimento é uma prática já bastante difundida para melhoramento das características mecânicas de solos moles, mas que continua a ter algumas limitações de realização devido a problemas de homogeneização e de durabilidade. Estes problemas podem colocar-se principalmente em meios agressivos para o cimento, como são aqueles em que as condições ambientais para isso contribuem, como seja o caso da presença de água salgada ou de locais contaminados, sendo necessário ter em conta as condições de exposição do cimento ao ataque químico proveniente de solos naturais e de águas neles contidas (NP EN 206-1, 2007).

O mesmo é referido na norma EN 14679:2005 (2005) - "*consequences due to exposure of the columns to chemical and physical effects shall be considered in the design. Particular consideration regarding long-term durability is needed in marine environments or contaminated ground conditions*". De acordo com essa norma, o controlo de qualidade e a garantia de qualidade quando apropriados, exigem a determinação de parâmetros do meio como sejam: teor em sulfatos, teor em cloretos, teor em carbonatos e pH. E em meio agressivo exige, ainda, a determinação do teor em substâncias químicas ativas.

A EN 14679:2005 (2005) refere também a necessidade de procedimentos de controlo de qualidade durante a execução. É neste ponto que se insere a exigência do controlo do teor de cimento da mistura solo-cimento e da sua homogeneidade num painel executado.

A prática vigente da aplicação das misturas solo-cimento impõe a realização de ensaios de laboratório normalizados de forma a obter informação acerca do tipo de ligante e da dosagem a aplicar para a construção específica. Os ensaios deverão contemplar todos os solos representativos das camadas existentes no local. Porém, os ensaios de laboratório são apenas indicativos, porque vai existir sempre uma diferença entre os resultados obtidos no laboratório e os obtidos no local da construção, em termos de resistência e de deformabilidade, pela interferência de diversas variáveis não controláveis. Contudo, serão estes resultados que servirão de pressupostos para as fases futuras. Simultaneamente, deverá tentar encontrar-se casos de obras semelhantes e deles usar todos os dados conhecidos que possam ajudar a afinar a decisão. Por fim, e antes da construção final, devem ser realizadas colunas protótipo no local a tratar, para ajudar à confirmação das dosagens a utilizar, do tipo de ligante, da energia de mistura para dar a resistência necessária e da uniformidade obtida.

É sobre a uniformidade do tratamento que passa o objetivo do presente estudo, dado que é oneroso recorrer a métodos laboratoriais complexos para definir em muitas amostras (amostras de mistura produzidas em laboratório - formulação, amostras recolhidas por furação do núcleo da coluna/carote ou amostras fluidas/frescas recolhidas imediatamente após a realização da coluna - colocadas em moldes) a fração percentual de cimento das misturas solo-cimento.

As misturas solo-cimento realizadas na fase de concretização do protótipo e na fase de execução do tratamento necessitam de ser aferidas periodicamente, para confirmação da homogeneidade da mistura e do teor real de cimento encontrado pontualmente no solo tratado. Esta verificação é muito importante.

Mediante esta exigência, considerou-se necessário desenvolver uma metodologia expedita que permitisse determinar a fração percentual de cimento existente nas amostras recolhidas nos locais de tratamento, tendo sido pensada inicialmente uma abordagem que pudesse ser usada praticamente em condições de obra. Desta forma, pretendia-se dar resposta ao controlo de qualidade pela realização de ensaios no local da execução das colunas e em ensaios de laboratório de formulação da mistura solo-cimento para a determinação do teor em cimento.

## 2 - CASO DE ESTUDO

As atividades desenvolvidas para o estudo das misturas solo-cimento foram realizadas com lodos argilosos, numa primeira fase recolhidos na Ria de Aveiro e numa segunda no Estuário do Tejo (Figura 1). Estes solos apresentavam consistência muito mole, com SPT de 1, quanto muito 2.

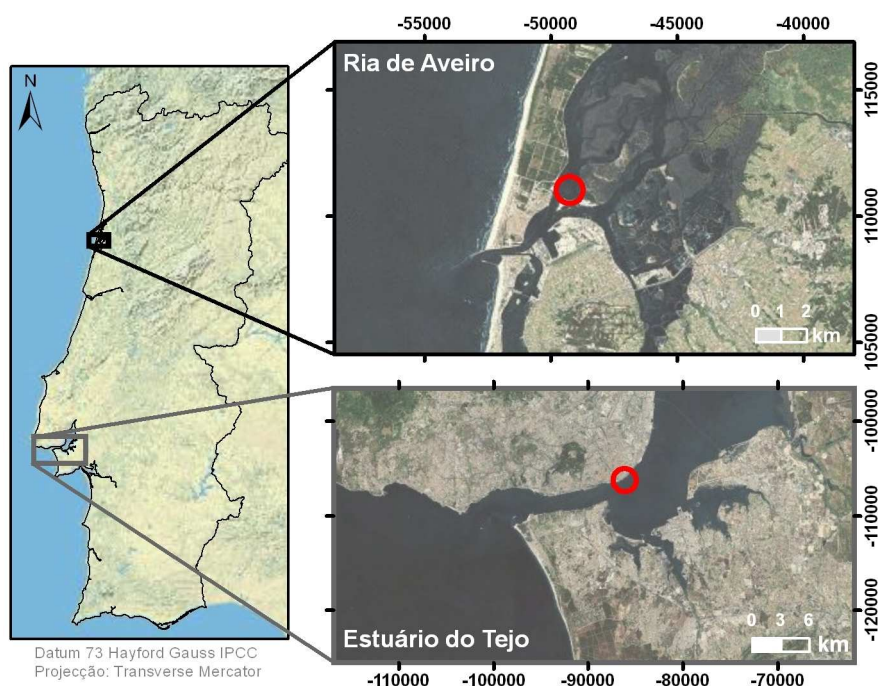


Figura 1 – Localização das Áreas Onde Foram Recolhidas Amostras de Lodos (Fontes – ESRI e BING Maps)

Uma vez que as misturas de cimento usadas estavam expostas a condições ambientais consideradas agressivas, determinaram-se os teores em sulfatos dos lodos e a qualidade da água do local onde se construíram os protótipos realizados no Estuário do Tejo. Os resultados obtidos nas determinações químicas dos solos deram teores em sulfatos variáveis entre 860 e 980 mg/kg<sub>seco</sub>. Por sua vez, a água do local é salgada e pelos resultados da sua análise química, de acordo com os critérios da NP EN 206-1 (2007), a classe de exposição é designada por XA3. Apesar destas condições foi considerado aplicável a técnica de tratamento solo-cimento. O cimento utilizado foi o Cimento Pozolânico CEM IV/B (V) 32,5 N produzido pela Cimpor.

### **3 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CIMENTO**

#### **3.1 - Processo iterativo para definição da metodologia**

A metodologia laboratorial expedita definida passou pela utilização de um detetor portátil de Fluorescência de RX (FRX) depois de testada a sua aplicabilidade em amostras de massa fresca (secas ao ar e em estufa), amostras de carotes húmidas (de protótipos de painéis) e amostras de misturas produzidas (formulação) no LNEC (secas ao ar e em estufa).

O objetivo do estabelecimento da metodologia pretendida consistiu na determinação de uma correlação entre a percentagem de Cálcio (Ca) obtida por FRX e a percentagem de cimento existente numa determinada amostra de solo tratado (solo mais calda de cimento).

Para a identificação e quantificação do Ca foi empregue um detetor XL3t da Thermo Scientific Niton com tecnologia GOLDD+, nos modos "Solos" e "Industrial", em leituras diretas e em amostras pré tratadas encapsuladas, seguindo o Método EPA 6200 (EPA, 1998).

Por processo iterativo foram-se eliminando hipóteses e escolhendo as condições de trabalho mais adequadas de acordo com os resultados obtidos, para a deteção e subsequente controlo e garantia de qualidade da homogeneidade da fração percentual de cimento das amostras recolhidas, com o menor erro associado. As aproximações foram várias e podem ser separadas por diversas etapas. Esta metodologia é apresentada em Jorge et al. (2009).

As caldas de cimento utilizadas na 1.<sup>a</sup> Fase e na realização de padrões específicos da 2.<sup>a</sup> Fase foram sempre na igual proporção de quantidade (peso) de cimento para quantidade (peso ou volume) de água.

#### **3.2 - Abordagem inicial – 1.<sup>a</sup> Fase**

A primeira etapa da tentativa de estabelecimento da metodologia para a avaliação do teor de cimento passou pela utilização de sedimentos da Ria de Aveiro.

Foram usadas duas amostras iguais do mesmo sedimento (Figura 2), com o teor em água natural, às quais se adicionaram quantidades de cimento pré-definidas (sob a forma de calda de cimento), para a obtenção de dois teores em cimento conhecidos. As misturas foram realizadas dentro de sacos de plástico, tentando-se obter a melhor homogeneização possível.

A determinação analítica foi efetuada diretamente sobre cada uma das misturas resultantes, tendo sido repetida quatro vezes por amostra (Figura 2). Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 1.



Figura 2 – Amostras de Lodos de Aveiro e Realização de uma Determinação Direta de Ca por FRX

Quadro 1 – Resultados das Análises Diretas por FRX Realizadas em ppm

Amostra	Referência laboratório	Ca (ppm)
Mistura 1 - Aveiro	1389	24316
	1391	19900
	1392	19419
	1393	23658
Mistura 2 - Aveiro	1395	19083
	1396	19999
	1397	25270
	1398	24289

A segunda etapa passou por tentar obter padrões, com os mesmos lodos, que permitissem constituir uma reta de calibração para a conversão do teor de Ca em partes por milhão (ppm) ou em percentagem (%) em teores de cimento. Assim, foram realizadas misturas de lodos húmidos com caldas de cimento a 10, 15 e 20% de cimento, as quais foram muito bem homogeneizadas.

Posteriormente, as amostras foram colocadas em tabuleiros na estufa e totalmente secas. Após secagem verificou-se existirem problemas de distribuição do cimento. Conforme se pode observar na Figura 3, a aglutinação do cimento em redor dos núcleos de cimento (unidades de aglutinação) aumentava em função do aumento do teor de cimento. Ou seja, dos 10% de cimento, para os 15% e para os 20% verificou-se que a interação entre as partículas de cimento e o sedimento/solo era cada vez menor (Figura 3).

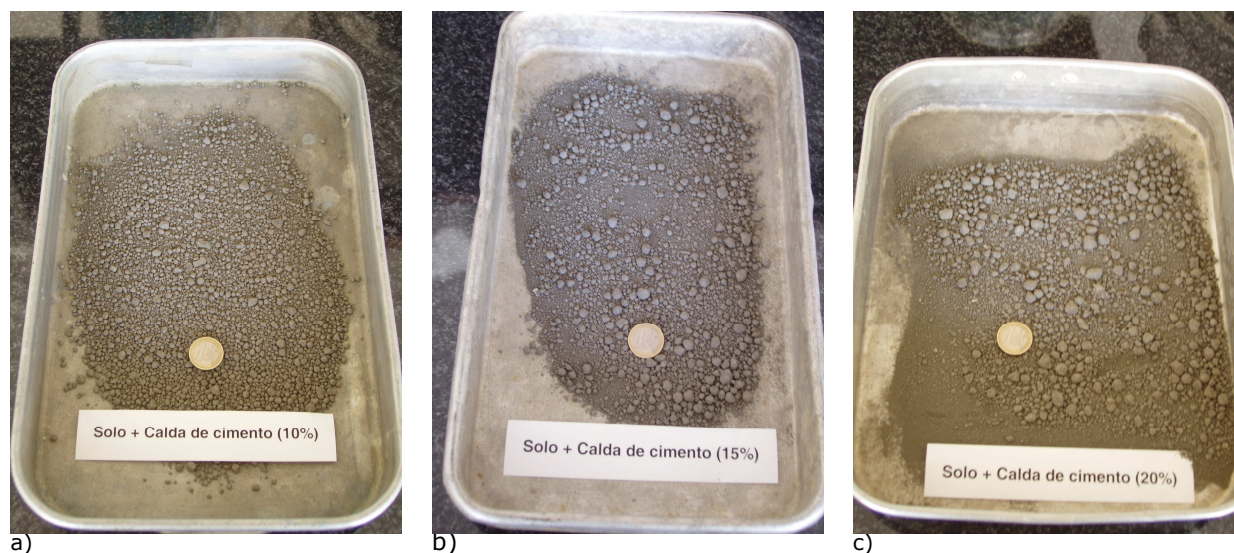


Figura 3 – Resultado das Misturas Solo-Cimento para Diferentes Teores em Cimento Após Secagem (Escala - Moeda de 1€)

Este facto introduziria um erro muito grande, se parte desse material fosse utilizado para a realização dos padrões pretendidos, devido aos efeitos de aglutinação cimento/segregação de partículas de sedimento. Por esse motivo, esta tentativa foi abandonada e teve de ser repensada outra estratégia.

Os padrões usados nesta fase foram única e exclusivamente os padrões NIST, para o modo "Bulk/solos", para as diferentes dosagens de elementos detetados pelo analisador, nas três gamas de valores, baixa (NIST 2709), média (NIST 2710) e alta (NIST 2711) (Figura 4).

### 3.3 - Realização de padrões e ajustamento da abordagem

#### 3.3.1 - Realização de padrões específicos

Uma vez que a quantificação do conteúdo em cimento das amostras a analisar foi idealizada para ser realizada a partir da deteção por FRX da quantidade de Ca presente nas mesmas, foi necessário realizar padrões com teores de cimento definidos, usando o solo a ser estudado, e convertê-los em quantidades de Ca medido. A passagem a fração ponderal de cimento foi efetuada num passo intermédio, antes de se converter em teor de cimento em  $\text{kg/m}^3$ .

Desta forma, foram usadas amostras de lodo, com teor em água natural, às quais foram adicionadas caldas de cimento pozolânico a 5, 10, 15 e 20%, em quantidades controladas. Estas misturas foram reali-

zadas e das mesmas foram recolhidas frações (Figura 5) que foram sujeitas a secagem e ao procedimento do Método EPA 6200, para a constituição de cápsulas padrão (Figura 6).

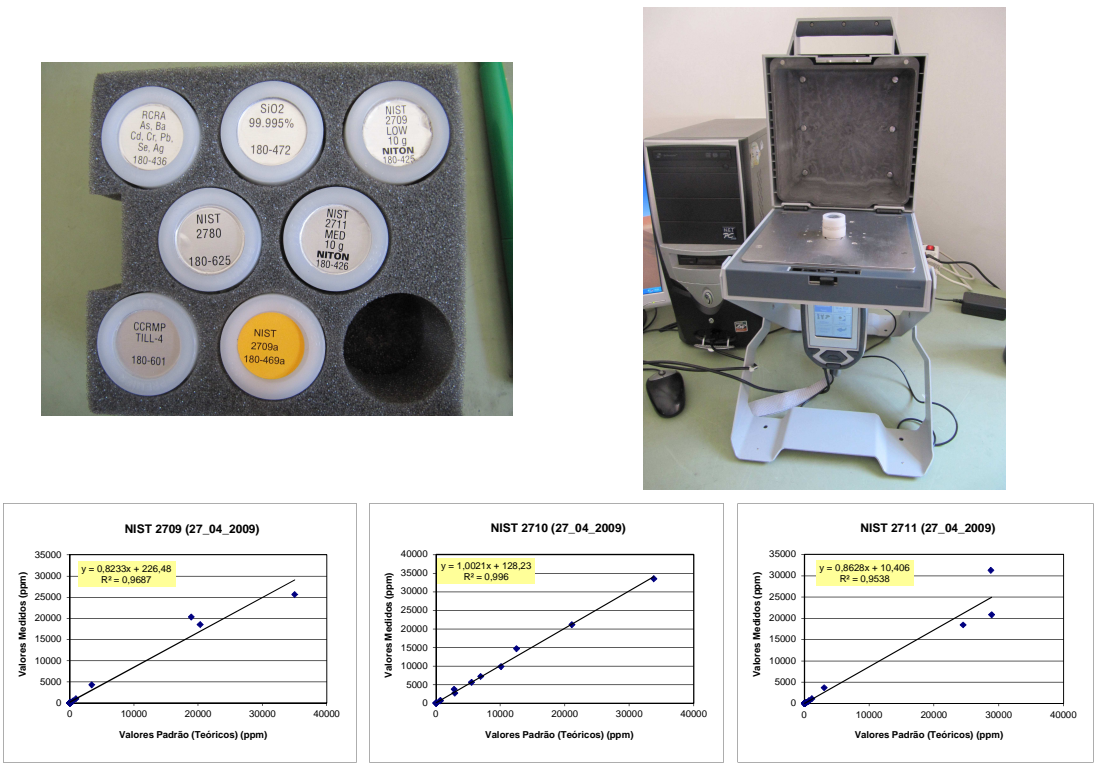


Figura 4 – Padrões NIST para Calibração do Detetor FRX no Modo Bulk/solos; Operação de Colocação de um Padrão para Proceder à Respetiva Leitura e Retas de Calibração para os Padrões

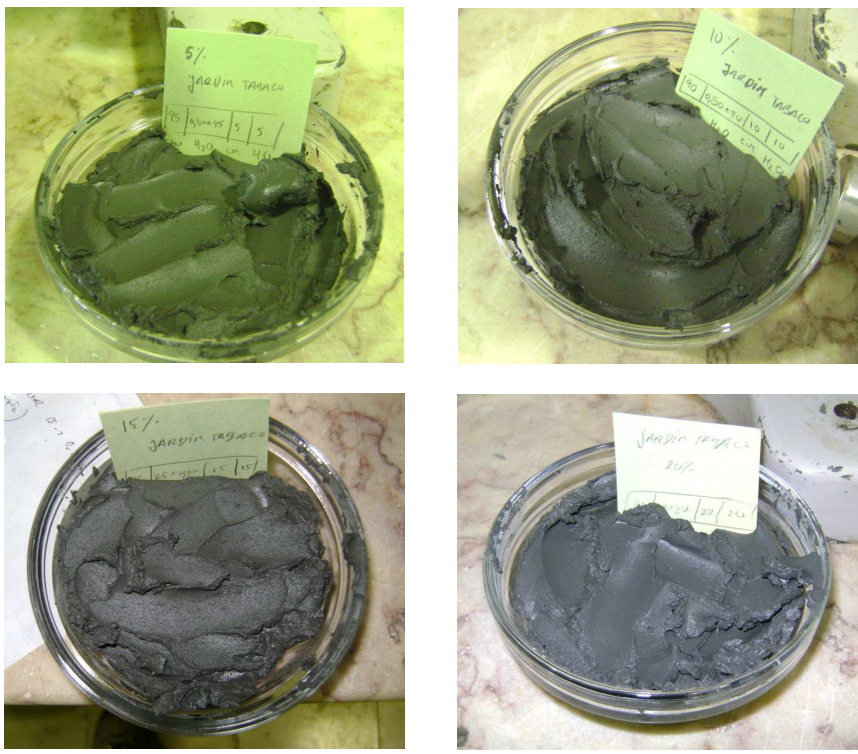


Figura 5 – Misturas Solo-Cimento a 5, 10, 15 e 20% Realizadas para a Constituição de Padrões de Análise por FRX



Figura 6 – Procedimento Utilizado para a Produção dos Padrões a Usar no Estudo. Cápsulas-Padrão a 0, 5, 10, 15 e 20% de Cimento

Neste procedimento, foram ainda realizadas cápsulas para uma amostra de cimento seco (100% cimento) e para uma amostra de solo seco não tratado (0% cimento). Após a análise repetida dos padrões produzidos, da amostra-solo e da amostra-cimento e do respetivo tratamento estatístico foram obtidos os valores médios de modo a estabelecer uma reta de calibração para cada dia de determinação analítica. No Quadro 2 apresentam-se os valores obtidos e utilizados para a elaboração da reta de calibração empregue para as análises realizadas no dia 3 de março de 2009 (Figura 7a)).

Para cada dia de análise de amostras a reta de calibração terá de ser definida a partir das amostras-padrão produzidas, uma vez que as leituras realizadas sofrem interferência de diversos fatores externos, tais como humidade do ar, temperatura, entre outros, que condicionam os valores obtidos. Assim, uma reta de calibração só é válida para esse dia e se ao longo do dia as condições externas envolventes não forem alteradas. Se tal acontecer, ter-se-á que proceder a nova calibração para a determinação do teor cimento (Figura 7b) – calibração para o dia 5 de maio).

Quadro 2 – Resultados das Cápsulas Padrão em Quantidade de Ca, em Percentagem de Ca e em Fração Ponderal de Cimento, numa Primeira Fase de Estabelecimento da Correlação (3 de março de 2009)

Amostra Ref. lab.	Ca (ppm)	Ca (%)	Fração ponderal de cimento (%)
Lodo - teor água natural	<u>26635</u> <u>26365</u> 26038	2,63	0
Lodo - teor água natural- Calda 5%	<u>37784</u> <u>38562</u> 38204	3,82	5
Lodo - teor água natural- Calda 10%	<u>54836</u> <u>52311</u> 56022	5,44	10
Lodo - teor água natural- Calda 15%	<u>61301</u> <u>63099</u> 64982	6,31	15
Lodo - teor água natural- Calda 20%	<u>74296</u> <u>73397</u> 74622	7,41	20

Uma vez que cada cápsula padrão é uma amostra totalmente homogénea, em que a concentração de Ca em qualquer ponto é sempre igual, a conversão de Ca em ppm para Ca em % é direta.

A análise da amostra-cimento serviu de referencial para os cálculos de transformação das frações ponderais de cimento em teores de cimento, tendo existido o cuidado de realizar análises sobre cápsulas de cimento puro seco e de cimento puro hidratado e posteriormente seco. Verificou-se que a diferença verificada nos resultados pode ser desprezável.

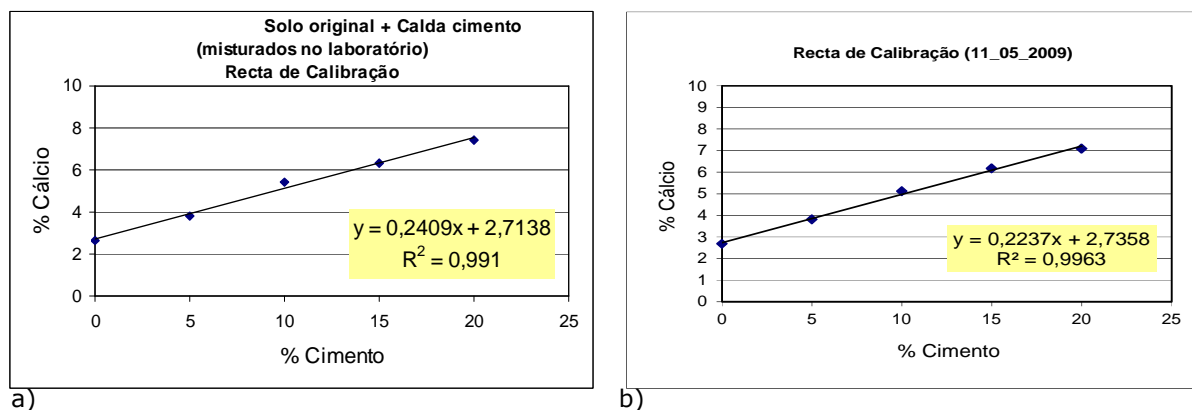


Figura 7 – Retas de Calibração para a Conversão de Percentagem de Ca em Fração Ponderal de Cimento. a) 3 de março de 2009 e b) 11 de maio de 2009

### 3.3.2 - Ajustamento da abordagem – 2.ª Fase

Nesta fase do estudo, foram recolhidas massas frescas, a diferentes profundidades das colunas, durante a construção de diversos protótipos de painéis CSM, realizados nos lodos do Estuário do Tejo, com diferentes teores em cimento nominais (250, 300 e 350 kg/m<sup>3</sup>), que foram colocadas em moldes cúbicos e cilíndricos (Figura 8). As frações ponderais de cimento das amostras foram avaliadas por FRX, em medições de laboratório em amostras pré tratadas e encapsuladas (secas a 40°C em estufa) e em medições diretas no interior dos cubos, cortados ao meio e em oitavos (Figura 9), após vários dias de cura, e secas a 40°C em estufa durante 24 horas. Os teores de água dos cubos C3, C7, C10 e C14, após 16 dias de cura, eram de 80,4%, 65,3%, 86,5% e 80%, respetivamente.

Foram ainda realizadas determinações por FRX em provetes cilíndricos mais secos, mas que foram humedecidos para proceder à operação de corte (teor em água inicial e final não determinado). Os resultados, de algumas das milhares de determinações realizadas por FRX, são apresentados nos Quadros 3, 4 e 5.



Figura 8 – Moldes Cúbicos e Cilíndricos Metálicos de Massas Frescas e Provetes Cúbicos Após 16 Dias de Cura

Quadro 3 – Teor em Cimento (cim.) dos Provetes Cúbicos em Amostras Tratadas/Cápsulas Secas a 40°C

Amostra Cubo	Painel	Profundidade (m)	Teor cim. nominal (kg/m <sup>3</sup> )	Ca (%)	Fração ponderal cim. (%)	Teor de cim. (kg/m <sup>3</sup> )
7	250A	3-4	250	7,5	19,8	191
10	250B	2-3	250	9,8	29,5	229
3	300B	4-5	300	10,4	32,1	268
14	350B	5-6	350	10,2	30,9	248



a)



b)

Figura 9 – Exemplo de Dois Provetes Cúbicos, a) Um com o Teor em Água Após 24 Horas na Estufa a 40°C e b) Outro Seco a 100°C

Quadro 4 – Teor em Cimento (cim.) dos Provetes Cúbicos por Medições Diretas no Centro, Após 23 Dias de Cura e Após Secagem a 40°C Durante 24 Horas

Amostra Cubo	Painel	Profundidade (m)	Teor cim. nominal (kg/m <sup>3</sup> )	Ca (%)	Teor em água (%)	Fração ponderal cim. (%)	Teor de cim. (kg/m <sup>3</sup> )
7	250A	3-4	250			Desfez-se	
10	250B	2-3	250	8,7	59,8	25,0	194
3	300B	4-5	300	9,3	52,3	27,3	224
14	350B	5-6	350	8,9	51,6	25,6	206

Quadro 5 – Teor em Cimento (cim.) dos Provetes Cilíndricos por Medições Diretas no Centro

Amostra Cilindro	Painel	Profundidade (m)	Teor em cim. nominal (kg/m <sup>3</sup> )	Ca (%)	Teor água (%)	Fração ponderal cim. (%)	Teor de cim. (kg/m <sup>3</sup> )
F2	300B	4-5	300	10,6	Nd	33,1	267
4	300B	5-6	300	10,5	Nd	32,3	262
1	350B	5-6	350	8,8	Nd	25,3	207

Nd – não determinado

Da análise dos resultados apresentados nos Quadros 3 a 5 e da experiência em laboratório, foi possível verificar que existem condições que interferem muito nas determinações realizadas. Dos resultados obtidos, verificou-se que os que se aproximaram mais dos teores de cimento previstos foram os relativos às amostras tratadas e com menores teor em água. À medida que as amostras apresentam teores em água mais elevados, maiores são as diferenças observadas, principalmente para teores de cimento superiores, como é o caso dos provetes do painel 350B, com 350 kg/m<sup>3</sup> de teor em cimento nominal, em que o teor em cimento medido chega a ser 41% inferior. Parte desta discrepância estará também relacionada, sem dúvida, com a falta de homogeneidade do painel de onde se recolheram as massas frescas que constituíram os provetes.

Para verificar qual a influência da água nas medições de Ca realizadas anteriormente, optou-se por proceder à secagem a 100°C do material das cápsulas realizadas com material dos cubos 3, 7, 10 e 14, e dos respectivos oitavos de cubos. Os Quadros 6 e 7 apresentam esses resultados.

Quanto às cápsulas, comparativamente com as análises diretas, verifica-se que há melhorias dos resultados obtidos, mas não suficientes. Porém, os resultados poderão estar relacionados com a real falta de homogeneidade dos painéis e não com deficiências no procedimento analítico e neste ponto da investigação não foi possível distingui-los.



Quadro 6 – Teor em Cimento (cim.) das Cápsulas Secas a 100°C

Amostra Cubo	Painel	Profundidade (m)	Teor cim. nominal (kg/m <sup>3</sup> )	Ca (%)	Fração ponderal cim. (%)	Teor de cim. (kg/m <sup>3</sup> )
7	250A	3-4	250	7,6	20,2	195
10	250B	2-3	250	10,5	32,4	251
3	300B	4-5	300	11,2	35,1	288
14	350B	5-6	350	10,2	31,2	252

Quadro 7 – Teor em Cimento (cim.) dos Provetes Cúbicos por Medições Diretas no Centro, Após Secagem a 100°C

Amostra Cubo	Painel	Prof. (m)	Teor cim. nominal (kg/m <sup>3</sup> )	Ca (%)	Teor água (%)	Fração ponderal cim. (%)	Teor de cim. (kg/m <sup>3</sup> )
10	250B	2-3	250	11,6	0	37,0	287
3	300B	4-5	300	11,2	0	35,0	287
14	350B	5-6	350	11,1	0	34,8	280

Confirmou-se que a medição direta por FRX do Ca em provetes de massa fresca depois de totalmente secos (100°C) não resultava plenamente. Após secagem, o material com 80% de teor em água inicial resultava num material vesicular, cheio de vazios que anteriormente estavam preenchidos por água. Essa elevada percentagem de vazios de grandes dimensões interfere nas medições por FRX e devolve resultados de concentração de Ca despropositados, com valores muito díspares. Nos resultados apresentados há, por vezes, uma inversão dos teores detetados e dos valores que deveriam existir.

Uma vez que se certificou que a metodologia estabelecida por FRX apenas funciona com rigor para teores em água até 20-25% e dadas as disparidades de valores verificadas entre os previstos e os medidos, foi necessário enveredar por outra abordagem.

### 3.4 - Abordagem final – 3.ª Fase

#### 3.4.1 - Preparação das misturas solo-cimento – formulação laboratorial de provetes

Devido às dificuldades sentidas durante as 1.ª e 2.ª fases da investigação e pelos resultados obtidos, houve a necessidade de planear uma nova estratégia que permitisse ter menos dúvidas sobre os dados originados. Deste modo, tentou-se excluir as incertezas sobre a má homogeneidade das massas recolhidas e consequentemente sobre a incerteza dos teores de cimento nominais que estavam a ser avaliados.

Nesta fase optou-se pela realização de ensaios laboratoriais sobre amostras de formulação de mistura solo-cimento, com teores de cimento bem controlados, para conhecimento exato das condições das amostras e aferição da metodologia em estudo.

Para tal foram utilizados os lodos do Estuário do Tejo e o cimento utilizado no local da construção dos protótipos para obter uma mistura solo-cimento com fração ponderal de cimento de 35% (para mistura solo-cimento no estado seco). A calda usada apresentava uma relação água:cimento de 0,75.

A mistura solo-cimento formulada seguiu os passos referidos em Mendes (2011), que são esquematizados nas Figuras 10 e 11.

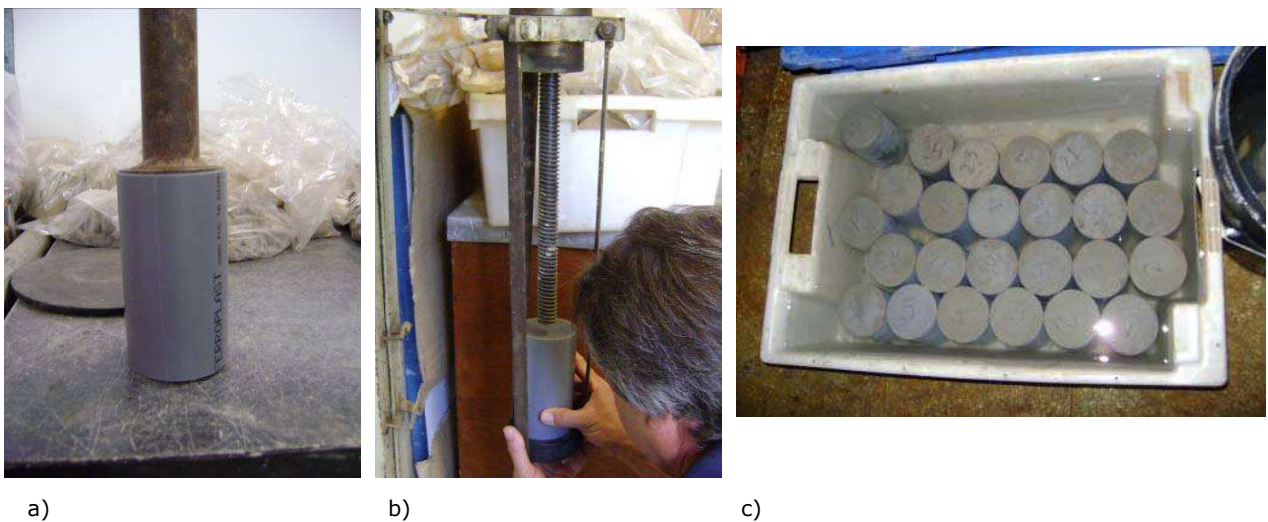
A partir da mistura solo-cimento produzida, realizaram-se 32 provetes, em moldes de PVC e de metal. Os provetes foram desmoldados e acondicionados até aos ensaios.

#### 3.4.2 - Características dos provetes preparados

Antes de se proceder à formulação da mistura solo-cimento foram realizados diversos ensaios de identificação sobre as amostras de material entregue em laboratório (Laboratório de Geomateriais do Departamento de Geotecnia) cujos resultados se apresentam no texto que se segue e em Mendes (2011). Na análise granulométrica efetuada (LNEC E-196 de 1966) verificou-se que o solo apresentava partículas de dimensão inferior a 0,074 mm acima de 88%. A mistura dos sedimentos dos quatro sacos fornecidos apresentou os seguintes valores para os limites de consistência (NP-143 de 1969): LL – 60,8%; LP – 29,5%; IP – 31,3%; IL – 205,6%. O teor em água (w) avaliado foi de 93,9% (NP-84 de 1965) e a atividade determinada foi de 1,17. A densidade das partículas sólidas (NP-83 de 1965) para a mistura dos quatro sacos de solos foi de 2,69. Para o cimento CEM IV/B (V) 32,5N a massa volúmica é de 2,79 g/cm<sup>3</sup>.



a) b) c)  
 Figura 10 – a) Batedeira Felino BT; b) Realização da Calda de Cimento; c) Adição de Lodo com Teor em Água Natural para a Obtenção da Mistura Solo-Cimento



a) b) c)  
 Figura 11 – Provetes Moldados de Solo-Cimento: a) Molde de PVC Onde se Construíam os Provetes por Prensagem com Pilão, b) Manobra de Extração dos Provetes, c) Acondicionamento dos Provetes para Ensaios

No Quadro 8 apresentam-se as características dos provetes preparados com a mistura solo-cimento de formulação laboratorial. A qualidade das amostras foi classificada numa escala de 1 a 5, sendo as amostras de classificação mais alta as de melhor qualidade (Mendes, 2011). Neste quadro apresentam-se também os teores em água (NP-83 de 1965) dos provetes realizados, após 5 dias de cura, antes de serem sujeitos a ensaios destrutivos. Não se determinou o teor em água nos provetes que não foram ensaiados laboratorialmente. Os provetes 27 e 28 foram rejeitados por apresentarem cavidades. Os provetes sujeitos a ensaios triaxiais não foram sujeitos a análises de determinação de Ca por FRX.

Os resultados da determinação da massa volúmica, avaliada no dia em que ocorreram os ensaios de resistência à compressão simples, à compressão diametral e ao corte por compressão triaxial, e da avaliação da massa volúmica seca (secagem a 100°C) dos provetes são apresentados no Quadro 9.

#### 3.4.3 - Procedimento analítico final

Na 3.<sup>a</sup> Fase da abordagem, todas as determinações analíticas da fração ponderal de cimento corresponderam à recolha de 25 a 50 g de material da zona "central" dos provetes produzidos em laboratório (Figura 12). Este material foi sujeito a secagem em estufa a 100°C durante 24 horas.

Na secagem das amostras foi testada a aplicação da norma ASTM D 4643 – 00 (2000), por micro-ondas, não se tendo verificado diferenças nos resultados de Ca obtidos por FRX, no entanto aconselha-se a realização de um estudo mais aprofundado nesta vertente.

Posteriormente, o material foi homogeneizado e esquartelado, tendo sido de seguida passado no peneiro #10 (2 mm) e moído num almofariz com pilão de porcelana (Figura 6), até se obter cerca de 10 g de material passado no peneiro #120 (125 µm).

Quadro 8 – Características dos Provetes de Mistura Solo-Cimento Formulada

Provetes	Massa inicial (g)	Teor água (w %)	Qualidade amostra	Provetes	Massa inicial (g)	Teor água (w %)	Qualidade amostra
1	852,2	71,5	2	17*	858,6	76,4	4
2	833,9	70,9	1	18	852,1	70,6	3
3	842,8	71,2	4	19*	857,1	70,3	5
4**	836,7	--	1	20	856,1	70,4	4
5*	860,8	75,9	5	21	849,9	71,9	4
6	852,4	70,8	3	22**	842,9	--	1
7*	855,6	73,8	5	23	855,6	71,9	3
8*	854,9	72,6	5	24	841,2	71,7	2
9**	834,8	--	1	25	786,7	70,4	5
10	842,6	71,4	1	26	791,1	70,5	4
11**	838,0	--	4	27**	771,3	--	-
12	843,2	73,3	2	28**	778,1	--	-
13	839,1	71,8	1	29	791,6	69,0	2
14	851,7	70,3	5	30*	796,5	74,3	4
15**	834,2	--	1	31	796,2	71,4	4
16**	828,4	--	3	32	899,3	72,6	-

\*Provetes sujeitos a ensaios triaxiais

\*\*Provetes não ensaiados – rejeitados

Quadro 9 – Características dos Provetes – Massas Volúmicas

Provetes	Tempo cura (dias)	Massa vol. (kg/m <sup>3</sup> )	Massa vol. <sub>d</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Provetes	Tempo cura (dias)	Massa vol. (kg/m <sup>3</sup> )	Massa vol. <sub>d</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
1	58	1526	890	17*	92	1528	866
2	59	1498	877	18	28	1525	894
3	28	1557	909	19*	93	1540	904
4**	--	--	--	20	15	1518	891
5*	92	1547	880	21	15	1610	879
6	16	1520	890	22**	--	--	--
7*	31	1515	874	23	28	1525	887
8*	32	1516	875	24	56	1512	881
9**	--	--	--	25	16	1504	883
10	28	1516	885	26	30	1511	886
11**	--	--	--	27**	--	--	--
12	91	1511	872	28**	--	--	--
13	28	1515	881	29	16	1506	891
14	56	1530	898	30*	31	1510	866
15**	--	--	--	31	93	1519	886
16**	--	--	--	32	100	1501	870

\*Provetes sujeitos a ensaios triaxiais

\*\*Provetes não ensaiados – rejeitados



Figura 12 – Provede Cilíndrico e seus Fragmentos Após Secagem em Estufa para as Elaboraões de Cápsulas para Análise

Com os 10 g de material obtido foram montadas três cápsulas por cada amostra (Figura 13), todas elas etiquetadas com a referência da amostra, as quais foram sujeitas a ensaios de FRX.

Os resultados dos ensaios FRX são apresentados no Quadro 10, relativamente à fração ponderal de Ca em ppm, à fração ponderal de cimento e ao teor em cimento.



Figura 13 – Exemplo de Três Conjuntos de Cápsulas de Três Provetes Diferentes

Quadro 10 – Fração Ponderal de Cimento e Teor de Cimento Determinados por FRX nos Provetes

Provetes.	Tempo cura (dias)	Massa Volúmica Seca (kg/m <sup>3</sup> )	Fração ponderal de Ca (ppm)	Fração ponderal de cimento (%)	Teor em cimento (kg/m <sup>3</sup> )
1	59	890	113271	34,7	309
2	58	877	113440	34,7	305
3	28	909	108680	34,5	314
4**	--	--	--	--	--
5*	92	880	--	--	--
6	16	890	111133	35,4	315
7*	31	874	--	--	--
8*	32	875	--	--	--
9**	--	--	--	--	--
10	28	885	111847	35,9	317
11**	--	--	--	--	--
12	91	872	114595	35,8	312
13	28	881	111147	35,6	314
14	56	898	111290	35,7	321
15**	--	--	--	--	--
16**	--	--	--	--	--
17*	92	866	--	--	--
18	28	894	111366	35,7	319
19*	93	904	--	--	--
20	15	891	110981	35,3	314
21	15	879	111278	35,4	311
22**	--	--	--	--	--
23	28	887	109693	35,0	310
24	56	881	112728	36,3	319
25	16	883	111076	35,3	312
26	30	886	110722	35,4	314
27**	--	--	--	--	--
28**	--	--	--	--	--
29	16	891	112590	36,0	320
30*	31	870	--	--	--
31	93	886	112028	34,8	308
32	100	870	114410	35,0	304

\*Provetes sujeitos a ensaios triaxiais

\*\*Provetes não ensaiados – rejeitados

Conforme se pode verificar pelos resultados da fração ponderal de cimento obtidos, os valores são muito próximos de 35%, com um valor mínimo de 34,5% e um valor máximo de 36,3%. O valor médio obtido foi de 35,4%, para as 18 leituras, e com um desvio padrão de 0,5 % e um coeficiente de variação de 1,42%.

#### **4 - VALIDAÇÃO INTERLABORATORIAL**

Tendo por objetivo a validação da metodologia estabelecida, foram realizados ensaios interlaboratoriais de intercomparação no laboratório de geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). Com este procedimento pretendia-se verificar a credibilidade do método estabelecido e a sua qualidade analítica - reprodutividade (precisão) e exatidão. Contudo, a opção tomada na altura não foi a mais adequada em termos de comparabilidade.

Por este motivo, este será o único passo a completar, de acordo com Canto Machado et al. (1997), para que a metodologia seja dada por completamente comprovada em termos de precisão e de exatidão.

Em contrapartida, usou-se um outro aparelho FRX – Analisador Niton Série XLi 700, noutra laboratório e os resultados obtidos foram equivalentes.

#### **5 - CONCLUSÕES**

Esta metodologia foi pensada inicialmente para ser utilizada diretamente em obra. Contudo, à medida que a mesma foi sendo estabelecida foram surgindo dificuldades que obrigaram a repensar a estratégia planeada. Desta forma, foi abandonada a pretensão inicial de utilização direta em obra para elaborar um método sustentado e que poderá ser refinado, para vir a aproximar-se o mais possível das condições de aplicação no local de uma obra.

Depois de um processo iterativo de tentativa e erro foi estabelecida a metodologia final, cujos resultados de reprodutibilidade deram muito satisfatórios e constituindo por isso uma metodologia de determinação da fração ponderal de cimento e de teor de cimento com muitas potencialidades e de grande gama de aplicações. O detalhe da apresentação deste artigo pretende mostrar como pormenores, por vezes não valorizados, podem fazer toda a diferença nos resultados e nas conclusões obtidas.

Dada a sua importância ao nível das grandes obras, para além da aplicação em melhoramento de solos por DM, esta metodologia pode ser agilizada e simplificada de forma a ser utilizada num laboratório de obra, possibilitando respostas muito rápidas da qualidade dos tratamentos em face ao desenvolvimento de uma dada obra que inclua misturas solo-cimento, outros tipos de tratamento de fundações com cimento ou mesmo cal, em paredes moldadas, etc.

A metodologia de determinação do teor de cimento mostrou-se também aplicável em obras costeiras sem problemas na presença de cloretos. Por outro lado, a sua aplicação em áreas contaminadas é já por si uma prática adaptada deste tipo de abordagem.

Por último, pode acrescentar-se que os resultados apresentados neste trabalho científico são muito satisfatórios e a aplicação da metodologia estabelecida apresenta um grande grau de confiança, com custos relativamente reduzidos.

#### **REFERÊNCIAS**

- ASTM D 4643-00 (2000) – Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Heating.
- Canto Machado, M. J., Moreira, M. E., Afonso, M. R. (1997) – Ensaios Interlaboratoriais – Forma Privilegiada de avliar a exactidão de uma metodologia. Ensaios, Notas e Trabalhos, Instituto Geológico e Mineiro, tomo 39, pp. 157-163.
- EN 14679:2005 (2005) – Execution of Special Geotechnical Works - Deep Mixing. European Standard by the European Committee for Standardization, Brussels.
- EPA (1998) – Field Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry for the Determination of Elemental Concentration in Soil and Sediment, Method 6200. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Jorge, C., Sousa, F., Mendes, B. (2009) – Validação de um Método para a Determinação do Teor em Cimento de Misturas Solo-Cimento. LNEC, Relatório 287 – NGEA (in press – documento não publicado).
- LNEC E-196 (1966) – Especificação LNEC – Solos – Análise Granulométrica. MOP, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- Mendes, B. F. (2011) – Melhoramento de Terrenos de Fundação Através de “Cutter Soil Mixing”. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Estruturas e Geotecnia. Trabalho de investigação desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil no âmbito do protocolo entre a FCT/UNL e o LNEC.
- NP 83 (1965) – Norma Portuguesa – Solos – Determinação da Densidade das Partículas.
- NP 84 (1965) – Norma Portuguesa – Solos – Determinação do Teor em Água.

NP 143 (1969) – Norma Portuguesa – Solos – Determinação dos Limites de Consistência.

NP EN 206-1 (2007) – Norma Portuguesa – Betão – Parte 1: Especificações, Desempenho, Produção e Conformidade.

Rutherford, C., Biscontin, G. e Briaud, J.L. (2005) – Design Manual for Excavation Support Using Deep Mixing Technology. Texas A&M University, March.