

Propagação de ondas de ultrassom na avaliação de tratamento de solos moles através da técnica *cement soil mixing* realizada em laboratório

Ultrasonic wave propagation in the evaluation of the treatment of soft soils through the technique cement soil mixing

Propagación de ondas ultrasónicas en la evaluación del tratamiento de suelos blandos por medio de la técnica cement soil mixing realizada en el laboratorio

Propagation des ondes ultrasonores dans l'évaluation du traitement des sols meubles par la technique de cement soil mixing réalisée en laboratoire

Rodrigo Rogério Cerqueira da Silva 
rodrigorogério@uni9.pro.br
Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Bruno Pereira Casanova 
brunopcasanova@geogrout.com.br
Geogrout Engenharia

Resumo

A técnica de tratamento solos por “*cement soil mixing*” tem sido utilizada na melhoria de capacidade de carga em solos moles, porém existe dificuldade no acompanhamento da qualidade dos traços utilizados, após a realização do tratamento, devido à necessidade de recorrer a ensaios destrutivos em áreas de difícil acesso. Técnicas não destrutivas baseadas em propagação de ondas vêm sendo cada vez mais utilizadas para avaliação de sistemas construtivos e de controle tecnológico de materiais. O presente trabalho visa contribuir com a técnica de tratamento de solos moles, analisando correlações entre parâmetros mecânicos com ensaios de ultrassom. Após a coleta de amostras no litoral norte de São Paulo, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização. Em seguida, foram preparadas misturas plásticas através da adição de cimento CII na proporção de 300 kg/m³, além da variação do fator água-cimento na mistura (0,5; 0,7; 0,9 e 1,0). Através dos resultados das amostras ensaiadas de compressão não confinada, módulo de deformabilidade, velocidade de propagação das ondas e coeficiente de rigidez, as análises de regressão verificaram a existência de modelos estatisticamente significativos, podendo ser utilizados, posteriormente, na inferência da qualidade de técnicas para tratamento de solos moles com uso de ultrassom.

Palavras-chave: Ensaio de ultrassom. Tratamento de solos moles. Caracterização mecânica. Cement soil mixing.

Abstract

The technique of treatment of soils by «*cement soil mixing*» has been used to improve the loading capacity of soft soils, but it is difficult to follow the quality of the traces used after the treatment, due to the need to resort to destructive tests in difficult areas access. Non-destructive techniques based on wave propagation have been increasingly used for the evaluation of constructive systems and the technological control of materials. The present work aims to contribute to the technique of soft soil treatment, analyzing correlations between mechanical parameters and ultrasonic tests. After sample collection in the north coast of São Paulo, laboratory characterization tests were carried out, followed by preparation of plastic mixtures by the addition of CII cement in the proportion of 300 kg / m³, besides the variation of the water-cement factor in the mixture (0,5; 0,7; 0,9 and 1,0). Through the results of the tested samples, unconfined compression, modulus of deformability, wave propagation velocities and

stiffness coefficient, the regression analyzes verified the existence of statistically significant models, and can be used later in the inference of the quality of techniques for treatment of soft soles using ultrasound.

Keywords: Ultrasound test. Soft soil treatment. Mechanical characterization. Cement soil mixing.

Resumen

La técnica de tratamiento de suelos por «*cement soil mixing*» está siendo utilizada en la mejoría de la capacidad de carga en suelos blandos, sin embargo existe dificultad en el seguimiento de la calidad de los rasgos utilizados después del tratamiento, debido a la necesidad de recurrir a ensayos destructivos en áreas de acceso difícil. Técnicas no destructivas basadas en propagación de ondas están siendo cada día más utilizadas para evaluación de sistemas constructivos y control tecnológico de materiales. Este trabajo objetiva contribuir con la técnica de tratamiento de suelos blandos, analizando correlaciones entre parámetros mecánicos con ensayos de ultrasonido. Después de coleccionar muestras en la cuesta norte de São Paulo, fueron realizados ensayos de laboratorio de caracterización, en seguida preparadas mezclas plásticas por medio de la adición de cemento CII en la proporción de 300 kg/m³, además de la variación del factor agua-cemento en la mezcla (0,5; 0,7; 0,9 e 1,0). Por medio de los resultados de las muestras ensayadas la compresión no confinada, módulo de deformabilidad, velocidades de propagación de ondas y coeficiente de rigidez, los análisis de regresiones verificaron la existencia de modelos estadísticamente significativos, pudiendo ser utilizadas posteriormente en la inferencia de la calidad de técnicas para tratamiento de suelos blandos con el uso de ultrasonido.

Palabras-clave: Ensayo de ultrasonido. Tratamiento de suelos blandos. Caracterización mecánica. Deep soil mixing.

Résumé

La technique de traitement des sols par «*mélange du sol en ciment*» a été utilisée pour améliorer la capacité de charge des sols meubles, toutefois il y a une difficulté en concernant le contrôle de la qualité des traces utilisées après le traitement, parce qu'il faut recourir à des contrôles non destructives dans des zones où l'accès est difficile. Les contrôles non destructives assises sur la propagation des ondes sont de plus en plus utilisées pour évaluer des systèmes constructifs et aussi le contrôle technologique des matériaux. Le présent article vise à contribuer à la technique de traitement des sols meubles en analysant les corrélations entre les paramètres mécaniques et les contrôles par ultrasons. Après la collecte des échantillons sur la côte nord de São Paulo, des contrôles de caractérisation en laboratoire ont été effectués, ensuite on a préparé des mélanges plastiques en ajoutant du béton CII dans une proportion de 300 kg / m³, au-delà de la variation du facteur eau-béton dans le mélange (0,5; 0,7; 0,9 et 1,0). Les résultats des échantillons testés, de la compression non confinée, du module de déformabilité, de la vitesse de propagation de la vague et du coefficient de rigidité et des analyses de régression ont vérifié l'existence de modèles statistiquement significatifs. Cela veut dire qu'ils peuvent être utilisées ultérieurement dans la déduction de la qualité des techniques de traitement de sols meubles par ultrasons.

Mots-clés: Contrôle par ultrasons. Traitement des sols meubles. Caractérisation mécanique. Deep soil mixing.

1 Introdução

As técnicas de melhoramento de solos permitem a implantação de infraestrutura local, através de seus parâmetros naturais, controlando seu estado, natureza e comportamento mecânico, sobretudo priorizando adequadas condições de segurança. Estas apresentam ótimo custo/benefício em relação à terraplenagem, que envolve remoção, bota fora e área de empréstimo, além de vasto domínio de aplicações para problemas

geotécnicos, como redução de recalques, aumento de resistência, controle de permeabilidade e estabilidade do maciço.

Entre as técnicas de melhoramento de solo, destaca-se o *cement soil mixing*, que consiste em misturar o solo *in situ* com agentes estabilizadores, sendo mais usado na aplicação dessa técnica o cimento *Portland*, adicionados isoladamente ou misturados com outros ligantes (PORBAHA, 2002; KITAZUME e TERASHI, 2002; EDIL e STAA, 2005; CORREIA, 2011). Para a eficácia do tratamento, de acordo com Topolnicki (2004), a resistência ao cisalhamento não drenado (S_u) do solo coesivo deve ser abaixo de 40 kPa, e o teor de umidade do solo deve ser aproximado ou igual ao limite de liquidez da amostra de solo mole natural.

O ganho de resistência do solo tratado com adições de cimento está relacionado com a reação química entre o solo e o agente estabilizador. Estudos realizados por Terashi (1997) e Vendruscolo (1996) demonstram que os principais fatores que influenciam no ganho de resistência estão relacionados às características do agente estabilizante, condições do solo, tipo de mistura e condições de cura das amostras.

Segundo Enamorado (1990), durante a hidratação do cimento em solos coesivos, desenvolve-se fortes pontes entre partículas do solo, impossibilitando seu deslizamento, de modo que o cimento contribui para diminuir a plasticidade, como ainda produz um incremento na resistência ao cisalhamento. Terashi et al. (1980) e Kawasaki et al. (1981) verificaram que uma dosagem mínima de 5% de cimento em solo orgânico, independente do tempo de cura, é o suficiente para contribuir com o ganho de resistência do solo. Uma das maiores dificuldades no tratamento de solo está relacionada à quantidade de água da mistura. Åhnberg (2006), Lorenzo e Bergado (2006) avaliaram um acréscimo da permeabilidade através do aumento do teor de água, ao qual corresponde necessariamente um maior volume de vazios, acarretando maiores permeabilidades.

Um dos grandes desafios para as técnicas que envolvem misturas de solo-cimento é com relação ao controle de qualidade e de sua garantia após o tratamento realizado *in loco*. A homogeneidade da mistura, o tempo de cura e o ganho de resistência do solo consistem em parâmetros de difícil avaliação, gerando dúvidas quando comparados aos valores determinados no projetado, que geralmente são obtidos em laboratório. Rathmayer (1996) e Porbaha (2002) relataram que os resultados de resistência obtidos em campo representam de 20% a 80% dos resultados determinados em laboratório, sendo que o procedimento de mistura do solo com o cimento, a composição do solo e as condições ambientais são os responsáveis pelas alterações de valores encontradas *in loco* e em laboratório.

Geralmente, os controles tecnológicos adotam metodologias de ensaio destrutivas, que podem dificultar e/ou comprometer a análise devido à larga escala de produção que as técnicas proporcionam, necessitando haver uma ferramenta adequada de inspeção da qualidade durante a execução do tratamento de solo. Uma das razões para a falta de controle tecnológico na geotecnia está relacionada à necessidade de recorrer à estrutura laboratorial de ensaios destrutivos, nem sempre próximos aos locais das obras e com custos elevados. A técnica de avaliação das estruturas por meio da utilização de ensaios não destrutivos vem crescendo continuamente em todo o mundo, abrangendo vários ensaios. Dentre os ensaios que se destacam pela praticidade, portabilidade e facilidade no manuseio, está o ultrassom, cuja técnica e princípio de utilização são simples, sendo utilizado para avaliação de sistemas construtivos e controle tecnológico de materiais através da inferência de propriedades mecânicas, ganhando novos adeptos e maior confiabilidade junto a cadeia produtiva da geotecnia para controle de parâmetros dos solos (YESILLER et al., 2001; WANG et al., 2006; DIAS, 2012; LIANG, 2013).

No entanto é necessário adequar o ensaio à situação específica ("*in loco*") e às características do solo para obter parâmetros e metodologia que permitam confiabilidade em sua aplicação. Assim, o presente trabalho visa contribuir com a técnica de tratamento de solos moles, analisando correlações entre parâmetros mecânicos com ensaios de ultrassom, avaliando os resultados das amostradas ensaiadas de compressão não confinada, módulo de deformabilidade, velocidades de propagação de ondas e coeficiente de rigidez. Através de análise de regressão foi verificada a existência de modelos estatisticamente significativos, podendo ser utilizadas posteriormente na inferência da qualidade de técnicas para tratamento de solos moles com o uso

de ultrassom, permitindo tomar de forma mais expedita decisão para verificação da qualidade dos parâmetros encontrados *in loco* após a realização do tratamento.

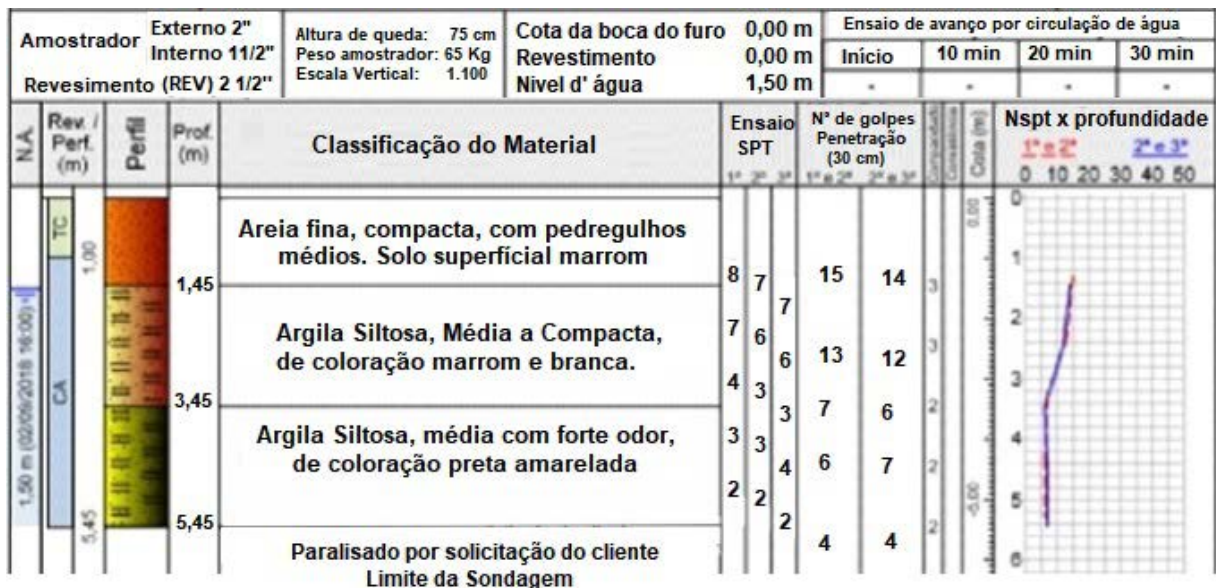
2 Metodologia

O programa experimental para avaliação do desempenho da mudança de parâmetros mecânicos de solos moles após tratado com cimentos Portland compreendeu: investigação geotécnica, coleta de amostras de solos, caracterização das amostras, preparo das amostras das misturas de solo/cimento, e ensaios destrutivos e não destrutivos.

2.1 Características geotécnicas da área de estudo

O processo de coleta das amostras deformadas de solo foi realizado no município de São Sebastião, próximo à praia de Camburi, região Sudeste do país, distando cerca de 200 km da cidade de São Paulo. Através de sondagem a trado (NBR 9603,1986), realizada até a profundidade de 5 m, as amostras foram sendo retiradas a cada metro, acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em caixas térmicas, a fim de preservar as características *in loco*. Próximo ao local de coleta das amostras foi realizado uma investigação geotécnica do tipo SPT (NBR 6484, 2001) de até 5,45 m, apresentando dois tipos de camada (Figura 1).

Figura 1 - Caracterização geotécnica sondagem SPT do local de retirada das amostras.



Fonte: Autores (2019).

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas as amostras recolhidas entre 4 e 5 m, seguindo o critério de solo mole SPT<4 de acordo com (NBR 6484, 2001). Os parâmetros geotécnicos, como determinação do teor de umidade natural (NBR 6457, 1986), densidade real dos grãos (NBR 6508, 1984), limite de liquidez (NBR 6459, 1984), limite de plasticidade (NBR 7180, 1984) e análise granulométrica do solo (NBR 7181, 1984) com uso de defloculante na fase de sedimentação, foram obtidos através dos ensaios laboratoriais.

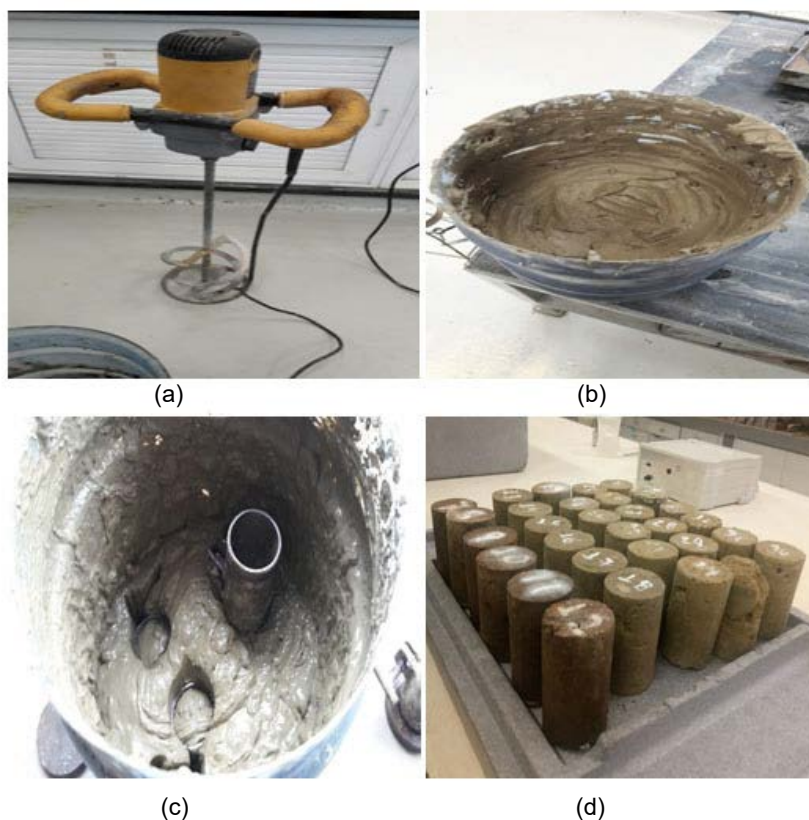
2.2 Mistura solo-cimento e moldagem dos corpos de prova

Na presente pesquisa, o cimento utilizado como ligante de referência para as amostras de solo foi o cimento Portland (CP II-E32), na proporção de 300 kg/m³. Segundo Axelsson et al. (2002), essa proporção de cimento, associado à adição de escória, apresenta melhor resistência tanto mecânica quanto ao ataque

dos sulfatos contidos nos solos moles. Para obter uma mistura próxima à adquirida *in loco* foi utilizado como base o método da técnica *cement soil mixing*, com uso de misturador manual (Figura 2a).

Foram confeccionadas corpos de prova de solo para verificar a eficiência da técnica antes e após o tratamento com cimento. Visando a produção *in loco* com tratamento de qualidade superior e inferior, foram moldados 6 corpos de prova de 50x100 mm, misturados durante 5 minutos até que apresentasse visualmente homogênea (Figura 2b). Os traços utilizados foram solo+pó de cimento e solo+caldá de cimento, com fator água/cimento de 0,5; 0,7; 0,9 e 1. Depois de efetuada a mistura, as amostras foram moldadas na própria vasilha (Figura 2c) a fim de simular a extração da mistura realizada *in loco*. Após a execução do processo de mistura por *deep soil mixing*, as amostras foram armazenadas em câmara úmida por 28 dias, a 23°C, totalizando 36 amostras para análise dos ensaios destrutivos e não destrutivos (Figura 2d).

Figura 2 - (a) Misturador manual, (b) Amostra homogênea com solo e cimento, (c) Moldagem dos corpos de prova, (d) Amostras com fator a/c 0,5; 0,7; 0,9 e 1.



Fonte: Autores (2019).

2.3 Ensaios não destrutivos e destrutivos

Após o período de cura, as amostras foram submetidas ao ensaio de propagação de ondas utilizando equipamento de ultrassom (USLAB, Agricef, Brasil) e transdutores longitudinais de faces planas e frequências de 45 e 80 kHz (Figura 3a). Antes da realização dos ensaios, o equipamento foi calibrado utilizando-se um material acrílico cuja velocidade é conhecida. A calibração deve ser analisada como um dos procedimentos fundamentais para obtenção dos dados com maiores precisão, isto é, o perfeito ajuste de todos os controles do aparelho de ultrassom para uma inspeção específica e eficaz. O ensaio direto foi realizado posicionando os transdutores em faces opostas do corpo de prova (Figura 3b), conforme proposto pela norma brasileira (NBR

8802, 2013). Durante os ensaios, utilizou-se como acoplante um gel medicinal nas faces dos transdutores, para garantir a perfeita propagação do som através do corpo de prova e evitar perdas de sinais por impedância entre os transdutores e os corpos de prova.

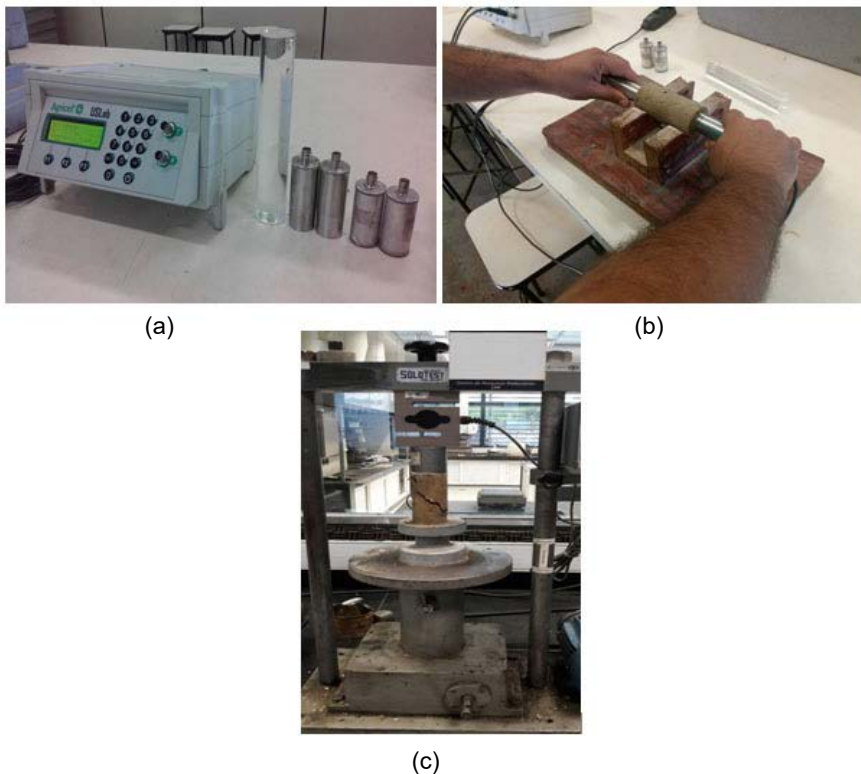
A partir do comprimento do corpo de prova (L) e do resultado do tempo de propagação das ondas (T), calculou-se a velocidade de propagação das ondas de ultrassom (V), conforme Equação 1 (NBR 8802, 2013).

$$V = L/T \quad \text{Equação 1}$$

$$C = \rho \cdot V^2 \quad \text{Equação 2}$$

De posse da velocidade (V) e da densidade do corpo de prova (ρ), calculou-se o coeficiente de rigidez (C), conforme Equação 2. Após a realização dos ensaios de ultrassom, os corpos de provas foram submetidos a ensaios de resistência à compressão não confinada (NBR 12770, 1992), conforme Figura 3 (c), e através dos gráficos (tensão x deformação) gerados pelos ensaios foram determinados os valores do módulo de elasticidade do solo.

Figura 3 - (a) Aparelho de ultrassom, acrílico de calibração, transdutores 45 e 80 kHz; (b) Ensaio direto em corpos de prova – NBR 8802, 2013; (c) Ensaio de resistência à compressão não confinada.



3 Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros geotécnicos obtidos por meio dos ensaios laboratoriais utilizando-se amostras deformadas coletadas a trado na área de estudo junto ao local mais crítico, de resistência N_{spt} igual a 4 (Figura 1).

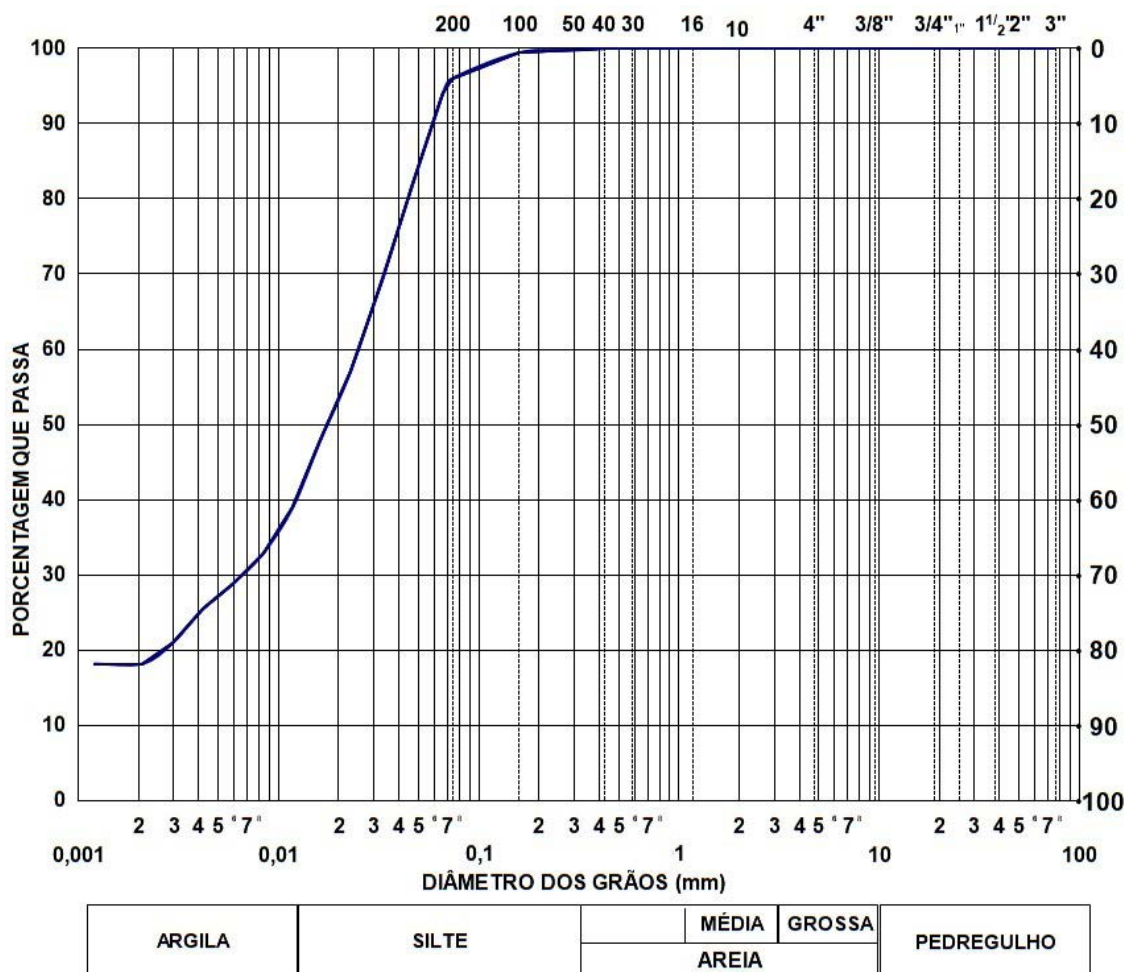
Tabela 1 - Características geotécnicas das amostras ensaiadas.

Prof. (m)	LL (%)	LP (%)	SR (%)	w (%)	e	n (%)	γ_s (Kn/m ³)	γ_{nat} (Kn/m ³)
4-5	50,7	41,2	71,3	83,8	1,67	75	25,6	12,84

Onde: (LL) limite de liquidez, (LP) limite de plasticidade, (SR) grau de saturação, (w) teor de umidade, (e) índice de vazios; (n) porosidade, (γ_s) peso específico das partículas sólidas, (γ_{nat}) peso natural.

Durante a realização da sondagem tipo SPT, a análise táctil e visual indica presença de argila-siltosa para a camada em estudo, porém a coloração escura e o alto índice de liquidez e a elevada dosagem de umidade contribuem para a dificuldade em classificar o material. Através do ensaio de granulometria (NBR 7181, 1984) com sedimentação, a curva granulométrica (Figura 4) indica que a característica da amostra coletada possui 65% de silte e 35% de argila, classificando a amostra como silte-argiloso e demonstrando a importância do ensaio de granulometria no apontamento da descrição errada realizada *in loco*.

Figura 4 - Curva granulométrica da amostra coletada para mistura com cimento.



Fonte: Autores (2019).

Conforme apresentado na Tabela 2, os parâmetros obtidos entre ensaios destrutivos e não destrutivos para as misturas apresentaram diferença em relação amostra inicial independente da relação a/c utilizada.

Tabela 2 - Valores das médias (primeira linha) de resistência à compressão não confinada (f_c), velocidade de propagação de onda (V); coeficiente de rigidez (C); módulo de elasticidade (E); densidade das amostras (ρ), segunda linha desvio padrão, terceira linha coeficiente e variação.

Tratamento	f_c	V (m/s)	V (m/s)	C (GPa)	C (GPa)	E	ρ
	(Mpa)	45 kHz	80 kHz	45 kHz	80 kHz	(Mpa)	(kg/m ³)
Solo	1,31	964	878	1,06	0,88	149	1137
	(0,08)	(24,59)	(44,48)	(0,06)	(0,10)	(14,58)	(43,46)
	(6,35)	(2,55)	(5,57)	(5,86)	(10,83)	(9,75)	(4,17)
Solo + cimento	2,24	1468	1474	3,27	3,30	271	1513
	(0,17)	(101,23)	(101,92)	(0,46)	(0,47)	(30,03)	(7,05)
	(7,66)	(6,90)	(6,91)	(14,19)	(14,14)	(11,08)	(0,47)
Solo + a/c = 0,5	3,92	1789	1818	5,03	5,20	458	1572
	(0,27)	(60,60)	(39,56)	(0,32)	(0,21)	(46,71)	(14,25)
	(6,82)	(3,39)	(2,18)	(6,38)	(4,08)	(10,20)	(0,91)
Solo + a/c = 0,7	1,28	1512	1523	3,56	3,61	144	1549
	(0,2)	(115,28)	(93,46)	(0,55)	(0,46)	(39,50)	(18,32)
	(17,61)	(7,62)	(6,14)	(15,41)	(12,69)	(27,27)	(1,18)
Solo + a/c = 0,9	1,21	1212	1220	2,21	2,25	138	1488
	(0,07)	(108,72)	(123,97)	(0,47)	(0,52)	(12,44)	(94,07)
	(5,87)	(8,97)	(10,16)	(21,18)	(23,29)	(9,01)	(6,32)
Solo + a/c = 1	1,18	1210	1219	2,20	2,23	134	1459
	(0,05)	(224,29)	(238,49)	(0,77)	(0,83)	(9,13)	(29,67)
	(4,42)	(18,51)	(19,53)	(34,88)	(36,89)	(6,78)	(2,03)

De acordo com Correa (2011), a estabilização de um solo desencadeia reações químicas, nas quais existe consumo de água, assim o material estabilizado é caracterizado por obter menor teor em água em relação ao solo natural não estabilizado. A partir da Tabela 2, o comportamento de melhoria do solo, em relação à amostra natural, para a mistura solo+cimento, indica aumento nos parâmetros de resistência à compressão na ordem de 70%, e, para a mistura a/c = 0,5, aumento de 200%. Para as misturas com fator a/c (0,7; 0,9 e 1) em relação à amostra natural, ocorreu redução dos parâmetros mecânicos em torno de 7 a 10%. O comportamento mecânico está relacionado às alterações estruturais do solo decorrentes da estabilização. Assim, o fator a/c = 0,5 proporciona menor índice de vazios e ligações cimentícias entre as partículas sólidas, responsáveis pela construção de um solo com esqueleto rígido e resistente.

O aumento da velocidade de ultrassom para solo+cimento foi de 50 a 67% e fator a/c=0,5, de 85 a 107%, para ambas frequências de 45 e 80 KHz. A variação na frequência dos transdutores durante o ensaio de ultrassom foi para verificar melhor as descontinuidades dentro dos corpos de prova. O aumento da frequência produz maior número de ondas dentro das amostras, de modo que a varredura de anomalias será mais eficaz. Diferente dos ensaios destrutivos, as misturas com fator a/c= 0,7; 0,9 e 1, obtiveram aumento na velocidade de propagação das ondas em torno de 25 a 56% para ambas as frequências em relação ao solo natural. O aumento do teor de umidade interno das amostras contribui para o aumento da propagação de ondas. O volume de vazios do solo reduz-se devido ao fato de parte do volume de água se encontrar agora preenchido pelos produtos resultantes das reações químicas (HORPIBULSUK, MIURA, 2001; ÅHNBERG, 2006; HERNADEZ-MARTINEZ, 2006; LORENZO, BERGADO, 2006).

Apesar das amostras de solo serem misturadas com características distintas de aglomerante, utilizou-se *software* estatístico (*Statgraphics Centurion*) para avaliar testes de intervalos múltiplos entre os resultados das amostras com relação a/c (0,5; 0,7; 0,9 e 1), verificando se existe diferença significativa para P-valor

menor que 0,05. Os valores encontrados entre os parâmetros obtidos por métodos destrutivos, como f_c e E , e não destrutivos, como V e C , apresentaram análise de variância pelo método ANOVA com P-valor (0,00), conforme Tabela 3, menor que 0,05. Isto demonstra que existe uma relação estatisticamente significativa entre os dois tipos de ensaios, apresentando modelos do tipo linear, que permitem a confiabilidade na avaliação dos parâmetros f_c e E para misturas de solo com calda de cimento tipo CII, *in loco*, na proporção de 300 kg/m³ para SPT<4 golpes.

Tabela 3 - Modelos de correlação entre parâmetros velocidade (V) e coeficiente de rigidez (C), obtidos por ultrassom, e módulo de elasticidade (E) e resistência à compressão não confinada (f_c) obtidos em ensaio de compressão estática, para misturas com calda de cimento fator a/c 0,5; 0,7; 0,9 e 1, com frequência dos transdutores 45 e 80 kHz.

Parâmetros	Frequência (KHz)	Modelo	P-valor	R ² (%)
$f_c \times V$	45	$f_c = -2,91 + 0,0034.V$	0,0000	61
	80	$f_c = -2,85 + 0,0033.V$	0,0000	61
$f_c \times C$	45	$f_c = -0,59 + 0,77.C$	0,0000	68
	80	$f_c = -0,59 + 0,75.C$	0,0000	69
$E \times V$	45	$E = -331,282 + 0,38.V$	0,0000	60
	80	$E = -324,36 + 0,37.V$	0,0000	61
$E \times C$	45	$E = -67,58 + 87,2.C$	0,0000	68
	80	$E = -67,30 + 85,3.C$	0,0000	70

A deformabilidade das amostras de solo-cimento obtidas através das curvas tensão x deformação, indica valores dentro de 112 a 120 dos valores da resistência à compressão não confinada, que está dentro da ordem de grandeza dos valores encontrados no estudo feito por Lorenzo e Bergado (2004), que analisaram as propriedades mecânicas de solo-cimento em uma argila com LL = 103% e LP = 43%. É possível concluir que a melhoria do comportamento mecânico não está associada ao aumento da densidade da microestrutura. As amostras com fator a/c 0,7; 0,9 e 1 obtiveram aumento de 36, 30 e 28%, respectivamente, refletido na quantidade de produtos cimentícios incorporados às amostras, porém menores resistências devido aos vazios gerados pela quantidade de água nas amostras. Os modelos obtidos através da propagação de ondas de ultrassom possuem significância para caracterização de amostras, desde que possuem as mesmas faixas de valores encontrados para as propriedades elásticas e mecânicas e densidade obtida para as amostras em estudo, sendo necessário um modelo específico que represente o comportamento do solo tratado diante da quantidade de cimento, relação a/c e da técnica específica aplicada para tratamento de solo.

4 Conclusão

Avaliando comparativamente os resultados dos ensaios destrutivos e não destrutivos obtidos através de diversas composições de misturas, após 28 dias de cura, houve expressiva melhoria após o tratamento com a utilização do fator $a/c = 0,50$, tomando-se em conta o consumo constante de cimento de 300 kg/m³ e SPT< 4 golpes.

Para dosagens com maiores relação a/c (0,7; 0,9 e 1), houve perda significativa de resistência, resultando em uma mistura com elevado índice de vazios, confirmados através das velocidades de ultrassonografia determinados durante os ensaios em relação ao fator a/c 0,5.

Dessa forma, conclui-se que, para uma mistura mais homogênea e com maior resistência admissível, é fundamental a utilização do fator a/c de 0,50, o acréscimo de mais água à mistura, havendo o risco de reduzir a resistência do material e comprometer a capacidade de carga do maciço de solo.

Os modelos encontrados nas correlações demonstram ser estatisticamente significativa a inferência dos parâmetros mecânicos f_c e E , que podem ser avaliadas por ensaio de propagação de onda de ultrassom,

sendo que, a partir da variação do consumo de cimento e diferentes fatores a/c, novas curvas de calibração devem ser adotadas. Sendo, portanto, necessária a criação de um banco de dados mais consistente e amplo para a realização de uma análise criteriosa para verificação da eficiência do tratamento de solos moles através da adição de cimento, viabilizando um modelo específico que represente o comportamento do solo tratado.

Referências

ÅHNBERG, H. **Strength of stabilised soils** – a laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder. (PhD Thesis) - University of Lund, Lund, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**. Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508. **Grãos de Solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da Massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**. Solo – Amostra de solos. Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9603**. Sondagem a trado. Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**. Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**. Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770**. Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada.. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

AXELSSON, K.; JOHANSSON, S. E.; ANDERSON, R. **Stabilization of organic soils by cement and puzzolanic reactions - Feasibility study**. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 3 (English translation), 2002. Disponível em: <https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r3e.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2019.

CORREIA, A. A. S. **Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego**. 2011. 512 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

DIAS, D. R. **Resistência à compressão não confinada de misturas de solo-cimento visando à aplicação do sistema de estabilização Dry-Mix**. 2012. 220 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

EDIL, T. B., STAAB, D. A. **Practitioner's guide for deep-mixed stabilization of organic soils and peat**. Final Report, The National Deep Mixing Research Program, Project Number NDM302. Washington, D. C., 2005.

ENAMORADO, M. A. **Estudo comparativo entre o método mecânico e o método físico-químico para dosagem do solo-cimento**. 1990. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

- HERNADEZ-MARTINEZ, F. G. **Ground improvement of organic soils using wet deep soil mixing**. PhD (Thesis in Civil Engineering) - University of Cambridge, United Kingdom, 2006.
- HORPIBULSUK, S. MIURA, N. A new approach for studying behavior of cement stabilized clays. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey, Istanbul, Turkey. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 3, p. 1759-1762. 2001.
- KITAZUME, M., TERASHIE, M. **The deep mixing method principle, design and construction**. Japan Coastal Development Institute of Technology, 2002.
- KAWASAKI, T. et al. Deep mixing method using cement hardening agent. **Journal Proceedings of the 10th International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering**, [s. l.], v. 3, p. 721-724, 1981.
- LIANG, R., et al. Nondestructive evaluation of historic Hakka rammed earth structures. **Journal Sustainability**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 298-315, 2013.
- LORENZO, G. A., BERGADO, D.T. Fundamental parameters of cement-admixed clay – new approach. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 130, n. 10, p. 1042-1050, 2004.
- LORENZO, G. A., BERGADO, D. T. Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 18, n. 2, p. 161-174, 2006.
- PORBAHA, A. State of the art in quality assessment of deep mixing technology. **Journal Ground improvement**, [s. l.], n. 6, v. 3, p. 95-120, 2002.
- RATHMAYER, H. Deep mixing methods for soft subsoil improvement in the Nordic Countries. **Journal Proceedings 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems**, IS-Tokyo 96, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1996, p. 869-878.
- TERASHI. M., TANAKA, H., SHINDOME, T. Fundamental properties of lime and cement treated soils. **Journal 2 and Report of the Port and Harbour Research Institute**, [s. l.], v. 19, n. 1, 1980
- TERASHI, M. Theme Lecture: Deep Mixing Method-Brief State of the Art. **Journal Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, [s. l.], v. 4, p. 2475-2478, 1997.
- TOPOLNICKI, M. In Situ Soil Mixing. **Journal Ground improvement**, [s. l.], v. 2, p. 331-428, 2004.
- VENDRUSCOLO, M. A. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado**. 1996. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- WANG, D. Y., ZHU, Y. L., MA, W., NIU, Y. H. Application of ultrasonic technology for physical–mechanical properties of frozen soils. **Cold Regions Science and Technology**, Canadá, v. 44, n. 1, p. 12-19, 2006.
- YESILLER, N.; HANSON, J. L.; USMEN, M. **Ultrasonic Assessment of Stabilized Soils. Proceedings of the ASCE Geo-Institute Soft Ground Technology Conference**. Disponível em : https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1145&context=cenv_fac. Acesso em: 13 out. 2018.

Sobre os autores

Rodrigo Rogério Cerqueira da Silva

Doutorando pela Universidade Estadual de Campinas, Mestrado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, possui graduação pela Universidade Estadual de Campinas e professor de Engenharia Civil Nove de julho - Uninove. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em fundações, obras de terra, tratamento de solos moles e inspeção de materiais e estruturas por meio de ensaios não destrutivos pelo método de ultrassom.

Bruno Pereira Casanova

Diretor técnico da Geogroupt Engenharia Geotécnica. Pós-graduando em Investigação do subsolo. Tem experiência na parte de investigação geológica-geotécnica, fundações e estabilização de encostas.

Recebido em: 27/02/2019

Aceito em: 27/06/2019