

MÓDULO DE ELASTICIDADE DE SOLO ARENOSO COMPACTADO UTILIZANDO ENSAIOS DE ULTRASSOM

Gabriella Macedo de Assis
Natália Castilho de Lima
Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira
Wélida de Sousa Sarro

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Tecnologia

RESUMO

Este trabalho evidencia a possibilidade de caracterização de solos arenosos utilizando ensaios de ultrassom. A metodologia incluiu a moldagem de 20 corpos de prova cilíndricos com solo arenoso e energia de compactação normal (Proctor). Estes corpos de prova foram submetidos aos ensaios de ultrassom durante 7 dias e em seguida aos ensaios de compressão simples não confinada com determinação da deformação específica. Com os resultados desses ensaios foi possível calcular os módulos de elasticidade (E_{US} e E). A análise destes dados levou a conclusão de que é possível determinar o módulo de elasticidade do solo arenoso compactado com ensaios de ultrassom, destacando-se a necessidade do controle de umidade do material durante os ensaios.

ABSTRACT

This work evidences the possibility of characterization of sandy soils using ultrasonic tests. The methodology included the molding of 20 cylindrical specimens with sandy soil and normal compaction energy (Proctor). These specimens were subjected to ultrasonic testing for 7 days and then to unconfined single compression tests with specific strain determination. With the results of these tests it was possible to calculate the E_{US} and E modulus of elasticity. The analysis of these data led to the conclusion that it's possible to determine the modulus of elasticity of compacted sandy soil with ultrasonic tests, highlighting the necessity of humidity control of the material during the tests.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à caracterização de materiais de construção encontra-se em destaque, principalmente aquelas relacionadas à determinação do desempenho das edificações. Neste sentido, destaca-se a técnica de ultrassom, método não destrutivo que pode ser aplicado na caracterização dos materiais, estimativa da resistência mecânica e identificação de não homogeneidades.

Ao relacionar os ensaios de ultrassom à construção civil, verifica-se que esse método já foi consolidado para alguns materiais de construção (materiais cimentícios, aço e madeira), entretanto, ainda requer estudos para validar a sua aplicação em solos compactados. Entre as possíveis aplicações dos ensaios de ultrassom, destaca-se a obtenção das constantes elásticas do solo (módulos de elasticidade e Coeficiente de Poisson). A Lei de Hooke generalizada permite correlacionar tensões e deformações dos materiais por meio dos componentes da matriz de rigidez (equação 1). Os métodos não destrutivos utilizando propagação de ondas podem ser utilizados para a matriz de rigidez $[C]$, na qual o número de componentes independentes está associado ao grau de complexidade do material avaliado.

$$\sigma_{ik} = C_{iklm} \varepsilon_{lm} \quad (1)$$

em que: σ : tensões normais;
 C : matriz de rigidez;
 ε : deformações.

Estudos neste sentido são essenciais devido às dificuldades em se obter tais parâmetros através dos ensaios destrutivos (compressão axial não confinada, compressão triaxial, resiliência).

Entre as dificuldades destes ensaios estão o tempo para a preparação das amostras, necessidade de vários corpos de prova para validação estatística, além da dificuldade de se obter o trecho elástico do solo.

Há estudos preliminares que indicam a viabilidade da utilização dos ensaios de ultrassom para obtenção das constantes elásticas do solo (ASSIS et al, 2018; SARRO et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2015; FERREIRA et al., 2014; HOFFMANN; GONÇALVES, 2010; MILANI; FREIRE, 2008). A tabela 1 apresenta alguns valores de módulos de elasticidade longitudinal obtidos com ensaios de ultrassom (E_{US}) para solos arenosos compactados.

Tabela 1: Resultados de módulo de elasticidade (E_{US}) de solo arenoso, obtidos através de ensaios de ultrassom.

Autores	E_{US} (MPa)
Ferreira et al. (2013)	1659
Hoffmann & Gonçalves (2010)	1174
Ferreira & Freire (2005)	2625

Ao analisar os valores apresentados na tabela 1 verifica-se que os mesmos são dispersos entre os pesquisadores consultados. Isso pode ser justificado pela heterogeneidade das amostras de solo (mesmo sendo classificados com a mesma textura granular) e pelos fatores intrínsecos ao solo, que interferem diretamente no tempo de percurso da onda ultrassônica, ou seja, o teor de umidade, a massa específica e microestrutura do material (GONÇALVES et al., 2014; MICCOLI, 2014; TEIXEIRA et al., 2015; FERREIRA et al., 2014; HOFFMANN; GONÇALVES, 2010; MILANI; FREIRE, 2008).

Ferreira et. al., (2013) realizaram ensaios de ultrassom e destrutivos (compressão simples) em painéis de solo cimento, os quais foram obtidos durante a construção de uma edificação residencial em taipa. Os resultados desta pesquisa indicaram que o ensaio de ultrassom pode ser utilizado para estimar a resistência à compressão e determinar o módulo de elasticidade deste material. Isso foi comprovado através da análise estatística, onde foram obtidos coeficientes de correlação entre o Coeficiente de Rigidez (C_{LL}) e a resistência à compressão de 0,91 a 0,98.

Hoffmann & Gonçalves (2010) utilizaram ensaios de ultrassom para estudarem o comportamento de corpos de prova de solo compactado em relação à isotropia e homogeneidade, determinando o módulo de elasticidade longitudinal (E_{US}), módulo de elasticidade transversal (G) e coeficiente de Poisson (ν). Estes autores obtiveram valor médio do E_{US} menor que os demais autores citados na tabela 1 (1174 MPa).

Ferreira & Freire (2005) estudaram o efeito da incorporação de estabilizantes químicos em amostra de solo arenoso (cal e cimento), associados ao silicato de sódio. Para isso, utilizaram minipainéis compostos por tijolos de solo compactado e ensaios não destrutivos e destrutivos (ultrassom e compressão simples), respectivamente. Os valores do módulo de elasticidade obtidos com ultrassom (E_{US}) ficaram entre 2630 e 2715 MPa.

Ao consultar a literatura (tabela 2), verifica-se que as faixas de módulo de elasticidade de solos arenosos obtidos com ensaios destrutivos (E), também apresentam valores heterogêneos.

Tabela 2: Valores do módulo de elasticidade longitudinal de amostras de solo arenoso, obtidos com ensaios destrutivos (E), conforme literatura consultada.

Ensaio destrutivo	E (MPa)
Lombilo <i>et al.</i> (2014)	359
Bui <i>et al.</i> (2014)	180 – 950
Miccoli <i>et al.</i> (2014)	2200
Champiré <i>et al.</i> (2016)	1200 – 2800

Considerando que há heterogeneidade dos valores do módulo de elasticidade tanto entre os resultados obtidos com ensaios destrutivos como com aqueles obtidos com ensaios de ultrassom, há de se destacar as vantagens da técnica não destrutiva estudada neste trabalho. As principais vantagens são o baixo custo dos equipamentos de ultrassom em relação às Máquinas de ensaios utilizadas para a obtenção do módulo de elasticidade do solo (Universal, Triaxial e Resiliência); a caracterização de corpos de prova nas diversas etapas de uma obra geotécnica (ensaios preliminares para obtenção de parâmetros de projeto até o controle tecnológico da execução e manutenção).

Com tais vantagens justifica-se as pesquisas neste sentido, as quais devem considerar alguns fatores que interferem nos resultados dos ensaios de ultrassom, por exemplo, aqueles relacionados aos equipamentos de ultrassom (tipo e frequência dos transdutores). Conforme Bucur (2006), para se obter velocidades ultrassônicas que respeitem os conceitos de elasticidade (meios infinitos) deve-se garantir um mínimo de 3 comprimentos de ondas passando pelo material durante o ensaio. Todavia a definição desse parâmetro foi realizada para as madeiras, havendo a necessidade de determinação para o material solo.

Após esta discussão, este trabalho propõe a determinação do módulo de elasticidade longitudinal de amostra de solo arenoso compactado, utilizando ensaios de ultrassom.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos materiais

O solo utilizado nesta pesquisa é oriundo da jazida do Residencial Rubi, Limeira - São Paulo. Sua preparação ocorreu de acordo com a NBR 6457 (ABNT 1986a) para a realização dos ensaios de caracterização física e compactação. A tabela 3 apresenta os principais ensaios de caracterização física e mecânica utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Esses ensaios foram realizados por alunos do Grupo de Pesquisa que o trabalho está vinculado.

Tabela 3: Ensaio de caracterização físico-química e mecânica do solo e respectivas normas vigentes

Ensaio	Normas
Granulometria conjunta (Peneiramento e sedimentação)	NBR 7181 (ABNT, 2016a)
Massa específica dos sólidos	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Fluorescência de Raios-X (FRX)	---
Índice de plasticidade do solo	NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 2016b, 2016c)
Compactação Proctor (Energia Normal)	NBR 7182 (ABNT, 2016d)

O método de Fluorescência de Raios-X foi utilizado com o objetivo de caracterização química da amostra do solo, apresentando os elementos químicos em %. A amostra foi prensada no amostrador e identificada através da calibração STD-1 (Standardless), relativa à análise sem

padrões dos elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio. Também se obteve a perda ao fogo em %, após aquecimento da amostra de solo à 1.020°C por 2h. Os valores expressos foram normalizados a 100%.

2.2. Moldagem dos corpos de prova para ensaios destrutivos e não destrutivos

Foram moldados 20 corpos de prova com 100 mm de diâmetro e 127 mm de altura na energia normal de compactação e respectiva umidade ótima (NBR 7182/86). Após a moldagem, os corpos de prova ficaram armazenados no ambiente do laboratório, com umidade e temperatura de 20% e 25°C, respectivamente. Após 7 dias da data de moldagem, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de ultrassom e em seguida, aos ensaios de compressão axial não confinada.

2.3 Ensaios de Ultrassom

Para a obtenção dos valores do tempo de propagação da onda (μs), foram realizadas leituras com o equipamento de ultrassom USLab (Agricief, Brasil) utilizando transdutores de faces exponenciais com frequência de 45 kHz de ondas de compressão. Essas leituras foram realizadas no período de 7 dias a partir da moldagem.

Posteriormente foram calculadas as velocidades do pulso ultrassônico (VPU) a partir da Equação 1.

$$VPU = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad (1)$$

em que: VPU: velocidade do pulso ultrassônico [m/s];

L: comprimento do corpo de prova [m];

t: tempo do pulso ultrassônico peso [s];

Para obter o módulo de elasticidade por ultrassom (E_{US}) é necessário obter a VPU com ondas de compressão e de cisalhamento. Para isso, foram utilizados transdutores de cisalhamento de faces planas com frequência de 1000 kHz com o equipamento de ultrassom EPOCH 4 (Panametrics, EUA) após 7 dias da moldagem dos corpos de prova. Para preservar o sinal do efeito da atenuação devido à presença de ar entre a face do transdutor e o corpo de prova utilizou-se acoplante de xarope de glicose.

Conforme literatura consultada, os cálculos de E_{US} foram realizados considerando o solo como material isotrópico (equação 2) (FERREIRA et al., 2014; HOFFMANN; GONÇALVES, 2010; SARRO et al., 2017). Assim, obteve-se os elementos da matriz de rigidez conforme as equações 3, 4, 5 e 6, no 7º dia após a compactação.

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} \Rightarrow \rho * V_L^2 \quad (4)$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} \Rightarrow \rho * V_T^2 \quad (5)$$

$$C_{13} = C_{12} = C_{23} \Rightarrow C_{11} - 2 * C_{44} \quad (6)$$

em que: V_L : velocidade longitudinal [m/s];
 V_T : velocidade transversal [m/s];
 ρ : densidade do solo compactado [kg/m³];

A matriz de flexibilidade foi obtida a partir da inversão da matriz de rigidez, aplicando-se a equação 7 para determinar E_{us} .

$$S = 1/E_{us} \quad (7)$$

2.4 Ensaios de Resistência à Compressão Simples e Módulo de Elasticidade (E)

Após os ensaios de ultrassom, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de compressão axial simples não confinada, conforme a NBR 12770 (ABNT, 1992), com a determinação do módulo de elasticidade (E), conforme Equação 8 (ABNT NBR 8522, 2008).

Estes ensaios foram realizados em uma Prensa Universal para ensaios 23-600 (INSTRON/EMIC, Brasil), com capacidade de 600 kN. As deformações do solo durante a aplicação de carga foram obtidas através de um par de extensômetros elétricos com 100 mm de intervalo e resolução de 0,0001mm.

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (8)$$

3. RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

Conforme resultados do ensaio de granulometria (Figura 1), a amostra de solo apresenta 9% de argila, 14% de silte, 70% de areia fina e 7% de areia média, o que caracteriza o solo como uma areia fino siltosa ou classificação HRB como um solo A2-4.

Os resultados de plasticidade (índice de plasticidade – IP) e parâmetros obtidos na compactação pelo método Proctor, energia normal, estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de plasticidade (LL, LP, IP) e parâmetros obtidos através da compactação do solo na energia Normal, pelo método Proctor

Material	Energia de Compactação	ρ_d (KN/cm ³)	Wo (%)	LL	LP	IP
Solo Arenoso	Normal	2,05	10,6	18	5	13

LL: Limite de Liquidez; LP: Limite de Plasticidade; IP: Índice de Plasticidade;
 ρ_d : Massa específica.

Os resultados obtidos através dos ensaios de plasticidade e compactação corroboram com os valores dispostos na literatura para solos com as mesmas características (CAPUTO, 1988; PINTO, 2006).

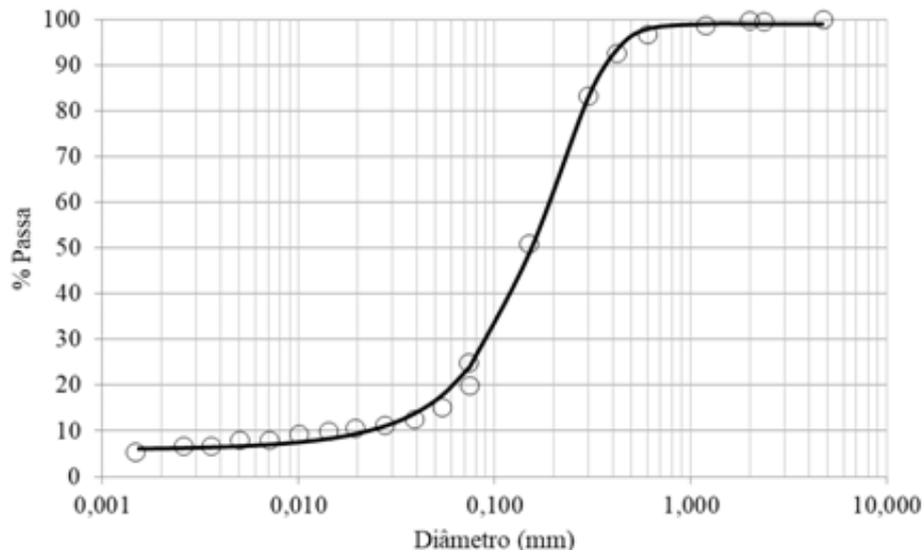


Figura 1: Distribuição granulométrica da amostra de solo arenoso.

A tabela 5 apresenta a composição química da amostra de solo com a identificação dos elementos químicos e respectivos teores em %.

Tabela 5: Composição química da amostra de solo, obtida com ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Perda ao Fogo (PF).

Elemento Químico	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	PF
Teor (%)	0,09	9,56	81,2	0,03	0,02	0,07	0,05	0,82	0,04	0,1	3,83	0,06	4,2

Os óxidos de sílica (SiO₂) que representam 81% da amostra indicam um material com textura granular (maior proporção de quartzo), o que corrobora a classificação obtida no ensaio de granulometria. A perda ao fogo (PF) de 4,2% indica a presença de material orgânico na amostra, normal para esse tipo de matéria-prima (GROSS, 1971).

3.1 Determinação da VPU e do módulo de elasticidade com Ensaio de Ultrassom

A tabela 6 apresenta os valores de VPU média para cada corpo de prova considerado para os cálculos dos módulos de elasticidade (E_{US}) e dados estatísticos (desvio padrão e coeficiente de variação). Também foram calculados os comprimentos de onda (λ) e os respectivos números de ondas estabelecidas durante os ensaios de ultrassom (L/λ).

Tabela 6: VPU média e respectivo comprimento de onda (λ) para cada corpo de prova considerado para a determinação dos módulos de elasticidade

CP	VPU (m/s)	λ	L/λ
1	1083,06	0,01	11,73
2	1129,09	0,01	11,20
3	1115,11	0,01	11,39
4	1097,57	0,01	11,57
5	1075,27	0,01	11,81
6	1118,65	0,01	11,35
7	1068,12	0,01	11,89
8	1036,14	0,01	12,26
Média	1090,38	-	11,65
*DP	30,89	-	0,34
**CV	2,83	-	0,03

*DP: Desvio Padrão (m/s); **CV: Coeficiente de Variação (%)

Os valores estatísticos validam a amostra considerada, ou seja, não apresentaram variação considerável entre os 8 corpos de prova (CV: 2,83%). O valor médio da VPU foi semelhante aos apresentados pelas principais referências consultadas (HOFFMAN e GONÇALVES, 2010; FERREIRA et al., 2013). Esses autores obtiveram valores médios de VPU de 1290 e 1376, respectivamente. Além disso, os teores de umidade considerados durante a compactação dos corpos de prova foram semelhantes (11,37% e 9,77 %), respectivamente.

O número de ondas obtidas durante os ensaios de ultrassom atendeu as indicações de Bucur (2006), obtendo-se uma média de 11 comprimentos de ondas passando pelos corpos de prova durante os ensaios de ultrassom.

A tabela 7 apresenta a diferença de VPU (%) entre os 7 dias considerados durante o acompanhamento dos corpos de prova antes da ruptura (ensaios destrutivos). Essa avaliação foi necessária em função da perda de umidade dos corpos de prova durante o período de acompanhamento.

A diferença da VPU entre o segundo e sétimo dia de monitoramento foi de 56,5% (média dos 8 corpos de prova). A comparação entre essas datas é a mais importante porque no segundo dia de monitoramento obtêm-se uma maior estabilidade das leituras do tempo de pulso ultrassônico. Isso ocorre porque há uma perda maior de umidade de compactação entre os dias 1 e 2, devido à estabilização da umidade dos corpos de prova com a do ambiente do laboratório.

Tabela 7: Valores da variação da VPU em % conforme o tempo de monitoramento dos corpos de prova com ensaios de ultrassom

Variação da VPU (%)							
CP	Idade (dias)						
	1 → 2	2 → 3	3 → 4	4 → 5	5 → 6	6 → 7	2 → 7
1	112,1	7,9	-17,0	20,4	-21,7	-1,9	56,9
2	71,0	16,0	1,4	-1,4	-7,2	-0,6	54,6
3	75,0	23,0	-11,0	12,3	-13,0	-4,2	55,7
4	51,8	18,6	17,6	-4,8	-6,3	-1,8	53,9
5	36,0	17,8	35,3	-7,5	-6,1	-2,1	54,2
6	36,2	19,4	36,0	-8,8	-8,6	-1,1	54,9
7	50,2	8,9	18,4	-5,4	-1,8	-2,8	57,2
8	36,9	21,4	-0,3	-4,8	0,5	-2,7	64,9
Média	58,6	16,6	10,0	0,0	-8	-2,2	56,5

De acordo com a literatura, o tempo e percurso do pulso ultrassônico podem ser influenciados por alguns fatores como a umidade, isotropia e microestrutura do material (SARRO et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2015; HOLFFMAN e GONÇALVES, 2010). Isso ficou evidenciado com as variações de VPU e umidade, apresentadas nas tabelas 7 e 8. Verifica-se que as variações da VPU e umidade entre o segundo e sétimo dia foram de 56,5% e 58,75%, respectivamente, o que caracteriza a influência desse último na VPU.

Tabela 8: Valores da variação da VPU em % conforme o tempo de monitoramento dos corpos de prova com ensaios de ultrassom

Umidade (%)								
CP	1 → 2	2 → 3	3 → 4	4 → 5	5 → 6	6 → 7	2 → 7	% Perda
1	13,71	31,95	22,11	16,45	3,39	14,36	41,05	47,43
2	15,58	52,69	25,83	14,27	6,9	8,03	50,10	57,35
3	34,57	50,92	29,02	22,92	1,0	50,84	71,95	88,03
4	10,74	42,4	28,88	42,89	0,51	16,84	61,17	66,17
5	10,44	48,1	30,06	23,89	9,11	31,22	66,22	71,08
6	9,35	43,07	29,9	36,87	0,38	41,75	70,68	75,03
7	9,65	59,26	31,29	10,89	4,45	32,78	64,50	68,99
8	10,43	43,7	22,35	19,73	4,54	4,99	44,33	49,18
Média	14,31	46,51	27,43	23,49	3,79	25,10	58,75	65,41
DP	8,46	8,21	3,57	11,11	3,15	16,54	12,00	13,64
CV	0,59	0,18	0,13	0,47	0,83	0,66	0,20	0,21

A figura 2 apresenta as variações dos módulos de elasticidade (E_{US} e E), obtidos nos ensaios de ultrassom e compressão axial não confinada, respectivamente.

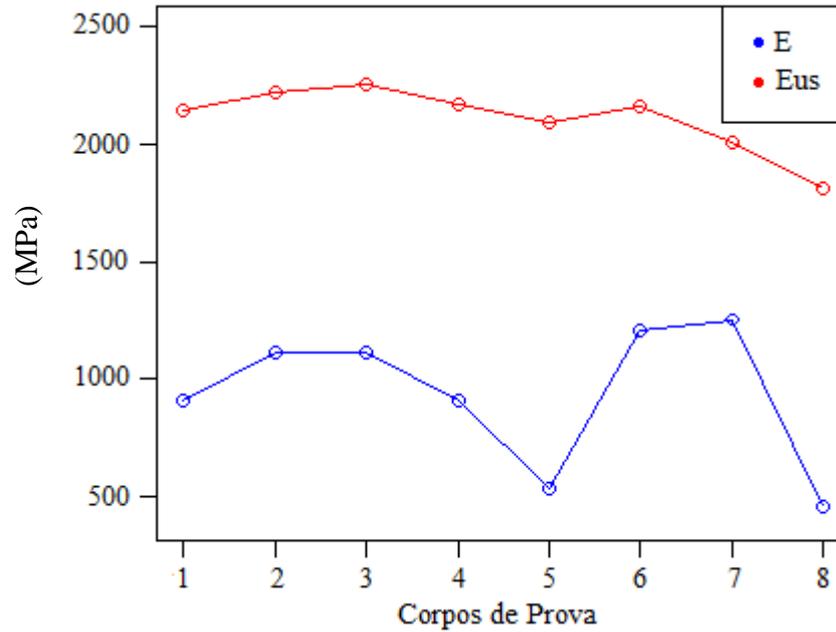


Figura 2: Variação dos módulos de elasticidade E_{US} e E conforme corpo de prova, obtidos nos ensaios de ultrassom e compressão axial não confinada, respectivamente.

Ao observar a figura 2, é possível concluir que o comportamento dos corpos de prova em relação ao módulo de elasticidade seguiu o mesmo padrão, ou seja, as curvas representativas dos valores de E_{US} e E seguiram a mesma tendência. Entretanto, os valores foram distintos entre os módulos de elasticidade obtidos com ultrassom e compressão simples. Ao buscar justificativas à diferença entre os módulos de elasticidade obtidos através dos dois métodos, pode-se citar problemas relacionados ao ensaio de compressão simples não confinado. Esse método de ensaio apresenta certa limitação em relação a determinação da deformação específica devido as acomodações durante o carregamento inicial.

Conforme tabela 9, os módulos de elasticidade (E_{us}) obtidos através dos ensaios de ultrassom não apresentaram variações significativas entre os corpos de prova (DP: 130,86 MPa). Já os módulos de elasticidade obtidos com ensaios de compressão simples não confinada apresentam DP: 279,75 MPa. Esta avaliação estatística mostra que os ensaios destrutivos podem trazer variações mais significativas do que os ensaios não destrutivos.

Tabela 9. Valores obtidos através dos ensaios não destrutivos e destrutivos

CP	R _{CS} (MPa)	E _{US} (MPa)	E (MPa)	%*
1	0,55	2143	909	57,6
2	0,55	2218	1111	49,9
3	0,58	2258	1111	50,8
4	0,55	2169	909	58,1
5	0,83	2097	532	74,6
6	0,55	2165	1200	44,6
7	0,70	2007	1250	37,7
8	0,73	1818	455	75,0
Média	0,63	2109	935	56,0
DP	0,11	140	299	13,3
CV	0,18	0,07	0,32	0,24

*Porcentagem de variação entre o E_{US} e E

O valor médio do módulo de elasticidade obtido com ensaios de ultrassom (E_{US}=2109 MPa) corrobora os apresentados por pesquisas semelhantes (tabela 1). Esses trabalhos indicam uma faixa de E_{US} entre 1140 a 2500 MPa, a qual abrange o valor médio indicado na tabela 9.

Ao comparar o valor médio do módulo de elasticidade obtido com ensaios de compressão simples (E= 935 MPa) com a literatura (tabela 2), verifica-se que o mesmo também apresenta variações consideráveis (359 a 2800 MPa), que incluem o valor obtido nesse trabalho.

A resistência à compressão média (R_{CS}) foi de 0,63 MPa, com desvio padrão de 0,11 MPa, ou seja, com considerável variação. A resistência à compressão obtida por Ferreira et al. (2014) foi de 0,88 MPa para corpos de prova de solo arenoso, compactados com 9,8 % de umidade. Outros autores realizaram o mesmo estudo e obtiveram R_{CS} = 0,95 MPa com umidade de 11,4% (FERREIRA et al., 2005).

Para relacionar esse comportamento mecânico com a microestrutura do solo compactado, realizou-se imagens em microscópio óptico (Stemi 2000-C, Zeiss) com ampliação de 25 vezes (figura 3). A figura ilustra a heterogeneidade das dimensões dos grãos que formam a amostra de solo em questão. O alto teor da mineral sílica pode interferir diretamente na VPU e na resistência à compressão.



Figura 3: Representação da microestrutura da amostra do solo compactado, através de microscópio óptico com ampliação de 25 vezes.

4. CONCLUSÕES

Ao considerar o objetivo deste trabalho é possível confirmar a obtenção do módulo de elasticidade da amostra de solo arenoso compactado utilizando ensaios de ultrassom. Entretanto, verifica-se que há a necessidade de mais estudos para definir um coeficiente de correção entre os módulos de elasticidade longitudinais obtidos com ensaios de ultrassom e compressão axial não confinada. Para isso, deve-se considerar os índices físicos do solo estudado e a viabilidade do método destrutivo utilizado nesta pesquisa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fábrica de Mobiliário Urbano de Limeira (FAMUL), coordenado pela Prefeitura Municipal de Limeira, SP, pela doação do lote de solo arenoso; ao LabEND (Feagri, UNICAMP) e ao Programa de Pós-graduação da FT, UNICAMP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984d) *NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1984e) *NBR 12770 – Solo Coesivo – Determinação da resistência não confinada - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1986a) *NBR 6457 – Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1986b) *NBR 7182 – Solo – Ensaios de compactação - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2008) *NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016e) *NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez - Apresentação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Assis, G. M.; Cardoso, S. M.; Sarro, W. S.; Ferreira, G. C. S. Influência do teor de umidade na velocidade do pulso ultrassônico de solos estabilizados granulometricamente. I Workshop de Ensaios não destrutivos aplicados na Construção Civil, Limeira, SP, 5 p., abril, 2018.
- Bandeira, R. F. Estudo da correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica para um material terroso. *Dissertação de Mestrado*. - Belo Horizonte: Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- Bucur, V. Acoustics of Wood. *New York: Editora Springer Verlage*, 2006.
- Bui, Q. B.; Morel, J. C.; Hans, S.; Walker, P. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, v. 54, p. 163–169, 2014.
- Caputo, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*, p. 244, 1988.
- Champiré, F.; Fabbri, A.; Morel, J. C.; Wong, H.; McGreegor, F. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials*, v. 110, p. 70–78, 2016.
- CNT (Confederação Nacional do Transporte). Pesquisa CNT de Rodovias, Brasília, 2016.
- Ferreira, G. C. S.; Sarro, W. S.; Hoffman, M.; Gonçalves, R. Influência das camadas de compactação em inspeções de painéis monolíticos de solo-cimento por ultrassom. In: *18 Congresso Nacional de Ensaios Não destrutivos e de Inspeção*, 2014, São Paulo, SP: ABENDI, 2014. v. 1. p. 1-10.
- Ferreira, R. C.; Freire, W. J. Eficiência da estabilização do solo e qualidade de tijolos prensados de terra crua tratada com aditivos químicos, avaliada pela combinação de testes destrutivos e não-destrutivos. *Engenharia Agrícola*, 2004, Jaboticabal, v.24, n. 3, p. 501-511.
- Fonseca, A. M. Avaliação da influência do controle tecnológico na qualidade de obras de pavimentação (dissertação). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- Gonçalves, R.; Dijk, R. V.; Bertoldo, C. Influência da frequência e da distância entre transdutores na velocidade de propagação de ondas obtida em ensaios indiretos durante inspeções de peças estruturais de madeira. In: *Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos (CONAEND)*, 2014, São Paulo. Anais do CONAEND&IEV2014. São Paulo: ABENDI, 2014. v. 1.
- Gross, M. G. Carbon determination. In: CARVER, R. E. (ed.) *Procedure in sedimentar petrology*. New York: Wiley-Interscience, 1971. Cap. 25, p. 573-596.

- Hoffman, V. M.; Gonçalves, R. Análise da qualidade da taipa de pilão por meio de ondas ultrassônicas. - Campo Grande, UFMS: [s.n.], 2010.
- Lombilo, I.; Villegas, L.; Fodde, E.; Thomasc, C. In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing. *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 451–460, 2014b.
- Miccoli, L.; Müller, U.; Fontana, P. Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, v. 61, p. 327–339, 2014.
- Milani, A. P. S.; Freire, W. J. Avaliação física, mecânica e térmica de misturas de solo-cimento adicionadas de cinza de casca de arroz sem atividade pozolânica. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v. 11, p. 23–30, 2008.
- Pinto, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos (16 Aulas) – 3º Edição.pdf. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- Sarro, W. S.; Ferreira, G. C. S.; Cardoso, S. M.; Macedo, G. A. Influência dos transdutores no ensaio de ultrassom aplicado a solo compactado. In: 14a Conferência sobre tecnologia de equipamentos (Coteq), 2017, São Paulo. *Anais do Coteq2017*. São Paulo: ABENDI, 2017. v. 4
- Teixeira I.; Sarro W. S.; Cardoso S. M.; Macedo G. A.; Ferreira G. C. S. Influência da granulometria e umidade nas propriedades de solos a partir de ensaios destrutivos e não destrutivos. In: XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Ouro Preto, MG: ANPET; 2015. p. 196–207.

Tecnóloga Gabriella Macedo de Assis (gabi.macedo@live.com)

Graduanda Natália Castilho de Lima (naathcastilho@gmail.com)

Profa. Dra. Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira (gisleiva@ft.unicamp.br)

MsC. Wélida de Sousa Sarro (lely.sarro@hotmail.com)

Departamento de Construção Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.
Rua Paschoal Marmo, 1888, Limeira, SP, Brasil.