



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia

Wélida de Sousa Sarro

**PROPAGÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS
APLICADAS À CARACTERIZAÇÃO DO SOLO
COMPACTADO**

Limeira
2022

Wélida de Sousa Sarro

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS APLICADAS À
CARACTERIZAÇÃO DO SOLO COMPACTADO**

Tese apresentada à Faculdade de Tecnologia da
Universidade Estadual de Campinas como parte
dos requisitos para a obtenção do título de Doutor
em Tecnologia, na área de Ciência dos Materiais.

Orientador: Profa. Dra. Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira

Este trabalho corresponde à versão final da
Tese defendida por Wélida de Sousa Sarro e
orientada pelo Profa. Dra. Gisleiva Cristina
dos Santos Ferreira.

Limeira
2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

Sarro, Wélida de Sousa, 1993-
Sa75p Propagação de ondas ultrassônicas aplicadas à caracterização do solo compactado / Wélida de Sousa Sarro. – Limeira, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Solos - Compactação. 2. Solos - Umidade. 3. Mecânica do solo. 4. Engenharia geotécnica. 5. Testes não-destrutivos. I. Ferreira, Gisleiva Cristina dos Santos, 1975-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Propagation of ultrasonic waves applied to the characterization of compacted soil

Palavras-chave em inglês:

Soil compaction

Soil moisture

Soil mechanics

Geotechnical engineering

Non-destructive testing

Área de concentração: Ciência dos Materiais

Titulação: Doutora em Tecnologia

Banca examinadora:

Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira [Orientador]

Marcelo de Castro Takeda

Raquel Gonçalves

Roberto Caldas de Andrade Pinto

Vivian Silveira dos Santos Bardini

Data de defesa: 27-01-2022

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-9790-1806>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8942431352110780>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Doutor em Tecnologia na área de concentração Ciência dos Materiais, a que se submeteu o aluno Wélida de Sousa Sarro, em 27 de janeiro de 2022 na Faculdade de Tecnologia – FT/UNICAMP, em Limeira/SP.

Profa. Dra. Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira

Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Marcelo de Castro Takeda

UFSCAR

Profa. Dra. Raquel Gonçalves

FEAGRI/UNICAMP

Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto

UFSC

Profa. Dra. Vivian Silveira dos Santos Bardini

FT/UNICAMP

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós Graduação da Faculdade de Tecnologia.

*O que nós sabemos
tem importância,
mas quem nós somos
importa mais.*

(Brené Brown)

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Parte dos recursos adquiridos para compra de equipamentos utilizados nessa pesquisa deve-se ao projeto de pesquisa aprovado pelo CNPq (Edital Universal - Processo 405929/2016-1).

Houve apoio ainda do Programa Ibero-Americanas Santander (Edital 031/2018) que resultou em intercâmbio no Instituto Superior Técnico de Lisboa (PT), no período de Março-Junho/2019.

Dedicatória

Aos meus pais, Delci de Sousa Sarro e José Luiz Sarro (*in memoriam*), que deram tudo de si para que suas filhas fossem pessoas de bem e que nos faltasse nada. Cada um a sua forma, mesmo àquele que não está presente, é responsável por quem eu sou.

À minha querida irmã, Maira Sarro, meu exemplo eterno de resiliência e competência. Você é e sempre vai ser a melhor professora que posso ter e ser. Eu não estaria aqui se não fosse por você.

Ao meu companheiro, Maurício Rossi, por sempre acreditar em mim, mesmo quando eu mesma não acredito. Você foi e ainda é grande parte da minha vida, mesmo que não faça sentido para mais ninguém. Obrigada por não desistir de mim.

À minha melhor amiga, Sandra Maria Cardoso, que me ensinou e me lembra todos os dias que eu sou o sol e que eu sou capaz de tudo aquilo que me propuser fazer. Você foi essencial nesses últimos anos e sou grata pela jornada acadêmica ter me presenteado com você. Você é sol também e minha vida é melhor por ter você.

À minha orientadora Profa. Dra. Gisleiva, por todas as oportunidades e toda a confiança ao longo desses anos. Parte do que descobri ser só foi possível devido as possibilidades que você me apresentou e que acreditou que eu fosse capaz.

Resumo

A técnica de ultrassom é indicada para diversos tipos de materiais de construção, sendo aplicada na caracterização, controle tecnológico e inspeção de materiais e elementos construtivos. Entretanto, a utilização dessa técnica em solos é incipiente, sendo os resultados da literatura relacionados em grande parte a solos estabilizados, impossibilitando estabelecer um modelo de previsão de comportamento devido à variabilidade das misturas. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi caracterizar amostras de solos compactados utilizando o ensaio de ultrassom. A metodologia experimental desta pesquisa incluiu a moldagem de corpos de prova de diferentes dimensões, para a determinação do comprimento de onda e consequentemente a dimensão adequada para a realização dos ensaios de ultrassom. A influência dos índices físicos também foi avaliada, a partir de corpos de prova moldados com diferentes teores de umidade e densidade. Além disso, foram moldados corpos de prova cúbicos para verificar o comportamento mecânico/elástico de acordo com diferentes direções de realização dos ensaios (paralela e perpendicularmente as camadas). Os resultados indicaram que, para que se tenha a velocidade real do material, deve-se utilizar corpos de prova com comprimento mínimo 200 mm no sentido de realização da leitura. O comportamento da velocidade frente as variações de umidade e densidade indicam potencial de utilização na técnica para controle tecnológico, uma vez que a velocidade sofreu alterações de acordo com a condição de ensaio. No que diz respeito ao comportamento elástico, verificou-se que há diferenças estatisticamente significativas nas velocidades e constantes elásticas quando ensaiadas no sentido de compactação, sendo as demais direções classificadas como iguais estatisticamente. Os modelos de regressão linear múltipla desenvolvidos para estimativa da densidade seca apresentaram coeficientes de correlação (R) entre 0,94 e 0,97, a depender dos índices físicos utilizados. Já para a estimativa da resistência à compressão não confinada esses coeficientes ficaram entre 0,82 e 0,98. Esses resultados reafirmam a viabilidade do uso do ensaio de ultrassom na caracterização, controle e inspeção de construções em terra.

Palavras-chave: Controle tecnológico; Caracterização física; Caracterização Mecânica; Obras geotécnicas; Ensaio Não Destrutivo.

Abstract

Ultrasound technique is indicated for several types of construction materials, being applied in the characterization, technological control and inspection of materials and construction elements. However, the use of this technique in soils is incipient, and the results of the literature are related to stabilized soils, making it impossible to establish a model for predicting behavior due to the variability of mixtures. Therefore, the aim of this research was to characterize samples of compacted soils from the ultrasound test. The experimental methodology of this research included the molding of specimens of different dimensions, for the determination of the wavelength and consequently the appropriate dimension for the performance of the ultrasound tests. The influence of physical indices was also evaluated, from specimens molded with different moisture content and density. In addition, cubic specimens were molded to verify the mechanical/elastic behavior according to different directions of test (parallel and perpendicular to the layers). The results indicated that, in order to have the real velocity of the material, test specimens with a minimum length of 200 mm should be used in the direction of the reading. The velocity behavior in face of moisture content and density variations indicate potential use in the technique for technological control, since the velocity changed according to the test condition. Regarding to the elastic behavior, it was found that there are statistically significant differences in elastic velocities and constants when tested in the direction of compaction, with the other directions classified as statistically equal. The multiple linear regression models developed to estimate dry density presented correlation coefficients (R) between 0.94 and 0.97, depending on the physical indices used. For the estimation of unconfined compressive strength, these coefficients were between 0.82 and 0.98. These results reaffirm the feasibility of using the ultrasound test in the characterization, control and inspection of buildings in earth.

Keywords: Technological control; Physical characterization, Mechanical characterization; Geotechnics; Non-destructive testing.

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Objetivos	13
1.2	Estrutura do documento	13
2	Levantamento bibliográfico	14
2.1	Ensaio de Ultrassom	14
2.2	Solo como material de Construção	17
2.3	Ultrassom aplicado à solos compactados	20
3	Materiais e Métodos	26
4	Artigos	29
4.1	Publicados	29
4.1.1	Artigo 1	29
4.2	Submetidos	38
4.2.1	Artigo 2	38
4.2.2	Artigo 3	50
5	Discussão geral	60
5.1	Interferência dos fatores físicos e microestruturais	61
5.2	Procedimentos de ensaio - Corpo de prova	62
5.3	Influência da direção no ensaio de ultrassom	63
6	Conclusões	64
	Referências bibliográficas	66
7	Anexos	72

Capítulo 1

Introdução

As técnicas não destrutivas são excelentes ferramentas para se obter propriedades físicas e mecânicas dos materiais, auxiliando os profissionais das mais diversas áreas, inclusive da construção civil, no controle tecnológico, monitoramento e inspeção. Entre essas técnicas, destaca-se a de propagação de ondas ultrassônicas, por apresentar vantagens como a rapidez na execução dos ensaios, possibilidade de caracterização em série, não alteração das propriedades internas e externas da estrutura, identificação de não homogeneidades e estimativa de propriedades mecânicas.

Entretanto, embora já tenha sido validada para vários materiais de construção (madeira, concreto, argamassa e compósitos), no que diz respeito ao solo os estudos ainda são incipientes, o que justifica a necessidade de estudos relacionados ao uso desta técnica em solos compactados.

Na antiguidade, quase sempre os materiais de construção eram empregados na forma em que eram encontrados na natureza, como o caso das pedras, madeira e solo, os quais eram modelados de acordo com as técnicas e ferramentas da época. Dentre essas tecnologias construtivas, grande parte fizera do solo, comumente mencionado na história como barro, a matéria-prima principal, para construções habitacionais e de infraestrutura. Logo, estudos que envolvam esse material são muito importantes pois o mesmo faz parte de diversas construções, como aquelas tombadas como patrimônio histórico (taipa, adobe, etc.) e de cunho geotécnico (barragens de terra, pavimentação, aterros, etc.).

No contexto histórico, consta que cerca 17% das 897 construções tombadas como Patrimônio Histórico da Humanidade foram construídas total ou parcialmente com solo (UNESCO, 2021), as quais $\frac{1}{4}$ estão em perigo. Esses dados por si só, devido à importância

dessas construções, justificam os estudos voltados ao desenvolvimento de metodologias que facilitem a obtenção de informações necessárias à manutenção e restauração.

O solo, cujas propriedades variam de acordo com a rocha de origem, dentre outros fatores, apresentam maior complexidade para a sua caracterização, tanto relacionado ao material natural, como quando em alguma aplicação (compactado). Assim, se faz necessária a adoção de tecnologias que também possam auxiliar na obtenção de parâmetros necessários às etapas de projeto e dimensionamento das estruturas que utilizam o solo como principal material construtivo ou de suporte.

Neste sentido, destacam-se as propriedades elásticas do solo (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) parâmetros que, quando necessários, requerem ensaios complexos e onerosos. Dependendo da finalidade, os métodos comumente utilizados para obter esses parâmetros requerem ainda a retirada de amostras para ensaios laboratoriais, o que a depender do nível de degradação da estrutura pode não ser possível, como no caso de edificações tombadas.

Além disso, outros fatores devem ser levados em consideração, como por exemplo, a massa específica das camadas de solo compactado que formam uma parede de uma edificação ou a estrutura de um pavimento, bem como a umidade presente na estrutura durante a realização do ensaio, que estão relacionados com a execução dos elementos construtivos. Há de se considerar ainda o comportamento mecânico do material conforme o eixo de carregamento, na qual os materiais podem ser considerados isotrópicos, ortotrópicos ou anisotrópicos.

Assim, a validação da técnica de ultrassom aplicada à caracterização do solo compactado pode auxiliar várias etapas de uma construção com solo, seja no projeto, dimensionamento, execução e/ou manutenção. Entretanto, a aplicação correta desta técnica de ensaio inclui conhecimentos específicos, principalmente relacionados aos fatores que interferem na propagação de ondas ultrassônicas. A literatura consultada indica a possibilidade da utilização da técnica de ultrassom para caracterização de solo compactado, mas para consolidar a sua aplicação é necessária uma investigação aprofundada e consistente, considerando os principais fatores que interferem nos resultados.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é utilizar a técnica de propagação de ondas ultrassônicas na caracterização de amostras de solo compactado. Esse objetivo pode ser sistematizado em um conjunto de metas e objetivos específicos destacados a seguir:

- Verificar os fatores físicos interferentes na propagação das ondas ultrassônicas como a massa específica, teor de umidade, índice de vazios, porosidade, grau de saturação;
- Verificar o comprimento de onda mínimo para que a onda se propague em meio infinitos baseando-se nas características dos equipamentos disponíveis;
- Verificar a influência da direção de realização da leitura no ensaio de propagação das ondas ultrassônicas;
- Propor modelos matemáticos que possibilitem a estimativa de outros parâmetros a partir dos ensaios de ultrassom

1.2 Estrutura do documento

A tese foi estruturada em formato alternativo, conforme autorização concedida pela Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Tecnologia - UNICAMP.

Consta, nesse caso, a introdução, que contextualiza o assunto abordado, além das justificativas e objetivos do trabalho (Capítulo 1), revisão da literatura sobre os conceitos principais utilizados para o desenvolvimento desse trabalho (Capítulo 2) e também um panorama geral dos materiais e métodos utilizado (Capítulo 3). No Capítulo 3, conforme permitido pelo formato adotado para a tese, estão dispostos os artigos resultantes do desenvolvimento dessa pesquisa, os quais foram agrupados em publicados, submetidos e em processo de elaboração e incluídos ao longo do texto com padrão de formatação das revistas. Por fim, as discussões e considerações finais, bem como as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento do trabalho foram dispostas no Capítulos 4 e 5, seguidas pelas respectivas referências.

Capítulo 2

Levantamento bibliográfico

2.1 Ensaio de Ultrassom

Os ensaios não destrutivos foram propostos inicialmente com o objetivo de detectar defeitos em metais e suas ligas sem alterar suas capacidades de uso (ANDREUCCI, 2018), tendo-se expandido posteriormente para a caracterização de diversos outros materiais (polímeros, compósitos, madeiras, matrizes cimentícias, rochas, minerais e solos). Dentre as principais vantagens em relação aos ensaios destrutivos, temos a redução do tempo de execução e obtenção dos resultados, ausência de danos superficiais ou interferências invasivas aos elementos construtivos, fachadas ou amostras, além da possibilidade de maior número de ensaios, o que aumenta a acurácia dos resultados (BUCUR, 2006).

Neste contexto está inserido o ensaio de ultrassom, técnica que utiliza ondas mecânicas, geradas por transdutores piezelétricos de frequência entre 20 e 1000 kHz, as quais sofrem modificações a depender das propriedades mecânicas dos materiais, sendo consequentemente refletida na velocidade do pulso ultrassônico (VPU) (Eq. 2.1). A propagação da onda ultrassônica no sólido pode revelar características dos materiais como homogeneidade, descontinuidades, vazios e fissuras internas (BAUER, 2000), o que justifica seu uso para caracterização de materiais. Quanto menos homogêneo for o material maior será o tempo que a onda levará para percorrer sua estrutura interna e, consequentemente, menor será a velocidade de propagação da onda ultrassônica pelo material (CULTRONE et al., 2001; LOMBILLO et al., 2014; QASRAWI, 2000).

$$VPU = \frac{L}{t} \quad (2.1)$$

As ondas podem ser classificadas quanto a sua propagação como sendo longitudinal (p-wave) e transversal (s-wave), distinguidas em função da direção de oscilação das partículas. No caso da onda longitudinal, ou de compressão, a propagação ocorre tanto em sólidos quanto em líquidos e gases e sua oscilação ocorre no sentido de propagação da onda. Já as ondas transversais, ou de cisalhamento, são transmitidas apenas para a fase sólida do material, sendo a oscilação no sentido perpendicular a propagação (ANDREUCCI, 2018; KOHLHAUSER; HELLMICH, 2012). O procedimento do ensaio, independente do tipo de onda a ser determinada, depende de alguns fatores, como o tipo, frequência e posição dos transdutores, além do tipo de acoplante, os quais devem ser compatíveis com o material analisado e o objetivo pretendido com o ensaio.

Os transdutores podem ser posicionados de diferentes maneiras para a obtenção dos tempos de propagação dessas velocidades. Neste caso, a leitura direta refere-se a aquela na qual os transdutores são posicionados em faces opostas e a leitura indireta refere-se àquela posicionada paralelamente, quando se tem acesso a uma única face do elemento inspecionado. Existe ainda a possibilidade de leitura semi-indireta, utilizada apenas quando não é possível o posicionamento dos transdutores de forma direta ou indireta, sendo os transdutores posicionado em faces perpendiculares (ABNT, 2019). Apesar de ambos possuírem cristais piezelétricos internos, esses transdutores podem ter formatos externos distintos, sendo do tipo plano ou exponencial (pontas secas). A escolha adequada desse tipo de transdutor vai depender portanto da superfície na qual eles serão dispostos. No caso dos transdutores planos, devido a rugosidade da maioria dos materiais, é necessário utilizar um acoplante, para que não se tenha interferência do ar entre o transdutor e o material na letura do tempo de propagação.

Além disso, para que se tenha a velocidade real de propagação da onda, deve-se garantir que o comprimento de onda (λ) (Eq. 2.2) esteja adequado às dimensões das partículas anatômicas do material, ou seja, da microestrutura. As equações desenvolvidas para meios infinitos definem que para alcançar as condições desta hipótese, o comprimento do percurso da onda (ou dimensão da amostra em análise) deve respeitar uma proporção entre λ e o número de ondas obtidas durante a emissão do pulso ultrassônico pelo material (BUCUR, 2006; TRINCA; GONÇALVES, 2009; OLIVEIRA et al., 2006).

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.2)$$

Entretanto, não são somente os parâmetros operacionais que devem ser considerados. Embora de maneira diferente entre os materiais, há um consenso sobre a influência da microestrutura do material no ensaio de ultrassom, tendo em vista que a velocidade tende a ser maior quanto mais homogêneo for o material. Apesar disso, desde que essas variáveis sejam bem avaliadas e consideradas, o ultrassom é uma ferramenta importante para a caracterização, controle e inspeção de materiais.

Umas das possibilidades que os resultados do ensaio proporciona é a determinação dos parâmetros elásticos do material (Módulo de elasticidade - E, Módulo de Cisalhamento - G e Coeficiente de Poisson - ν), os quais são determinados a partir da matriz de rigidez e sua inversa, a matriz de flexibilidade (Eq. 2.3 a 2.5), que correlaciona a velocidade com o comportamento elástico do material. Essas equações foram desenvolvidas por Christoffel baseando-se em um elemento tridimensional (eixos x, y e z) onde cada face está sujeita a uma tensão e já são utilizadas por outros pesquisadores em madeira, metal e concreto (YILDIRIM; SENGUL, 2011; BERTOLDO; SANTOS GORSKI; GONÇALVES, 2020; KOHLHAUSER; HELLMICH, 2012).

$$C_{ij} = \rho V^2 \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} C \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_2} & \frac{-\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{31}}{E_1} & \frac{-\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{32}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Alguns desses procedimentos já são normatizados para diferentes tipos de materiais. No Brasil as principais normas sobre ultrassom são a NBR 8802 para concreto (ABNT, 2019); a NBR 15521 para madeira (ABNT, 2007) e a NBR 15630 (ABNT, 2008) (argamassa de revestimento e assentamento). No âmbito internacional, destacam-se as normas ISO 16810 (ISO, 2012), ASTM A578 (ASTM, 2012) para aço e BS EN 12504-4 (BS, 2004) e ASTM C597 (ASTM, 2016) para concreto. Para solo, entretanto, não há ainda nenhuma regulamentação, devido à falta de dados suficientes para validação da técnica.

2.2 Solo como material de Construção

Se tratando de edificações, o solo, como material de construção, é empregado desde o ano 5000 a.C na forma de tijolos de terra crua, secos ao sol ou sombra (SANTIAGO, 2001). Diversas construções, hoje consideradas como de interesse social e cultural, foram construídas total ou parcialmente com solo compactado. As técnicas de construção com solo são muito comuns na Europa, sendo extremamente utilizadas em Portugal, a quem devemos o conhecimento das técnicas de construção com esse material, trazidas ao Brasil durante o período de colonização. No território português, assim como no brasileiro e nos demais países que fizeram ou fazem uso desse material, a problemática gira em torno do mesmo ponto, que é o abandono, associado ao avançado estágio de degradação e a falta de conhecimento e investimentos para investigar as razões e os processos de intervenção necessários (FERREIRA; LIMA et al., 2017).

O processo de intervenção nesse caso é ainda mais complicado pois requer uma avaliação das características dos materiais utilizados durante a construção, sendo essas informações a base para a elaboração de recomendações para o plano de intervenções relativo aos materiais e técnicas a utilizar. Em países onde o valor cultural desse tipo de construção já é mais

consolidado, há um movimento para a documentação destes tipos de dados, como uma espécie de repositório de materiais históricos que une informações relativas à história e as propriedades e desempenho dos materiais (SILVA; CORREIA, 2017) além do mapeamento dessas construções no país (ANTUNES; CUNHA; BENTO, 2017).

No Brasil, pouco ainda é feito em relação a preservação, monitoramento e restauração dessas construções. Na cidade de São Paulo, que foi um dos primeiros lugares de assentamento dos portugueses durante o período colonial, havia grande limitação de materiais e revestimentos, que culminou na necessidade da adoção de técnicas mais simples, como o caso da taipa e pau-a-pique (CAMPOS et al., 2017).

Um exemplo da negligência perante ao patrimônio histórico e cultural deu-se após as inundações ocorridas em 2010 na cidade de São Luiz do Paraitinga – SP, a qual acarretou na ruína do centro histórico da cidade, especificamente da Capela das Mercês, construída de taipa de pilão e pau-a-pique, construída em meados do fim do século XVIII. Embora fosse possível a sua recuperação, com estudos inclusive utilizando o ensaio de ultrassom (FERREIRA; DEZEN-KEMPTER; SARRO, 2014), a comoção diante do ocorrido pressionou o poder público a tomar decisões de cunho político, e não técnico, ignorando o aspecto cultural envolvido. Nesse caso, manteve-se o desenho, dando lugar a uma estrutura de concreto e alvenaria, ao invés da taipa de pilão (CAMPOS et al., 2017).

Dessa forma, o ultrassom se mostra como uma técnica que, se validada, pode contribuir significativamente nas fases de construção, monitoramento, inspeção, reabilitação e restauro dessas edificações, como um meio rápido e não invasivo de caracterização do material e do estado de degradação da estrutura.

No que diz respeito a demais obras geotécnicas, como barragens e camadas de pavimento, geralmente são constituídas com um, dois ou vários tipos de solo, o qual também é compactado em camadas com espessuras pré-determinadas, compactadas com energia normatizada, determinada em laboratório e reproduzida em campo. Para garantir que as condições estudadas em laboratório tenham sido reproduzidas em campo, é necessário um rigoroso controle tecnológico de compactação, através da determinação e comparação da umidade e massa específica dos dois ambientes (BRASIL, 2006).

No caso de pavimentos, muitos dos problemas associados a pavimentação ocorrem principalmente por erros durante a compactação do solo, onde a falta de controle tecnológico de compactação pode causar aumentos exorbitantes nos custos de execução e manutenção

destas construções (BERNUCCI et al., 2006). Embora grande parte da economia brasileira seja movimentada através do modal rodoviário, segundo o Relatório Anual da Confederação Nacional de Transportes (CNT), de um total de 1.720.700 km de rodovias, apenas cerca de 12,5% destas (213.453 km) são pavimentadas. Em relação a especificamente as condições do pavimento, 52,4% apresentam problemas, sendo 35% considerados como regular, 13,7% ruim e 3,7% péssimo. Com isso, o Brasil ocupa a 93ª posição, entre 141 países, no ranking de competitividade global no quesito de qualidade da infraestrutura viária, sendo responsável pela 116ª posição no que diz respeito a qualidade da via especificamente (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES, 2019).

As etapas de concepção dessas estruturas, ocorre inicialmente em laboratório, onde além da caracterização física (massa específica dos sólidos (ABNT, 2016a), granulometria (ABNT, 2016d), limites (ABNT, 2016c,b) são realizados ensaios de compactação (ABNT, 2016e) para a determinação do teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima, parâmetros que são utilizados na compactação em campo. Este ensaio pode ser realizado a partir de três energias de compactação (normal, intermediária e modificada). A diferença entre estas se dá na variação da umidade e densidade do maciço gerado, onde quanto maior a energia maior a densidade e menor o teor de umidade. Estes parâmetros são utilizados para o controle tecnológico da compactação dos solos em diversos tipos de aplicação (edificações, pavimentação e obras geotécnicas).

Em campo são realizados ensaios para verificar se os parâmetros de umidade e massa específica obtidos em laboratório foram reproduzidos em campo, para determinação do grau de compactação. Caso o grau de compactação, relação entre a massa específica de campo e de laboratório, não tenha sido atingido o material tem que ser recompactado (BRASIL, 2006). Para garantir a qualidade do controle é necessário que sejam realizadas diversas repetições, com o número máximo de amostras possíveis, para posterior análise através de testes estatísticos. Dentre as desvantagens desses métodos destrutivos está justamente a dificuldade da repetibilidade dos ensaios.

Atualmente, existem estudos sobre um método de compactação inteligente, responsável por avaliar as propriedades mecânicas do solo, de forma contínua, através do monitoramento da vibração do solo durante a compactação com rolo compactador. Esse método possibilita identificar problemas de falta ou excesso de compactação em tempo real (ANJAN KUMAR et al., 2016; CARRASCO; TERADO; WANG et al., 2014; MEEHAN et al., 2017; XU; CHANG,

2016). Assim como o método não destrutivo o qual os autores tentam correlacionar o método de compactação inteligente, o Light Weight Deflectometer (LWD), tem-se a problemática de que os equipamentos para esse fim são custosos e de difícil manutenção (FERRI, 2013; HUANG; WANG, 2013; PREUSSLER, 2007).

Assim, uma tecnologia com custo menor e que possibilite a realização de ensaios em massa seria extremamente vantajosa para o setor. Com vista ao panorama exposto identifica-se a importância de desenvolver tecnologias apropriadas para caracterizar com eficiência o solo, principal material utilizado em obras geotécnicas. Portanto, estudar a viabilidade de utilizar uma técnica não destrutiva para tal, por exemplo, ensaios com ultrassom é oportuno e atual.

2.3 Ultrassom aplicado à solos compactados

Há diversas pesquisas sobre a determinação das propriedades físicas e mecânicas do solo com o uso da técnica de ultrassom, buscando informações tanto para análises laboratoriais como para estruturas em serviço e construções históricas (BANDEIRA, 2009; SARRO, 2017; FERREIRA; GONÇALVES et al., 2013; FERREIRA; SARRO et al., 2014; HOFFMANN; GONÇALVES, 2010; WANG et al., 2006; MILANI et al., 2008; LIANG et al., 2013; DIAS et al., 2012; YESILLER; HANSON; USMEN, 2001; LIANG et al., 2013; D'ORAZIO et al., 2008). Entretanto, há divergências entre os resultados obtidos pelos pesquisadores, tanto pela variabilidade dos materiais analisados como pelas metodologias adotadas. Este comportamento indica que há a necessidade de mais estudos nesta área para validar o método aplicado ao solo.

Por exemplo, Ferreira (2003) determinou a VPU em corpos de prova confeccionados com diversas composições de solo, tanto arenoso quanto argiloso, juntamente com cimento ou cal e silicato de sódio. Neste caso, o autor obteve velocidade em uma faixa de 250 a 3000 m.s⁻¹ para solos arenosos e entre 250 e 2200 m.s⁻¹ para solos argilosos. A grande variação das faixas de velocidade foram em função da variabilidade de dias de cura entre as leituras, além da própria diferença de composição das misturas. Hoffmann e Gonçalves (2010), também realizaram ensaios de ultrassom em solos compactados e estabilizados quimicamente (solo cimento) e obtiveram VPU de aproximadamente 1300 m.s⁻¹, respectivamente. Por sua vez, Ferreira, Gonçalves et al. (2013), para solos arenosos estabilizados com cimento, obtiveram valores de VPU entre 2000 e 2888 m.s⁻¹ para os traços distintos.

Para solo puro com características arenosas, Bandeira (2009) obteve valores de velocidade de 943, 748 e 445 m.s⁻¹, para variações de umidade de 26,3%, 28,5% e 30,1%, respectivamente. Outros autores, que também utilizaram o ultrassom em corpos de prova de solo arenoso, obtiveram valores bem acima dos obtidos por Bandeira (2009), com faixa de VPU entre 1190 e 1376 m.s⁻¹ (FERREIRA; GONÇALVES et al., 2013). Esses estudos mostram que, mesmo para solos de grupos de textura semelhantes, as VPUs podem variar consideravelmente. Essas variações são associadas a diversos fatores, entre eles a diferença do teor de umidade e consequentemente da microestrutura do material. Essas observações corroboram com o comportamento mecânico do material, o qual também varia em função do teor de umidade, conforme observado por Bui et al. (2014).

Há influência ainda da temperatura, tendo em vista que o estado físico da água e, consequentemente, do esqueleto do solo, também se alteram com essa variação. Assim, há também o estudo do ensaio de ultrassom aplicado à solos solos congelados (temperaturas abaixo de 2°C), fator que segundo Bucur (2006) aumenta consideravelmente a velocidade. Esse efeito foi observado em um estudo com solos argilosos, siltosos e arenosos, ensaiados a temperaturas entre -2 e -18 °C (WANG et al., 2006). Neste caso, as VPUs, tanto de compressão quanto de cisalhamento, foram afetadas, sendo a relação entre elas inversamente proporcional a temperatura e diretamente proporcional ao tamanho das partículas. Esse comportamento corrobora com outros estudos utilizando o ensaio de ultrassom e também com o comportamento mecânico desses solos congelados (CHRIST; PARK, 2009; DONGQING et al., 2016; LI et al., 2018).

Outro fator que deve ser considerado durante a realização do ensaio de ultrassom em elementos construtivos em terra é a variação da velocidade em função das camadas de compactação. Ciano e Gibbins (2012) compararam corpos de prova cilíndricos moldados em laboratório e extraídos de paredes de construção em terra, onde os resultados indicaram que a compactação das camadas subsequentes leva sempre a uma compactação adicional das camadas inferiores. Sarro, Ferreira e Galletto (2015) também analisaram a influência da massa específica e umidade de mini-painéis de solo-cimento com ensaios de ultrassom, além da influência das camadas de compactação. Estes autores concluíram que a velocidade é influenciada diretamente por ambos índices físicos, sendo inversamente proporcional a umidade e diretamente proporcional a massa específica, além do fato da VPU ser maior para a camada mais inferior do painel.

Assim, os valores de velocidade podem ser distintos a depender do tipo de solo, dos seus índices físicos, principalmente umidade e densidade, se houve adições, como cal ou cimento, de temperaturas extremas no instante de leitura com ultrassom e até do ponto de realização da leitura. Dessa forma, esses parâmetros, principalmente físicos e microestruturais, precisam ser considerados durante os ensaios, para que seja possível estabelecer um padrão confiável entre os resultados.

A literatura indica ainda que é possível utilizar o ultrassom para estimar propriedades mecânicas, como a resistência e as constantes elásticas, as quais são de extremo interesse na área. Liang et al. (2013) comparou a eficiência dos ensaios de ultrassom aplicada ao solo com outras duas técnicas não destrutivas (pacometria e imagens termográficas), durante a inspeção de edificações antigas construídas em terra. Nesse caso, o ultrassom destacou por apresentar melhor correlação com a resistência mecânica, mais rapidez durante a execução do ensaio e obtenção dos resultados.

Ainda nesse sentido, Bandeira (2009) realizou ensaios de ultrassom em corpos de prova de solo compactado e determinou a correlação entre velocidade e resistência à compressão simples, onde obteve um coeficiente de determinação de $R^2=0,83$. Também para solo puro, do tipo argiloso, a correlações obtidas por Sarro (2017) para a resistência a compressão simples não confinada versus a velocidade longitudinal obtida por ultrassom em corpos de prova expostos ao ambiente laboratorial foi igual a 0,89. Ferreira, Gonçalves et al. (2013) atingiram correlações ainda maiores (entre 0,91 e 0,98) durante o estudo do ultrassom aplicado a mini-painéis e solo-cimento.

No que diz respeito ao comportamento elástico, é usual aplicar teorias clássicas de caracterização de outros materiais para o solo, entretanto, nesse material, há certa dificuldade para estabelecer os limites de tensões e deformações que separam o estado elástico do estado plástico. Essa dificuldade provém do fato de que há, no trecho inicial na curva tensão-deformação, a acomodação dos grãos do solo, que dificulta a identificação do trecho elástico do material (CAPUTO, 1988). Apesar disso, a determinação do comportamento do material frente a deformações é extremamente necessária para projetar e garantir a segurança das barragens, camadas de pavimentos e outras obras geotécnicas está a determinação das deformações.

Atualmente, as constantes elásticas (E , G e ν) são obtidas através das curvas de tensão-deformação, geradas pelos dados de ensaios destrutivos (AASHTO, 2007; DNIT,

2010), geralmente o ensaio triaxial, pois este possibilita a determinação das deformações ao longo do ensaio, as quais variam de acordo com o tipo de material (arenoso e argiloso) e com o estado da amostra (solta ou compacta).

É mais comum a determinação de apenas o módulo de elasticidade longitudinal através de ensaios destrutivos devido à complexidade dos métodos para a obtenção do módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson. A mais comum é através do ensaio de compressão não confinada, segundo a NBR 8522 (ABNT, 2021), norma direcionada para concreto, a qual necessita de adaptação dos ciclos de carregamento e velocidade de aplicação de carga quando utilizado em solos compactados. Há ainda, na literatura, relatos da estimativa desses parâmetros através da transformada da curva de tensão-deformação obtida no ensaio triaxial através do modelo hiperbólico, proposto por Duncan e Chang (1970) (ADEM; VANAPALLI, 2015).

No que diz respeito ao módulo de cisalhamento o ensaio triaxial também é utilizado, sendo estudadas ainda fórmulas empíricas de obtenção, bem como ensaios não destrutivos (CAI et al., 2015; KU; MAYNE, 2013; SENG; TANAKA, 2012; YU; JI; LI, 2016; CHUANCHENG; WENXIA; HAIYUE, 2012).

Na Tab. 2.1 estão dispostos alguns resultados obtidos na literatura sobre a determinação destes parâmetros. Os valores variam de acordo com o tipo de solo, teor de umidade e técnica ou energia de compactação utilizada. A variabilidade entre as constantes elásticas existentes na literatura é muito grande quando obtidas por meio dos ensaios estáticos, tendo em vista que, conforme mencionado anteriormente, existe certa dificuldade na determinação do trecho elástico nas curvas tensão-deformação. Assim, é necessário que esses parâmetros possam ser determinados com o mínimo de interferência de fatores como a experiência do executor, por exemplo.

Os ensaios não destrutivos vêm justamente ao encontro a essa necessidade, já tendo mostrado potencial de uso na caracterização, controle, monitoramento e inspeção de diversos materiais, inclusive do setor da construção civil (concreto e argamassa). Para solo, embora a técnica de ultrassom ainda não esteja consolidada, pois há diversos fatores interferentes a investigar, já é possível afirmar que o ensaio tem grande potencial de utilização para esse material, principalmente no que diz respeito ao controle de compactação e caracterização mecânica.

Tabela 2.1: Constantes elásticas do solo obtidas a partir de ensaios destrutivos e não-destrutivos

Autor (s)	Material	E (MPa)	G (MPa)	Coefficiente de Poisson
Ensaio Destrutivo				
Sarro e Ferreira (2019)	Argiloso	1250 - 2500	-	-
Sarro (2017)	Argiloso	700 - 3500	-	-
Champiré et al. (2016)	Arenoso	1200 - 2800	-	0,15 - 0,20
Silva (2016)	Arenoso	-	-	0,31 - 0,38
Lombillo et al. (2014)	Arenoso	359	-	0,16
Bui et al. (2014)	Arenoso	580 - 950	-	0,17 - 0,22
		180 - 390		0,35 - 0,37
Miccoli et al. (2015)	Argiloso	2200	660	0,45
CAPUTO (1988)	Arenoso	-	-	0,20 - 0,40
Ensaio Não-Destrutivo				
Sarro e Ferreira (2019)	Argiloso	1500 - 2500	-	-
Sarro (2017)	Argiloso	1145 - 3329	400 - 1300	0,20 - 0,32
Ferreira, Gonçalves et al. (2013).	Arenoso	1659	607	0,36
Hoffmann e Gonçalves (2010)	Arenoso	1144	429	0,33
Christ e Park (2009)	Arenoso/ Siltoso	2500	750	0,37
Wang et al. (2006)	Argiloso	2750	1500	0,39

Adaptado de Sarro (2017)

Embora existam outras técnicas, como Bender Elements (CAI et al., 2015; SENG; TANAKA, 2012; LEE; YOON, 2015; INDRARATNA; HEITOR; RUJIKIATKAMJORN, 2012), que utilizam a propagação de ondas como meio de determinação do comportamento elástico (módulo de cisalhamento), o ultrassom pode ser uma alternativa mais prática e menos custosa.

Os resultados da literatura para ensaios não-destrutivos, se comparados com os obtidos por ensaios convencionais, apresentam-se muito mais consistentes entre si, mesmo com as variações de tipos de materiais (Tab. 2.1). Ainda assim, é necessário estudos mais aprofundados sobre a magnitude da real influência de fatores intrínsecos ao material (tipo de solo, umidade, densidade) na velocidade de propagação.

Há muitas divergências, por exemplo, referente a classificação do tipo de comportamento elástico do solo compactado. Os materiais, de forma geral, podem ser considerados, em relação ao seu comportamento elástico, como isotrópicos, onde suas propriedades independem da direção analisada (por exemplo, concreto) ou como ortotrópicos, quando

possuem planos definidos que dependem da direção ou plano considerado para a emissão da onda ultrassônica (por exemplo, a madeira) (BUCUR; ARCHER, 1984; BUCUR, 2006; VÁZQUEZ et al., 2015; COSTA et al., 2005).

Para o solo esse comportamento ainda não foi bem definido, uma vez que há diferentes formas de análise quando se trata do material, podendo este ser homogêneo, compactado em camadas, no formato de painéis ou corpos de prova cilíndricos, etc. Milani et al. (2008), que determinou as constantes elásticas de uma amostra arenosa compactada através da propagação de ondas ultrassônicas, considerou este material como ortotrópico. Outros autores, por sua vez, consideraram esse material como isotrópico (FERREIRA; GONÇALVES et al., 2013; FERREIRA; SARRO et al., 2014) e ainda anisotrópico (ROWSHANZAMIR; ASKARI, 2010).

Assim, busca-se que a técnica de ultrassom seja capaz de auxiliar na caracterização desse comportamento e de outros parâmetros importantes a respeito do material, bem como determinar as constantes elásticas (módulo de elasticidade, cisalhamento e coeficiente de Poisson), que apresentam complexidade, alto custo e tampouco são encontradas na literatura, de forma eficaz e mais fácil do que através dos ensaios destinados a este fim.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

A metodologia desse trabalho foi dividida em quatro etapas (Fig. 3.1), as quais foram abordadas nos artigos apresentados no capítulo 4, a depender do objetivo proposto. Neste caso, foram utilizadas duas amostras de solo distintas, sendo uma argilosa (S_1) e arenosa (S_2), ambas características da região de Limeira, SP. Esse materiais são objeto de pesquisas vinculadas ao grupo de pesquisa “Ensaaios Não Destrutivos na Construção Civil - ENDS-CC” cadastrado no CNPq (Processo: 40592) ao qual essa pesquisa está inserida. Na etapa 1, referente à caracterização física das amostras (S_1 e S_2), foram realizados ensaios de granulometria, massa específica, limites de consistência, além da caracterização química e mineralógica (Tab.3.1).



Figura 3.1: Esquema da metodologia geral utilizada para elaboração dos artigos

Tabela 3.1: Normas utilizadas para caracterização dos materiais

Normas	
NBR 7181 (ABNT, 2016d)	Solo – Análise Granulométrica
NBR 7180 (ABNT, 2016c)	Determinação do Limite de Plasticidade
NBR 6459 (ABNT, 2016b)	Determinação do Limite de Liquidez
NBR 6458 (ABNT, 2016a))	Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água
Caracterização química e mineralógica – MEV e FRX	

Além destes, também foi realizado o ensaio de compactação Proctor (ABNT, 2016e), utilizando as três energias de compactação (normal, intermediária e modificada), com o objetivo de definir a umidade ótima e massa específica seca máxima. A variação de energia foi realizada com o intuito de ter corpos de prova com diferentes índices físicos, principalmente umidade, massa específica, índices de vazios, porosidade e grau de saturação, tendo em vista que avaliar a influência desses parâmetros fazem parte dos objetivos propostos. Esses parâmetros foram utilizados para moldagem dos corpos de prova (CPs), os quais foram de dimensões e formatos distintos, a depender resultados esperados, resultando em 180 CPs (Tab. 3.2).

Tabela 3.2: Descrição das dimensões dos corpos de prova e condições de moldagem

Formato	Dimensões	Condições de moldagem	N° de CPs
Cilíndrico	50 mm de diâmetro e alturas de 50 a 300 mm (múltiplos de 50 mm)	Solo arenoso e argiloso, nas 3 energias de compactação	108
Cilíndrico	50 mm de diâmetro e 100 mm de altura	Solo argiloso, nas 3 energias de compactação	54
Cúbico	150 mm de aresta	Solo arenoso e argiloso, nas 3 energias de compactação	18

No que diz respeito aos equipamentos, foram utilizados dois modelos, a depender dos objetivos de cada ensaio, sendo:

- USLab (Agricef, Brasil): transdutores exponenciais de ondas de compressão e 45 kHz de frequência (Fig. 3.2a);

- Pundit (Proceq, Suíça): transdutores planos de ondas de compressão e 54 kHz de frequência e transdutores de ondas de cisalhamento e 40 kHz de frequência (Fig. 3.2b).

Dependendo do objetivo proposto, esse ensaio foi realizado imediatamente após a moldagem ou após um período de dias de exposição dos CPs em ambiente laboratorial. Todos esses períodos estão descritos nos artigos do capítulo 4.



Figura 3.2: Equipamentos de ultrassom (a) UsLab e (b) Pundit

Os corpos de prova cúbicos foram ainda submetidos a ensaios de compressão simples não-confinada, utilizando a prensa microprocessada CBR/Marshall. Em virtude da pandemia, os demais ensaios destrutivos programados para a etapa 3 não puderam ser realizados.

Todos os resultados obtidos foram analisados através do Software estatístico Origin Lab 8.1 por meio de teste como ANOVA, Tukey Test, Pearson, Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Erro quadrático médio (RMSE), Erro absoluto Médio (MAPE) e Regressão Linear Múltipla.

Capítulo 4

Artigos

Conforme permitido pelo Programa de Pós Graduação em Tecnologia da FT, a apresentação do desenvolvimento deste trabalho ocorreu em formato de artigos científicos. Esta sessão foi organizada de acordo com a ordem de publicação/submissão, cujos dados estão detalhados a seguir.

- Artigo 1

Título: "Experimental investigation of the UPV wavelength in compacted soil". Revista: Construction and Building Materials Status: Publicado em 22 de fevereiro de 2021. Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820338381>

- Artigo 2

Título: "Estimate of the dry density of compacted soils using ultrasonic pulse velocity and multiple linear regression models". Revista: Journal of Building Engineering Status: Submetido em 04 de Julho de 2022.

- Artigo 3

Título: "Elastic behavior of compacted soil using ultrasonic waves". Revista: Ultrasonics Status: Submetido em 04 de Julho de 2022.

4.1 Publicados

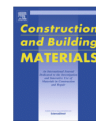
4.1.1 Artigo 1

Construction and Building Materials 272 (2021) 121834



Contents lists available at ScienceDirect
Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat



Experimental investigation of the UPV wavelength in compacted soil

W.S. Sarro, G.M. Assis, G.C.S. Ferreira*

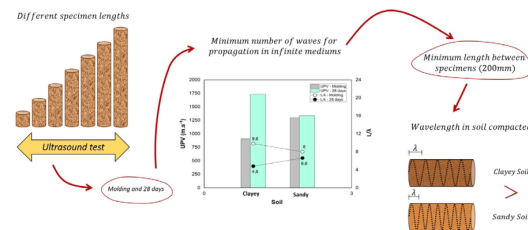
University of Campinas, School of Technology, 1888 Paschoal Marinho, Limeira, São Paulo, Brazil



HIGHLIGHTS

- There was no great variation in wavelength sizes between sandy and clayey soil.
- For the frequency of 45 kHz, specimens of at least 200 mm are required.
- Between 5 and 7 waves are required to have flat waves.
- The smallest discontinuity detected by the ultrasound was between 8 and 19 mm.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
 Received 27 August 2020
 Received in revised form 6 November 2020
 Accepted 21 November 2020

Keywords:
 Ultrasonic pulse velocity
 NDT
 Non-destructive tests
 Physical-mechanical characterization
 Soil characterization

ABSTRACT

Considering this parameter, the minimum length of a soil test specimen to be compacted, to enable its characterization, was determined using ultrasonic testing. The experimental stage involved the production of specimens in different lengths for two types of soils (clayey and sandy) and three compaction energies (normal, intermediate, and modified). Ultrasound tests were performed after molding (0 days) and 28 days of compaction, using 45 kHz frequency longitudinal transducers and compression wave. The results indicated that the minimum length of the specimen should be 200 mm when the velocity stabilization occurred for the Clayey and Sandy soils. However, the factors considered (transducer frequency, compaction energy and apparent specific mass) may infer significant changes in wavelength.

© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Soil is a versatile material that can be applied in various sectors of construction as supporting or construction material. The knowledge about the physical and mechanical properties of soils- micro-structure and macro-structure - is essential to obtain the desired performance of constructions that use it as constructive or support material [1–3].

However, given that soil is a natural material- thus translating into significant heterogeneities between the types of soils and conditions of use (in natura or compacted)-, more advanced technologies are required to characterize soil samples. Given this context, ultrasound tests can be highlighted as a non-destructive method commonly used in the characterization and classification of other construction materials such as metal alloys, polymers, wood, concretes and mortars [4–8]. In addition to its validation in other materials, ultrasound is distinguished by the possibility of its "in situ" application, greater representatives results in relation to the structure or construction element analyzed, and velocity in obtaining the results.

* Corresponding author.
 E-mail address: gisleiva@unicamp.br (G.C.S. Ferreira).

W.S. Sarro, G.M. Assis and G.C.S. Ferreira

Construction and Building Materials 272 (2021) 121834

Regarding the use of this technique in compacted soils, the literature presents promising results on the determination of soil suction, elastic properties, estimation of mechanical strength, quality control and inspection of earth constructions [9–12,6,13,1,14].

However, some theoretical concepts that involve this technique must be respected to ensure that the results obtained are reliable. When performing an ultrasound test and considering the propagation of ultrasonic waves of compression (P) in relation to the sample's length, it is verified that the distance between the transducers (emitter and receiver) close to the wavelength (λ) results in a finite path. This condition contradicts the theoretical concepts about the propagation of acoustic waves (infinite path), causing an effect of reflection and refraction of the waves (dispersive path), which can result in the propagation of the wave across the material's surface [2,15–17]. Therefore, a minimum number of waves traversing the material during the ultrasound test is required to obtain a volume wave, thus ensuring its propagation in infinite paths. For such, the specimen's length (or dimension of the element under analysis) must conform to the frequency of the transducer used [18,16,19–21,15].

According to the Guidebook on non-destructive testing of concrete [22], there is a minimum dimension of the workpiece that must be respected according to the frequency of the transducer used for the test, and such dimension cannot be shorter than the wavelength. This concept was studied in wood specimens [18,21], having been observed that the ultrasound tests on this material should be carried out on samples that provide 3 minimum wavelengths in the material, which is related to the sample dimensions and frequency of the transducers. The results also indicated that there is a critical point between the L/λ ratio, from which the UPV becomes constant, corresponding to 3λ as the minimum number [21].

There are few studies on the influence of the frequency of transducers on the UPV in cementitious materials (concrete, mortar, paste) and the distance between transducers; however, the approach on the wavelength was not direct [23,24].

Wavelength is approached in the geotechnical area in studies on seismic refractions and surface waves, methods that characterize land as a function of UPV in depth, using low frequencies (≤ 10 Hz) to enable the achievement of results in great depths [25–29]. However, low frequency transducers do not meet the specifics of compacted soils due to low saturation and smaller dimensions of the construction elements and specimens.

Therefore, each material requires a minimum distance between the transducers, i.e., a minimum length of the specimen or construction element, to meet the condition of an infinite path considering the stabilization of UPV values and frequency of transducers available during testing. Therefore the aim of this study is to determine the minimum length that compacted soil specimens must be made to obey the infinite path condition.

2. Materials and experimental procedures

2.1. Materials and preparation of specimens

Two soil samples S1 (Clayey) and S2 (Sandy) were used in this study. The aim of selecting soils with different classifications was to verify if the UPV is sensitive to changes in the granulometric arrangement, since the size of the grains directly interferes with the physical indexes of the compacted material.

The materials used were collected and later prepared for the sample characterization tests. The preparation including the separation of clods using sieve of 4.8 mm in diameter and drying in an oven for 24 h at 105°C according to the procedures described in NBR 6457 [30]. The physical characterization of samples includes

the respective granulometric curves [31], specific mass of solids [32] and plasticity indices [33,34].

The specimens used in this study were molded according to parameters determined in compaction tests (Proctor's method), i.e., maximum apparent dry mass (γ_{dmax}) and optimum moisture content (OMC), considering the three energies of compaction (normal, intermediate and modified) according to NBR 7182 [35].

To fulfill the aim of this study – minimum specimen length – cylindrical specimens sized 50 mm in diameter and 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 and 400 mm in length (Fig. 1a). The molds were made with PVC tubes which received a side cut in the direction of each preset length, required to extract the specimen from the molds after compaction- especially those larger than 200 mm. Stainless steel clamps ($\phi = 8$ inches) were used to avoid the loss of material during the manufacture of the specimens, varying from two to five clamps according to the specimen's length (Fig. 1b).

The compaction was performed according to the parameters of γ_{dmax} and OMC, defined in the Proctor tests, according to three compaction energies (normal, intermediate and modified). Therefore, it was decided to fix the heights of the compaction layers according to each specimen length, ranging from 6.7 mm to 37.5 mm. When considering soil types (2), compaction energies (3), length of the molds (60) and 3 repetitions for each condition analyzed, 108 specimens were required (Fig. 2).

2.2. Ultrasound tests

Ultrasound tests were performed using UsLab equipment (Agricel, Brazil), with longitudinal wave transducers and 45 kHz frequency exponential transducers (Fig. 3a). These tests were performed after 0, 7 and 28 days of the compaction of the specimens, considering the perpendicular transmission of the ultrasonic pulse to the compacted layers (Fig. 3b). The adoption of the compaction ages was necessary to verify the effects of the variation in the moisture content (MC) at the ultrasonic pulse velocity (UPV) and, consequently, on the λ .

From the propagation time of the ultrasonic wave, the UPV values (Eq. 1) and the wavelength (Eq. 2) were calculated, considering the frequency of the transducers used (45 kHz). As there is no standard for compacted soil, the procedures described in the concrete and wood ultrasound standards were adapted [36–38].

$$V = \frac{L \text{ (cm)}}{t \text{ (}\mu\text{s)}} \times 10^6 \text{ (m/s)} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{V \text{ (m/s)}}{f \text{ (Hz)}} \text{ (m)} \quad (2)$$

Based on the calculations of λ (Eq. 2) and of each condition established in the methodology, the minimum L required to stabilize

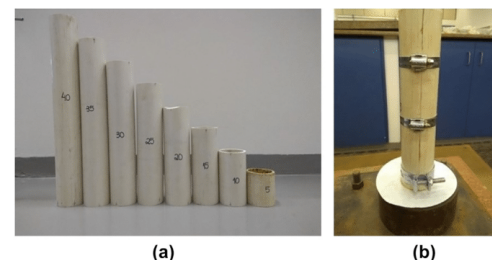


Fig. 1. PVC molds used for wavelength determination (λ) (a) and Adaptation of side-cut pipes and clamps (b).

W.S. Sarro, G.M. Assis and G.C.S. Ferreira

Construction and Building Materials 272 (2021) 121834

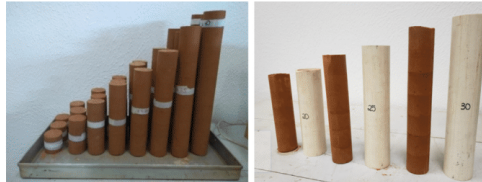


Fig. 2. Test specimens exposed in the laboratory.

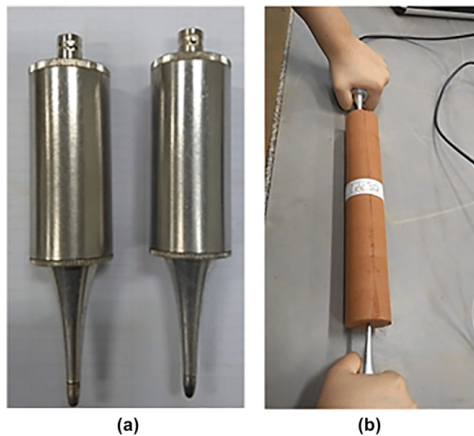


Fig. 3. (a) 45 kHz exponential transducers (b) Ultrasound test on specimens.

the UPV was determined, which indicates the propagation of the ultrasonic wave in infinite paths [22,21].

As identified in the literature [39,40,7,17,41], there are some factors that directly influence the UPV (MC and specific apparent mass). To verify whether these factors also influenced the λ values of compacted soil samples, statistical analyses were made between the soil types, compaction energy and MC. The hypothesis test method was used with the aid of the Origin software.

3. Results and discussions

From the granulometric curves obtained for the soil samples S1 and S2 (Fig. 4), it was possible to identify them as sandy-silt clay (55% clay, 23% sand and 22% silt) and clayey-silt sand (9% clay, 77% sand and 14% silt), with specific gravity of the grains equal to 27.9 kN.m^{-3} and 26.5 kN.m^{-3} , respectively. The physical and plasticity parameters used for the classification two soil samples, according to the USCS (Unique Soil Classification System) and HRB (Highway Research Board) methods, indicated that samples S1 and S2 presented low plasticity, with a plasticity index equal to 10 and 13, respectively. The S1 sample was classified as A-5/ML [42] and the sample S2 as A-2-4/SC [43] according to the methods HRB and USCS, respectively. Clayey soils require higher MC than sandy soils to obtain the limits of plasticity and liquidity due to the greater surface area presented and minerals present of this soil.

Fig. 5 and Table 1 show the compaction curves and physical indexes of the two soil samples (S1 and S2), respectively. The increased density coincides with increasing compacting energy

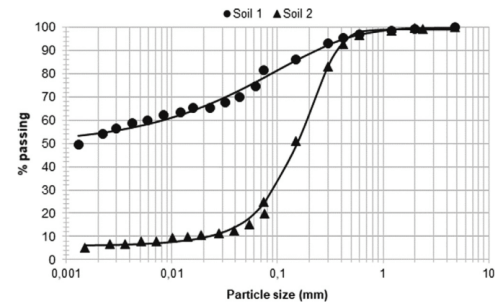


Fig. 4. Particle size distribution of soil samples S1 and S2.

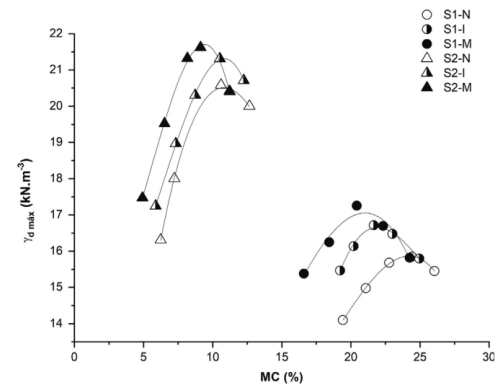


Fig. 5. Compaction curves of soil samples S1 and S2, according to compaction energy (Normal - N; Intermediate - I; Modified - M).

(N, I, M), which is justified for obtaining a higher grain content per unit volume. Furthermore, the shape of the curves (S1: open; S2: closed) are characteristic of behavior of clayey and sandy soil [43,44].

However, these parameters are changed when the samples are exposed to the environment, without controlling the loss of MC. Such modifications were considered in this research, being the specimens tested both after molding and after 28 days of exposure to the laboratory environment. The loss of water in this period changed the saturation conditions of the specimens, providing an increase in the void index for all the compaction energies (Table 1). The reduction in soil moisture content compacted unsaturated cause changes in its microstructure, both in the grain arrangement as in its rigidity. This is because the equivalent effective stress as a result of capillary forces, increases with decreasing saturation and the size of soil particles, which also affects the behavior of obtaining values UPV [45]. Therefore, in ultrasound tests, the size and shape of the particles and the moisture content must be account.

Based on the literature, specifically in the ultrasound test in compacted soil, the UPV is directly influenced by the moisture content [39,44,17,41,10]. In other studies, values UPV clay soil samples were stabilized after 3 days from compaction [40,46,17]. This was confirmed by statistical analysis (Paired-Samples T Test) considering the data obtained after 3, 30, 60 and 120 days after compaction, which were identified in the same homogeneous group.

Table 1
Physical properties of the soils by compaction energy and period.

Period	Soil	Identification	MC (%)	Yd (kN/m ³)	Voids	Porosity (%)	Saturation (%)
Molding	S1	S1-N	23,4	15,9	0,79	44,0	83,0
		S1-I	21,9	16,7	0,72	41,7	84,6
		S1-M	20,7	17,4	0,66	39,7	87,8
	S2	S2-N	10,6	20,6	0,36	26,7	73,0
		S2-I	9,6	21,2	0,34	25,5	72,1
		S2-M	8,7	21,7	0,31	23,9	55,4
28 days	S1	S1-N	19,2	13,5	1,1	52,4	48,7
		S1-I	18,4	14,0	0,99	49,8	51,7
		S1-M	17,1	14,7	0,95	48,6	50,4
	S2	S2-N	9,1	17,9	0,49	32,7	49,6
		S2-I	8,6	18,3	0,45	30,9	50,8
		S2-M	7,6	17,8	0,41	29,1	48,8

Table 2 presents the mean values of UPV, standard deviation (SD) and standard errors (SE), obtained in soil specimens S1 and S2, compacted in the three energies. The same statistical data are presented graphically in Fig. 6.

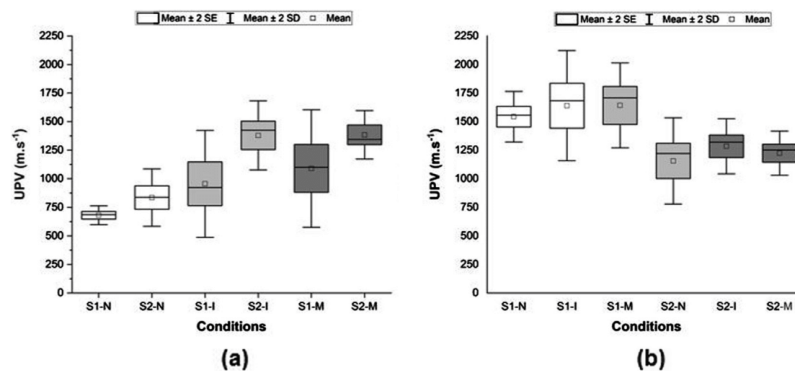
According to the hypothesis test- which allows us to reject or not a statistical hypothesis via the evidence provided by the sample (Paired Samples t-test)- the variation between 7 and 28 days was, on average, 15%, 9.5% and 13.5%, for normal, intermediate and modified energies, respectively. This behavior can be justified by the type of soil (clayey), which present OMC values above 20%, resulting in a moisture loss proportional to the MC when considering the same period (7 and 28 days). Moreover, according to the same hypotheses applied to the results of S1, there is no statistically significant difference between the periods of 7 and 28 days (p-value ≤ 0.05), except for the modified energy (p-value ≥ 0.05).

The S2 sample did not present significant UPV variation (p-value ≥ 0.05) after 7 and 28 days of specimens molding, considering the three compaction energies (N, I and M) (Fig. 6). This behavior is due to the type of soil (clayey-silt sand), which requires less OMC for compaction, resulting in a faster moisture stabilization. Other authors observed the same behavior when comparing the UPV values of the sandy soil sample after 2 and 7 days of molding, only obtaining a 5% UPV variation in this period [40].

Regarding the type of soil (S1 and S2), the UPVs were lower for S1 when obtained after molding. This is due to the greater attenuation of the compression wave, which is greater with a higher moisture content, since there are more capillary forces related to suction pressure [2,47,48]. However, after 7 and 28 days, the values were higher for the S1 sample, for the three compaction energies. Some studies that the ultrasonic velocities are lower for granular

Table 2
Analysis of variance (ANOVA) considering the UPV of molding and after 28 days.

Condition	Molding			28 days		
	Mean (m.s ⁻¹)	SD	SE	Mean (m.s ⁻¹)	SD	SE
S1 - N	680,6	41,3	16,9	1542,8	110,8	45,2
S1 - I	955,7	233,9	95,5	1641,9	185,9	83,1
S1 - M	1379,3	151,4	61,8	1283,9	120,5	49,2
S2 - N	835,0	125,6	51,3	1639,3	241,3	98,5
S2 - I	1090,2	257,2	105,0	1156,3	189,0	77,1
S2 - M	1384,4	105,9	43,2	1223,9	96,8	39,5

**Fig. 6.** UPV variation according to compaction energy (N; I; M), soil samples (S1 and S2) and time after molding (a) and 28 days (b).

W.S. Sarro, G.M. Assis and G.C.S. Ferreira

Construction and Building Materials 272 (2021) 121834

soils [41,49], corroborating the results of this study. The discrepancy between the UPV values of the soils is due to the difference in specific surface between the two types of soil studied and, consequently, attenuation waves depends on interparticles contact area. The smaller the grain size, the greater the specific surface and consequently the greater the contact area between particles [45,2,50].

In heterogeneous material, dispersion and attenuation of the ultrasonic wave depends on the micro-structure of the medium, such as grains of different sizes and properties and the presence of water (adsorbed, capillary and, free). In this case, the higher the humidity, the greater the attenuation of the longitudinal waves [51,47]. Thus, the increase in UPV in compacted soils, after reducing the moisture content in relation to the optimum compaction humidity, occurs because the intergranular stresses that occur in unsaturated soils (suction pressure) increase the stiffness and facilitate the passage of ultrasonic wave in granular materials [45].

After 28 days, comparing the UPV value between both soils (S1 and S2), it was found that all molding conditions presented a statistically significant difference (Fig. 6b and Table 3). However, when comparing the different conditions (N, I and M) for the same soil, there was no difference (p -value ≤ 0.05). This behavior reinforces that there was stabilization of the UPV for both soils after the exposure period.

In unsaturated conditions, as analyzed in this study, one should take into consideration that the results are also influenced by stiffness increase caused during the period of exposure to the environment. The moisture loss process in which the test samples were subjected causes the increase inter-particle forces, due to pressure difference between air and water. This difference is related to the suction pressure, which is greater the lower the degree of saturation [45].

The specimens size must be bigger than λ to have the real velocity- similar to that which spreads in a free path (plane wave) [18,20,52]. Therefore, the UPV variation between the specimens of different dimensions, especially smaller, due to the fact that the surface wave is not a plane wave.

Considering the main objective of this research, it was determined how many wavelengths pass in each specimen dimension (50 mm to 300 mm) in order to identify from which dimension the wave becomes flat. UPV stability was not found in specimens with MC nearby to OMC, regardless of the λ and compaction energy. As reported by other authors, MC is the factor that influences UPV the values [46,41,39,17,44,49,41,53]. Performed a similar analysis on compacted soil panels for 14 days and also verified that the UPV increases according to the loss of moisture in the panels, despite the reduction of the apparent specific mass values [54].

Therefore, the lower the UPV, the shorter the λ and, consequently, the greater the number of waves traversing the material.

This behavior was observed in the results of UPV obtained shortly after the molding of the specimens, a condition with MC nearby to OMC, resulting in 1.6 to 20.6 waves travelling through the specimen (Fig. 7).

After 28 days – and consequently a decrease in MC – there was an increase in UPV in S1, also reflecting the decrease in λ values. For S2, this same behavior was only observed the normal compaction energy, with intermediate and modified energies identified an increase in λ .

Another effect that the variation of the specimen's length may cause is the dissipation of part of the energy used during compaction due to the friction of the grains with mold's walls, which translates into non-linear variations of the physical indices, directly influencing the UPV. This relationship between voids, porosity and moisture content of compacted soils has already been evaluated using the propagation of ultrasonic waves, and the technique has identified the same nonlinear behavior of these variables, with velocity being sensitive to void variations [47,1].

This effect is more evident in the clayey soil (S1), which presents the intrinsic behavior of its properties in relation to UPV – cohesion; shape and size of the grains – thus changing the microstructure of this type of soil in a non-linear way. It can thus be concluded that the size of the specimens used during the characterization of the soil infers greater interference in clayey soils than in sandy soils. According to the literature, the difference between the behavior of both soils may be related to the amplitude of the ultrasonic wave, depends on the contact area between the particles, which is higher for samples with less amount of voids. As this contact area increases, the amplitude is also increased, which causes a decrease in the path taken by the wave and, consequently, an increase in velocity [47,2].

This behavior corroborates only for the specimens tested after 28 days, with the UPV being higher for the soil with less voids and porosity (S2). After 28 days, even with a higher void index, the UPV was higher for the S1 soil. This behavior indicates that the amount of voids, did not interfere as much in the results as the changes in MC.

The UPV values obtained in specimens tested stability after the passage of 6.2 and 5.4 waves for the normal and intermediate energies, respectively, for the S1 sample. Specimens molded in the modified energy for this soil did not present UPV values that identified some type of stabilization according to number of waves. The stabilization of the S2 specimens analyzed after molding occurred with 7.2 and 4.9 waves, also for normal and intermediate energies, respectively. In specimens tested after 28 days, for S1 it stabilized after the passage of 5.3; 3.9 and 5.0 waves, for normal, intermediate and modified energies, respectively. For S2, stabilization occurred after 7.3; 5.6 and 7.4 waves, for normal, intermediate and modified energies, respectively.

Table 3
Comparison between mean conducted using Tukey Test.

Comparison		Molding		28 days	
		P-value	Sig	P-value	Sig
S1-N	S2-N	0,6188	0	0,0042	1
S1-I	S2-I	0,0020	1	0,0097	1
S1-M	S2-M	0,0054	0	0,0030	1
S1-N	S1-I	0,0832	0	0,9100	0
S1-N	S1-M	0,0029	1	0,9170	0
S1-I	S1-M	0,7417	0	1,0000	0
S2-N	S2-I	0,0001	1	0,7606	0
S2-N	S2-M	0,0001	1	0,9792	0
S2-I	S2-M	1,0000	0	0,9878	0

Sig = 1: the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig = 0: the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

W.S. Sarro, G.M. Assis and G.C.S. Ferreira

Construction and Building Materials 272 (2021) 121834

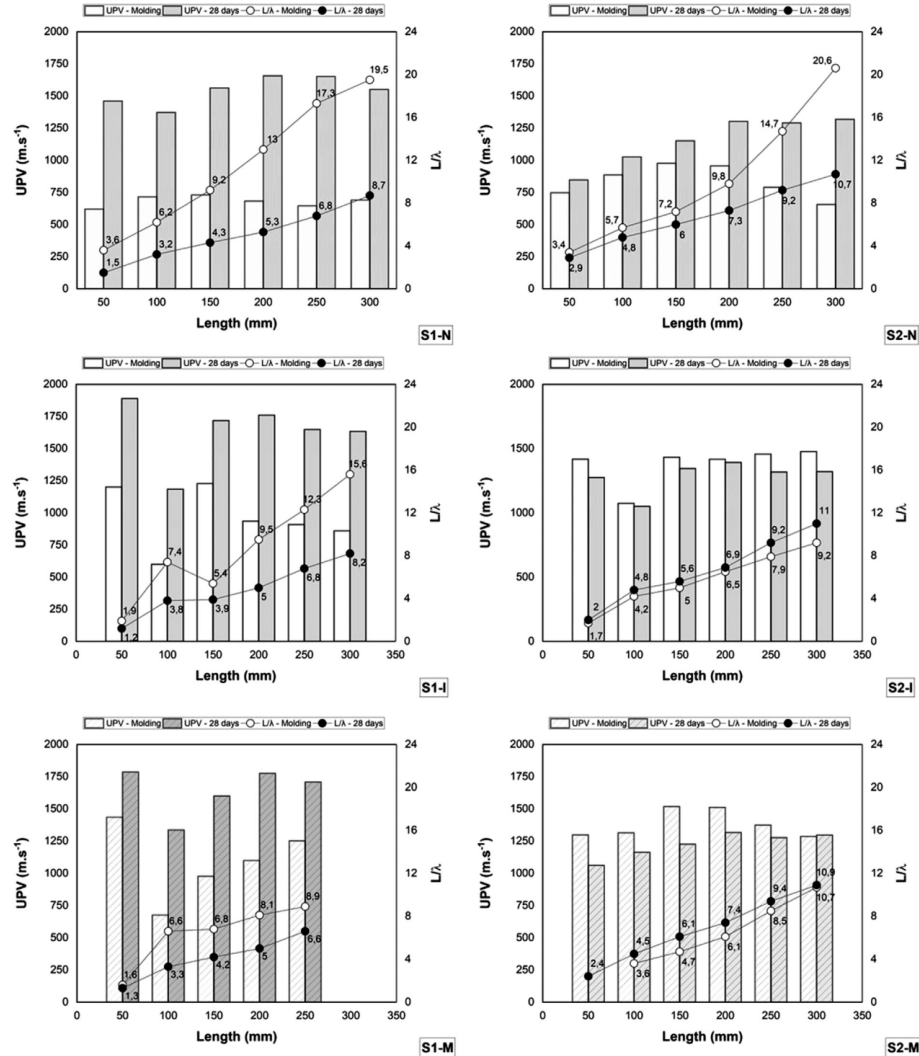


Fig. 7. UPV variation as a function of soil sample moisture content (S1 and S2) for each compaction energy (N, I and M) and specimen ages during tests (Molding and 28 days).

Although the intermediate energy showed a lower L/λ ratio, indicating the possibility of a smaller sample, this was also the condition that presented the highest standard deviation and standard error among the other energies considered, in S1 and S2 (Table 2).

In the case of this research, due to the frequency of the available transducers (45 kHz), the minimum length of 200 mm should be used, to guarantee at least 7 waves and, consequently, the propagation of waves in infinite media for all compaction energies, different from wood in which 3 waves must be guaranteed [18,21,19,20]. It should be noted that what will indicate the minimum length of the specimen will be the frequency of the

transducer available to perform the test such must be increased if the use of smaller specimens is required for to obtain the real velocity in the material (infinite paths).

In addition to the actual UPV, knowledge of the wavelength is of significant importance, as it is directly related to the size of the defect to be detected. If the size of the discontinuities is much larger than λ , they may not be detected, and the data are inaccurate [18]. In general, the smallest diameter of a discontinuity to be detected in the material must be in the order of $\lambda/2$, that is, for a 200 mm specimen, with 7 passing waves, the minimum discontinuity to be detected will be approximately 8 and 19 mm, for tests after molding and 28 days, respectively.

4. Conclusions

Considering the proposed objective and the results obtained in this study, it is possible to conclude that:

- To ensure volume waves and infinite paths using a 45 kHz transducer, the compacted soil specimens must be at least 150 mm in length for the intermediate energy and 200 mm in length for the normal and modified energies, considering the S1 and S2 samples. Therefore, the soil type did not interfere with the minimum length required for the specimens to be used in ultrasound tests. When considering this behavior, it is concluded that the minimum length of the specimen must be 200 mm for both soil types;
- Among the physical indices, MC was considered the factor with the greatest influence on UPV variations, considering that ultrasound was able to identify the variations of MC between the period of exposure of the specimens to the environment laboratory;
- When comparing the values of UPV of the same soil, varying the compaction energy, it was found that the MC presents an inversely proportional influence, i.e., UPV increases as the MC decreases;
- Soil S1 (clayey) showed distinct behavior when correlating UPV values with the number of waves obtained for each length of the specimen. The fact occurred in 100 mm specimens, in which UPV sharply decreases in all 3 compaction energies. Further studies related to changes in the microstructure of this type of soil in relation to the type of compaction energy are required to explain such results.

These results indicate an advance regarding the procedures of the ultrasound test in compacted soil, indicating that there is interference in the sample dimensions, which must be considered in order to have the real UPV in the material. From this, it is necessary to investigate further the influence of variation of physical indexes in UPV, mainly related to MC and porosity/voids. Such researches are necessary to make possible the use of ultrasound in different areas that have the soil as main building material, assisting in the characterization, technological control and inspection.

CRedit authorship contribution statement

W.S. Sarro: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing - original draft, Writing - review & editing. **G.M. Assis:** Conceptualization, Methodology. **G.C.S. Ferreira:** Supervision, Writing - review & editing, Project administration, Funding acquisition.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), Brazil (Proc. 405929/2016-1) for the research funding, the support fund for Teaching Research and Extension (FAPEX – UNICAMP, SP, Brazil) for the financial resources and the "Espaço da Escrita (UNICAMP, SP, Brazil) for the assistant in translating this paper.

References

- [1] J. Chen, H. Wang, Y. Yao, Experimental study of nonlinear ultrasonic behavior of soil materials during the compaction, *Ultrasonics* 69 (2016) 19–24.
- [2] A. Gheibi, A. Hedayat, Ultrasonic investigation of granular materials subjected to compression and crushing, *Ultrasonics* 87 (2018) 112–125.
- [3] J. Canivell, J.J. Martín-del Río, F. Alejandro, J. García-Heras, A. Jiménez-Aguilar, Considerations on the physical and mechanical properties of lime-stabilized rammed earth walls and their evaluation by ultrasonic pulse velocity testing, *Construction and Building Materials* 191 (2018) 826–836.
- [4] D.S. Andrade, E.P. Figueiredo, Estimativa da resistência à compressão do concreto por meio de ensaios não destrutivos: Estudo de caso da estrutura do estádio Maracanã, in: *Anais do 54 Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Maceió -, Alagoas, 2012*, pp. 1–16.
- [5] Q.-B. Bui, S. Hans, J.-C. Morel, A.-P. Do, First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings, *Engineering Structures* 33 (12) (2011) 3690–3695.
- [6] M.V. Hoffmann, R. Gonçalves, Análise da qualidade da taipa de pilão por meio de ondas ultra-sônicas, in: *TerraBrasil 2010 III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, 2010*, p. 25.
- [7] F. Champiré, A. Fabbri, J.-C. Morel, H. Wong, F. McGregor, Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material, *Construction and Building Materials* 110 (2016) 70–78.
- [8] I. Lombillo, L. Villegas, E. Fodde, C. Thomas, In situ mechanical investigation of rammed earth: calibration of minor destructive testing, *Construction and Building Materials* 51 (2014) 451–460.
- [9] S. Kasap, D. Lakhanpal, C. Patzer, T. Mandziak, D. Fredlund, Ultrasonic measurements on a porous ceramic to determine soil suction, *Ultrasonics* 32 (5) (1994) 379–383.
- [10] N. Yesiller, G. Inci, C.J. Miller, Ultrasonic testing for compacted clayey soils, in: *Advances in Unsaturated Geotechnics*, ASCE, 2000, pp. 54–68.
- [11] M. Christ, J.-B. Park, Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils, *Cold Regions Science and Technology* 3 (58) (2009) 136–142.
- [12] G.C.d.S. Ferreira, W.d.S. Sarro, M. Hoffmann, R. Gonçalves, Influência das camadas de compactação em inspeções de painéis monolíticos de solo-cimento por ultrassom, in: *Abendi (Ed.), ConaEnd & Iev, São Paulo, SP, 2014*, pp. 1–10.
- [13] W.S. Sarro, G.C.S. Ferreira, Soil elastic modulus determined by ultrasound tests, *Soils and Rocks* 42 (2) (2019) 117–126.
- [14] W. Lin, A. Liu, W. Mao, Use of acoustic emission to evaluate the micro-mechanical behavior of sands in single particle compression tests, *Ultrasonics* 99 (2019) 105962.
- [15] V. Samu, M. Guddati, Nondestructive length estimation of an embedded pile through combined analysis of transverse and longitudinal waves, *NDT & E International* 110 (2020) 102203.
- [16] A.J. Trinca, R. Gonçalves, Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira, *Revista Árvore* 33 (1) (2009) 177–184.
- [17] W. Sarro, G. Ferreira, S. Cardoso, G. Macedo, Influência dos transdutores no ensaio de ultrassom aplicado a solo compactado, in: *14a Conferência sobre tecnologia de equipamentos. Anais...Rio de Janeiro: Abendi, 2017*, pp. 1–10.
- [18] V. Bucur, *Acoustics of Wood*, second ed., Springer, France, 2006.
- [19] R. Gonçalves, R. Dijk, C. Bertoldo, 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, pp. 567–574.
- [20] D.M. Stangerlin, J.C. Gonzalez, R. Gonçalves, E.J. Santini, L. Calegari, R.R. de Melo, D.A. Gatto, Avaliação de tipos de ondas geradas por dois modelos de transdutores para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, *Floresta* 40 (4).
- [21] F.G.R.D. Oliveira, K.P. Miller, M. Candian, A. Sales, Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultra-sônica em madeiras, *Revista Árvore* 30 (1) (2006) 141–145.
- [22] IAEA - International Atomic Energy Agency, Guidebook on Non-destructive Testing of Concrete Structures, no. 17 in Training Course Series, Vienna, 2002. <https://www.iaea.org/publications/6347/guidebook-on-non-destructive-testing-of-concrete-structures>.
- [23] M.F. Cosmes-Lopes, F. Castellanos, P.F.J. Cano-Barrita, Ultrasound frequency analysis for identification of aggregates and cement paste in concrete, *Ultrasonics* 73 (2017) 88–95, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.08.016>.
- [24] M. Chekroun, L. Le Marrec, O. Abraham, O. Durand, G. Villain, Analysis of coherent surface wave dispersion and attenuation for non-destructive testing of concrete, *Ultrasonics* 49 (8) (2009) 743–751.
- [25] F. Gouveia, I. Lopes, R.C. Gomes, Deeper vs profile from joint analysis of rayleigh wave data, *Engineering Geology* 202 (2016) 85–98.
- [26] I. Lopes, J. Santos, I. Almeida, T. Brito, O método das ondas sísmicas superficiais na caracterização geotécnica-caso de estudo, in: *Actas do 9. Congresso Nacional de Geotecnia*, vol. 1, 2004, pp. 277–286.
- [27] I. Lopes, J. Santos, I. Almeida, Ondas sísmicas superficiais: a sua utilização na caracterização geotécnica, in: *10 Congresso Nacional de Geotecnia, UNL, Lisboa, vol. 1, 2006*, pp. 217–226.
- [28] I. Lopes, J.A. Santos, R.C. Gomes, V s profile: measured versus empirical correlations-a lower tagus river valley example, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73 (4) (2014) 1127–1139.

W.S. Sarro, G.M. Assis and G.C.S. Ferreira

Construction and Building Materials 272 (2021) 121834

- [29] C. Rodrigues, F. Bonito, F. Almeida, R. Moura, C. Cardoso, F. Constantino, Ondas de superfície na avaliação de parâmetros elásticos de solos: estudo comparativo com outros métodos sísmicos, in: 10 Congresso Nacional de Geotecnia, UNL, Lisboa, vol. 1, 2006, pp. 197–206.
- [30] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6457 - Amostras de solo-preparação para ensaios de compactação e ensaios, de caracterização (2016).
- [31] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7181 - Solo-análise granulométrica, 2016.
- [32] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7182 - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente, e da absorção de água (2016).
- [33] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6459 -, Solo: Determinação do limite de liquidez (2016).
- [34] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7180 -, Solo: Determinação do limite de plasticidade (2016).
- [35] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7182 -, Solo: Ensaio de compactação (2016).
- [36] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15521 - Ensaios não destrutivos - Ultra-som - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas (2007).
- [37] British Standards, BS 12504-4, Testing concrete-part 4: determination of ultrasonic pulse velocity (2004).
- [38] ASTM, C597 - Standard test method for pulse velocity through concrete (2016).
- [39] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, S. Hans, P. Walker, Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth, *Construction and Building Materials* 54 (2014) 163–169.
- [40] S. Cardoso, G. Assis, W. Sarro, G. Ferreira, Caracterização de misturas de solo e areia descartada de fundição, in: 6th International Workshop Advances in Cleaner Production São Paulo, SP, 2017, pp. 1–12.
- [41] I. Teixeira, W. Sarro, S. Cardoso, G. Assis, G. Ferreira, 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, Anais...Ouro Preto, MG: ANPET, 2015, pp. 196–207.
- [42] I. Teixeira, Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento, Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2014.
- [43] G.M. de Assis, N.C. de Lima, G.C. dos Santos Ferreira, W. de Sousa Sarro, Módulo de elasticidade de solo arenoso compactado utilizando ensaios de ultrassom, in: XXXII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, 2018, pp. 1921–1932.
- [44] W.S. Sarro, Constantes elásticas de solo compactado a partir do ensaio de ultrassom, Mestrado, Faculdade de Tecnologia - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP (2017).
- [45] G.C. Cho, J.C. Santamarina, Unsaturated particulate materials-particle-level studies, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127 (1) (2001) 84–96.
- [46] W. Sarro, G. Ferreira, A. Galletto, Técnica de ultrassom aplicada na inspeção de edificações construídas em solo compactado, in: 57 Congresso Brasileiro do Concreto-Ibracon, ISSN, 2015, pp. 2175–8182.
- [47] W. Wu, J. Zhao, Effect of water content on p-wave attenuation across a rock fracture filled with granular materials, *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48 (2) (2015) 867–871.
- [48] Z. Fournier, D. Geromichalos, S. Herminghaus, M. Kohonen, F. Mugele, M. Scheel, M. Schulz, B. Schulz, C. Schier, R. Seemann, et al., Mechanical properties of wet granular materials, *Journal of Physics: Condensed Matter* 17 (9) (2005) S477.
- [49] R. Sharma, A. Gupta, Continuous wave acoustic method for determination of moisture content in agricultural soil, *Computers and Electronics in Agriculture* 73 (2) (2010) 105–111.
- [50] M.W. Knuth, H.J. Tobin, C. Marone, Evolution of ultrasonic velocity and dynamic elastic moduli with shear strain in granular layers, *Granular Matter* 15 (5) (2013) 499–515.
- [51] R. Jasiński, Identification of stress states in compressed masonry walls using a non-destructive technique (ndt), *Materials* 13 (12) (2020) 2852.
- [52] R. Andreucci, Ensaio por ultrassom, São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos.
- [53] D.-Y. Wang, Y.-L. Zhu, W. Ma, Y.-H. Niu, Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soils, *Cold Regions Science and Technology* 44 (1) (2006) 12–19.
- [54] E. Bernat-Maso, E. Teneva, C. Escrig, L. Gil, Ultrasound transmission method to assess raw earthen materials, *Construction and Building Materials* 156 (2017) 555–564.

4.2 Submetidos

4.2.1 Artigo 2

Estimate of the dry density of compacted soils using ultrasonic pulse velocity and multiple linear regression models

Sarro, W. S., Teixeira, I., Ferreira, G. C. S.*

University of Campinas - School of Technology - 1888 Paschoal Marmo, Limeira, São Paulo, Brazil

Abstract

Ultrasound tests still have a limited database regarding the application of the technique in compacted soil. Part of the available literature investigates the technique in chemically stabilized soils, for purposes of mechanical characterization, which causes difficulty in the direct comparison of results and validation of technique. Despite this, there is a consensus that the ultrasonic pulse velocity (UPV) is affected by variations in density and moisture content (MC), which indicates the potential of using in technological control of compaction. Thus, the aim of this research was to estimate the dry density (DD) of samples of compacted soil using the physical indices and UPV. For this, specimens were molded in different MC (dry and wet branch) and submitted to the ultrasound test subsequently. From that, three multiple linear regression models (MLR) were proposed to estimate DD, using the voids index, porosity and saturation, respectively, together with the MC and UPV. Both presented satisfactory results with correlations greater than 0.93 and an absolute and percentage difference of target density of approximately 0.4 kN/m^3 and $\pm 3\%$, respectively.

Keywords: Non-destructive testing, Technological Control, Wave Velocity, Compaction Control

Acronyms and Symbols			
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity	e	Voids index
XRF	X-Ray Fluorescence	p	Porosity
XRD	X-Ray Diffraction	DS	Degree of Saturation
OMC	Optimum Moisture Content	MLR	Multiple Linear Regression
MDD	Maximum Dry Density	RMSE	Root Mean Square Error
MC	Moisture Content	MAPE	Mean Absolute Percentage Error
T	Transmitter Transducer	FSP	Fibers Saturation Point
R	Receiving Transducer	TDR	Time Domain Reflectometry
t	Time	V_p	Longitudinal Wave
L	Distance between the transducers	V_s	Shear Wave
SLR	Simple Linear Regression		

1. Introduction

Soil is a natural and heterogeneous material, used for a long time in the most diverse areas of civil engineering (buildings, roads, dams) as raw material for construction. For each of these applications, the types of soil indicated vary and, consequently, so does their physical, chemical and mechanical properties.

*Corresponding author

Email address: gialeiva@unicamp.br (Ferreira, G. C. S.)

Despite this, if the used soil requires its compaction, parameters such as moisture content and density must be determined in the laboratory, so that, later, these values can be reproduced in the field [1, 2]. In order to ensure that the structure will fulfill its function, it is necessary that the compaction control be conducted, which relates the laboratory investigation, carried out according to the type of soil and application of the material, with the conditions performed in the field.

The conventional methods used for this control may present inaccuracies and restrictions, due to execution of test and time required to obtain results for each of the civil engineering applications [3, 4, 5]. Therefore, new technologies which support in controlling and in the investigation of several structures in compacted soils are needed.

In this sense, there is the ultrasound test, nondestructive method commonly used in the characterization, classification, technological control and inspections of other materials such as concrete, steel and wood [6, 7, 8, 9, 10]. However, in compacted soil, in-depth studies are still needed to verify the effectiveness and facilitate its use. As a means of technological control of compacted soils, research on ultrasound are still incipient, particularly the difficulty of correlating the ultrasonic pulse velocity (UPV) with the required parameters for this control [11, 12, 13].

According to ultrasonic propagation theory, the UPV differs in solid, liquid and gaseous media [6]. Knowing this and bearing in mind that the soil is composed of a three-phase skeleton, (formed by solid particles, water and air) [14, 15, 16] it is necessary to investigate the influence of this micro-structure on propagation of waves to enable the use of ultrasound as a technique (or tool) for the technological control of compacted soil [17].

Most research about on soil ultrasound test is focused on the mechanical characterization of the rammed construction [13, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Thus, it is common for most of the data available in the literature to come from soil with some type of addition (cement, lime, industrial waste, etc.), making it difficult to directly compare the results. Regarding pure soil and mechanical characterization, correlations of 0.98 were obtained between the longitudinal elasticity module obtained by ultrasound and by compression tests, indicating that the technique allows the estimation of this parameter. Regarding pure soil and mechanical characterization, correlations of 0.98 were obtained between the longitudinal elasticity module obtained by ultrasound and by compression tests, indicating that the technique allows the estimation of this parameter [18]. When studying different moisture contents of rammed earth samples, it was also observed that, when chemically stabilized, the UPV is directly proportional to the compressive strength and density of the samples. This fact may not be confirmed when the ultrasound technique is used for compacted soils [20].

Regarding the use of ultrasound for technological control, there are still some observations made made by researchers that should be considered, such as the variation of UPV (as a function of moisture content and density of the materials) where the micro-structure of the soil change, due to presence of three phases in soil (air, solids and water). Thus, contemplating these variables alone is not enough, given that the micro-structure, especially the air content, are intrinsically related to changes in moisture content and density. Therefore, it is necessary to investigate other physical indices as well.

Despite the variability between soil compositions in the literature, the alteration effect of UPV due to the drying process of compacted soils was the focus of some authors, who concluded that this change is associated with free and interstitial water and the pressure difference in pores of that material [13, 18, 25].

Although in UPV chemically-stabilized materials indicate greater density and resistance, in pure soil this behavior differs according to the moisture content of the samples. Some authors have observed that depending on which branch of the compaction curve the moisture content of the specimen is located (dry or wet), the UPV can be directly or indirectly proportional [12, 20]. This fact makes it difficult to propose a model capable of predicting variables that are important in the technological control of the soil, such as density, together with the ultrasound test.

Part of the studies are based on simple linear regression models, formed by a dependent and an independent variable [12, 20]. As such, the estimation of any physical or mechanical soil parameter is complex because there are always several variables that interfere with the variable of interest. In addition, the seismic response test method itself is affected by several factors, such as lithological, physical and soil elasticity. Based on this, it is necessary to use multiple analyses for forecasting models.

Thus, considering that the density reflects on the sample's micro-structural arrangement, it is necessary

to study models that are capable of incorporating a greater number of independent variables, so that the micro-structure is correctly considered. Some studies have used multiple linear regression for the development of prediction models for the bulk modulus, shear modulus and Poisson's ratio, using porosity, density and velocity. The results presented by these authors were satisfactory, with a low percentage of error in the estimates [26]. There are also multiple models for estimating density and compressive strength [27, 28].

Therefore, the aim of this study was to investigate the influence of physical indices (moisture content, voids index, porosity and degree saturation) in the UPV to enable an estimated dry density with the aid of ultrasound test.

2. Experimental Procedures

2.1. Physical Characterization of Materials

The soil sample used in this research is lateritic clay, characteristic from metropolitan region of Campinas, Brazil. This soil was chosen as it has a high moisture content (MC) variation in the degree of compaction, which was necessary for this study.

After collected, the soil was prepared and stored according to the procedures described in standard [29]. The physical, chemical and mineralogical characteristics of this soil was performed according to the testing of grain density tests [30], particle size [31], plasticity and liquid limits [32, 33], X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD).

Table 1: Physical and chemical characteristics of the soil sample

Parameter	Value
Specific Gravity	27.9 kN.m ⁻³
Plasticity index	10%
Sand	23%
Silt	22%
Clay	55%
Al ₂ O ₃	27.2%
SiO ₂	36.8%
Fe ₂ O ₃	19.4%

The main minerals present in this soil (Fig. 1) are quartz and hematite, which are typical of lateric soils, together with mineral traces of clays (phyllosilicates) and kaolinite. These elements also were identified in XRF, within the reddish color, characteristic of lateritic clay soils, related to the greater presence of hematite (Fe₂O₃) and alumina (Al₂O₃) (Tab. 1).

2.2. Molding of Specimens

The compaction tests were performed previously to determine the optimal moisture content (OMC) and maximum dry density (MDD), for the three energies of compaction (normal, intermediate and modified) [34], subsequently used during the molding of the specimens (Fig. 2).

Six moisture contents were chosen from the compaction curves for each of energies in order to verify the behavior of the Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in relation to variations in moisture content and density. Three repetitions were made for each moisture content (MC) and compaction energy, totaling 54 samples (100 mm in height and 50 mm in diameter).

To ensure the accuracy of the density of the bodies of the test piece, the compaction was performed by controlling the height up the layers. The choice of compaction controlled by the height of layers and not by number of blows was in order to reproduce values as of the compaction curves.

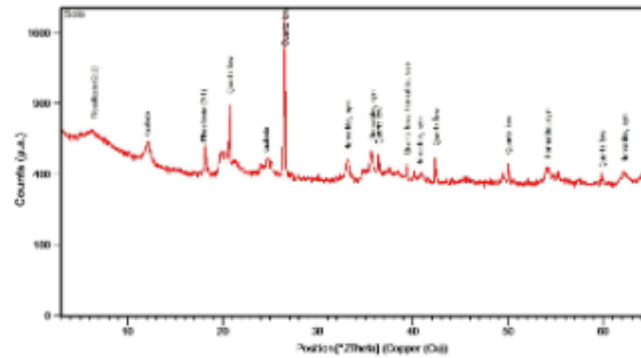


Figure 1: XRD diagram for the determining overall mineralogy of the soil

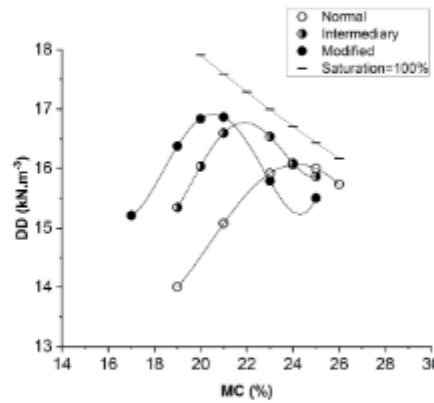


Figure 2: Compaction curves of soil according to compaction energy

2.3. Ultrasound Tests

The ultrasound equipment consists of a source, two transducers of exponential faces (transmitter and receiver) with 45 kHz of frequency (Fig.3). The source sends an electrical signal to transmitter transducer (T) composed of a piezoelectric material capable of converting the electric signal received in response acoustic or mechanical. This acoustic wave propagates in material, which is received by the receiving transducer (R), which also contains a piezoelectric material, again transforming the acoustic signal into an electric. From the receiver, the signal is sent back to the source, which indicates the time taken for the wave to travel through the tested material.

The wave transmission was made in relation to height (length) of the specimen. Therefore, the propagation of ultrasonic waves occurred through the layers' compaction, following standard procedures for

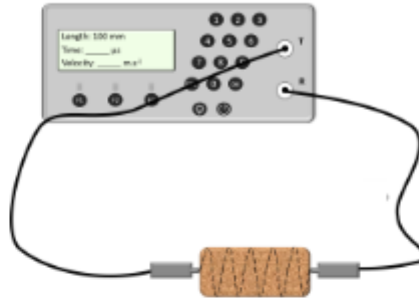


Figure 3: Operation and execution of the ultrasound test

ultrasound tests on other types of materials [35, 36, 37].

$$UPV = \frac{L}{t} \quad (1)$$

120 The test measures the wave propagation times (t) in materials, which allow the determination of UPV in materials (Eq. 1) together with the distance between the transducers (L). This procedure was performed immediately after molding of the test specimens to ensure same conditions during tests.

2.4. Analysis of results

125 The physical index of specimens were individually correlated with UPV using the simple linear regression model (SLR). Based on the literature, this modeling provides efficiency to estimate mechanical properties (mechanical resistance, elastic constants). However, as observed in other researches, the relationship between the UPV and only the physical indices may not be amenable to analysis by this method, due to its non-linear behavior as a function of a single independent variable [12, 21]. Therefore, using the OriginPro software we established a comparison between several regression models (Linear multiple, Polynomial, Sinusoidal, Weibull, Lowess) so that the best regression model could be defined, based on three independent variables.

130 The choice of dependent (DD) and independent (MC and UPV) variables as fixed in order to generate the model was based on what was observed by other studies, where UPV is able to detect variations in MC and DD [12, 13, 18, 25]. Although the test was able to detect these variations, it cannot identify whether the UPV obtained is located in the dry or wet branch of the compaction curve. Besides that, the same UPV value can be related to various MC and DD value. Because of this, as a third independent variable, three physical indices linked to the material's micro-structure (voids index - e , porosity - P and degree of saturation - DS) were adopted, generating three distinct models.

Among the regression models available in the OriginLab software, the best response was obtained through multiple linear regression (MLR) (Eq. 2).

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (2)$$

135 With the MLR model, we can estimate a dependent variable (Y) from independent variables ($x_1, x_2, \dots, x_n$), the respective linear (β_0) and angular ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$) coefficients. The random error (ε) is the difference between the target variable and obtained by the proposed model, which will be used during the performance analysis of these models.

140 There are some basic assumptions that will be evaluated to validate this model, in order to verify the linearity and correlation between the dependent and independent variables, in addition to normality, variance (homoscedasticity) and self-correlation between the model's residuals/errors.

Thus, Pearson, Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov tests were performed, in addition to graphical analysis to identify heteroscedasticity or homoscedasticity. All of these checks were performed with Origin Lab software.

Moreover, to analyze the reliability of the models, the standard deviation of the differences between the predicted and observed values (RMSE) (Eq. 3) was also considered, together with the size of the error in percentage (MAPE) (Eq. 4). In this case, the lower the RMSE and MAPE values, the better fit of the predictive model. RMSE corresponds to the Root Mean Square Error and MAPE the Mean Absolute Percentage Error.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (4)$$

3. Results and discussions

The shape of the compaction curves was consistent with the behavior of procedure, which involves compressing a larger number of grains per unit volume. Thus, it appears that the greater the compaction energy, the greater the MDD and, consequently, the lower the OMC, considering that less lubrication of the grains is necessary.

However, even if the aim of the compaction test is to determine the OMC and MDD (kN/m³) of soil, these were not parameters used to test ultrasound. Thus, six moisture contents were selected for molding, with three MC in dry branch and three in wet branch of the compaction curve. Due to characteristic behavior of compaction energy variation (increase in DD and decrease in MC) only contents of 19%, 21%, 23% and 25% are common to the three compaction energies (Tab. 2).

The ultrasound test was able to identify the different conditions of samples, with the UPV being directly proportional to increase in MC until OMC and inversely proportional for contents above of OMC. This indicates that the UPV in compacted soils has a behavior similar to relationship between the variation of MC and DD. This behavior is similar to compaction curve, where DD is directly proportional until OMC and inversely proportional after this content. In this case, this behavior is related to the capacity of expelling air promoted by compaction, which is successful up to certain levels, varying according to the type of soil. From the point identified as optimal (highest DD), the compaction no longer promotes the expulsion of air, being trapped between the soil and interstitial water, which causes the DD to decrease with increasing MC. The fact that this behavior is also observed when studying the UPV in different MC indicates the possibility of using the technique in characterization and control of compacted soil.

This distinct behavior of UPV from certain moisture levels was also observed in wood. In this material, the UPV is different before and after the fibers saturation point (FSP), a point that corresponds to the MC at which the entire capillary water has evaporated and the maximum amount of hygroscopic water remains in the wood, saturating the fiber walls [38].

In compacted soil, this pattern of behavior has already been observed in other studies [12, 14], being associated with the three-phase skeleton of the soil and the difference in propagation between this medium (solid-water-air). Thus, it was already expected that the highest UPV would be obtained for the largest volume of solids, correspondent to MDD and OMC. If correlated, the coefficients were not satisfactory for any of the three energies, confirming the non-linear behavior among the variables (Fig. 4).

Therefore, only a simple linear regression model would not be able to correlate the UPV to MC or DD. Thus, it is necessary that the wet and dry branches are analyzed individually or in conjunction with other parameters, such as the voids index, porosity and saturation.

Table 2: Molding MC and DD conditions obtained from polynomial adjustment and their respective physical index

Energy	Branch	Physical index				
		MC (%)	DD (kN.m-3)	e	P (%)	DS (%)
Normal	Dry	19.0	14.01	1.03	50.75	51.42
		21.0	15.08	0.92	47.93	62.06
		23.0	15.92	0.84	45.56	72.53
	Wet	24.0	16.07	0.77	43.65	82.86
		25.0	16.00	0.76	43.04	87.45
		26.0	15.74	0.76	43.03	89.87
Intermediate	Dry	19.0	15.35	0.78	43.76	89.62
		20.0	16.04	0.79	44.05	90.94
		21.0	16.60	0.80	44.51	82.60
	Wet	23.0	16.54	0.83	45.31	63.99
		24.0	16.09	0.77	43.60	71.17
		25.0	15.87	0.72	41.96	78.57
Modified	Dry	17.0	15.21	0.69	40.86	84.81
		19.0	16.38	0.70	41.10	89.27
		20.0	16.84	0.71	41.67	91.11
	Wet	21.0	16.87	0.74	42.67	89.98
		23.0	15.79	0.76	43.31	90.08
		25.0	15.50	0.80	44.56	78.32

MC: Moisture Content; DD: Dry Density; e: Voids Index; P: Porosity and DS: Saturation

120 The choice of void ratio and porosity parameters as independent variables, along with Saturation, is due to the fact that these indices are directly linked to the three-phase structure of the soil, which makes it possible to estimate the relationship between voids filled with air and water, which make up the soil micro-structure. Therefore, the analysis of these variables was essential, since the focus of this research is the DD of specimens, which is inversely proportional to amount of e ($R = -0.957$) and P ($R = -0.963$) (Eq. 5).

$$\begin{bmatrix} DD \\ MC \\ UPV \\ e \\ P \\ DS \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0.248 & 1 & & & & \\ 0.534 & -0.479 & 1 & & & \\ -0.957 & -0.193 & -0.532 & 1 & & \\ -0.963 & -0.156 & -0.554 & 0.997 & 1 & \\ 0.781 & 0.777 & 0.030 & -0.759 & -0.739 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

125 The general correlation between MC and DS was relatively low ($R = 0.777$) due to the different molding conditions (normal, intermediate and modified energies), with equal moisture contents for different values of DS. Due to the non-linear behavior of soil moisture and density variation, it was expected that the correlations between the other parameters were not satisfactory.

130 As seen in Fig.5, UPV is directly proportional in the dry branch and indirectly proportional in the wet branch. Therefore, the values obtained from the correlation of this parameter with the MC and DD are coherent, being equal to 0.534 and -0.479, respectively.

135 Using the OriginPro software, it was possible to determine a Multiple Linear Regression model (MLR), using UPV, MC, e , P and DS as independent variables, as a alternative to estimate the dependent variable DD (Tab. 3). From these equations (Model I, II and III), it is possible to estimate any DD value as long as the independent variables are known.

The R values indicate that the models explain 97% (Model I), 95% (Model II) and 94% (Model III) of the variations observed in the DD of the compacted soil, considering the voids index, porosity and Saturation, respectively, as the third independent variable. The target DD, if compared to that obtained using the

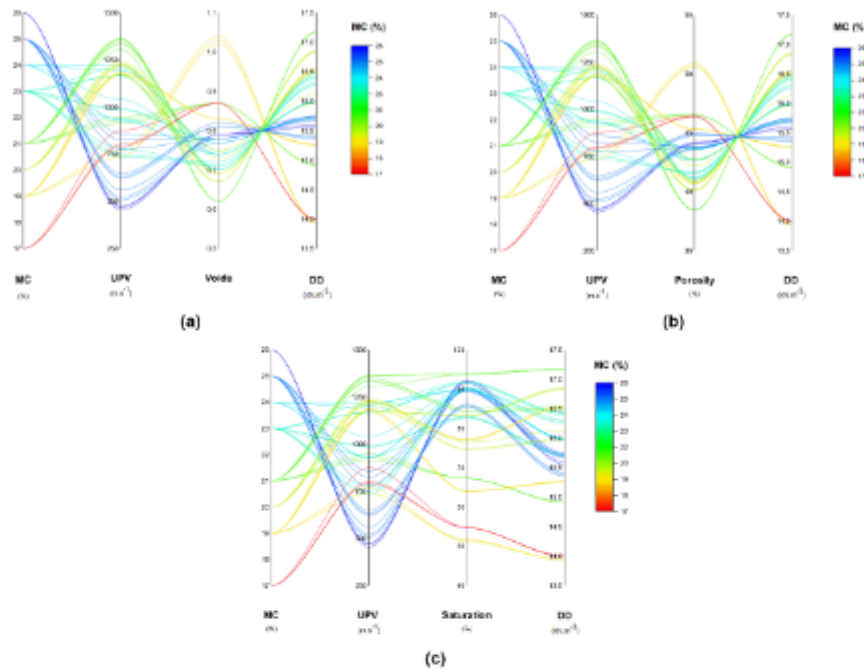


Figure 4: Relationship between physical index (Voids index (a), Porosity (b) and Saturation (c)), UPV, MC and DD

models I, II and III, showed an absolute and percentage difference of approximately 0.4 kN/m^3 and $\pm 3\%$, respectively.

The greatest difference between the values observed and predicted by the models were obtained by the intermediate compaction energy (Fig. 2b), with the values estimated by models I, II and III on average 0.52 kN/m^3 greater than the estimated values. For the other energies (Normal and Modified), the estimated DD values were 0.39 kN/m^3 and 0.48 kN/m^3 greater than those predicted, respectively (Fig. 2a and Fig. 2c). There was also a difference in the behavior of the UPV for the compaction intermediate energy when studying the wavelength in compacted sandy and clayey soil, with this energy being responsible for the largest deviation and standard error among the other energies [26].

The variables MC and UPV do not show satisfactory correlations with the DD (target variable) (Pearson test), because both variables behave in an inverse way when located in the dry and wet branch (Eq. 5). In the case of the data used all moisture contents were considered regardless of the branch in which it is located, so that only one model was proposed, covering both branches of the curve. Only variables e , P and DS are highly correlated with dependent variable (DD), considering that both deal with the soil micro-structure.

Due to this non-linear behavior between UPV and MC, the use of only UPV as a parameter for estimating DD is still uncertain. In compacted soil, when investigating the behavior of the UPV with loss of moisture through exposure to air, the increase in UPV can be associated with a decrease in the void ratio and porosity [25]. As with specimens with compaction moisture, UPV variations can be associated with the three-phase skeleton of this material (solids + air + water) [12].

In the equations developed in this study, we noticed that between the models developed and the variables

Table 3: Multiple Regression Models for DD with performance indices of equations				
Model	Equation	R	RMSE (kN.m^{-3})	MAPE (%)
I	$DD = 19.923 + 0.057MC + 0.001UPV - 7.685e$	0.97	0.52	2.90
II	$DD = 25.034 + 0.063MC + 0.001UPV - 0.257p$	0.95	0.53	3.01
III	$DD = 13.330 - 0.232MC + 0.001UPV + 0.087DS$	0.94	0.52	2.91

RMSE: Root Mean Square Error; MAPE: Mean Absolute Percentage Error

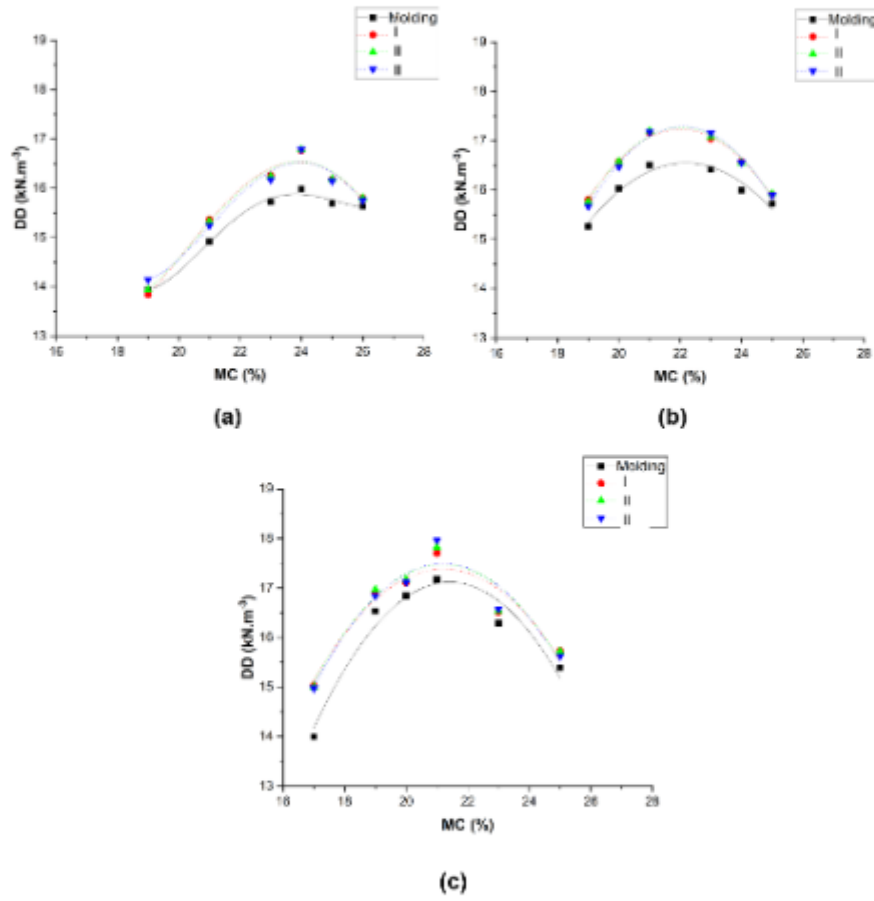


Figure 5: Comparison between the dry densities (DD) obtained with the data from the proctor test (molding) and with models I, II and III, for normal energies (a); intermediate (b) and modified (c)

considered (e , P and DS), the void ratio is the variable what most interferes in modeling, corroborating the literature.

According to the Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov normality test, the residues are identically distributed, that is, they were extracted significantly from a normally distributed population, considering the confidence level of 0.05. Regarding to the graph of residue versus order, there is no trend or patterns when analyzed in temporal order, with points that fall randomly around the central line, indicating that they are independent of each other (Fig. 6a). No heteroscedasticity problems were observed, thus indicating that the variance of errors/residuals is constant and each point contributes with an equal explanation for the variability the performed modeling (Fig. 6b).

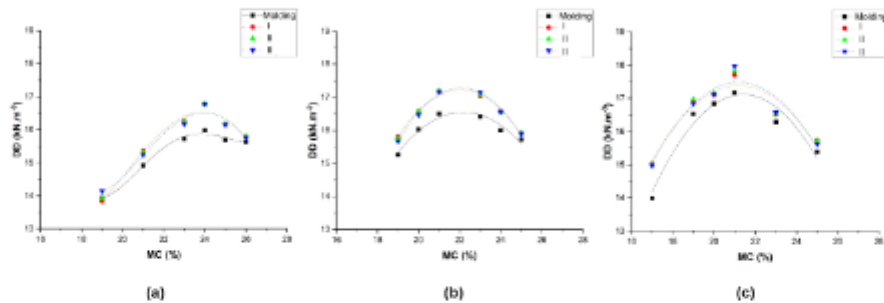


Figure 6: Relationships between residual errors and order (a) and between residual errors and predicted value (b) of equations of model I, II and III.

Some authors have combined the techniques of Time Domain Reflectometry (TDR) and P-wave to measure the in-situ density of soils, proposing a model that relates the UPV with the void ratio, porosity, degree of saturation, water stiffness, stiffness grain, shear modulus and suction. The model proposed by them allows the determination of the density in-situ with a difference of approximately 10% from that calculated by the conventional method using weight and volume of a field sample [14].

Analyzing specifically the relationship between DD and UPV, some authors also observed that there is a distinct linear relationship between some of the parameters analyzed in this research, where the same UPV has different values of DD. Thus, a relationship between longitudinal (V_P) and shear velocity (V_S) has been proposed to predict the dry density using a non-linear multi-parameter regression analysis method. According to the authors, V_S was added to the modeling considering that the V_P is directly affected by the pores of the material. The estimate, considering V_P and V_S , showed the smallest error of 0.45 g/cm³ [28]. These observations corroborate what was presented in this research, however, with greater errors than those observed in models I, II e III (Tab. 3 and Fig.2).

In order to confirm the effectiveness of the proposed models, the models I, II and III were tested using the other search data using the same soil sample studied in this research [25] predicted and estimated values for the specimens tested with ultrasound by the authors immediately after molding and after 28 days air exposure were compared, which showed a mean difference of 0.02 kN/m³ to 0.70 kN/m³ of the target values, respectively, for the models developed in this research (Tab.4).

Despite showing a greater difference than the estimated error for these models when used data after 28 days of exposure, the percentage of about 5% was even smaller than those obtained in the model developed using the TDR technique [14].

Table 4: Comparison of the results obtained and estimated for tests performed on clayey soil, after molding and after 28 days [26]

Condition	Energy	MC (%)	UPV (m.s)	e	P (%)	DS (%)	DD target kN.m	DD estimate ¹ kN.m
Molding	N	23,4	680,6	0,79	44	83,0	15,90	15,85
	I	21,9	955,7	0,72	41,7	84,6	16,70	16,60
	M	20,7	1379,3	0,66	39,7	87,8	17,40	17,49
28 days	N	19,2	1542,8	1,1	52,4	48,7	13,50	14,36
	I	18,4	1641,9	0,99	49,8	51,7	14,00	15,08
	M	17,1	1283,9	0,95	48,6	50,4	14,70	14,94

¹Average estimates for models I, II and III, shown in Tab.3

Conclusions

The ultrasound test was able to identify the different levels of MC and DD, whose behavior is similar to the compaction curve, with UPV being directly proportional in dry branch of the curve ($< \text{OMC}$) and inversely proportional in wet branch ($> \text{OMC}$). This non-linear behavior reflected directly in R values obtained by the Pearson test, causing a low correlation between the UPV - MC ($R = 0.534$) and UPV - DD ($R = -0.479$).

Thus, simple linear regression and the use of MC in conjunction with the UPV was not sufficient to estimate DD. In this case, we opted for the development of multiple linear regression models, using the physical indices that most refer to skeleton of compacted soil (solids - water - air). The aim was to identify, among the voids index, porosity and degree of saturation (Model I, II and III, respectively), which are more efficient to estimate DD in conjunction with ultrasound test.

The models presented satisfactory results, with correlations between 0.94 and 0.97, and average errors of approximately $\pm 3\%$. These results were better than those obtained in the literature for other modeling or combination of techniques.

The Model I, which used the voids index (ratio between the volume of voids and solids), had the best performance (lowest error and highest correlation) among the other models. This proves that, although the UPV is interfered by the medium in which it propagates, the voids (air) interfere more in variations of UPV than moisture content (water).

Therefore, as long as materials used are characterized and calibrated in the laboratory, it is possible to use proposed models to assist in quality control of structures of compacted soil, as long as the tests are carried out with transducers positioned perpendicularly (direct transmission). For practical purposes, it is also necessary that future studies verify the same scope in ultrasound tests performed with transducers positioned in parallel (transmission indirect) and in soils with other mineralogical constitutions.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), Brazil (Proc. 405929/2016-1) for the research funding, the support fund for Teaching Research and Extension (FAEPEX - UNICAMP, SP, Brazil) for the financial resources and the "Espaço da Escrita (UNICAMP, SP, Brazil) for the assistant in translating this paper.

References

- [1] M. Barman, M. Nazari, S. A. Imran, S. Commuri, M. Zaman, F. Bealany, D. Singh, Quality control of subgrade soil using intelligent compaction, *Innovative Infrastructure Solutions* 1 (1) (2016) 1–14.
- [2] D. Liu, M. Lin, S. Li, Real-time quality monitoring and control of highway compaction, *Automation in Construction* 62 (2016) 114–123.

- [3] ASTM, D4944 - standard test method for field determination of water (moisture) content of soil by the calcium carbide gas pressure tester (2016).
- 275 [4] ASTM, D1556 - standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method (2015).
- [5] ABNT, Nbr 12102: Solo — controle de compactação pelo método de hilt (2020).
- [6] V. Bucur, *Acoustics of Wood*, 2nd Edition, Springer, France, 2006.
- [7] C. Kohlhauser, C. Hellmich, Determination of poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: Application to metals and wood, *European Journal of Mechanics-A/Solids* 33 (2012) 82–98.
- 280 [8] C. Vázquez, R. Gonçalves, C. Bertoldo, V. Baño, A. Vega, J. Crespo, M. Guaita, Determination of the mechanical properties of castanea sativa mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods, *Wood Science and Technology* 49 (3) (2015) 607–622.
- [9] R. Gonçalves, M. Glaçon Júnior, I. M. Lopes, Determining the concrete stiffness matrix through ultrasonic testing, *Engenharia Agrícola* 31 (3) (2011) 427–437.
- 285 [10] R. Gonçalves, A. J. Trinca, D. G. P. Cerri, Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing, *Wood and fiber science* 43 (1) (2011) 64–75.
- [11] R. Liang, G. Hota, Y. Lei, Y. Li, D. Stanislawski, Y. Jiang, Nondestructive evaluation of historic hakka rammed earth structures, *Sustainability* 5 (1) (2011) 298–315.
- 290 [12] N. Yesiller, G. Inci, C. J. Miller, Ultrasonic testing for compacted clayey soils, in: *Advances in Unsaturated Geotechnics*, ASCE, 2000, pp. 54–68.
- [13] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, S. Hans, P. Walker, Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth, *Construction and Building materials* 54 (2014) 163–169.
- 295 [14] D. Pratta, K. A. Alshibli, W. M. Tanner, L. Roussel, Combined tdr and p-wave velocity measurements for the determination of in situ soil density—experimental study, *Geotechnical Testing Journal* 28 (6) (2005) 553–563.
- [15] W. Wu, J. Zhao, Effect of water content on p-wave attenuation across a rock fracture filled with granular materials, *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48 (2) (2015) 867–871.
- [16] G. C. Cho, J. C. Santamarina, Unsaturated particulate materials—particle-level studies, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 127 (1) (2001) 84–96.
- 300 [17] J. Chen, H. Wang, Y. Yao, Experimental study of nonlinear ultrasonic behavior of soil materials during the compaction, *Ultrasonics* 69 (2016) 19–24.
- [18] W. de Sousa Sarro, G. C. dos Santos Ferreira, Soil elastic modulus determined by ultrasound tests, *Soils and Rocks* 42 (2) (2019) 117–126.
- [19] R. Janiński, Identification of stress states in compressed masonry walls using a non-destructive technique (ndt), *Materials* 13 (12) (2020) 2852.
- 305 [20] J. Canivell, J. J. Martín-del Río, F. Alejandro, J. García-Heras, A. Jimenez-Aguilar, Considerations on the physical and mechanical properties of lime-stabilized rammed earth walls and their evaluation by ultrasonic pulse velocity testing, *Construction and Building Materials* 191 (2018) 826–836.
- [21] E. Bernat-Maso, E. Teneva, C. Escrig, L. Gil, Ultrasound transmission method to assess raw earthen materials, *Construction and Building Materials* 156 (2017) 555–564.
- 310 [22] F. Champiré, A. Fabbri, J.-C. Morel, H. Wong, F. McGregor, Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material, *Construction and Building Materials* 110 (2016) 70–78.
- [23] I. Lombillo, L. Villegas, E. Rodde, C. Thomas, In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing, *Construction and Building Materials* 51 (2014) 451–460.
- 315 [24] M. Christ, J.-B. Park, Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils, *Cold Regions Science and Technology* 3 (58) (2009) 136–142.
- [25] W. Sarro, G. Assis, G. Ferreira, Experimental investigation of the upv wavelength in compacted soil, *Construction and Building Materials* 272 (2021) 121834.
- [26] O. Uyanik, Estimation of the porosity of clay soils using seismic p-and s-wave velocities, *Journal of Applied Geophysics* 170 (2019) 103832.
- 320 [27] O. Uyanik, B. Çathoğlu, Determination of density from seismic velocities, in: *the 19th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey*, 2010, pp. 23–25.
- [28] R. Sharma, A. Gupta, Continuous wave acoustic method for determination of moisture content in agricultural soil, *Computers and electronics in agriculture* 73 (2) (2010) 105–111.
- 325 [29] ABNT, Nbr 6457: Amostras de solo — preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (2016).
- [30] ABNT, Nbr 7182-grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água (2016).
- [31] ABNT, Nbr 7181: 2016: Solo análise granulométrica (2016).
- [32] ABNT, Nbr 6459: 2016: Solo determinação do limite de liquidez (2016).
- 330 [33] ABNT, Nbr 7180: 2016: Solo determinação do limite de plasticidade (2016).
- [34] ABNT, Nbr 7182: Solo: Ensaio de compactação (2016).
- [35] ABNT, Nbr 15521: Ensaios não destrutivos — ultra-som — classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas (2007).
- [36] ASTM, C597 - standard test method for pulse velocity through concrete (2016).
- 335 [37] BS, 12504-4. testing concrete: part 4: determination of ultrasonic pulse velocity (2004).
- [38] R. Gonçalves, O. A. L. da Costa, et al., Influence of moisture content on longitudinal, radial, and tangential ultrasonic velocity for two brazilian wood species, *Wood and fiber Science* 40 (4) (2008) 580.

4.2.2 Artigo 3

Elastic behavior of compacted soil using ultrasonic waves

Sarro, W. S., Ferreira, G. C. S., Gonçalves, R.

University of Campinas - School of Technology - 1888 Paschoa Marmo, Limeira, São Paulo, Brazil

Abstract

Considering that soil as a construction material is generally compacted in layers, and that there is difficulty in the mechanical characterization of new and historic rammed earth, the influence of compaction layers was analyzed with ultrasound. Therefore, was produced cubic specimens (150mm edge) with two different soils (clayey and sandy) and three compaction energies (normal, intermediate and modified). The ultrasonic pulse velocity (UPV) (compression and shear wave) were determined considering three propagation and polarization axes (X, Y and Z), with Y being the compaction direction of the layers. The relation between velocities in axes and plans are used to analyze the soil behavior relating anisotropy. The results showed differences in elastic behavior between soil type and compaction energies. The sandy soil shows transverse isotropies for all compactions energy while clayey soil only for normal compaction, becoming isotropic for higher energy levels. The methodology using relationships between velocities in the axes and in the planes proved to be viable to evaluate the elastic behavior of soils.

Keywords: Non-destructive testing, Elastic Constants, Mechanical Characterization, Wave Velocity

1. Introduction

The rammed earth is one of the oldest architectural techniques, brought to Latin America by the Portuguese and Spanish, with numerous combinations of construction techniques based on the material available in the local territory [1, 2, 3]. Although it has an empirical character, the earthen constructions feature high durability, considering there are buildings identified as historical and cultural heritage that are still in operation or in rehabilitation conditions or structural reinforcement, having been built with the techniques of rammed earth [3, 4].

Despite this, even with a large number of historical buildings and modern architecture that use this material, the execution of the characterization, restoration and structural recovery of these constructions still presents difficulties [5, 6]. Part of these difficulties refer to mechanical characterization, more specifically related to elastic constants (modulus of elasticity, shear modulus and Poisson's coefficient). These parameters are of paramount importance to design and guarantee the safety of rammed earth constructions, since it is based on the determination of the deformations suffered under a certain tension. In the case of compacted earth, there is some difficulty in establishing the limits of stresses and deformations that separate the plastic and elastic state, which producing great variability in the results presented by authors for destructive tests [7, 5, 8].

Non-destructive techniques, specifically ultrasound, can help determine these parameters, it is a tool already used in the characterization of other materials (metal, wood, concrete) [9, 10, 11, 12]. However, several factors still need to be evaluated until this technique is fully validated to characterization soil. Preliminary research indicates a possibility of using the wave propagation to estimate the physical (moisture content and density) and mechanical behavior of compacted soil [5, 13, 7, 14]. Meanwhile, studies on the use of ultrasound testing in soil are still incipient, which justifies researches with this focus.

*Corresponding author

Email address: gisaleiva@unicamp.br (Gonçalves, R.)

In buildings that use the soil as construction material, compaction is carried out inside forms, in parallel layers, using the values of moisture content and density determined in the laboratory, which vary according to the texture of the material. This process is based on the experience of the professional responsible for compaction, who strikes the material until it reaches a “ringing” sound, which indicates that the degree of compaction has been reached [15]. As shown by Canivell et. al [16, 15, 8], in the few existing studies on rammed earth, the mechanical characterization is performed by destructive methods, using specimens extracted from the executed compacted walls, which generally do not represent the physical and mechanical properties of the analyzed constructive element, due to alterations caused by the vibration of the equipment used in the sample extraction. In addition, the composition of compacted walls in superimposed layers can also interfere with the destructive results, depending on the positioning in to the layers in relation to extraction. Due to the variability of land use forms for the various applications of civil engineering, there is still no consensus on the behavior of the mechanical response of these materials, that is, whether this is an anisotropic, orthotropic or isotropic material. In this case, the conclusions obtained by other authors depend on the element they are investigating (cylindrical, prismatic, overlapping or single-layer specimens, etc.) and the soil state (loose or compacted) [17, 18, 19, 20, 21].

The anisotropy of materials is expressed as the variations in the elastic strain tensor of the material as response to the applied stress tensor. An accurate estimation of material mechanical behavior requires simultaneous views on its structure and wave propagation phenomena [22]. Wave parameters are affected by material structure which acts as a filter and this interaction reveals sharply the anisotropy of this material [22]. The modulation of longitudinal and shear ultrasonic waves propagation by the material structure must be understood in terms of both propagation and polarization direction. For longitudinal waves, propagation and polarization are parallel and therefore occur on an axis. On the other hand, in shear waves the polarization occurs on a perpendicular axis and therefore concerns to a plane. The properties as the density, stiffness, shape and size of the materials elements affect the transmitted ultrasonic field because each structural element acts independently like an elementary resonator [22]. The spatial distribution of velocities and frequencies could explain the acoustical behavior of the material, which is associated with its anisotropy. So, as a first step in the estimation of material anisotropy by acoustic methods is to relate bulk velocities to symmetry axes [22]. One of the possible approaches for the estimation of the material anisotropy using acoustic method is to compute the ratios between velocities of longitudinal and transversal waves in the three main symmetry directions [22]. If the material has an isotropic behavior, there are no expected discrepancies between velocities in axes (longitudinal waves). In planes (shear waves) some differences are expected, because one same velocity can be obtained with propagation in ax Y and polarization in ax X or propagation in ax X and polarization in ax Y, for example. These differences are from the material inhomogeneities causing the wave birefringency.

Thus, considering that there is no consensus on the elastic behavior of compacted soil, that is, whether it is anisotropic, orthotropic or isotropic, the main aim of this study was verify, using ultrasound tests, if the compaction layers interfere in the isotropy of building elements in rammed earth. For this, the influence of the soil type and compaction energy was verified using relations among ultrasonic pulse velocity (UPV) obtained with compression and shear waves in pure soil.

2. Experimental Procedures

2.1. Materials

Were selected two soil samples of predominantly clay particle size (S_1) and sandy (S_2), so that the influence of soil type in the ultrasound testing could be analyzed. For physical and mineralogical characterization of materials, tests of particle size [23], density of grains [24], limits of consistency [25, 26] and X-Ray Fluorescence (XRF) were conducted, with results are summarized in Tab.1. In addition, were collected images from material for characterization of the micro-structure with the scanning electron microscopy (SEM).

Based on the results obtained and according to the Unified Soil Classification System (USCS), S_1 is a low plasticity clay (ML) and S_2 is a clayey sand (SC) (Fig 1). Although having different particle size, the main chemical elements identified in XRF and their compositions corroborate the types of soil in this study.

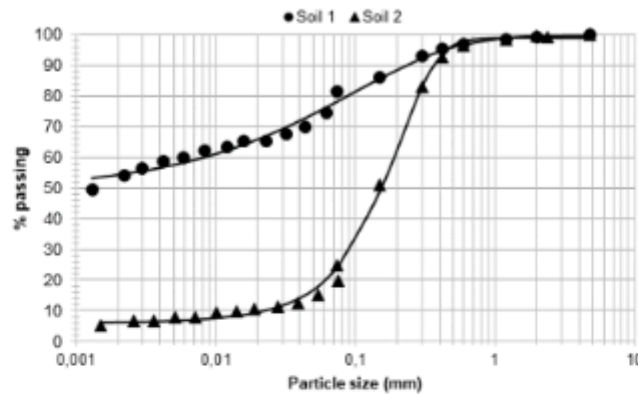


Figure 1: Particle size distribution of the selected soils [27]

The reddish color and higher density of S_1 is related to the predominance of Hematite (Fe_2O_3) that, together with a higher percentage of Alumina (Al_2O_3), corroborate with the characteristics of clayey lateritic soils. In S_2 sample, the predominance of Silica (SiO_2) corroborates the granulometric classification, indicating a material with a sandy granular texture, due to the greater amount of Quartz.

Table 1: Physical and chemical characteristics of the soils samples

Sample	DG ($kN.m^{-3}$)	Plasticity Index (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)
S1	27.9	10	33	22	55	27.2	36.8	19.4
S2	26.5	13	77	14	9	9.6	81.2	3.8

2.2. Molding

In order to determine the elastic behavior (Elasticity Modulus, Shear Modulus and Poisson) of compacted soil samples tested with ultrasound in different directions (Section 2.4) were molding cubic specimens with 150 mm, due to the need for establish the same dimensions for the faces, where the transducers will be positioned during the ultrasound tests, and to minimize the influence of the specimen size on this test [27]. The metal formwork used for these samples is the same those used for concrete tests [28], chosen due to the ease of demoulding the faces, with internal surface similar to formwork used in molding rammed earth panels [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 15].

To minimize the influence of the executor's experience, the compaction was performed manually, controlling the height of the compaction layers and the amount of material per layer. This procedure was followed in order to ensure a high degree of compaction and less variability between the density of samples. The optimal moisture content and maximum dry density used in compaction were obtained through the Proctor test [36], considering three compaction energies (intermediate normal and modified) (Fig 2 and Tab 2). A total of 18 specimens were made, considering the types of soil (2), compaction energy (3) and repetitions for each condition analyzed (3).

The control of moisture content (MC) and other physical index of the cubes after the exposure period was carried out by weighing the specimens (Tab. 2).

Where MC = Moisture Content and DM = Dry Density

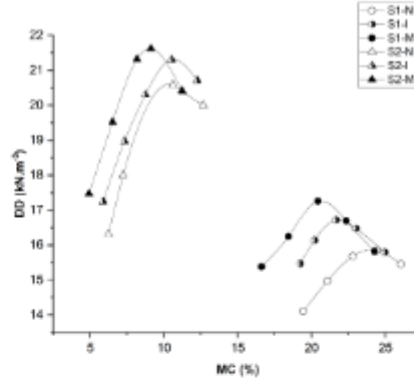


Figure 2: Compaction curves of soils according to compaction energy

Table 2: Comparison of physical properties of the soils in molding and after 120 days

Condition	Molding				120 days			
	MC %	DD (kN.m ₃)	Porosity (%)	Voids	MC %	DM (kN.m ₃)	Porosity (%)	Voids
S1-N	23.4	15.89	43	0.76	19.3	13.76	51	1.03
S1-I	21.9	16.65	40	0.68	18.2	14.48	48	0.93
S1-M	20.7	17.36	38	0.61	17.3	15.13	46	0.84
S2-N	10.6	20.60	22	0.29	9.5	18.86	29	0.41
S2-I	9.6	21.20	20	0.25	8.7	19.61	26	0.35
S2-M	8.7	21.70	18	0.22	7.9	20.09	24	0.32

2.3. Ultrasound Tests

The ultrasound test measures the wave propagation times (t) in materials, which allow the determination of velocity of compression and shear waves in materials (Eq. 1) from with the distance between the transducers (L). For this, a equipment Pundit PL-200 (Proceq) and compression transducers (54 kHz) and shear (40 kHz), with plane and exponential faces, respectively, was used (Fig. 3a). This equipment has an oscilloscope which allows observing the wave collected by the transducers, allowing the propagation time readings to be performed accurately and carefully for further calculation of velocity, whether compression (V_p) or shear (V_s) (Fig. 3b).

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

The direct transmission method was used, with transducers positioned on opposite parallel faces of the cubes, according to the guidelines of the ultrasound test applied to other materials, as there is no specific standard for the soil [37, 38, 39]. Velocity readings were performed in three directions, considering the faces of the specimens, being 1 the direction of compaction of the layers and directions 2 and 3 parallel to these (Fig. 4). This process was based on studies carried out on concrete and rocks cubes [40, 41] and also on rammed earth wall/panels [42, 35, 16, 21, 43] and bricks [13, 44].

This procedure was performed 120 days after molding of the test specimens to balance the conditions of the specimens with their exhibition environment, simulating the conditions of constructions of earth.

2.4. Analysis of results

Kolmogorov-Smirnov normality tests were performed, considering as a prerequisite for a series of other analyses using parametrical statistics. Firstly longitudinal velocity (V_p) was used to verify if both soil (sandy and clay) have the same acoustic response, using the P-value of the F-test from ANOVA table. Since the P-value of the F-test is less than 0.05, there is a statistically significant difference between the mean V_p from on types of soil to another at the 95.0% confidence level. To

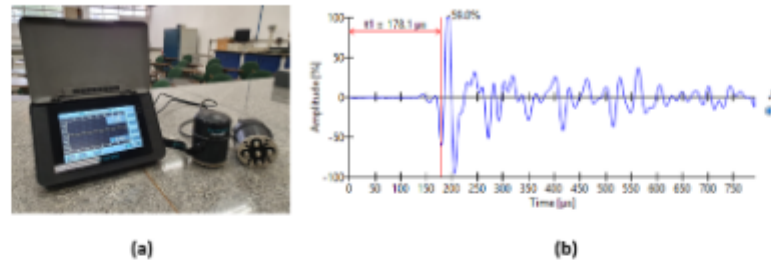


Figure 3: (a) Ultrasound equipment with shear transducer and (b) Detail of the signal captured by ultrasound equipment time

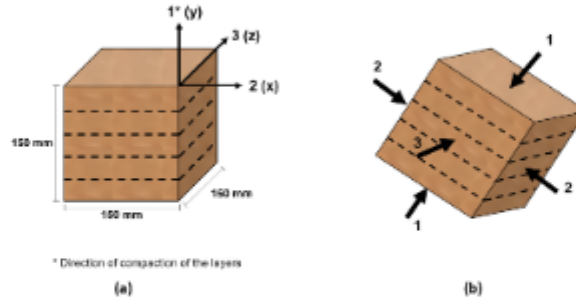


Figure 4: (a) Layout of the positioning of the compaction layers in relation to the considered directions; and (b) Positioning the ultrasound transducer during the test according to the considered direction

determine which means are significantly different from which others, was used the Multiple Range Test. To analyses the elastic behavior of the soil compacted in layers and the influence of the compaction energy was used the F-test and Multiple Range Test and also the relationships between bulk velocities in axes (V_{11}/V_{22} and V_{11}/V_{33}) and in planes (V_{44}/V_{55} , V_{44}/V_{66} , V_{66}/V_{55} , V_{66}/V_{44} , V_{55}/V_{44} and V_{55}/V_{66}). In planes V_{44} is one obtained with propagation in direction 2 (X) and polarization in direction 3 (Z) or vice-verso; V_{55} with propagation in direction 1 (Y) and polarisation in direction 3 (Z) or vice-verso and V_{66} with propagation in direction 1 (Y) and polarization in direction 2 (X) or vice-verso. So, the relationship between V_{66}/V_{55} or V_{55}/V_{66} are related to the planes containing the axis 1 (Y), in numerator and denominator, that correspond to compaction direction. The other relationship always contains the propagation and polarization in axes 2 (X) and 3 (Z) or as numerator or as denominator.

3. Results and discussions

In general, disregarding the difference in compaction energies, the UPV obtained with the compression transducers (V_P) for samples molded with S_1 are between $1381.22 - 1594.05 \text{ m.s}^{-1}$, with overall average of 1509.59 m.s^{-1} . These values were for approximately 13% higher than the V_P obtained for S_2 , whose values are between 1124.44 and 1473.48 m.s^{-1} , with average of 1316.84 m.s^{-1} . This behavior also observed for V_S , with UPV obtained for S_1 , in relation to general average, approximately 8% higher than those obtained for S_2 , with values between $867.59 - 1001.69 \text{ m.s}^{-1}$ and $806.45 - 908.12 \text{ m.s}^{-1}$ for S_1 and S_2 , respectively.

Based on the Kolmogorov-Smirnov normality test at the 0.05 level, all data was significantly extracted from a normally distributed population, and the normal distribution curve is represented by the box-chart in Fig 5. Regarding the UPV analyzed according to the compaction energies (normal, intermediate and modified), using the Tukey Test, the means of V_P for S_1 and S_2 indicates that difference is not significant at the 0.05 (Fig.5a). However, for V_S , conditions $S1-N$ and $S1-M$, as well as $S2-I$ and $S2-M$, presented a significant difference, with p-values of 0.0113 and 0.0000, respectively.

The same behavior regarding compaction energies was observed by Sarro et al. [27], when comparing the UPV (V_P) in the direction of compaction of the layers, from the same soil samples used in this research. In this case, the authors also observed

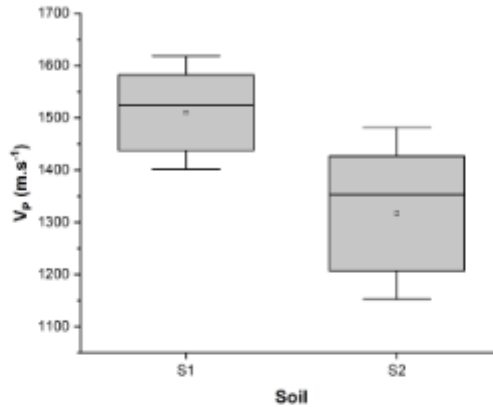


Figure 5: Comparison between S1 and S2

that, for both soils (S1 and S2), there is no statistical difference between the compaction energies. Huang et. al [45] verified that the UPV increased the higher the energy of compaction, which is in agreement with the results obtained in this research.

Although much of the research on the application of the ultrasound test to compacted soil is carried out in soils with some type of addition, such as cement, the results obtained in this research are compatible with those obtained in other studies, considering the readings carried out on specimens of control. The difference between the UPV (V_P and V_S) of the two soils, both greater for S1, is associated with the difference between the inter-particle contact surface, which is greater for clayey soils [27, 46, 47, 48, 49, 50]. As highlighted by Dutta et al. [51], the difference between UPV, especially V_S , is related to the inter-particle deviation, where the greater the sphericity of the grains, the lower the value of V_S . The difference between in V_P and V_S for the same soil type was also consistent with the theory of ultrasonic wave propagation, with V_S being approximately 60% of the V_P value, regardless of the soil type, behavior consistent with that reported by Knuth et. al [47], with the changes in the orientation and stress states of the grain-to-grain contacts being reflected in the decrease in V_S .

Based on the Kolmogorov-Smirnov normality tests at the 0.05 level, all data was significantly extracted from a normally distributed population. The P-value (0.0000) of the P-test indicate statistical differences between longitudinal velocities (VP) in clay and sandy soils (Figure 5).

For both soils (clay and sandy) the V_P was statistically equivalent for directions 2 and 3 for any level of compaction energy (Fig.6). For sandy soil the compaction direction (1) was statistically different from the other two (2 and 3) for any level of compaction energy but for clay soil this difference occurs only at normal compaction energy (Fig.6a). For intermediate (Fig.6b) and modified (Fig.6c) compaction energies there are no statistical differences among any directions. The observed difference in relation to the normal compaction energy can be associated with the presence, in greater quantity, of voids (7. For clay soil the variability grows in intermediate and modified compaction energy (Fig.6)bc) which may have been the cause of statistical equality between all directions. We also observed that at the compaction direction V_P was the largest in clay soil and the smallest in sandy soil.

The ratios between velocities of longitudinal waves in compaction direction (1) by perpendicular ones on the symmetry axes (2 and 3) confirm the behavior obtained in statistical analyses, showing, for sandy soil, values further away (from 12% to 17%) from the equality (relation = 1.00) for all level of compaction energy (Tab.3). On the other hand, for clay soil (Table 3) only for the first compaction level the relationship is further from one (9% to 10%). It is also observed that the relationship from direction 2 and 3 is 1.0 for both soils and for all compaction energy, indicating that those directions have equal velocities as also showed by statistical analysis.

The relationship between shear waves in different planes are also compatible with statistical results and with longitudinal waves relationship, showing greater extrapolations from 1.0 for sandy soil than for clayey soil. It is also observed that the ratios between shear waves V_{66} (propagation in direction 1 and polarization in direction 2 or vice-versa) and V_{55} (propagation in direction 1 and polarization in direction 3 or vice-versa) and V_{55}/V_{66} are equal to 1.0 for both soils and all compaction energies (Tab.3). This behavior is coherent with the isotropy between axes 2 and 3.

The influence of reading direction was also verified by Kasinikota et al. [44], when studying the structural anisotropy of compressed stabilized earth blocks (CSEBs) using ultrasound. The authors determined VP in the longitudinal (x), compaction (y) and transverse (z) directions in CSEBs molded with soils of different particle sizes, being V_P was smaller for the compaction

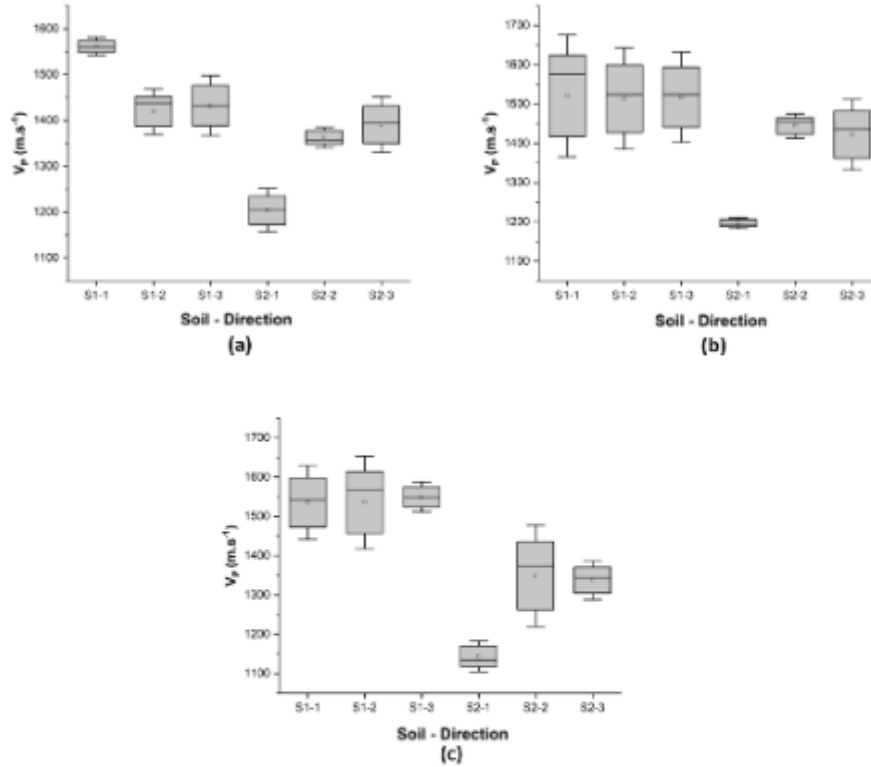


Figure 6: Comparison between the V_p obtained for S_1 and S_2 at different directions (1, 2 e 3) and compaction energies: Normal (a), Intermediate (a) and Modified (a)

direction (direction y) and higher for fine soils, as observed in this study (direction 1) (Fig. 5b). Canivell et al. [8, 16] also observed that the ultrasonic pulse velocity is influenced by the reading direction, where the velocity in the compaction direction is significantly different from the others.

The unequal behavior between samples S_1 and S_2 is mainly due to the difference in texture and, consequently, the shape of the grains, in addition to the difference in physical indices. As highlighted by Sarro et. al [27], the difference between the contact surface directly interferes with the wave velocity, therefore, it is expected that this also affects the modules obtained from the ultrasound test. Regarding the mechanical response of sandy materials, such S_2 , the arrangement and shape of the grains directly influence the results, as these influence the physical indices [52].

Based on the circularity scale presented by Salvatore et. al [52] and the images obtained in the Scanning Electron Microscope (SEM) (Fig. 8), the S_2 sample has grains with a Sub-angular shape, which indicates a greater interlock between the particles. Some authors highlights that sands with the same average grain size but different particle shapes, present higher dispersion of velocity values is more accentuated for angular grains, which may explain the differences observed for soil S_2 , considering that the velocity values [53, 54].

Although differences were identified between S_1 and S_2 , the results were consistent for the molding conditions of each soil, considering that the UPV were higher the lower the void and porosity index, due to to greater inter-particle contact

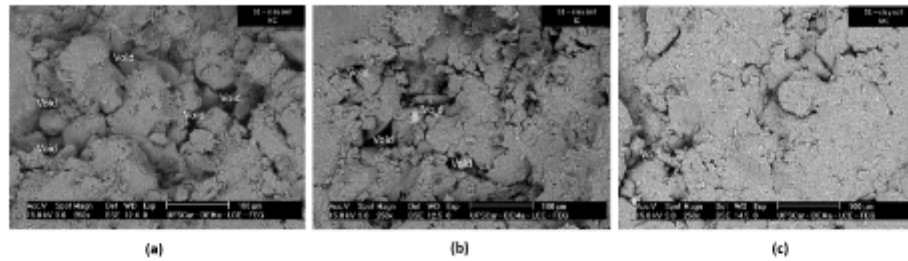


Figure 7: Scanning Electron Microscope (SEM) images of soil S_1 compacted in the energies (a) Normal, (b) Intermediate and (c) Modified

Table 3: Ratios between velocities of longitudinal and shear waves considering three propagations directions (1, 2 and 3) and three compactions energy for two types of soil

Compaction energy	V11 /V22	V11 /V33	V22 /V33	V44 /V55	V44 /V66	V66 /V55	V66 /V44	V55 /V44	V55 /V66
Clayey Soil (S_1)									
Normal	1.1	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0
Intermediate	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Modified	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sandy Soil (S_2)									
Normal	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	1.0
Intermediate	0.8	0.8	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	1.0
Modified	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

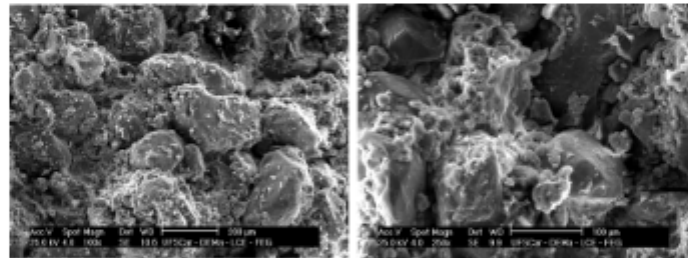


Figure 8: Scanning Electron Microscope (SEM) images of the grains of S_2

[47, 27, 50, 52].

Conclusions

The methodology using velocities in the axes and in the planes proved to be simple and viable to evaluate the elastic behavior of compacted soils. This result indicate an advance regarding the mechanical characterization procedures when compared with conventional destructive testing in compacted soil, mainly because it can be done in the field and without the need to take a sample, and so is useful in inspections and technological control.

Acknowledgments

The authors would like to thank the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), Brazil (Proc. 405929/2016-1) for the research funding, the support fund for Teaching Research and Extension (FAEPEX - UNICAMP, SP, Brazil) for the financial resources and the "Espaço da Escrita (UNICAMP, SP, Brazil) for the assistant in translating this paper.

References

- [1] C. C. M. Cordeiro, D. Q. Brandão, L. C. Durante, I. J. A. Callejas, *Construções vernáculas em terra: perspectiva histórica, técnica e contemporânea da taipa de mão*, PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção 10 (2019) e019006 e019006.
- [2] J. C. Reyes, L. E. Yamin, W. M. Hassan, J. D. Sandoval, C. D. Gonzalez, F. A. Galvis, Shear behavior of adobe and rammed earth walls of heritage structures, *Engineering Structures* 174 (2018) 526–537.
- [3] V. Youlgh, E. Kianfar, The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts, *Construction and Building Materials* 200 (2019) 616–629.
- [4] M. Fernandes, A taipa no mundo, *digitAR-Revista Digital de Arqueologia, Arquitetura e Artes* (1) (2013).
- [5] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, S. Hans, P. Walker, Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth, *Construction and Building Materials* 54 (2014) 163–169.
- [6] I. Lombillo, L. Villegas, E. Rodde, C. Thomas, In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing, *Construction and Building Materials* 51 (2014) 451–460.
- [7] E. Bernat-Maso, E. Teneva, C. Pacrig, L. Gil, Ultrasound transmission method to assess raw earthen materials, *Construction and Building Materials* 156 (2017) 555–564.
- [8] J. Canivell, J. J. Martín-del Río, F. Alejandro, J. García-Heras, A. Jimenez-Aguilar, Considerations on the physical and mechanical properties of lime-stabilised rammed earth walls and their evaluation by ultrasonic pulse velocity testing, *Construction and Building Materials* 191 (2018) 826–836.
- [9] C. Kohlhauser, C. Hellmich, Determination of poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: Application to metals and wood, *European Journal of Mechanics-A/Solids* 33 (2012) 82–98.
- [10] C. Bertoldo, R. K. Santos Gorski, R. Gonçalves, Evaluation of elastic anisotropy of concrete using ultrasound wave propagation, *Journal of Materials in Civil Engineering* 32 (4) (2020) 04020056.
- [11] V. G. Haach, F. C. Ramirez, Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography, *Construction and Building Materials* 119 (2016) 61–70.
- [12] C. Vázquez, R. Gonçalves, C. Bertoldo, V. Baño, A. Vega, J. Crespo, M. Guaita, Determination of the mechanical properties of castanea sativa mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods, *Wood Science and Technology* 49 (3) (2015) 607–622.
- [13] S. Noor-E-Khuda, F. Albermani, Mechanical properties of clay masonry units: Destructive and ultrasonic testing, *Construction and Building Materials* 219 (2019) 111–120.
- [14] W. de Sousa Sarro, G. C. dos Santos Ferreira, Soil elastic modulus determined by ultrasound tests, *Soils and Rocks* 42 (2) (2019) 117–126.
- [15] J. D. Rodríguez-Mariscal, J. Canivell, M. Solís, Evaluating the performance of sonic and ultrasonic tests for the inspection of rammed earth constructions, *Construction and Building Materials* 299 (2021) 123854.
- [16] J. J. Martín-del Río, J. Canivell, R. M. Falcon, The use of non-destructive testing to evaluate the compressive strength of a lime-stabilised rammed-earth wall: Rebound index and ultrasonic pulse velocity, *Construction and Building Materials* 242 (2020) 118060.
- [17] M. Christ, J.-B. Park, Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils, *Cold Regions Science and Technology* 3 (58) (2009) 136–142.
- [18] Z. Y. Ai, Y. H. Jiang, Z. H. Chu, Dual integral equation solution of eccentricity loaded rectangular rigid foundation embedded in layered transversely isotropic soils, *Computers and Geotechnics* 126 (2020) 103755.
- [19] E. Pegah, H. Liu, N. Dastanbo, Evaluation of the lateral earth pressure coefficients at-rest in granular soil deposits using the anisotropic components of s-wave velocity, *Engineering Geology* 230 (2017) 55–63.
- [20] E. Currasco, S. Silva, J. Mantilla, Assessment of mechanical properties and the influence of the addition of sawdust in soil cement bricks using the technique of ultrasonic anisotropic inspection, *Journal of materials in civil engineering* 26 (2) (2014) 219–225.
- [21] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, Assessing the anisotropy of rammed earth, *Construction and building Materials* 23 (9) (2009) 3005–3011.
- [22] V. Bucur, *Acoustics of Wood*, 2nd Edition, Springer, France, 2006.
- [23] ABNT, Abnt nbr 7181: 2016: Solo análise granulométrica (2016).
- [24] A. B. d. N. T. ABNT, Nbr 7182:grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água (2016).
- [25] ABNT, Abnt nbr 6459: 2016: Solo determinação do limite de liquidez (2016).
- [26] ABNT, Abnt nbr 7180: 2016: Solo determinação do limite de plasticidade (2016).
- [27] W. Sarro, G. Assis, G. Ferreira, Experimental investigation of the upv wavelength in compacted soil, *Construction and Building Materials* 272 (2021) 121834.
- [28] B. S. BS, 12390-1. testing hardened concrete. shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds (2012).

- [29] A. Khan, R. Gupta, M. Garg, Determining material characteristics of “rammed earth” using non-destructive test methods for structural design, in: *Structures*, Vol. 20, Elsevier, 2019, pp. 399–410.
- [30] T.-T. Bui, Q.-B. Bui, A. Limam, S. Maximilien, Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications, *Construction and Building Materials* 51 (2014) 295–302.
- [31] R. El-Nabouch, Q.-B. Bui, P. Perrotin, O. Plé, Shear parameters of rammed earth material: results from different approaches, *Advances in Materials Science and Engineering* 2018 (2018).
- [32] T.-T. Bui, Q.-B. Bui, A. Limam, J.-C. Morel, Modeling rammed earth wall using discrete element method, *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 28 (1-2) (2016) 523–538.
- [33] L. Miccoli, D. V. Oliveira, R. A. Silva, U. Müller, L. Schueremans, Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling, *Materials and Structures* 48 (10) (2015) 3443–3456.
- [34] W. A. Rhyono, E. Vincenz, J.-P. Plassiard, A hierarchical elasto-plastic constitutive model for rammed earth, *Construction and Building Materials* 160 (2018) 351–364.
- [35] J. Canivell, J. J. Martín-del Río, R. M. Palcón, C. Rubio-Bellido, Rammed earth construction: A proposal for a statistical quality control in the execution process, *Sustainability* 12 (7) (2020) 2830.
- [36] A. B. d. N. T. ABNT, Nbr 7182: Solo: Ensaio de compactação (2016).
- [37] A. B. D. N. ABNT, Nbr 15521: Ensaio não destrutivo – ultra-som – classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas (2007).
- [38] A. S. I. T. M. ASTM, Standard test method for pulse velocity through concrete (2016).
- [39] B. S. BS, 12504-4. testing concrete- part 4: determination of ultrasonic pulse velocity (2004).
- [40] R. Gonçalves, M. Glacou Júnior, I. M. Lopes, Determining the concrete stiffness matrix through ultrasonic testing, *Engenharia Agrícola* 31 (3) (2011) 427–437.
- [41] E. Vasanelli, P. Micelli, D. Colangiuli, A. Calia, M. Aiello, A non destructive testing method for masonry by using upw and cross validation procedure, *Materials and Structures* 53 (6) (2020) 1–15.
- [42] R. A. Silva, N. Mendes, D. V. Oliveira, A. Romanazzi, O. Domínguez-Martínez, T. Miranda, Evaluating the seismic behaviour of rammed earth buildings from Portugal: From simple tools to advanced approaches, *Engineering Structures* 157 (2018) 144–156.
- [43] R. Jasielecki, Identification of stress states in compressed masonry walls using a non-destructive technique (ndt), *Materials* 13 (12) (2020) 2852.
- [44] P. Kasinikola, D. D. Tripura, Predicting the effect of crushed brick particle size on anisotropy, physical and mechanical properties of compressed stabilized earth blocks using ultrasonic pulse velocity, *Materials and Structures* 54 (3) (2021) 1–20.
- [45] S. Huang, C. Lu, H. Li, J. He, Q. Wang, P. Yuan, Z. Gao, Y. Wang, Transmission rules of ultrasonic at the contact interface between soil medium in farmland and ultrasonic excitation transducer, *Computers and Electronics in Agriculture* 190 (2021) 106477.
- [46] G. C. Cho, J. C. Santamarina, Unsaturated particulate materials—particle-level studies, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 127 (1) (2001) 84–96.
- [47] M. W. Knuth, H. J. Tobin, C. Marone, Evolution of ultrasonic velocity and dynamic elastic moduli with shear strain in granular layers, *Granular Matter* 15 (5) (2013) 499–515.
- [48] R. Sharma, A. Gupta, Continuous wave acoustic method for determination of moisture content in agricultural soil, *Computers and electronics in agriculture* 73 (2) (2010) 105–111.
- [49] D. Pratta, K. A. Alshibli, W. M. Tanner, L. Roussel, Combined tdr and p-wave velocity measurements for the determination of in situ soil density—experimental study, *Geotechnical Testing Journal* 28 (6) (2005) 553–563.
- [50] S. S. D. Raavi, D. D. Tripura, Ultrasonic pulse velocity and statistical analysis for predicting and evaluating the properties of rammed earth with natural and brick aggregates, *Construction and Building Materials* 298 (2021) 123840.
- [51] T. Dutta, M. Otsubo, R. Kuwano, C. O’Sullivan, Stress wave velocity in soils: Apparent grain-size effect and optimum input frequencies, *Géotechnique Letters* 9 (4) (2019) 340–347.
- [52] I. Salvatore, M. Giuseppe, C. Gabriele, S. Erminio, Predictive correlations for the compaction of clean sands, *Transportation Geotechnics* 4 (2015) 38–49.
- [53] P. Pongvithayapannu, S. Teachavorasinskun, The mechanical responses of sandy soil during isotropic loading by shear wave logging, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 19 (2014) 9339–9350.
- [54] X. Qian, D. H. Gray, R. D. Woods, Voids and granulometry: effects on shear modulus of unsaturated sands, *Journal of Geotechnical Engineering* 119 (2) (1993) 296–314.

Capítulo 5

Discussão geral

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir dos objetivos específicos abordados pelos artigos apresentados no corpo da tese, os quais estão interligados e se completam para que o objetivo geral seja alcançado.

Essas discussões estão apresentadas em três seções, sendo elas realizadas na ordem dos objetivos propostos, de forma a facilitar a compreensão.

- A seção 5.1 discute os principais fatores físicos e microestruturais interferentes nos resultados do ensaio de ultrassom, reunindo pontos discutidos em todos os artigos, principalmente no artigo 2;
- Na seção 5.2 contém os principais pontos relacionados às condições de ensaio como o tamanho dos corpos de prova. Esses dados foram apresentados principalmente nos artigos 1;
- Na seção 5.3 contém os principais pontos relacionados às condições de ensaio como a forma e tamanho dos corpos de prova, além da direção de realização da leitura. Esses dados foram apresentados principalmente nos artigos 1 e 3;

5.1 Interferência dos fatores físicos e microestruturais

O ensaio de ultrassom em solo compactado é afetado principalmente pelas condições físicas e microestruturais da amostra, as quais são distintas para cada tipo de solo. Embora o ultrassom tenha sido capaz de identificar as variabilidades das condições estudadas, no que diz respeito à umidade e densidade observou-se que, para viabilizar o uso da VP para controle tecnológico é necessário que outras variáveis sejam consideradas. Essa necessidade se mostrou evidente após o comportamento VP x Umidade não ter apresentado comportamento linear no estudo dos teores de umidade presentes na curva de compactação de ambos os solos. Nesse caso, houve VP iguais para teores de umidade situados no ramo seco e umido da curva de compactação, ou seja, com mesma densidade, reafirmando assim a necessidade de um modelo capaz de diferenciar esses pontos.

De forma geral, a VP é diretamente proporcional à umidade até o teor ótimo de compactação e, conseqüentemente, maior densidade. Após esse ponto a VP passa a ser inversamente proporcional à umidade, mas continua a ser diretamente proporcional à densidade. Logo, para possibilitar a distinção das densidades situadas nos ramos seco e úmido, foi necessário verificar o comportamento da VP com os demais índices físicos relacionados à densidade: índice de vazios, porosidade e saturação. Nesse caso, a VPU é inversamente proporcional ao índice de vazios e a porosidade, coincidindo com o teor de umidade ótimo e densidade seca máxima.

Embora esse comportamento tenha sido observado para ambos os solos estudados (solo argiloso - S1 e solo arenoso - S2) houve diferença estatística significativa quando comparadas suas velocidades (VP e VS), sendo ambas maiores para S1. Esse resultado está associado à diferença entre a superfície de contato interpartículas, que é maior para solos argilosos. No caso de solos arenosos, devido ao formato mais circular das partículas, o intertravamento é menor e, conseqüentemente, maior é o índice de vazios e porosidade, fator associado à maior dispersão do pulso ultrassônico.

5.2 Procedimentos de ensaio - Corpo de prova

Além das condições físicas e microestruturais dos corpos de prova, foram analisados também os fatores relacionados ao tamanho e formato do corpo de prova. Tendo em vista que, a investigação da utilização do ensaio de ultrassom em solo engloba diversas possibilidades de aplicação, como a caracterização, controle tecnológico e inspeção, optou-se por verificar também a influência dos diferentes instantes e, conseqüentemente, condições de umidade, em que esse ensaio é realizado (após a moldagem e após determinado período de exposição as condições do ambiente).

As VPUs obtidas nessa fase do estudo corroboraram com a literatura e com as investigações anteriores, sendo maior quanto menor a umidade, estabilizando-se a partir do momento em que a perda de umidade atinge determinado equilíbrio com as condições do ambiente ao qual está exposto. Essa variação foi considerada para determinar o comprimento mínimo do corpo de prova para propagação em meios infinitos, tendo em vista que quanto maior a velocidade, ou quanto maior o período de exposição ao ambiente após a compactação, maior o comprimento de onda.

A partir disso, no que respeito ao tamanho da seção no sentido de realização do ensaio e, conseqüentemente distância entre os transdutores, observou-se que a VPU se propaga em meios infinitos, e não superficial, em corpos de prova com tamanho igual ou superior à 200 mm. Essa dimensão, utilizando transdutores de 45 kHz de frequência, garante a propagação de 5 a 7 comprimentos de onda ao longo da seção, a depender do tipo de solo. O comprimento de onda obtido foi maior para S1 pois, conforme destacado na seção anterior, a velocidade é maior para solos argilosos. Para transdutores com frequências diferentes é necessário que sejam alteradas as dimensões de forma que a quantidade mínima de comprimentos de onda (5 a 7) seja garantida.

5.3 Influência da direção no ensaio de ultrassom

Embora o ensaio de ultrassom em laboratório seja realizado mais comumente no sentido de compactação das camadas é necessário considerar que, para viés de inspeção, podem ser necessários ensaios em campo ou em testemunhos extraídos da estrutura. Devido à isso, foram verificadas também o comportamento das velocidades frente as diferentes direções de ensaio, considerando corpos de prova cúbicos e as direções paralelas e perpendiculares às camadas de compactação.

De forma geral, para ambos os solos (argiloso e arenoso) o VP foi estatisticamente equivalente para as direções 2 e 3 para qualquer condição de compactação. Para solo arenoso a direção de compactação (1) foi estatisticamente diferente das outras duas (2 e 3) para todas as condições de compactação. As razões entre as velocidades das ondas longitudinais na direção de compactação (1) pelas perpendiculares na simetria eixos (2 e 3) confirmam o comportamento obtido nas análises estatísticas, mostrando, para solo arenoso, valores maiores para solo argiloso. A relação entre as ondas de cisalhamento também foi compatível com resultados estatísticos e com resultados longitudinais. Com base nisso, o solo, quando compactado em camadas, pode ser considerado como transversalmente isotrópico, tendo em vista que as velocidades apresentaram diferenças significativas em relação à direção de compactação.

É necessário portanto, a depender da finalidade do ensaio, garantir que as amostras sejam extraídas e/ou ensaiadas considerando a diferença entre as direções e também a frequência dos transdutores disponíveis para que estes estejam adequados ao tamanho da seção.

Capítulo 6

Conclusões

Considerando o objetivo proposto e os resultados obtidos neste estudo, é possível concluir que há interferência das dimensões da amostra na VPU, sendo o comprimento ideal do corpo de prova para garantir ondas de volume dependente principalmente da frequência do transdutor utilizado. Além disso, o tipo de solo não interferiu significativamente no ensaio e, consequentemente, no tamanho mínimo dos corpos de prova. Nesse caso, utilizando transdutores de 45 kHz de frequência, para ambos os solos (argiloso e arenoso) o tamanho mínimo dos corpos de prova deve ser de 200 mm.

O ensaio de ultrassom também foi capaz de identificar diferentes condições de teor de umidade e densidade, parâmetros que são essenciais para sua compactação. O comportamento da VPU em relação a essas variáveis é semelhante à curva de compactação, ou seja, não possui comportamento linear, fato refletido aos valores de correlação, tanto em relação a VPU-Umidade ($R=0,534$) quanto em relação a VPU-Densidade Seca ($R=-0,479$). Logo, a inclusão de outros índices físicos para elaboração de um modelo foi necessário, sendo o melhor desempenho obtido utilizando o índices de vazios.

No que diz respeito à direção de realização dos ensaios, houveram diferenças estatisticamente significativas, devendo-se considerar além das direções o tipo de solo. Neste caso, as VPUs obtidas perpendicularmente às camadas de compactação foram diferentes somente para o solo arenoso. Apesar disso, tendo em vista que as inspeções são comumente realizadas paralelamente as camadas, a influência da direção de ensaio pode ser desconsiderada, assumindo o comportamento desse material com comportamento isotrópico.

Foi avaliado ainda o comportamento das diferentes velocidades (compressão e cisalhamento), tendo em vista que ambas são necessárias para cálculo das constantes

elásticas (Módulo de elasticidade, cisalhamento e Coeficiente de Poisson). Não houve diferença em função da variação de energia de compactação e, consequentemente, de densidade entre os dois tipos de solo (argiloso e arenoso). Embora tenha havido diferença entre a VPUp (compressão) para o solo arenoso, a VPUs (cisalhamento) não foi afetada para nenhum dos dois solos. Dentre os modelos propostos para estimativa da resistência à compressão não confinada, aqueles que utilizaram parâmetros como a umidade, densidade e índice de vazios além das velocidades (VPUp e VPUs) obtiveram correlações entre 0,96 e 0,98.

No caso das constantes elásticas, embora tenham sido identificadas diferenças entre os solos argiloso e arenoso, os resultados foram consistentes para as condições de moldagem de cada solo, sendo as constantes elásticas maiores quanto menor o vazio e índice de porosidade, devido ao maior contato entre os grãos. A diferença entre os solos deve-se também a outros fatores, como o formato dos grãos, sendo a variação da VPU maior quanto maior a angularidade dos grãos, como o caso do solo arenoso.

Esses resultados indicam que há possibilidade de utilização do ensaio de ultrassom para auxiliar na caracterização, controle/monitoramento e inspeção de elementos de solo compactado. Embora os resultados obtidos tenham sido relevantes, há pontos que devem ser avaliados em pesquisas futuras, a fim de validar a técnica para este material, tais como:

- Comportamento da variação de umidade e densidade para outros tipos de solo;
- Influência da sucção nas velocidades, tanto de compressão quanto de cisalhamento;
- Comparação das constantes elásticas obtidas com o ultrassom e com métodos destrutivos.

Referências bibliográficas

AASHTO. **T307-99 - Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials**. [S.l.]: American Association of State Highway e Transportation Officials, 2007.

ABNT. **NBR 15521: Ensaios não destrutivos—Ultra-som—Classificação mecânica de madeira Serrada de dicotiledôneas**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2007.

ABNT. **NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2008.

ABNT. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

ABNT. **NBR 6459: Solo—Determinação do limite de liquidez**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

ABNT. **NBR 7180: 2016: Solo—Determinação do limite de plasticidade**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

ABNT. **NBR 7181: 2016: Solo—análise granulométrica**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

ABNT. **NBR 7182: Solo: Ensaio de compactação**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

ABNT. **NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2021.

ABNT. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brazil, 2019.

ADEM, H. H.; VANAPALLI, S. K. Prediction of the modulus of elasticity of compacted unsaturated expansive soils. **International Journal of Geotechnical Engineering**, Taylor & Francis, v. 9, n. 2, p. 163–175, 2015.

ANDREUCCI, R. Ensaio por ultrassom. **São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos**, 2018.

ANJAN KUMAR, S. et al. Accelerated assessment of quality of compacted geomaterials with intelligent compaction technology. **Construction and Building Materials**, v. 113,

p. 824–834, 2016. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.117>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816304202>.

ANTUNES, A.; CUNHA, S.; BENTO, R. Mapeamento da construção em terra no território Português. In: UNIVERSIDADE DE AVEIRO. CONGRESSO da Reabilitação do Património. [S.l.: s.n.], 2017.

ASTM, A. S. f. T. M. **Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Rolled Steel Plates for Special Applications**. [S.l.]: ASTM International West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM, A. S. f. T. M. **Standard test method for pulse velocity through concrete**. [S.l.]: ASTM International West Conshohocken, PA, 2016.

BANDEIRA, R. F. Estudo da correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica para um material terroso. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: novos materiais para construção civil**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 5.

BERNUCCI, L. et al. **Pavimentação asfáltica - Formação Básica para Engenheiros**. [S.l.]: Petróleo Brasileiro S.A., 2006.

BERTOLDO, C.; SANTOS GORSKI, R. K.; GONÇALVES, R. Evaluation of Elastic Anisotropy of Concrete Using Ultrasound Wave Propagation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 32, n. 4, p. 04020056, 2020.

BRASIL. **Manual de Pavimentação**. 3ª. [S.l.], 2006.

BS. **BS12504-4. Testing concrete–Part 4: determination of ultrasonic pulse velocity**. [S.l.]: British Standards Institution, 2004. p. 18.

BUCUR, V.; ARCHER, R. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. **Wood Science and Technology**, Springer, v. 18, n. 4, p. 255–265, 1984.

BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. 2ª. France: Springer, 2006. p. 403. ISBN 9783540261230.

BUI, Q.-B. et al. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. **Construction and Building materials**, Elsevier, v. 54, p. 163–169, 2014.

CAI, Y. et al. Measurement of small strain shear modulus of clean and natural sands in saturated condition using bender element test. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, Elsevier, v. 76, p. 100–110, 2015.

CAMPOS, R. P. et al. São Luiz do Paraitinga: O último retrato das pequenas cidades brasileiras do século XVIII. In: CONGRESSO da reabilitação do património-CREPAT 2017. [S.l.: s.n.], 2017.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações–vol. 1: fundamentos**. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CARRASCO, C.; TERADO, C.; WANG, H. et al. **Numerical Simulation of Intelligent Compaction Technology for Construction Quality Control**. [S.l.], 2014.

CHAMPIRÉ, F. et al. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 110, p. 70–78, 2016.

CHRIST, M.; PARK, J.-B. Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils. **Cold Regions Science and Technology**, v. 3, n. 58, p. 136–142, 2009.

CHUANCHENG, Y.; WENXIA, C.; HAIYUE, D. Research on comparison of the maximum dynamic shear modulus test. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 28, p. 230–234, 2012.

CIANCIO, D.; GIBBINGS, J. Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 294–304, 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES, C. Relatório Gerencial. In: CNT; SEST; SENAT (Ed.). **Pesquisa CNT de Rodovias**. [S.l.: s.n.], 2019.

COSTA, O. A. L. d. et al. **Velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira para diferentes condições de umidade**. [S.l.: s.n.], 2005.

CULTRONE, G. et al. Ultrasound and mechanical tests combined with ANOVA to evaluate brick quality. **Ceramics International**, Elsevier, v. 27, n. 4, p. 401–406, 2001.

D'ORAZIO, T. et al. Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials. **NDT & e International**, Elsevier, v. 41, n. 2, p. 145–154, 2008.

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

DNIT. ME - 134/2010 - Pavimentação - Solos - **Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. [S.l.]: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

DONGQING, L. et al. The impact of unfrozen water content on ultrasonic wave velocity in frozen soils. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 143, p. 1210–1217, 2016.

DUNCAN, J. M.; CHANG, C.-Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. **Journal of the soil mechanics and foundations division**, American Society of Civil Engineers, v. 96, n. 5, p. 1629–1653, 1970.

FERREIRA, G.; DEZEN-KEMPTER, E.; SARRO, W. S. Inovação tecnológica aplicada à inspeção e documentação de patrimônio cultural edificado em terra compactada: Ultrassom e modelagem da informação da construção. In: VIOLLET-LE-DUC à carta de Veneza - Teoria e prática do restauro no espaço Ibero-Americano. [S.l.: s.n.], 2014.

FERREIRA, G.; GONÇALVES, R. et al. Determinação de propriedades de solo compactado utilizando ensaios de ultrassom. 12a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. **Anais... Porto de Galinhas, PE: Abendi**, 2013.

FERREIRA, G. d. S.; SARRO, W. d. S. et al. 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. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–10.

FERREIRA, M.; LIMA, J. et al. Edifícios de adobe e taipa na região de Leiria, Portugal. Levantamento material e documental com vista à sua conservação e reabilitação. In: UNIVERSIDADE DE AVEIRO. CONGRESSO da Reabilitação do Património. [S.l.: s.n.], 2017. p. 31–40.

FERREIRA, R. C. **Desempenho Físico-Mecânico E Propriedades Termofísicas De Tijolos E Mini-Painéis De Terra**. [S.l.: s.n.], 2003.

FERRI, S. **Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

HOFFMANN, M. V.; GONÇALVES, R. Análise da qualidade da taipa de pilão por meio de ondas ultra-sônicas. In: TERRABRASIL 2010 III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil. [S.l.: s.n.], 2010. p. 25.

HUANG, C.-H.; WANG, S.-Y. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 43, p. 174–183, 2013.

INDRARATNA, B.; HEITOR, A.; RUJIKIATKAMJORN, C. Effect of compaction energy on shear wave velocity of dynamically compacted silty sand soil, 2012.

ISO. **Non-Destructive Testing—Ultrasonic Testing—General Principles**. [S.l.]: ISO Geneva, Switzerland, 2012.

KOHLHAUSER, C.; HELLMICH, C. Determination of Poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: Application to metals and wood. **European Journal of Mechanics-A/Solids**, Elsevier, v. 33, p. 82–98, 2012.

KU, T.; MAYNE, P. W. Yield stress history evaluated from paired in-situ shear moduli of different modes. **Engineering geology**, Elsevier, v. 152, n. 1, p. 122–132, 2013.

LEE, J.-S.; YOON, H.-K. Theoretical relationship between elastic wave velocity and electrical resistivity. **Journal of Applied Geophysics**, Elsevier, v. 116, p. 51–61, 2015.

LI, D. et al. Experimental research on acoustic wave velocity of frozen soils during the uniaxial loading process. **Sciences in Cold and Arid Regions**, v. 7, n. 4, p. 323–328, 2018.

LIANG, R. et al. Nondestructive evaluation of historic Hakka rammed earth structures. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 5, n. 1, p. 298–315, 2013.

- LOMBILLO, I. et al. In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 51, p. 451–460, 2014.
- MEEHAN, C. L. et al. Assessing soil compaction using continuous compaction control and location-specific in situ tests. **Automation in Construction**, Elsevier, v. 73, p. 31–44, 2017.
- MICCOLI, L. et al. Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling. **Materials and Structures**, Springer, v. 48, n. 10, p. 3443–3456, 2015.
- MILANI, A. P. d. S. et al. **Avaliação física, mecânica e térmica do material solo-cimento-cinza de casca de arroz e seu desempenho como parede monolítica**. [S.l.: s.n.], 2008.
- OLIVEIRA, F. G. R. d. et al. Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultrassônica em madeiras. **Revista Árvore**, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 141–145, 2006.
- PREUSSLER, L. A. **Contribuição ao estudo da deformabilidade de camadas de pavimento**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- QASRAWI, H. Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 30, n. 5, p. 739–746, 2000.
- ROWSHANZAMIR, M.; ASKARI, A. An investigation on the strength anisotropy of compacted clays. **Applied Clay Science**, Elsevier, v. 50, n. 4, p. 520–524, 2010.
- SANTIAGO, C. C. **O solo como material de construção**. second. [S.l.]: EDUFBA, 2001.
- SARRO, W. S.; FERREIRA, G. C. S. Soil Elastic Modulus Determined by Ultrasound Tests. **Soils and Rocks**, v. 42, n. 2, p. 117–126, 2019.
- SARRO, W. S. **Constantes elásticas de solo compactado a partir do ensaio de ultrassom**. [S.l.: s.n.], 2017.
- SARRO, W.; FERREIRA, G.; GALLETTTO, A. Técnica de ultrassom aplicada na inspeção de edificações construídas em solo compactado. In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto–Ibracon. [S.l.: s.n.], 2015.
- SENG, S.; TANAKA, H. Properties of very soft clays: A study of thixotropic hardening and behavior under low consolidation pressure. **Soils and Foundations**, Elsevier, v. 52, n. 2, p. 335–345, 2012.
- SILVA, A. S.; CORREIA, M. J. Desempenho de materiais de construção com interesse histórico - arquivo e ferramentas de divulgação. In: UNIVERSIDADE DE AVEIRO. CONGRESSO da Reabilitação do Património. [S.l.: s.n.], 2017.
- SILVA, L. **Estudo experimental do comportamento de tensão, deformação e resistência de solos artificialmente cimentados**. 2016. 108 f. 2016. Tese (Doutorado) – Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia)–Centro de Tecnologia ...
- TRINCA, A. J.; GONÇALVES, R. Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira. **Revista Árvore**, SciELO Brasil, v. 33, n. 1, p. 177–184, 2009.

UNESCO (Ed.). **World Heritage Earthen Architecture Programme**. 2021. Disponível em: <<https://whc.unesco.org/en/earthen-architecture/>>. Acesso em: 28 out. 2021.

VÁZQUEZ, C. et al. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. **Wood Science and Technology**, Springer, v. 49, n. 3, p. 607–622, 2015.

WANG, D.-y. et al. Application of ultrasonic technology for physical–mechanical properties of frozen soils. **Cold regions science and technology**, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 12–19, 2006.

XU, Q.; CHANG, G. K. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. **Automation in Construction**, Elsevier, v. 62, p. 78–88, 2016.

YESILLER, N.; HANSON, J. L.; USMEN, M. A. Ultrasonic assessment of stabilized soils. In: **SOFT Ground Technology**. [S.l.: s.n.], 2001. p. 170–181.

YILDIRIM, H.; SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 25, n. 4, p. 1645–1652, 2011.

YU, C.; JI, S.; LI, Q. Effects of porosity on seismic velocities, elastic moduli and Poisson's ratios of solid materials and rocks. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, Elsevier, v. 8, n. 1, p. 35–49, 2016.

Capítulo 7

Anexos

ANEXO I - Pedido de autorização Construction and Building Materials

14/12/2021 21:41

Gmail - Request for use article CONBUILDMAT-D-20-08299R1



Welida Sarro <welidasarro@gmail.com>

Request for use article CONBUILDMAT-D-20-08299R1

2 mensagens

Welida Sarro <welidasarro@gmail.com>
Para: em@editorialmanager.com

17 de agosto de 2021 11:25

Dear Editors,
Considering that the paper "Experimental investigation of the UPV wavelength in compacted soil" was published in the journal, we request authorization for included the article in the text of my doctoral thesis, which will be prepared in an alternative format.

Best Regards,

--

Wélida S. Sarro

Tecnóloga em Estradas - FT/UNICAMP

Mestra e Doutoranda em Tecnologia - FT/UNICAMP

Profa. Ms. - Unifaj - Jaguariúna

(19) 99207-1697

14/12/2021 21:41

Gmail - Request for use article CONBUILDMAT-D-20-08299R1



Welida Sarro <welidasarro@gmail.com>

Request for use article CONBUILDMAT-D-20-08299R1

2 mensagens

AuthorSupportGlobal (ELS) <AuthorSupport@elsevier.com>
Responder a: "AuthorSupportGlobal (ELS)" <AuthorSupport@elsevier.com>
Para: welidasarro@gmail.com

16 de setembro de 2021 16:38

Dear Dr Sarro,

Thank you for your email.

Regarding your request, doctoral thesis is not characterized as a publication. Thus, is authorized the insertion.

Kind regards,

Jinky Topacio
Researcher Support
ELSEVIER

Responsible sharing in line with copyright enables publishers to sustain high quality journals and the services they provide to the research community. [Find out how you can share your research published in Elsevier journals.](#)