



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**CORRELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO EM
SOLO-CIMENTO-COMPACTADO**

ROLANDO ANAGUA COILA

Foz do Iguaçu
2024



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

CORRELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO EM SOLO- CIMENTO-COMPACTADO

ROLANDO ANAGUA COILA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Dario Gomez Araujo.
Co Orientador: Prof. Dra. Gisele Suhett Helmer.

Foz do Iguaçu
2024

ROLANDO ANAGUA COILA

CORRELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO EM SOLO-CIMENTO-COMPACTADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Ivan Dario Gomez Araujo
UNILA

Prof. Dr. Ricardo Oliveira de Souza
UNILA

Prof. Dr. Gustavo Bogado
UNaM-ARG

Foz do Iguaçu, 28 de março de 2024.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

C679

Coila, Rolando Anagua.

Correlação do módulo de elasticidade dinâmico e estático em solo-cimento-compactado / Rolando Anagua
Coila. - Foz do Iguaçu-PR, 2024.

69 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR, 2024.

Orientador: Ivan Dario Gomez Araujo.

Coorientador: Gisele Suhett Helmer.

1. Solo-cimento-compactado. 2. Vibração acústica. 3. Módulo de elasticidade dinâmico. 4. Amortecimento. I. Araujo, Ivan Dario Gomez. II. Helmer, Gisele Suhett. III. Título.

CDU 624.13:539.3

“Previsão, não narração, é o verdadeiro teste de nossa compreensão do mundo.”

Nassim Nicholas Taleb

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, Gostaria de agradecer à minha família pelo apoio incontável ao longo dos últimos anos, especialmente aos meus pais e irmãos, que me apoiaram em tantos momentos difíceis. Sem o incentivo deles este trabalho não seria possível.

Gostaria de agradecer aos meus orientadores Prof.Dr. Ivan e Prof^a.Dr.^a Gisela pelo apoio contínuo ao longo dos últimos anos. Este trabalho não seria possível sem a orientação deles. Gostaria também de expressar minha gratidão ao professor Júlio pelo apoio e as orientações valiosas ao longo da minha jornada acadêmica. Ainda, agradeço a banca examinadora pelos comentários e críticas construtivas referente ao estudo realizado.

Gostaria de agradecer à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro durante meu mestrado. Obrigado.

Finalmente, expresso minha gratidão aos colegas do mestrado e a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para minha conquista do título de mestre.

RESUMO

As fundações são responsáveis pela distribuição da carga da estrutura ao terreno com segurança para evitar o aparecimento de diversos tipos de problemas que podem comprometer até a própria estrutura. A execução de sapatas em obras de pequeno e médio porte (casas, sobrados, barracões, galpões entre outros) assentadas sobre silte argiloso mole de origem residual, muitas vezes resulta-se inviável, pois ao utilizar as metodologias semi-empíricas de tensão admissível encontram-se valores baixos, optando-se geralmente pelo uso de estacas, mais essa nem sempre é uma alternativa econômica, pelo baixo nível de cargas dos pilares. Existe a necessidade de alternativas de melhoramento da resistência do solo como o uso do cimento. Igualmente surge a necessidade de caracterizar mecanicamente esse material para definir suas propriedades mecânicas de forma rápida e econômica. O uso de vibrações acústicas surge como uma técnica não destrutiva, acessível e econômica para a caracterização de materiais, geralmente utilizado para materiais como o concreto e sem quase nenhuma aplicação na área de solos. Nesse trabalho se estuda a viabilidade de caracterizar mecanicamente o módulo de elasticidade dinâmico, módulo de elasticidade estático e coeficiente de amortecimento do solo-cimento-compactado. O programa experimental consiste em realizar ensaios acústicos e ensaios de compressão axial em corpos de prova de Solo-Cimento-Compactado com dosagem de cimento de 6, 9 e 12% em relação ao peso total da mistura, para correlacionar o módulo de elasticidade estático e dinâmico de amostras de solo-cimento. Os resultados mostraram que quanto maior a adição do cimento as propriedades mecânicas do solo se tornam melhores, assim tanto a resistência a compressão como os módulos de elasticidades foram incrementando com a adição progressiva de cimento ao longo do tempo, inversamente ocorre para o caso do coeficiente de amortecimento. Os módulos de elasticidade dinâmicos foram maiores que os módulos de elasticidade estáticos em aproximadamente 6% e 13% pelo método de Técnica de Excitação por Impulso (TEI). Das equações obtidas para estimar o módulo de elasticidade estático a partir do módulo de elasticidade dinâmico foi incluído a densidade e o amortecimento a qual apresentou um bom coeficiente de correlação ($R=0,762$), o que indica que pode ser utilizado como ensaios complementares, permitindo uma observação detalhada do comportamento das propriedades do material ao longo do tempo. A pesquisa apresenta indícios que favorecem a viabilidade técnica de sua aplicação, tornando-a uma alternativa para caracterizar as propriedades mecânicas de forma rápida e econômica do solo cimento.

Palavras-chave: Solo-cimento-compactado; Vibração acústica; Módulo de elasticidade dinâmico; Amortecimento.

ABSTRACT

Foundations are responsible for safely distributing the load from the structure to the ground to prevent various types of problems that could compromise the structure itself. The execution of footings in small and medium-sized construction projects (houses, townhouses, warehouses, sheds, among others) placed on soft residual silty clay soil often becomes unfeasible. This is because, when using semi-empirical methodologies of allowable stress, low values are often encountered, and the use of piles is generally preferred. However, this is not always an economical alternative due to the low load levels of the pillars. There is a need for alternatives to improve soil strength, such as the use of cement. Similarly, there is a need to mechanically characterize this material to define its mechanical properties quickly and economically. The use of acoustic vibrations emerges as a non-destructive, accessible, and economical technique for material characterization, commonly used for materials like concrete and with almost no application in the field of soils. In this study, the feasibility of mechanically characterizing the dynamic modulus of elasticity, static modulus of elasticity, and damping coefficient of compacted soil-cement is investigated. The experimental program involves conducting acoustic tests and axial compression tests on specimens of Compacted Soil-Cement with cement dosages of 6%, 9%, and 12% relative to the total weight of the mixture to correlate the static and dynamic modulus of elasticity of soil-cement samples. The results showed that the higher the addition of cement, the better the mechanical properties of the soil become. Both compression strength and elasticity modulus increased with the addition of cement over time, inversely occurring for the damping coefficient. Dynamic elasticity moduli were higher than static elasticity moduli by approximately 6% and 13% using the TEI method. The equations obtained to estimate static elasticity modulus from dynamic elasticity modulus included moisture and damping, which showed a good correlation coefficient ($R=0.762$), indicating that they can be used as complementary tests, allowing a detailed observation of the material properties' behavior over time. The research provides indications favoring the technical feasibility of its application, making it an alternative for quickly and economically characterizing the mechanical properties of soil-cement.

Key words: Soil-cement-compact. Acoustic vibration. Dynamic modulus of elasticity, Damping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modos fundamentais de vibração para uma amostra cilíndrica	17
Figura 2 – Tipos de medição em um corpo cilíndrico	17
Figura 3 – Correlação entre módulo de elasticidade estático e dinâmico para argamassas ensaiadas	20
Figura 4 – Relação entre módulo de elasticidade estático e dinâmico para argamassas ensaiadas	21
Figura 5 – Relação entre a resistência a compressão e o módulo de elasticidade dinâmico para o concreto	21
Figura 6 – Relação entre módulo de elasticidade estático e dinâmico para o concreto	22
Figura 7 – Evolução dos módulos de elasticidade estático e dinâmico com o tempo de cura do concreto	23
Figura 8 – Montagem do ensaio experimental	24
Figura 9 – Montagem do ensaio experimental	25
Figura 10 – Comportamento do módulo de elasticidade dinâmico para uma determinada temperatura	25
Figura 11 – Incremento da resistência a tração com a adição do cimento	29
Figura 12 – Incremento da resistência a tração com a redução da porosidade	29
Figura 13 – Relação entre a resistência a compressão e quantidade de cimento para diferentes tempos de cura	30
Figura 14 – Relação entre módulo de elasticidade elástico e quantidade de cimento para diferentes tempos de cura	30
Figura 15 – Fluxograma da metodologia do trabalho.	32
Figura 16 – Local de extração do solo utilizado no estudo experimental	33

Figura 17 – Local de coleta do material.	34
Figura 18 – Procedimento para o ensaio granulométrico	36
Figura 19 – Propriedades físicas e dimensões dos corpos de prova	39
Figura 20 – Procedimento de moldagens de corpos de prova	41
Figura 21 – Corpos de prova com 6, 9 e 12% de solo – Cimento compactado processo de cura	42
Figura 22 – Equipamento para o ensaio Técnica de Excitação por Impulso	43
Figura 23 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela Técnica de Excitação por impulso	44
Figura 24 – Janela do programa UNILastic	45
Figura 25 – Registro da resposta acústica 6%SCC para 14 dias de tempo de cura	46
Figura 26 – Registro da resposta acústica 9%SCC para 14 dias de tempo de cura	46
Figura 27 – Registro da resposta acústica 12%SCC para 14 dias de tempo de cura	46
Figura 28 – Procedimento para o ensaio de compressão simples	47
Figura 29 – Gráfico tensão deformação do solo – cimento compactado	49
Figura 30 – Comparação do comportamento entre os testes corrigidos e os ensaios antigos	50
Figura 31 – Curva granulométrica do Solo	52
Figura 32 – Gráfico de compactação do Solo-cimento com diferente porcentagem de SCC	53
Figura 33 – Gráfico da resistência a compressão do Solo-cimento com tempo de cura de 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado	55
Figura 34 – Módulo de Elasticidade Estático do Solo-cimento com tempo de cura 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado	

	56
Figura 35 – Frequências (Hz) do solo – cimento com tempo de cura 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado	56
Figura 36 – Módulo Elasticidade Dinâmico do solo – cimento com tempo de cura 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado	57
Figura 37 – Amortecimento do solo – cimento com tempo de cura 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado	58
Figura 38 – Correlação do Módulo elasticidade estático e Módulo de elasticidade Dinâmico do solo - cimento	59
Figura 39 – Correlação do Amortecimento e Módulo de Elasticidade Dinâmico do Solo-cimento	59
Figura 40 – Correlação da resistência a Compressão - Módulo de Elasticidade Dinâmico do Solo-Cimento	60
Figura 41 – Correlação do Módulo de Elasticidade Estático - umidade e Módulo de Elasticidade Dinâmico do Solo-Cimento	60
Figura 42 – Correlação do Módulo de Elasticidade Estático – umidade - Amortecimento e Módulo de Elasticidade Dinâmico do Solo-Cimento	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ILAACH	Instituto Latino-Americano de Arte, Cultura e História
ILACVN	Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza
ILAESP	Instituto Latino-Americano de Economia, Sociedade e Política
ILATT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 DESENVOLVIMENTO.....	15
2.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	15
2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.....	16
2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	17
2.3.1 TÉCNICA POR EXCITAÇÃO POR IMPULSO.....	17
2.4 ESTUDO DE CASOS.....	21
2.5 SOLO – CIMENTO.....	28
2.5.1 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DO SOLO CIMENTO.....	29
2.5.2 APLICAÇÃO DO SOLO CIMENTO.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	36
3.1.1 CIMENTO.....	36
3.1.2 SOLO.....	36
3.1.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E SOLO-CIMENTO.....	37
3.1.4 MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA.....	44
3.1.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	48
3.1.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES.....	53
3.1.7 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.....	54
4 RESULTADOS.....	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70

REFERÊNCIAS.....	72
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

Geralmente as fundações profundas são utilizadas quando o solo superficial não tem capacidade de suporte suficiente para sustentar as solicitações da estrutura, inviabilizando a utilização de fundações superficiais (Maria Teresa da Silva 1994). No entanto, a solução de fundações profundas nem sempre é uma solução técnica e economicamente viável, pelo seu elevado custo, em especial para obras de pequeno e mediano porte (Marcio Antônio Vendruscolo, 1996).

Sendo assim, procuram-se soluções alternativas para melhorar as propriedades mecânicas como resistência a compressão, módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, desse material, as quais também são muito importantes para obras sujeitas principalmente a ações dinâmicas (Miguel F. S. F. do Amaral, 2009).

Existem variados métodos para melhorar as propriedades mecânicas do solo, um exemplo é a mistura solo-cimento como material de fundação (Antônio Anderson da Silva Segatini, 2000), as quais são frequentemente empregados em terraplenagem, subleitos para estradas, plataformas e sublastro de vias ferroviárias. Nesse sentido, surge a necessidade de caracterizar mecanicamente esse material para definir suas propriedades mecânicas de uma forma econômica e rápida.

As propriedades dinâmicas podem ser determinadas indiretamente por meio de ensaios não destrutivos (Neville, 2016). Dentre os métodos não destrutivos empregados para determinar as propriedades mecânicas destaca-se a frequência ressonante (Alengaram; Mahmud; Jumaat, 2011; El-Newihy et al., 2018; Zhou et al., 2015), a velocidade de pulso ultrassônico (Bogas; Gomes, 2014; Miličević; Štirmer; Bjegović, 2017) e a técnica de excitação por impulso (Jurowski; Grzeszczyk, 2018; Lee et al., 2017).

A frequência de ressonância é baseada na vibração do componente, determinando assim a frequência natural de vibração do componente em estudo, pode ser produzida por vibrações mecânicas variáveis ou por um impacto acústico. As vibrações mecânicas são produzidas por um vibrador acústico cuja frequência varia continuamente (El-Newihy et al., 2018). A maioria dos experimentos para obter as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade) do concreto foram baseados em espectroscopia de frequência ressonante, a qual é um procedimento de teste bastante complexo (Carrazedo et al., 2018). A técnica de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) é baseada na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de alta frequência mediante uma determinada amostra de material (Bahr et al., 2013), normalmente os testes ultrassônicos são usados em laboratório para medir as

propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade (Amaral et al., 2011). O teste ultrassônico é amplamente utilizado para a medição das propriedades elásticas dos materiais, avaliação da qualidade do material e medição indireta da resistência (Naik e Malhotra 1991; Popovics & Rose, 1994).

Já a técnica de excitação por impulso (TEI), é mais simples, menos dispendioso, sendo baseado no impacto de um martelo, e na subsequente medição do ruído irradiado com um microfone de baixo custo. A aquisição de dados é feita em um computador e os resultados são processados posteriormente em um software dedicado para a identificação das frequências de vibração do material. (Bahr et al., 2013a; Malhotra; Carino, 2004; Sílvia Martins de Almeida, 2012). A norma ASTM E1876-15 (2015) fornece procedimentos para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson com base nas frequências de ressonância fundamentais de amostras de geometrias e massa conhecidas. Pelo que o uso de vibrações acústicas surge como uma técnica não destrutiva, acessível e econômica para a caracterização de materiais geralmente utilizado para materiais como o concreto (ACI 228.22 R-13, 2013; BS EN 12504-4, 2004; EN 1992-1-1, 2004; ASTM C597, 2012) e sem quase nenhuma aplicação na área de solos

Este trabalho tem por objetivo investigar a viabilidade de caracterizar mecanicamente (módulo de elasticidade estático, módulo de elasticidade dinâmico, e coeficiente de amortecimento) o solo e Solo-Cimento-Compactado (SCC) por meio de ensaios estáticos e acústicos em corpos de prova com dosagem de cimento de 6, 9 e 12% em relação ao peso total da mistura. Para a obtenção das propriedades mecânicas serão utilizadas as normas NBR 12025 para os ensaios estáticos e ASTM E1876-15 para os ensaios acústicos pelo software UNILastic (Ramirez Nunez; Dario Araújo, 2020) que captará o som dos espécimes e realizaram as análises espectrais dos sinais para identificar as frequências de ressonância.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é correlacionar o módulo de elasticidade estático e dinâmico do Solo-Cimento-Compactado.

1.2 Objetivos Específicos

- A. Realizar os ensaios de caracterização do solo-cimento compactado;
- B. Determinar o módulo de elasticidade estático de amostras de solo-cimento-compactado;
- C. Determinar o módulo de elasticidade dinâmico, coeficientes de amortecimento associados às frequências de ressonância dinâmico de amostras de solo-cimento-compactado;
- D. Determinar a correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e estático de amostras de solo-cimento compactado;
- E. Determinar a correlação do módulo de elasticidade estático e a resistência a compressão de amostras de solo-cimento compactado.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade (E) conhecido também como o módulo de Young, é um importante parâmetro de desempenho que indica a capacidade do material de se deformar elasticamente quando submetida a uma tensão (Beushausen; Dittmer, 2015; Estolano et al., 2018; Jurowski; Grzeszczyk, 2015). Sua definição se origina da lei de Hooke, a qual relaciona a proporcionalidade entre a tensão e a deformação do material:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Equação 1})$$

Módulo de elasticidade é uma das características mecânicas mais importantes de um material para projetos de estruturas. Existem três tipos de determinação do módulo de elasticidade: O módulo estático (E_c) e o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade à Flexão (E_f) (Metha; Paulo J. M. Monteiro, 2013). Os dois primeiros serão abordados neste trabalho

Os pesquisadores vêm tentando estabelecer a relação entre módulos dinâmicos e estáticos há algum tempo. Esta relação é difícil de determinar através da análise do comportamento físico, uma vez que a heterogeneidade do concreto influencia nos módulos de elasticidade de forma diferente (Malhotra; Carino, 2004). O módulo elástico dinâmico é geralmente 20%, 30% ou 40% maior que o módulo elástico estático, especificamente para alta, média e baixa resistência (Metha; Paulo J. M. Monteiro, 2013).

2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

A NBR 8522 (2017) define módulo de elasticidade como uma propriedade mecânica que relaciona a deformação apresentada por um material devido a um estado de tensão. Essa relação surge da relação entre força por unidade de área (tensão) e a deformação proporcional em materiais no sistema de elasticidade linear de uma deformação uniaxial.

O Módulo de Elasticidade Estático (E_c) é determinado a partir da velocidade de carregamento e tensão previamente estabelecidas no estado elástico do material (Metha e. Monteiro, 2013; Neville, 2016). A NBR 8522 (2017) apresenta dois tipos de carregamento possíveis para determinar o E_c : módulo de deformação secante e o módulo de deformação

tangencial inicial (E_{ci}). O Módulo de Elasticidade Tangente inicial, é determinado após medida a deformação do corpo de prova, é calculado conforme a equação 2:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde σ é a resistência do corpo de prova em Mpa, ε é a deformação específica correspondente a tensão σ .

2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O módulo de elasticidade dinâmico se relaciona a uma deformação instantânea muito pequena e ela pode ser considerada aproximadamente igual ao Módulo de Deformação tangencial Inicial e sensivelmente maior que o Módulo de Deformação Secante (Metha; Paulo J. M. Monteiro, 2013).

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, existem vários métodos de medição indireta, entre os mais conhecidos e utilizados temos o método da Frequência Ressoante (Dilek; Leming 2008). Método da velocidade de Impulso Ultrassônico e o Método da Técnica de Excitação por Impulso (TEI). No trabalho será aplicado o método a Técnica de Excitação por Impulso (TEI), devido à disponibilidade do equipamento e pelas seguintes vantagens que apresenta a TEI: permite reduzir a quantidade total de amostras no seu estudo, proporciona resultados mais precisos devido à menor quantidade de variáveis e menor susceptibilidade de erros experimentais (Haach et al., 2013), agiliza a obtenção dos resultados e permite a avaliação de danos progressivos em elementos estruturais, pois a fissuração reduz a rigidez do material e, portanto, a frequência natural de vibração (Sandra Freire de Almeida, 2005).

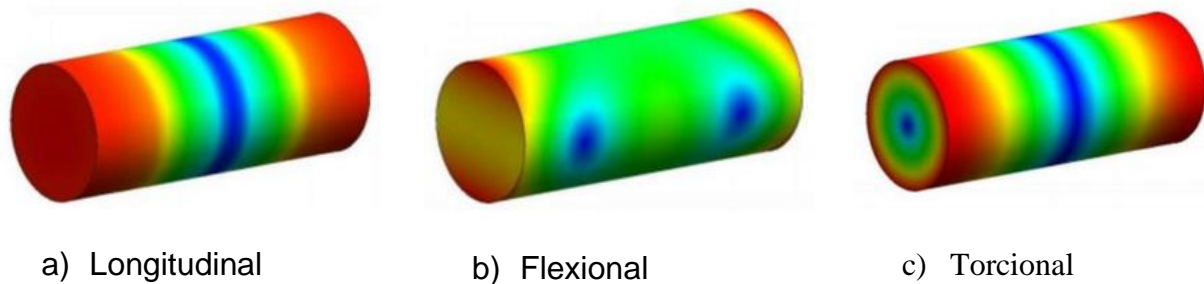
2.3.1 Técnica por excitação por impulso

As metodologias não destrutivas estão sendo mais utilizadas e os métodos vibracionais estão entre as técnicas mais adequadas para o controle de qualidade (Fallstrom; Jonsson, 1991; Fallstrom; Molin, 1987). A técnica de excitação por impulso (TEI) é um ensaio não destrutivo descrito pela (ASTM E1876, 2015). Este método consiste, na determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto a partir das frequências naturais de vibração. O ensaio consiste em excitar um corpo de prova de geometria regular

conhecida (cilíndrica, prismática, placas) com um leve impulso manual ou mecânico de curta duração de maneira longitudinal, flexional ou torcional, a fim de obter a frequência ressonante da resposta acústica captada por um microfone (Bahr et al., 2013a).

Devido à excitação, o corpo de prova vibra e para cada modo há uma frequência fundamental característica. Na Figura 1 são apresentados os principais modos fundamentais de vibração para um corpo de prova cilíndrico para os três tipos e excitação.

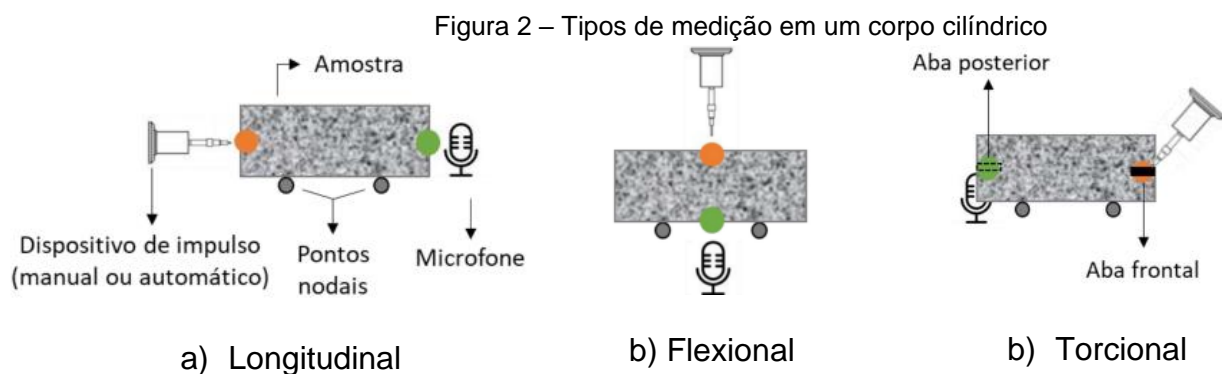
Figura 1 – Modos fundamentais de vibração para uma amostra cilíndrica



Fonte: Pereira e Otani (2017)

Onde as regiões de coloração azul refletem os pontos no qual a amplitude de vibração é mínima, enquanto as regiões de coloração avermelhado representam a amplitude de vibração máxima (Pereira; Otani, 2017).

A Figura 2 mostra as condições de contorno ótimas para se obter as frequências naturais de vibração de um corpo cilíndrico



Fonte: Araujo Thomaz, (2020)

Para a determinação do módulo de elasticidade, o corpo de prova (CP) é apoiado sobre um suporte, (a função do suporte é sustentar o corpo de prova, permitindo que este vibre livremente ao receber o impulso mecânico de excitação), posteriormente o CP é posicionada nos seus nós de ressonância fundamentais (a $0,224L$ de cada extremidade, onde L é o comprimento da amostra). O pulsador e o sensor acústico são posicionados no ponto correspondente ao tipo de medição do estudo (longitudinal, flexional ou torcional). Em seguida, é aplicado um leve impacto na amostra para a captação das frequências de vibração (ASTM E1876, 2015).

Logo após o término do teste, os dados são coletados e convertidos do domínio do tempo para o domínio da frequência aplicando métodos de estimativa do espectro, como é caso do método de Welch (1967) que envolve a determinação da transformada de Fourier dos sinais de resposta (Gomez, 2015), determinando assim um conjunto aproximado de frequências de ressonância (f_r) do material testado. O cálculo dos módulos elásticos do material é possível porque as frequências de ressonância (f_r) dependem da massa, dimensões e propriedades elásticas da amostra testada (Roebben et al., 2000).

Os procedimentos da ASTM E1876 (2015) e o método proposto por (Kolluru; Popovics; Shah, 2000) foram as metodologias implementadas no software UNILastic (Ramirez Nunez; Dario; Araújo, 2020). Nas equações 3, 4, 5 e 6 é mostrada as correlações pela norma ASTM E1876 (2015) para a determinação dos módulos de elasticidade em função da frequência fundamental longitudinal (f_L), flexional (f_F), ou torcional (f_T), a massa específica (ρ), e as características elásticas do material.

$$E_d = \frac{5,093 * (L * m * f_L^2)}{d^2 * K} \quad (\text{Equação 3})$$

$$E_d = \frac{1,6067 * (L^3 * m * f_F^2 * T_1)}{d^4} \quad (\text{Equação 4})$$

$$G = \frac{16 * (L * m * f_T^2 * R_{E1876})}{d^2 * \pi} \quad (\text{Equação 5})$$

$$T_1 = 1 + 4,938(1 + 0,0752v_d + 0,8109v_d^2) \left(\frac{d}{L}\right)^2 - 0,4883 \left(\frac{d}{L}\right)^4 - \left[\frac{4,691(1 + 0,2023v_d + 2,173v_d^2) \left(\frac{d}{L}\right)^4}{1 + 4,754(1 + 0,1408v_d + 1,536v_d^2) \left(\frac{d}{L}\right)^2} \right] \quad (\text{Equação 6})$$

Onde E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (Pa), G o módulo de cisalhamento (Pa), L é o comprimento do corpo de prova (mm), d é o diâmetro (mm), m ; é a massa (g), f_L é a frequência fundamental longitudinal (Hertz), f_F a frequência fundamental flexional (Hertz), f_T é a frequência fundamental torcional (Hertz), k e o fator de correção do modo

longitudinal, R_{E1876} é o fator de correção do modo torcional, T_1 é o fator de correção do modo flexional onde o ν_d é o coeficiente de Poisson dinâmico.

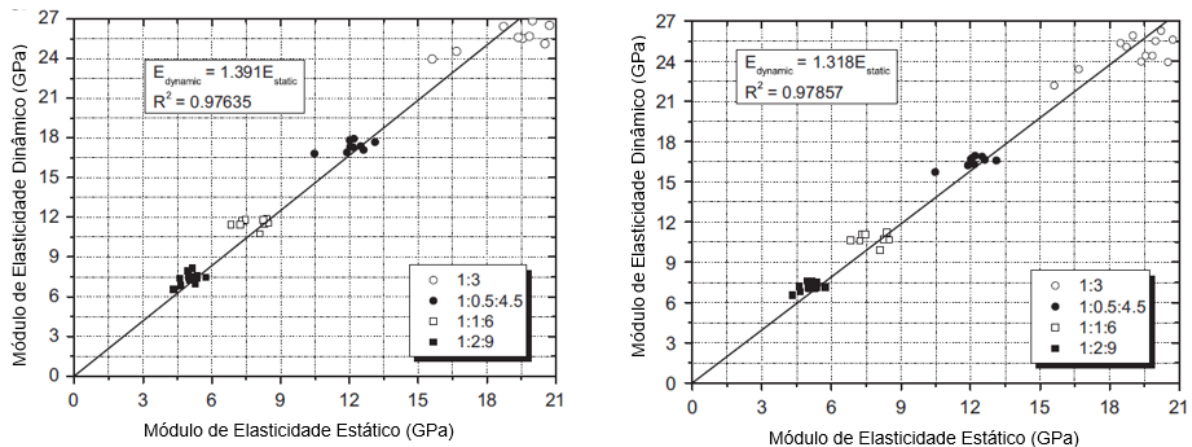
O procedimento para a determinação da taxa de amortecimento foi da extração de uma curva de amortecimento não linear que relaciona a amplitude de resposta e a taxa de amortecimento para cada frequência de ressonância. Para construir a curva de amortecimento não linear, são usados o método de decremento aleatório (Cole, 1973) e o método de ajuste de curva. A taxa de amortecimento é calculada usando o método de ajuste da curva de frequência, que ajusta um sistema de um grau de liberdade próximo a uma frequência de ressonância.

Todos os procedimentos e métodos anteriores já foram configuradas no software UNILastic (Ramirez Nunez; Dario; Araújo, 2020) utilizado para a determinação dos parâmetros mecânicos por meio da Técnica de Excitação por Impulso (TEI), sendo necessário somente inserir os dados de entrada no programa como dimensão e a massa do material.

2.4 Estudo de casos

Ensaio acústicos foram realizados por Haach et al. (2013) em argamassas para determinar as propriedades mecânicas desse material. Quatro misturas foram produzidas em amostras cilíndricas (50 mm e 100 mm) de comprimento, onde foram realizados ensaios acústicos antes dos ensaios estáticos para caracterizar o módulo de elasticidade dinâmico. Neste ensaio foram avaliadas e correlacionadas o módulo de elasticidade estático e dinâmico (Figura 3), sem seguida foi realizado uma comparação da dispersão entre as medições. A dispersão dos valores medidos teve uma variação de 5,95% a 8,32% no caso de ensaios estáticos, enquanto para os ensaios dinâmicos uma variação de 2,27% a 5,01%. Por conseguinte, com os ensaios realizados observou-se uma melhor precisão obtida nos ensaios acústicos, assim também o módulo de elasticidade dinâmico foi maior que o estático.

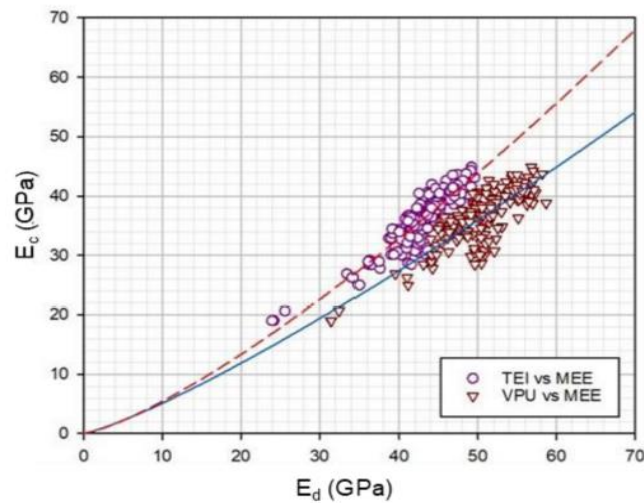
Figura 3 – Correlação entre módulo de elasticidade estático e dinâmico para argamassas ensaiadas



Fonte: Haach et al., (2013)

Thomaz et al. (2021) realizaram ensaios aplicando a técnica por excitação por impulso em diferentes lotes de concreto onde foram preparados variando a relação água/cimento, tipo de agregado basáltico e quantidade de agregados as quais foram ensaiadas aos 28 dias, o cimento utilizado foi o CP V-ARI e com uma resistência a compressão que varia de 24,16 a 54,17 MPa's. Na pesquisa concluíram que a origem do agregado graúdo foi um fator que teve maiores influências nas variações no módulo de elasticidade. Ademais, o módulo de elasticidade tende a incrementar nas idades iniciais de cura do concreto devido às reações de hidratação do cimento Portland. Nesta pesquisa os módulos de elasticidade dinâmico foram maiores em aproximadamente 16% que os módulos de elasticidade estático com um coeficiente de determinação variando entre 0,811 e 0,901 e um erro de máximo de 2,46 GPa (Figura 4). Enquanto a determinação do módulo de elasticidade do concreto, o tempo de realização dos ensaios dinâmicos por TEI é 10 vezes mais rápida que o ensaio estático. Já as variáveis do módulo de elasticidade dinâmico e resistência a compressão apresentam elevadíssima correlação ($R=0,936$). Ademais, o modelo estatístico obtido consegue representar 87,66% ($R^2=0,8766$) das variáveis experimentadas pela variável dependente (módulo de elasticidade dinâmico).

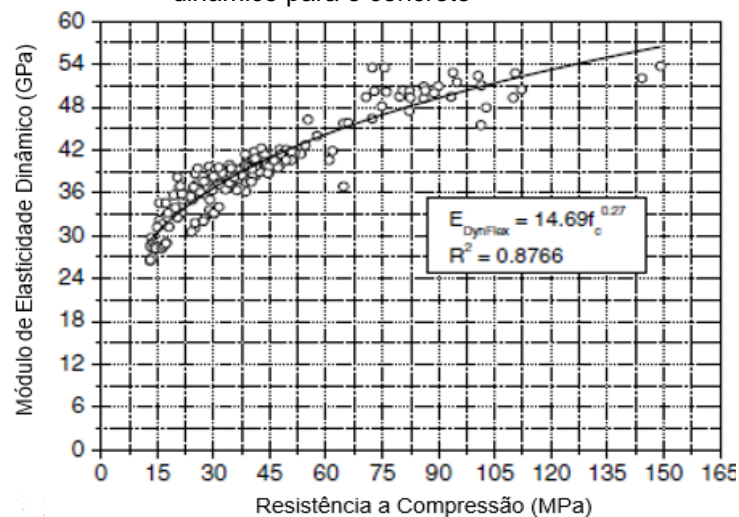
Figura 4 – Relação entre módulo de elasticidade estático e dinâmico para argamassas ensaiadas



Fonte: THOMAZ et al., (2021)

Adicionalmente, Carrazedo et al. (2018a) também aplicaram a técnica de excitação por impulso para avaliar as propriedades mecânicas do concreto onde foram produzidas dezessete misturas de concreto em corpos de prova de 100 e 200 mm de altura, com cimento Portland Tipo III de alta resistência inicial, agregado fino (areia) de 0,3 mm de diâmetro e um agregado graúdo (basalto) de 12,7 e 9,6 mm, onde foi avaliado seu comportamento ao longo do tempo (7, 14, 28 dias) obtendo-se resistência a compressão variando de 13 a 147 MPa's. Similarmente, aos ensaios acústicos mostraram uma menor dispersão com um coeficiente de variação de 1,53% e uma excelente correlação (0,88) com a resistência a compressão e o módulo de elasticidade dinâmico (Figura 5).

Figura 5 – Relação entre a resistência a compressão e o módulo de elasticidade dinâmico para o concreto



Fonte: CARRAZEDO et al., (2018)

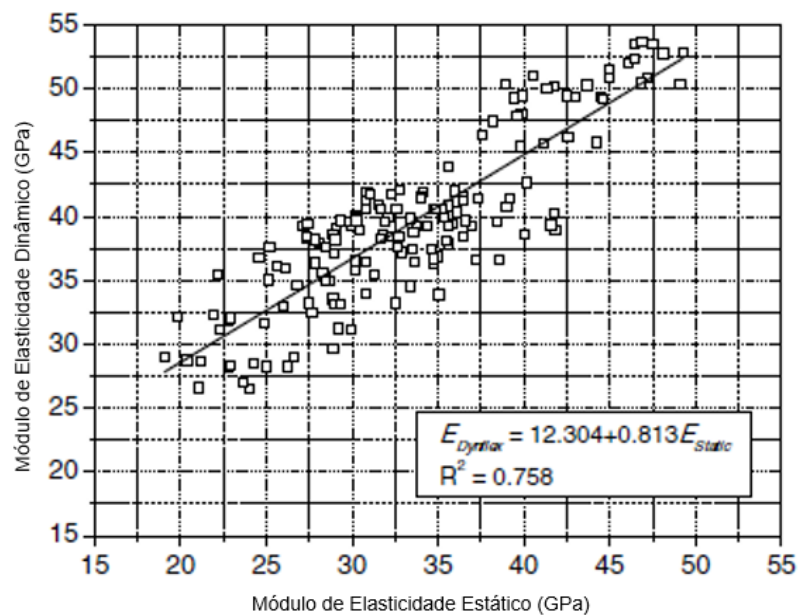
A Figura 6 mostra a correlação entre os módulos elásticos estáticos e dinâmicos, apresentando um coeficiente de determinação de $R^2=0,758$ a qual foi significativamente superior os módulos de elasticidade dinâmicos estimados por equações empíricas como apresenta a tabela 1.

Tabela 1 – Módulos dinâmicos do concreto estimados por equações empíricas para o concreto por meio de testes acústicos

BSI (1985)	$E_{Static} = 1.25E_{Dyn} - 19$	$R^2=0,6134$	(Equação 7)
LYDON; BALENDRAN, (1986)	$E_{Dyn} = 1.25E_{Static}$	$R^2=0,5812$	(Equação 8)
MALHOTRA e Sivasundaram, (2004)	$\frac{E_{Static}}{E_{Dyn}} = 0,368 + 0,0126E_{Static}$	$R^2=0,5341$	(Equação 9)
POPOVICS, (1975)	$E_{Static} = 427.484E_{Dyn}^{1.4}/w$	$R^2=0,6224$	(Equação 10)

Fonte: CARRAZEDO et al. (2018)

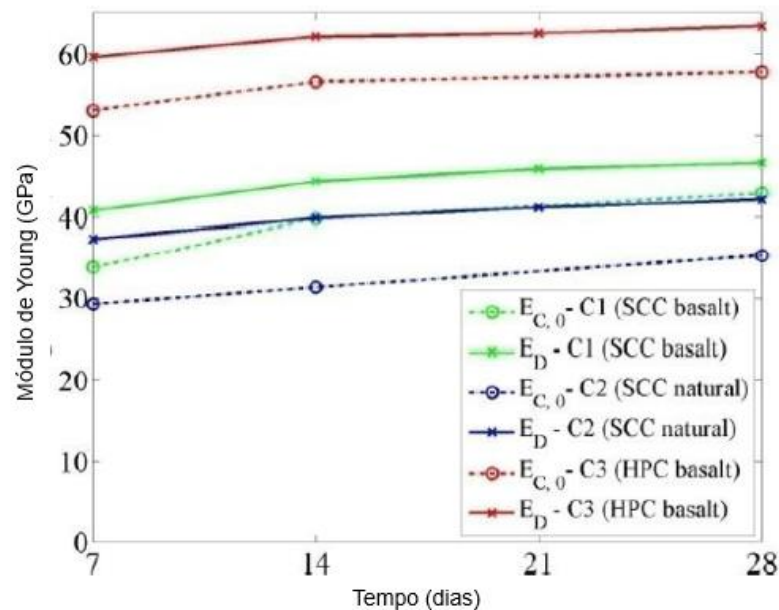
Figura 6 – Relação entre módulo de elasticidade estático e dinâmico para o concreto



Fonte: CARRAZEDO et al., (2018)

Os pesquisadores Jurowski; Grzeszczyk (2015) realizaram ensaios acústicos de impacto e ultrassom que foram usadas para medir as propriedades elásticas dinâmicas em misturas de concreto autoadensável (C1) e concreto, com cimento CEM III A 42,5N (concretos C1 e C2) e CEM I 42,5R (C3) e agregado de basalto britado (C2). Ensaios foram realizados em 3 corpos de provas prismáticos (140 x 44 x 500mm) de comprimento, para cada mistura. Os resultados obtidos mostraram que o módulo de elasticidade dos módulos de Young apresentou que os valores obtidos com o teste dinâmico são claramente superiores que os obtidos com o método de teste estático (Figura 7). O valor do módulo de Young do concreto (tanto estático quanto o dinâmico) para o concreto CAA com agregado de basalto é maior do que no caso do concreto com agregado natural, embora ambos os concretos sejam caracterizados por resistência à compressão semelhante.

Figura 7 – Evolução dos módulos de elasticidade estático e dinâmico com o tempo de cura do concreto

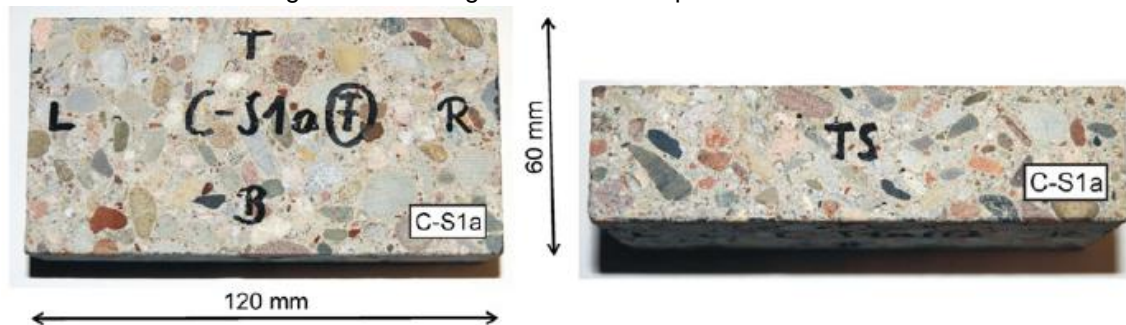


Fonte: JUROWSKI; GRZESZCZYK, (2015)

Do mesmo modo, ensaios não destrutivos foram utilizados por Bahr et al., (2013) para investigar as propriedades elásticas do concreto exposto ao fogo, para isso foi aplicado a Técnica de Excitação por impulso. Foram produzidas 5 amostras com as dimensões (120x60x30) mm (Figura 8), foi utilizado um agregado graúdo com tamanho máximo de 8 mm, cimento Portland CEM 42.5R com um aditivo superplastificante “Muraplast FK 63.30” visando melhorar a consistência do concreto, para um fck 30 MPa. Os corpos foram submetidos a uma taxa de aquecimento de 3 °C/min até 1000 C/min durante 30 minutos.

Estes ensaios foram realizados 3 meses depois da produção da amostra, inicialmente foram ensaiados pela Técnica de Excitação por Impulso e posteriormente aplicados aos ensaios estáticos. No estágio de resfriamento o amortecimento teve um aumento para temperaturas entre 900 e 1000 °C. No entanto, a frequência de flexão e o módulo de Young diminuíram para menor resfriamento, para temperaturas inferiores a cerca de 500 °C não foi possível detectar a frequência de flexão de forma confiável. Dificultando determinar a frequência de flexão entre cerca de 600 a 800 °C. O amortecimento apresentou uma dispersão a qual resultou da dissociação de carbonatos de cálcio nesta região de temperatura. Os resultados apresentaram que o módulo de Young do concreto exposto ao fogo pode exceder o dado em regulamentos normativos.

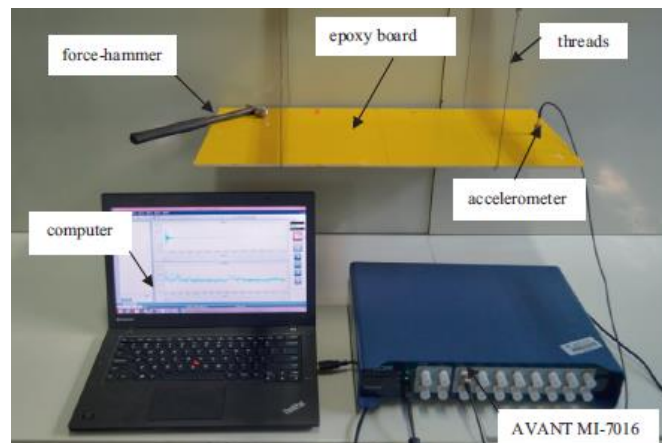
Figura 8 – Montagem do ensaio experimental



Fonte: Bahr et al., (2013)

A técnica de excitação por impulso (TEI) também foi aplicado por Song; Zhong; Xiang (2017) em materiais tais como em placas retangulares de compósitos laminados (Figura 9), para avaliar as propriedades mecânicas de este material como o módulo Young dinâmico e o módulo cisalhamento dinâmico. Foram ensaiadas 3 placas com as dimensões (30x20x0,6) cm, (40x40x0,6) cm e (60x30x0,6) cm pela TEI e os resultados foram comparados com formulações de métodos empíricos onde obtiveram erros relativos variando de 0,051% a 0,294% para o Módulo de Young e erros de 0,032% a 0,051% para o módulo de cisalhamento. De maneira que o resultado obtido pela técnica de Excitação por Impulso é aplicável para a identificação de parâmetros mecânicos para compósitos laminados.

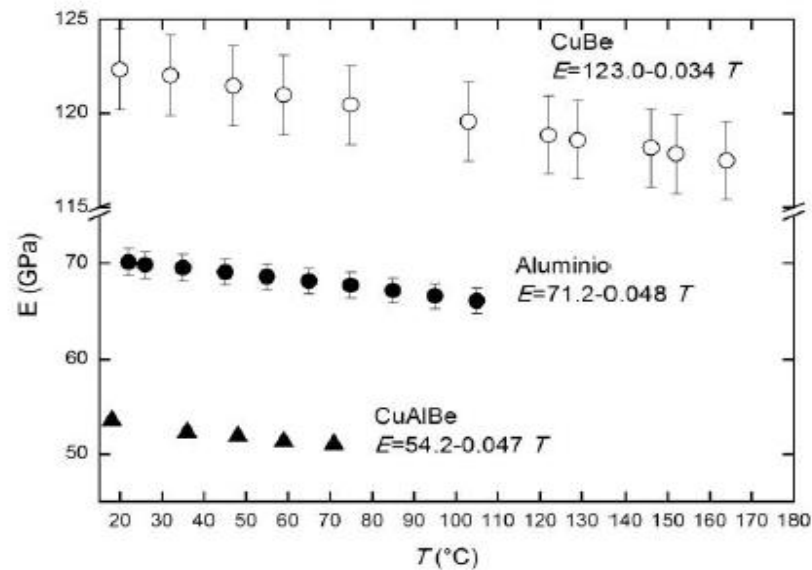
Figura 9 – Montagem do ensaio experimental



Fonte: SONG et al., (2017)

Tognana; Montecinos e Salgueiro (2018) utilizaram o método não destrutivo mediante a técnica de excitação por impulso, foram realizados ensaios em amostras de cobre, alumínio e ligas à base de cobre. As medições foram feitas usando diferentes modos de vibração: flexão em uma barra apoiada e longitudinal. Como primeiro passo, o módulo de Young de uma amostra foi determinado usando diferentes modos. Por outro lado, a variação do módulo de Young foi determinada em função da temperatura e dos parâmetros microestruturais estudados, como tamanho de grão. Na pesquisa verificou-se que o módulo de Young varia fortemente em função do tamanho de grão em CuAlBe (cobre alumínio e berílio), em menor grau em CuBe (cobre berílio) e não apresenta dependência do cobre e se observa que há um decréscimo do módulo de elasticidade em função do aumento de temperatura de forma aproximadamente linear (Figura 10). A TEI provou ser uma variante simples e de baixo custo para determinar variações do módulo de Young sob variações microestruturais, neste caso tamanho de grão, ou temperatura.

Figura 10 – Comportamento do módulo de elasticidade dinâmico para uma determinada temperatura



Fonte: TOGNANA et al., (2018)

2.5 Solo-Cimento

O solo-cimento é um produto resultante da íntima mistura de solo, cimento Portland e água, que quando compactados à umidade ótima e densidade máxima alteram suas propriedades mecânicas do solo, adquirindo maior resistência e durabilidade devido às reações ocorridas pela hidratação do cimento (ABCP, 2004).

Assim, solo-cimento pode ser considerado uma mistura de fases não homogêneas com propriedades mecânicas controladas pela quantidade de cimento, porosidade final, teor de umidade e tempo de cura. O teor de água de moldagem torna-se relevante para a compactação e hidratação do cimento Portland; portanto, afeta as propriedades mecânicas e térmicas dos solos estabilizados com cimento. O teor de água de moldagem (relação água-cimento), agentes climáticos externos (chuva ou inundações) ou internos (vazamentos acidentais de água ou evapotranspiração em edifícios), reduzem a durabilidade e a resistência mecânica dos blocos de terra (Minke, 2009)

Cimento na presença de água tende a formar uma microestrutura rígida envolvendo as partículas sólidas melhorando a resistência mecânica (Guettala; Abibsi; Houari, 2006). Vários autores concluíram que a resistência mecânica em misturas de solo, cimento depende do tipo de solo, mineralogia e teor de partículas finas (Balaji; Mani; Venkatarama Reddy 2017 - 2012).

O solo-cimento geralmente apresenta um comportamento complexo afetado por muitos fatores, por exemplo, as propriedades físico-químicas do solo, a quantidade de cimento e a porosidade (Clough; Sitar; Bachus, 1981; Consoli et al., 2009, 2011). Os fatores que mais afetam a resistência à tração de solos tratados com cimento segundo Moore e at., (1790) são: a quantidade de cimento, o esforço de compactação, a distribuição granulométrica dos solos e o período de tempo de cura.

2.5.1 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DO SOLO CIMENTO

A dosagem de solo-cimento é realizada por meio de ensaios laboratoriais, seguida da interpretação dos resultados por meio de critérios pré-estabelecidos. Segundo esses autores, o resultado consiste na fixação de três variáveis: quantidade de cimento, quantidade de água e massa específica aparente seca máxima, sendo que as duas últimas variáveis sofrem pequenas oscilações, dadas as condições de campo (ABCP, 2004).

Segundo ABCP (2004) o padrão simplificado de dosagem de solo-cimento pode ser resumido como:

- Identificação e classificação de solos;
- Seleção da quantidade de cimento para o ensaio de compactação;
- Execução do teste de compactação;
- Seleção das quantidades de cimento para o ensaio de durabilidade;
- Moldagem de corpos de prova para o teste de durabilidade;
- Execução do teste de durabilidade por moldagem e secagem; e
- Seleção da quantidade adequada de cimento com base nos resultados do teste.

A Tabela 2 apresenta as quantidades de cimento recomendadas pela ABCP (2004), na pesquisa será utilizada a quantidade de cimento até 12% para uma classificação tipo A6, já a Tabela 3 apresenta a classificação dos solos.

Tabela 2. Quantidades de cimento indicadas para o ensaio de compactação

Classificação H.R.B.	Quantidade de cimento (%)
A4	13
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: ABCP (2004)

Tabela 3. Classificação de solo AASHTO

Classificação Geral	Materiais silte-argilosos (más de 35% passando pela peneira. No. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Classificação em grupos				
Granulometria: % passando a peneira; N. 10 (2,0 mm) N. 40 N (0,42 mm.) N. 200 (0,074 mm.)	36 máx	37 máx	38 máx	39 máx
Características da fração passando a peneira N. 40: Limite de Liquidez (%) Índice de Plasticidade (%)	40 máx 10 máx	41 máx 10 máx	40 máx 11máx	41 máx 11máx
Índice de Grupo (IG)	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Materiais Constituintes	Solos limosos		Solos Argilosos	
Comportamento como subleito	Mediano o pobre			

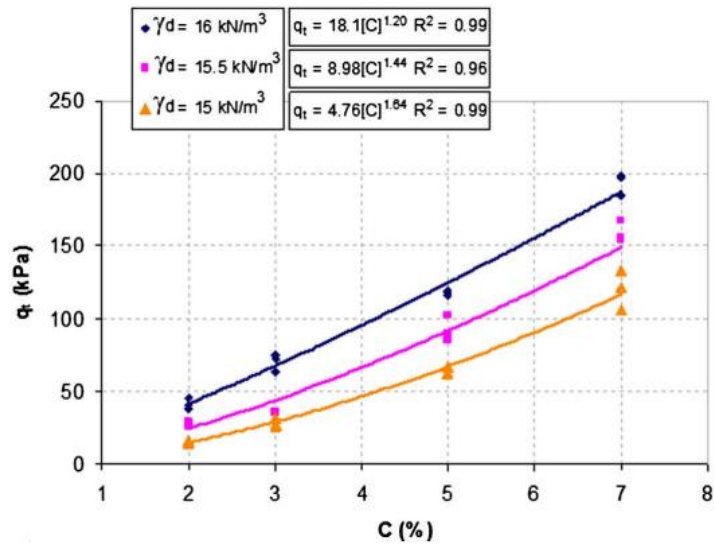
Fonte: DNER (1996)

2.5.2 APLICAÇÃO DO SOLO CIMENTO

Levando em consideração as propriedades das camadas estabilizadas com cimento, é comum em todo o mundo vê-lo sendo aplicado em diferentes tipos de vias. Seu uso permite uma grande flexibilidade e tem sido aproveitado principalmente na construção de bases e sub-bases de pavimentos, fundações, muros, aeroportos, áreas de armazenamento, proteção de barragens e proteção contra a erosão de correntes de água (Consoli et al., 2011; Washington Peres Nunez, 1991).

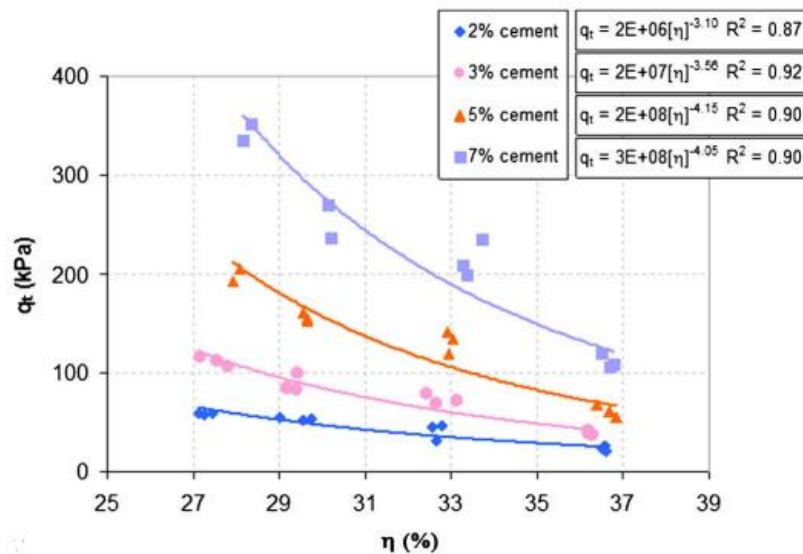
Consoli et al (2009), realizaram ensaios de tração para um solo tipo areia argilosa misturadas com 2, 3, 5 e 7% de cimento, onde a resistência a tração foi incrementando à medida que foi adicionado a porcentagem de cimento (Figura 11). Assim também se pode observar que à medida que a porosidade foi diminuindo a resistência à tração foi incrementando como se pode ver na (Figura 12)

Figura 11 – Incremento da resistência a tração com a adição do cimento



Fonte: Consoli et al., (2009)

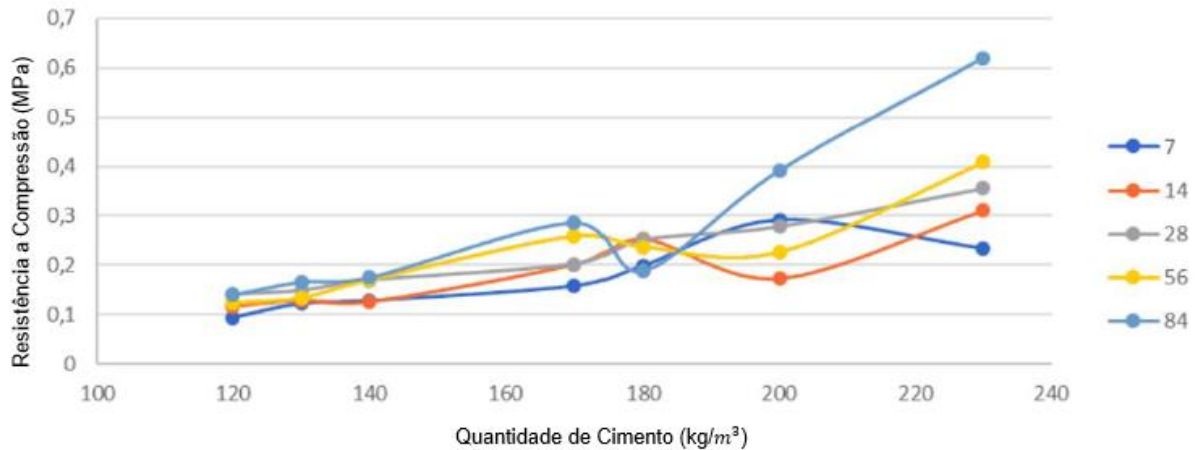
Figura 12 – Incremento da resistência a tração com a redução da porosidade



Fonte: Consoli et al., (2009)

Jendrysik et.al (2018) avaliaram as propriedades do solo - cimento como a resistência a compressão e o módulo de elasticidade, em ensaios realizados na Polônia com corpos de prova de base quadrada (15 x 15 cm), numa mistura de 120 a 226 kg de cimento para m³ de solos orgânicos. Concluíram que quanto mais cimento na mistura maior é sua resistência a compressão, assim também apresenta uma maior resistência ao longo do tempo de cura das amostras como mostra a figura 13.

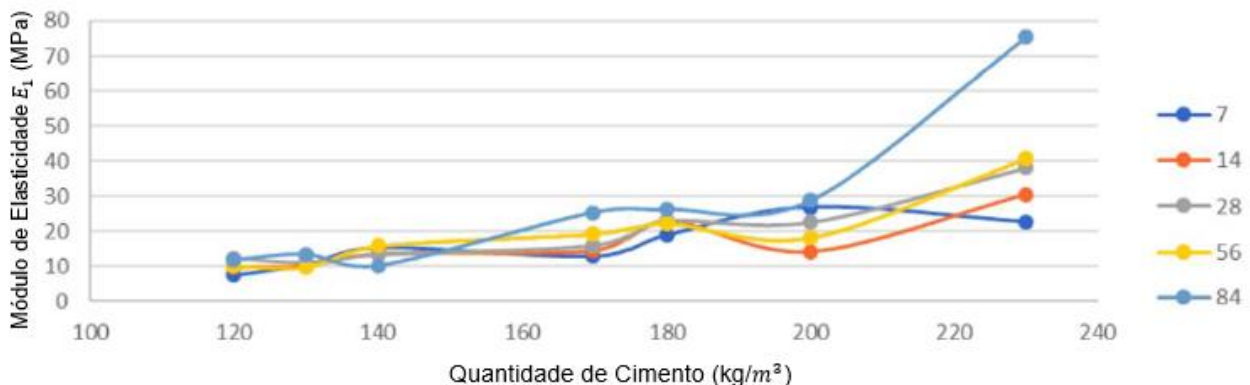
Figura 13 – Relação entre a resistência a compressão e quantidade de cimento para diferentes tempos de cura



Fonte: Jendrysik et al., (2018)

Para a relação entre o módulo de elasticidade e a quantidade de cimento se pode observar na Figura 14 que para o teor de cimento, 120-140 $\frac{kg}{m^3}$, o módulo de elasticidade está entre 7,5 e 15,5 MPa's, para tempos de maturação específicos, para um teor de cimento de 170-200 $\frac{kg}{m^3}$ apresenta um módulo de elasticidade de 13 – 19 MPa's, aqui em esta faixa existem diferenças consideráveis entre diferentes tempos de cura e o maior módulo de elasticidade é dado para um teor de cimento de 230 $\frac{kg}{m^3}$ com módulos de elasticidade de 22,7 – 40,7 MPa's (Figura 14) (Jendrysik et al., 2018).

Figura 14 – Relação entre módulo de elasticidade elástico e quantidade de cimento para diferentes tempos de cura



Fonte: Jendrysik, (2018)

Com as pesquisas realizadas na literatura podemos concluir que existem vários trabalhos realizados pelos métodos não destrutivos aplicando a técnica de excitação por Impulso (TEI) para a caracterização das propriedades mecânicas para o concreto e metais

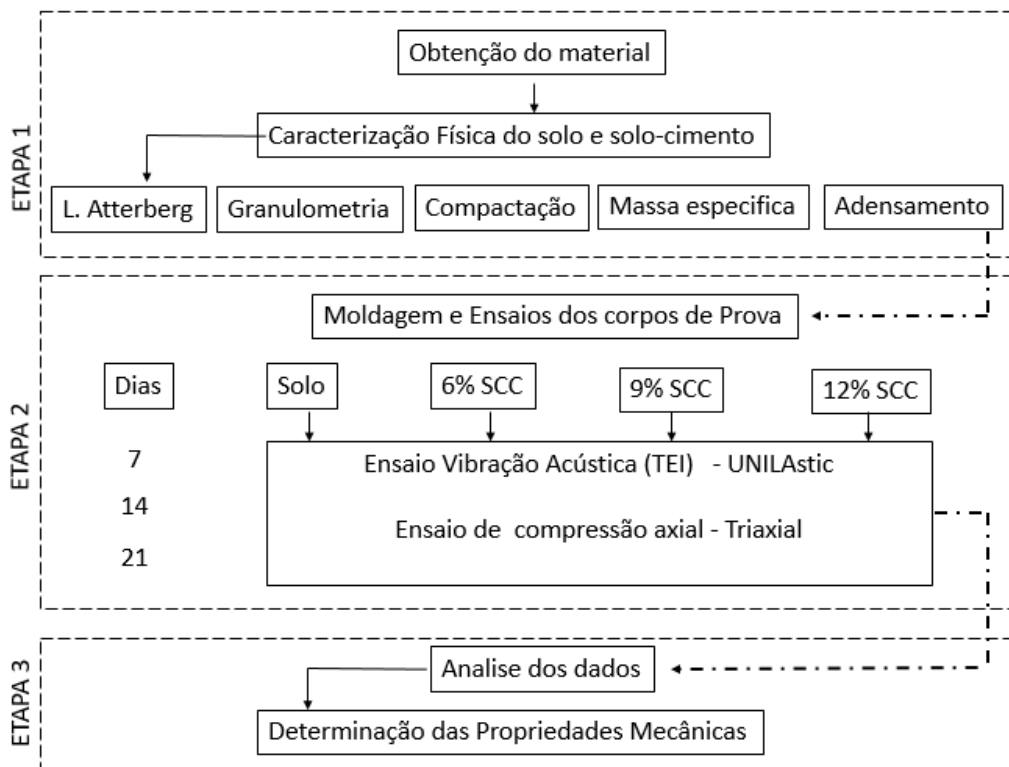
e com pouco ou quase nenhuma pesquisa aplicando a TEI para o solo-cimento, assim existe a necessidade e a importância do estudo das propriedades mecânicas de este material usando técnicas não destrutivas, uma relação entre os módulos dinâmicos e estáticos para o solo cimento permitirá a obtenção de propriedades mecânicas estáticas aproveitando a rapidez e economia dos ensaios não destrutivos.

A aplicação da porcentagem de cimento é como máximo de 12% indicado pela norma ABCP (2004) para o solo encontrado na região e nesse sentido seriam necessários pelo menos mais duas porcentagens de cimento para análise, daí surgiram os teores de 6 e 9%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente o módulo de elasticidade estático e dinâmico do solo cimento compactado, foram produzidos 50 corpos de prova de solo cimento compactado. Os corpos de provas foram realizados para o solo e para três porcentagens de cimento (6, 9 e 12%) em relação ao peso do solo. Para acompanhar o comportamento do módulo de elasticidade no tempo os corpos de prova foram curados e ensaiados aos 7, 14 e 21 dias. O fluxograma apresenta o procedimento (Figura 15).

Figura 15 – Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: Autor (2024)

Para a determinação dos módulos de elasticidade estático E_c foram realizados a partir do ensaio de compressão axial no equipamento triaxial conforme a NBR 8522, (ABNT, 2017), já para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico E_d foi utilizado a técnica de excitação por impulso (ASTM E1876, 2015).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

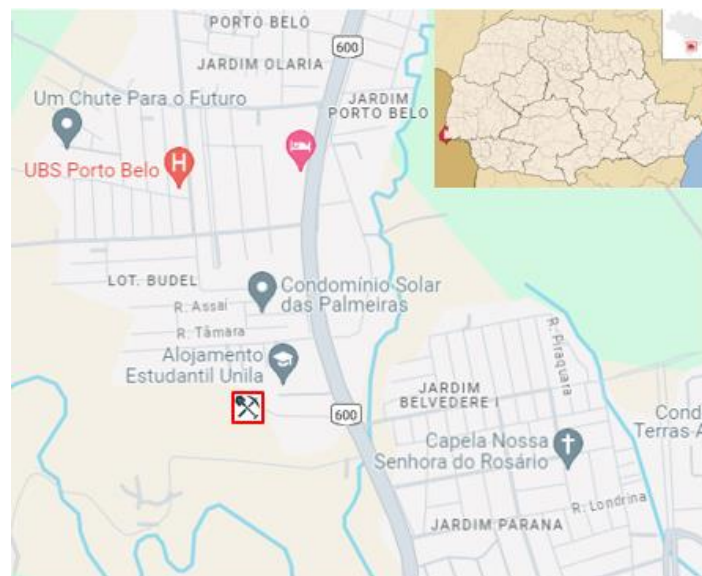
3.1.1 CIMENTO

O cimento utilizado no presente trabalho foi o CP-V ARI, de alta resistência devido que apresenta maior resistência no início da cura. Com massa específica $2,99 \text{ g/cm}^3$.

3.1.2 SOLO

O solo foi coletado do campo experimental do grupo geotécnico da UNILA, localizada a mediações da residência estudantil perto da Avenida Tancredo Neves Foz do Iguaçu Figura 16. Essa região foi estudada por (Dsoares E.C., 2015), evidenciando a presença de solos superficiais com N_{spt} menor que 5, classificados como moles pela NBR 6484, (2020).

Figura 16 – Local de extração do solo utilizado no estudo experimental



Fonte: Adaptado de Wikipédia, (2024)

O tipo de solo do campo experimental consiste em uma argila limo-arenosa de baixa resistência, com resistência à penetração N_{spt} de 3-4-5 até 6 metros de profundidade

As amostras de solo foram coletadas através da escavação de uma cava de 80 cm de profundidade e são do tipo deformado (Figura 17), foram submetidas a ensaios para

determinação dos índices físicos, distribuição granulométrica, umidade ótima, densidade máxima seca e limites de consistência e plasticidade.

Figura 17 – Local de coleta do material.



Fonte: Autor (2024)

3.1.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E SOLO-CIMENTO

Nesta etapa foi realizada a preparação de amostras de solo deformado, para realização de ensaios de caracterização, estes ensaios foram baseados na Associação de Normas Técnicas (ABNT), posteriormente as amostras de solo e solo-cimento foram submetidas a ensaios pelas normas (NBR) de acordo com a tabela 4.

Tabla 4. Ensaios de caracterização e normas aplicadas

Ensaio	Normas
Massa específica dos sólidos	NBR 6508 (2016)
Análises granulométrico	NBR 7181 (2016)
Limite de plasticidade	NBR 7180 (2016)
Limite de Liquidez	NBR 6459 (2016)
Compactação do solo	NBR 7182 (2016)

Ensaio de Compressão simples	NBR 12025 (2012)
Ensaio de Compactação	NBR 12023 (1992)
Moldagem e cura de corpos de prova	NBR 12024 (2012)

Fonte: Autor (2024).

A seguir, será apresentado um resumo dos ensaios realizados para a caracterização do solo e a apresentação detalhada da metodologia utilizada para os ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg, massa específica dos grãos e ensaio de compactação.

Granulometria

A análise granulométrica do solo foi realizada de acordo com a norma NBR 7181, (2016) - Análise Granulométrica por Peneiramento seguindo as seguintes etapas:

- Secagem da amostra ao ar;
- Processo de desagregação dos torrões do solo com dispositivo mecânico de madeira;
- Quarteamento da amostra, até obter uma amostra representativa de aproximadamente 1 quilo, com o restante do material será determinada a umidade higroscópica Figura 18;
- O teste de teor de umidade foi realizado com cerca de 50 gramas de material seco ao ar livre;
- Em seguida, foi realizado o processo de lavagem da amostra representativa na peneira nº 200, evitando-se cuidadosamente a queda direta da água na amostra de solo conforme a Figura 18;
- O material retido na peneira nº 200 após a lavagem foi colocado na estufa por 24 horas.
- Posteriormente, o material seco na estufa foi pesado e depois passado pelo conjunto de peneiras (2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,3mm, 0,15mm, 0,075mm) seguindo essa ordem respectivamente. Este procedimento pode ser visto na Figura 18;
- Por fim, com as porcentagens de material retido e passado nas peneiras, será feito o gráfico de granulometria do material retido na peneira nº 200.

Figura 18 – Procedimento para o ensaio granulométrico



Fonte: Autor (2024).

Para obter a curva granulométrica completa do solo, foi realizada a análise granulométrica por granulometria a laser, para os materiais que passam pela peneira nº 200, conforme NBR 7181, (2016) foi realizado o seguinte procedimento:

- Preparação da amostra conforme NBR 6457, (2016);
- Do material que passou pela peneira 200 foi retirada uma amostra de aproximadamente 120 gramas, pesado uma balança com resolução de 0,01 gramas. Uma amostra de 50 gramas também foi retirada para a determinações da umidade;
- O pH do solo foi medido seguindo os procedimentos recomendados pelo laboratório de Química da UNILA, para determinar se o solo era ácido ($\text{pH} < 7$) ou básico ($\text{pH} > 7$).

A análise de pH do solo foi conduzida no laboratório de química da UNILA, utilizando o pHmetro modelo mPa-210. Antes da realização do ensaio, o equipamento foi

devidamente calibrado. Após a decantação do solo diluído em 50 ml de água destilada, o leitor de pH foi inserido para a obtenção das medições.

O pH do nosso solo foi de 8,3 sendo assim classificado como base, para essa classificação a amostra de solo foi disposta em um Becker de 250 cm³, juntamente com 125 ml de hexametáfosfato de sódio, até que a amostra ficasse completamente imersa na solução, conforme as orientações de BOWLES (1981). Com esta concentração, busca-se obter uma sedimentação mais eficaz e separação do solo de outras partículas. Este procedimento visa garantir que o solo esteja livre de todas as impurezas, preparando-o para a subsequente análise granulométrica por difração a laser.

- Caso se a amostra de solo tiver pH ácida, a amostra é colocada em um Becker de 250 cm³ juntamente com 16 ml de solução concentrada de silicato de sódio para 1 litro de água, prosseguindo com o teste, deixa-se a amostra com a concentração em repouso por 12 horas, para finalmente realizar o teste utilizando o equipamento de granulometria por difração a laser.

Limites de Plasticidade (LP)

- Preparação da amostra de solo conforme NBR 6457, (2016);
- Separação de uma amostra de solo próxima a 50 gramas;
- Homogeneização da amostra com água destilada, até obter uma massa plástica;
- Com 20 gramas da amostra plástica, moldou-se um cilindro uniforme de 3 milímetros de diâmetro;
- Foi determinada a quantidade de umidade das amostras de solo moldadas em forma de cilindros e o limite de plasticidade foi obtido por meio da média das umidades obtidas.

Limite de liquidez (LL)

- Preparação de amostras de cerca de 50 gramas;

- Com o aparelho de Casagrande, verificou-se o número de golpes necessários para fechar uma fenda especificada no método;
- Determinação da umidade das amostras de solo no momento que se fecha o sulco devido a uma ranhura no solo e finalmente foi obtido o limite líquido do solo.

Índice de Plasticidade (IP)

- Foi determinado pelo cálculo da diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP).

Massa específica de sólidos

Este teste foi determinado seguindo a norma NBR 6508 para grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm. Seguindo os seguintes passos:

- Preparo da amostra de solo conforme NBR 6457, (2016);
- Uma amostra de 50 g foi colocada dentro de uma cápsula com água destilada em imersão completa do material por 12 horas;
- A amostra foi colocada em um dispersor, adicionando água destilada até a metade do nível do dispersor, em seguida procedeu-se à dispersão por 15 min;
- A amostra de solo foi transferida para um picnômetro de 500 cm³, adicionando água até a metade do picnômetro;
- Uma bomba foi aplicada ao picnômetro para remover os vazios do sistema picnômetro de água do solo;
- Por fim, foram obtidos os resultados e cálculos.

Compactação

A metodologia foi utilizada pela norma NBR 7182, (2016) e as curvas de compactação foram obtidas a partir de amostras de solo deformadas. Foi utilizada um equipamento de compactação automatizado e programável, com uma energia de compactação Proctor Normal executadas em 3 camadas, com a aplicação de 26 golpes para cada camada. As dimensões do molde cilíndrico para compactação dos corpos de

prova foram de 100 mm de diâmetro e 127 mm de altura. Quatro curvas de compactação foram feitas com as porcentagens de 0, 6, 9 e 12% de cimento de acordo com o seguinte procedimento:

- Preparação das amostras: secagem ao ar livre, desagregação dos torrões;
- Adição e mistura de cimento Portland na quantidade especificada pelos cálculos;
- Moldagem e compactação dos corpos de prova;
- Finalmente, os cálculos e resultados dos testes da curva de compactação.

Ensaio de adensamento

O ensaio foi realizado com o equipamento de Cisalhamento direto do solo de acordo a ASTM D 3080, (2011), inicialmente foi preparada uma mostra de solo deformada, com dimensões de 60,0x60,0x19,73 mm com um volume de 71028 mm^3 , a amostra foi compactada em 5 camadas. Finalmente a amostra foi montada no equipamento de cisalhamento direto (Figura 19) e posteriormente saturada para ser aplicadas as tensões correspondentes e obter o gráfico de adensamento do material ao longo do tempo.

Figura 19 – Propriedades físicas e dimensões dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024).

3.1.4 MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

Para a preparação dos corpos de prova de solo cimento foi adoptada as percentagens de cimento de 6, 9 e 12 % devido a que o solo é classificado como um solo Argiloso tipo A6 (AASHTO), para este tipo de classificação a ABCP, (2004) recomenda utilizar 12 % como limite máximo de cimento. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a NBR 12024, (2012) - Moldagem e cura de corpos de prova de solo e cimento. Foram elaborados um total de 50 corpos de prova, sendo 15 corpos de prova correspondentes à moldagem de 6% de solo cimento (5 corpos de prova ensaiadas aos 7, 14 e 21 dias correspondentemente), outros 15 corpos de prova para 9% de solo cimento (5 corpos de prova ensaiadas aos 7, 14 e 21 dias correspondentemente), 15 corpos de prova para 12% de solo cimento (5 corpos de prova ensaiadas aos 7, 14 e 21 dias correspondentemente) e finalmente foram moldados 5 corpos de prova de solo.

Os corpos de prova foram moldados em um molde cilíndrico com dimensões aproximadas de 7,6 cm de diâmetro, 17 cm de altura com volume de 771,20 cm^3 .

A compactação de cada corpo de prova foi realizada em 10 camadas iguais e sucessivas, o peso de cada camada foi determinado pela seguinte relação.

$$P.C. = \frac{\gamma_d * (1 + U) * V * GC}{N_c}$$

Onde:

γ_d - Massa específica;

U - Umidade óptima;

V - Volume do corpo de prova;

GC - Grado de compactação.

N_c – número de camadas

A Tabela 5 apresenta as quantidades de material solo-cimento, com os percentuais de cimento especificados para a moldagem e compactação dos corpos de prova.

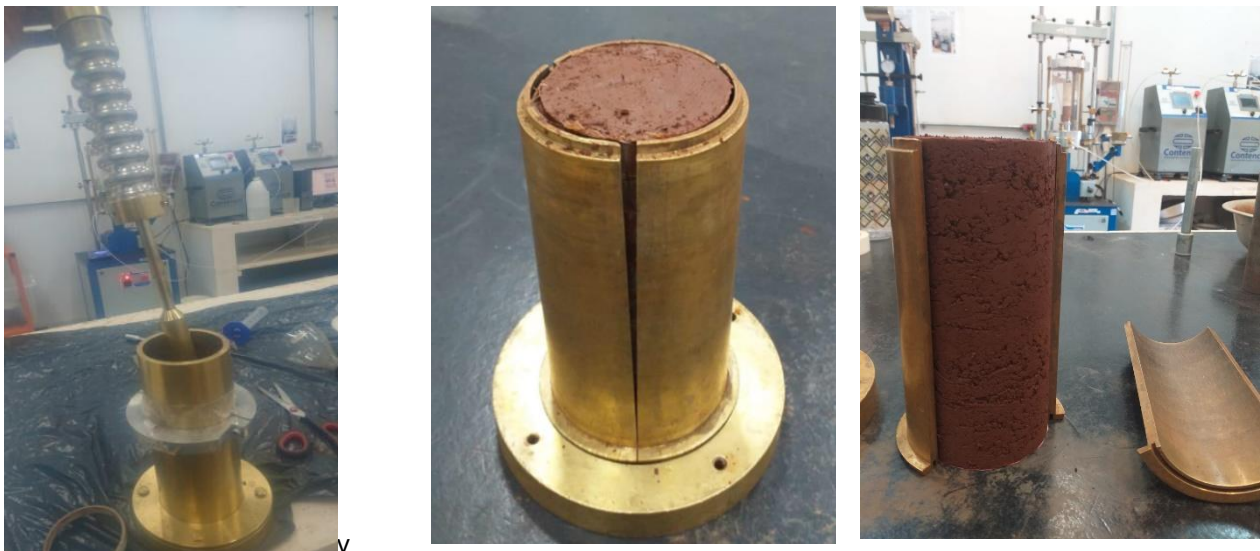
Tabela 5 – Propriedades físicas e dimensões dos corpos de prova

Porcentagem de cimento	Massa específica seca	Umidade ótima	Volume Molde	Grado de compactação	Peso Corpo Prova	Peso 1 camada
(%)	(g/cm^3)	(%)	(cm^3)	(%)	(g)	(g)
0	1,623	21,3	771,2	0,98	1487,90	148,79
6	1,539	23,4	771,2	0,98	1435,31	143,53
9	1,598	21,5	771,2	0,98	1467,39	146,74
12	1,574	21,6	771,2	0,98	1446,54	144,65

Fonte: Autor (2024).

A Figura 20 mostra o procedimento das etapas de compactação para os 50 corpos de prova.

Figura 20 – Procedimento de moldagens de corpos de prova



Fonte: Autor (2024).

d) Tempo de Cura dos Corpos de Prova

Após a extração dos corpos de prova, eles foram transferidos para a câmara úmida para o processo de curado (completamente imersos em água), onde foi especificado a porcentagem de cimento e os dias de tempo de cura de cada corpo de prova, para posteriormente ser submetidos a ensaios dinâmicos e de compressão simples (axial). A Figura 21 mostra os corpos de prova durante o tempo de cura.

Figura 21 – Corpos de prova com 6, 9 e 12% de solo – Cimento compactado processo de cura



Fonte: Autor (2024).

Após o tempo de cura dos corpos de prova, procede-se à preparação dos corpos para a realização de ensaios não destrutivos por meio da Técnica de Excitação por Impulso (TEI) para determinar o módulo de elasticidade dinâmico e por fim submeter o corpo de prova a ensaios destrutivos com o ensaio de compressão axial para determinar a resistência máxima do material, conseqüentemente determinar o módulo de elasticidade estático a partir do gráfico tensão-deformação obtido no ensaio de compressão axial.

3.1.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

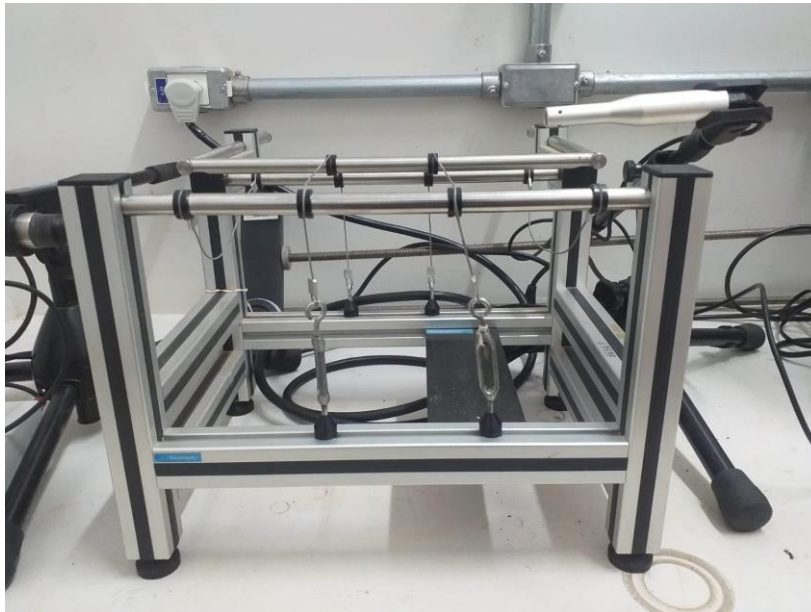
O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado por meio da técnica por excitação por impulso (TEI).

Técnica de Excitação por Impulso

O ensaio da técnica de Excitação por impulso (TEI) foi realizado com o equipamento (Figura 22) e software UNILastic (Ramirez Nunez; Dario; Araújo, 2020). A seguir é apresentado o procedimento para a estimativa das propriedades mecânicas do material pela técnica de excitação por impulso.

Para realizar o ensaio, primeiro foi inserido a massa e as dimensões do corpo de prova no software do equipamento. O corpo de prova foi apoiado nos pontos nodais a uma distancia de $0,224*L$ das extremidades do corpo de prova (L comprimento da amostra).

Figura 22 – Equipamento para o ensaio Técnica de Excitação por Impulso



Fonte: Autor (2024).

Uma vez devidamente posicionado, o microfone foi colocado a aproximadamente 1 cm da fase da amostra para análise da resposta acústica e posteriormente foi excitado o corpo de prova como um batedor manual (Figura 23).

Figura 23 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela Técnica de Excitação por impulso



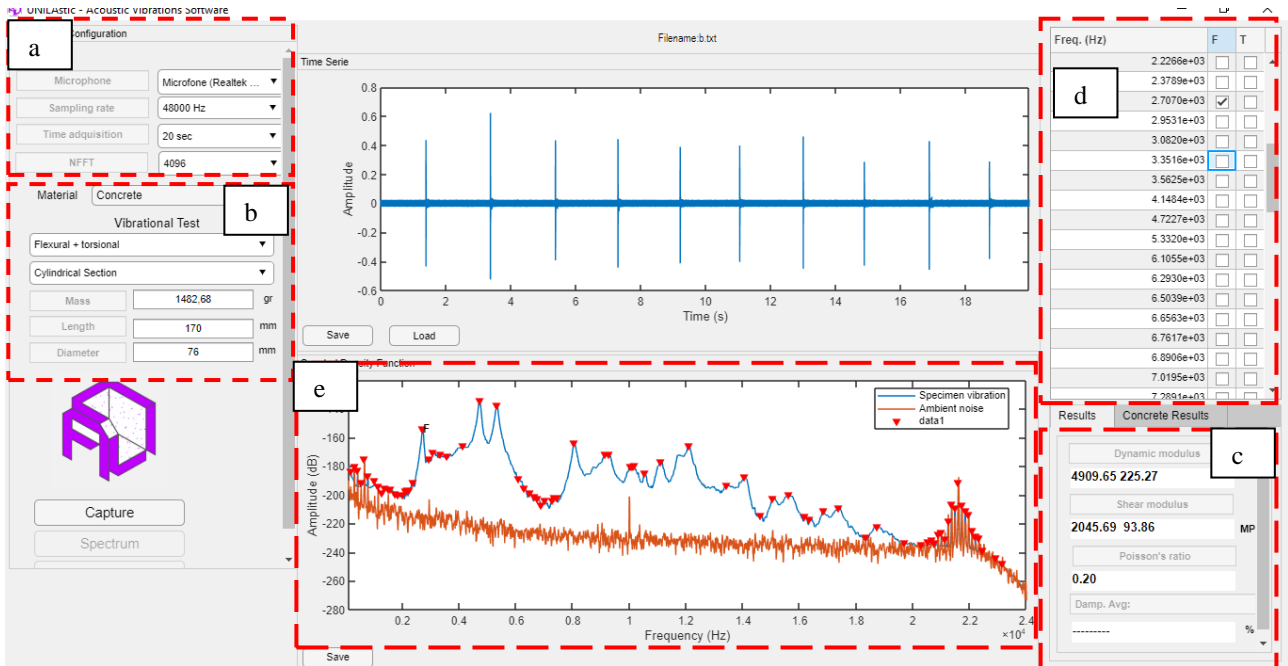
Fonte: Autor (2024)

Após o impacto no corpo de prova, as frequências naturais do material são capturadas por um microfone de alta precisão processadas pelo programa UNILastic (Ramirez Nunez Dario; Araújo, 2020) que identifica automaticamente os picos no espectro do sinal adquirido (Figura 25 a Figura 27). O programa nos fornece automaticamente as propriedades mecânicas da amostra.

A interface do usuário do software UNILastic mostrada na Figura 24 é dividida em etapas simples que são descritas a seguir. O Painel de configuração de parâmetros, ilustrado na Figura 24a, abrange a escolha do microfone conectado ao computador, a seleção da frequência de amostragem, a definição do tempo de teste em segundos e o tamanho da transformada de Fourier (Nfft). No módulo de ensaio acústico, o usuário escolhe o tipo de ensaio a ser realizado e especifica a massa, comprimento e diâmetro do corpo de prova (Figura 24b). O Painel de resultados exibe os resultados dos módulos de Young, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson (Figura 24c). Para iniciar o teste, o usuário configura os parâmetros do teste e pressiona o botão Capturar. O microfone é posicionado oposto à posição de excitação para identificar as frequências naturais, dependendo do tipo de teste. Durante o período determinado, o microfone adquire o som ambiente e, em seguida, o som proveniente do corpo de prova devido aos impactos causados pelo martelo de teste. Após a conclusão do teste, o programa identifica automaticamente os picos no espectro do sinal adquirido e os apresenta em uma tabela (Figura 24d). O usuário seleciona as frequências naturais consideradas fundamentais, seja

de flexão ou longitudinais, com base no tipo de ensaio definido inicialmente. Ao selecionar essas frequências, o software calcula automaticamente as propriedades mecânicas elásticas da amostra.

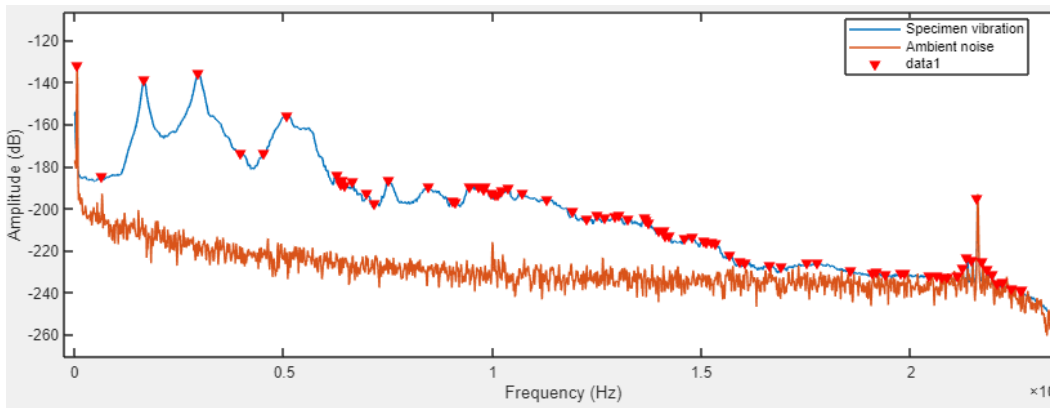
Figura 24 – Janela do programa UNILastic



Fonte: Autor (2024)

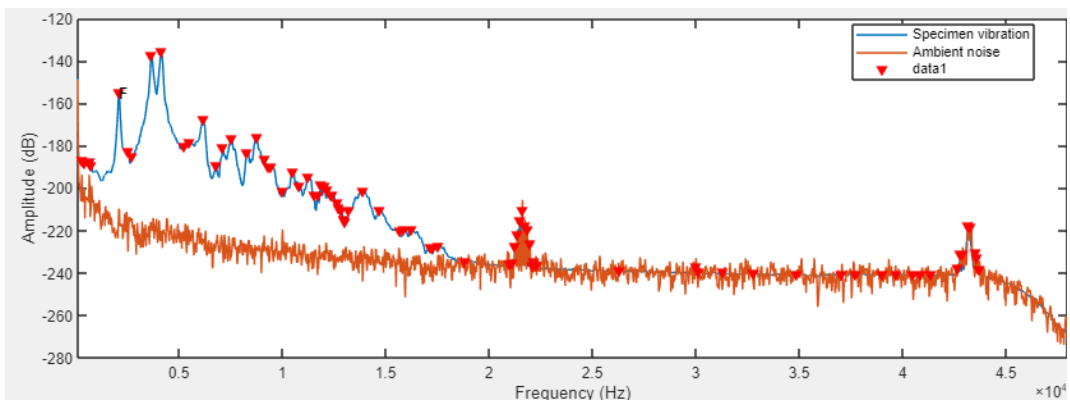
Foram realizadas 4 repetições do ensaio em cada corpo de prova, com a finalidade de caracterizar vários comportamentos da resposta devido as incertezas de parâmetros externos que possam influenciar o resultado do ensaio. A resposta do espectro (Figura 25 a Figura 26) correspondem aos corpos de prova com 6, 9 e 12% de SCC respectivamente, onde a primeira frequência (pico máximo) é o modo de flexão que será utilizado no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico e, posteriormente, a razão de amortecimento correspondente a esta frequência de flexão. Este processo foi realizado para todos os corpos de prova com 6, 9 e 12% de solo de cimento compactado para diferentes tempos do processo de cura (7, 14 e 21 dias).

Figura 25 – Registro da resposta acústica 6% SCC para 14 dias de tempo de cura



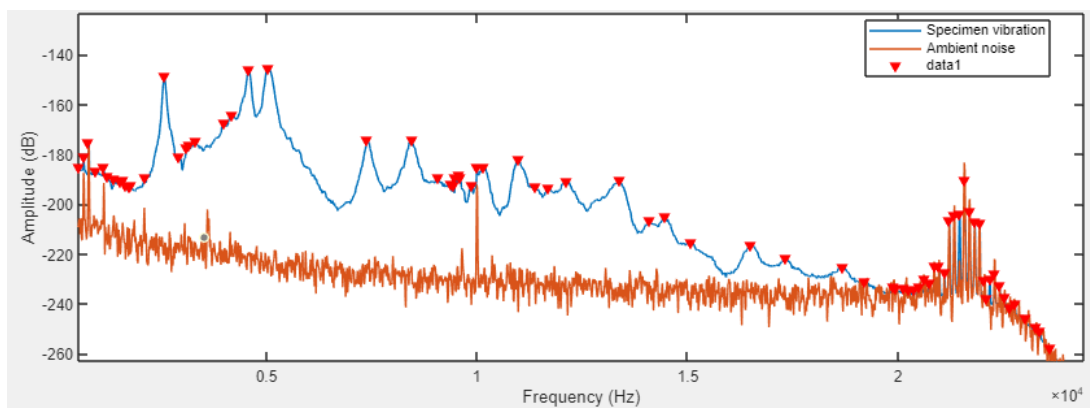
Fonte: Autor (2024)

Figura 26 – Registro da resposta acústica 9% SCC para 14 dias de tempo de cura



Fonte: Autor (2024)

Figura 27 – Registro da resposta acústica 12% SCC para 14 dias de tempo de cura



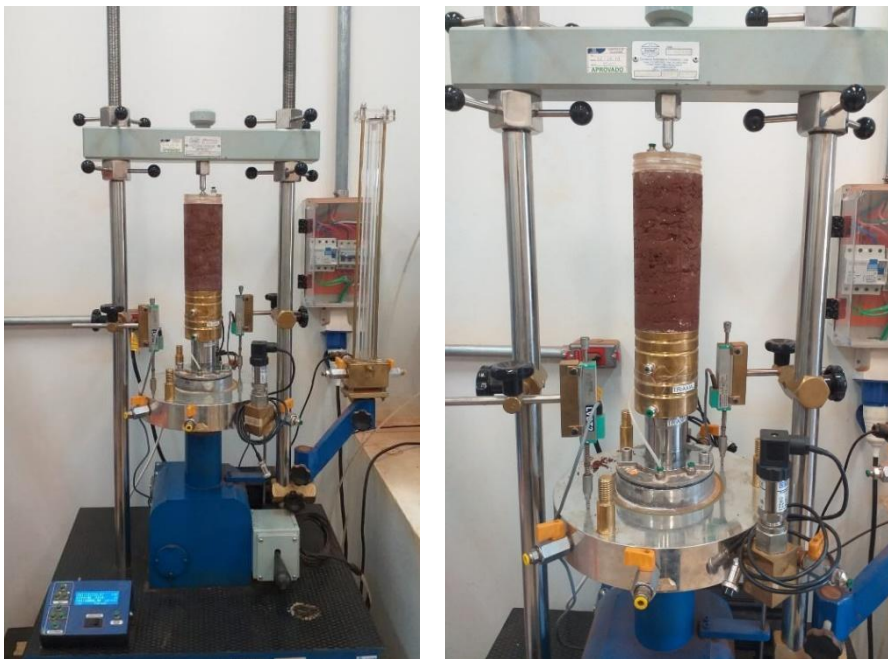
Fonte: Autor (2024)

Ao excitar o corpo de prova tem que se tomar muito cuidado com as vibrações ou sons externos devido a que estas geram frequências que irão se introduzir e interferir nas frequências de vibração do ensaio.

3.1.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES

Para o ensaio de compressão axial, baseou-se na norma (NBR 12025, 2012) - solo cimento - Ensaio de Compressão Simples de corpos de prova cilíndricos. O teste foi realizado em uma prensa com capacidade de 3 MPa de tensão, onde existem alguns extensômetros de leitura acoplados ao sistema. Na primeira etapa, o corpo de prova foi colocado na prensa para posteriormente ser aplicado a uma carga constante, a constante de carga foi aplicada a uma velocidade de 0,14 mm/min calculada pelo ensaio de adensamento para solos argilosos. O referido ensaio foi realizado para os 50 corpos de prova de solo cimento compactado a fim de avaliar o gráfico tensão deformação dos corpos de prova e posteriormente determinar a tensão resistente máxima das diferentes porcentagens de solo-cimento. A Figura 28 mostra a prensa e o procedimento de teste.

Figura 28 – Procedimento para o ensaio de compressão simples





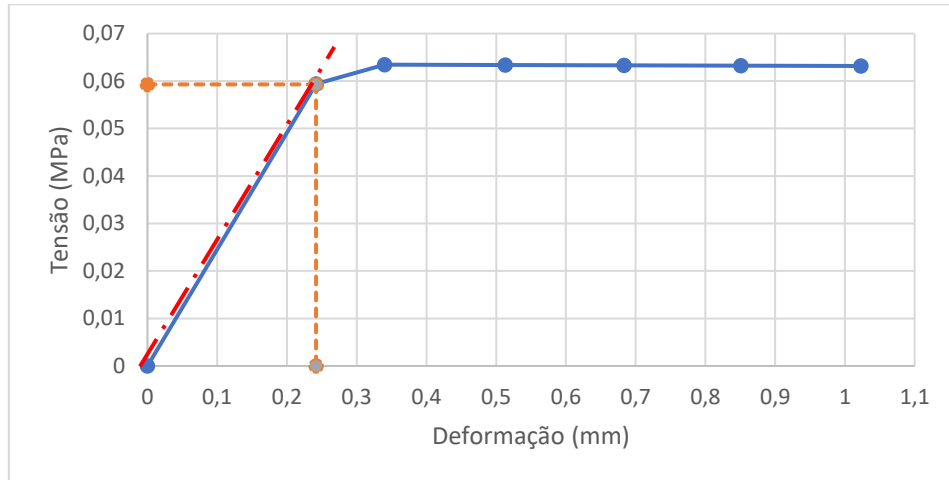
Fonte: Autor (2024).

3.1.7 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

O ensaio de compressão foi realizado no equipamento triaxial, onde se obteve os pontos correspondentes à tensão deformação, inicialmente devido à falta de conhecimento na configuração do equipamento, não foi possível obter mais pontos correspondentes à zona elástica para ver o comportamento detalhado do ensaio (Figura 29), limitando-nos a trabalhar com os pontos fornecido pelo equipamento para a determinação do módulo de elasticidade estática. Posteriormente o equipamento foi configurado para a obtenção de mais pontos que representa melhor o comportamento do gráfico tensão deformação. Em esse sentido foram realizados três ensaios de forma a validar os valores obtidos anteriormente mediante o intervalo de confiança

A obtenção do módulo de elasticidade estático foi realizada por meio do ensaio de compressão simples, levando em consideração o gráfico tensão-deformação. Em seguida, seguiu-se o procedimento da NBR 8522, (2017) para a determinação do módulo de elasticidade estático. Foi realizado uma reta tangencial até a zona elástica linear do gráfico tensão deformação (Figura 29). Após a medição das deformações o módulo de elasticidade é determinado aplicando a equação 1 (lei de Hooke).

Figura 29 – Gráfico tensão deformação do solo – cimento compactado



Fonte: Autor (2024).

As curvas obtidas no ensaio de compressão pelo equipamento mostraram uma quantidade mínima de pontos que possa ser insuficiente. Devido a isto foi feita uma verificação dos resultados dos módulos de elasticidade através da realização de novos ensaios para uma mistura definida, mas com o equipamento configurado com maior quantidade de pontos. O objetivo dessa verificação foi realizar um teste de hipóteses de médias obtidos pelos dois procedimentos. Caso o teste de hipóteses verifique que as médias são iguais não será necessário à realização de novos ensaios.

Nesse contexto foram realizados corpos de prova com 9% de solo cimento com o objetivo de verificar os resultados de módulo de elasticidade. Por meio do teste de hipótese das médias a qual apresentou que a média dos ensaios obtidos anteriormente se encontram dentro do intervalo de confiança dos ensaios atuais corrigidos (tabela 6), validando assim os valores do módulo de elasticidade.

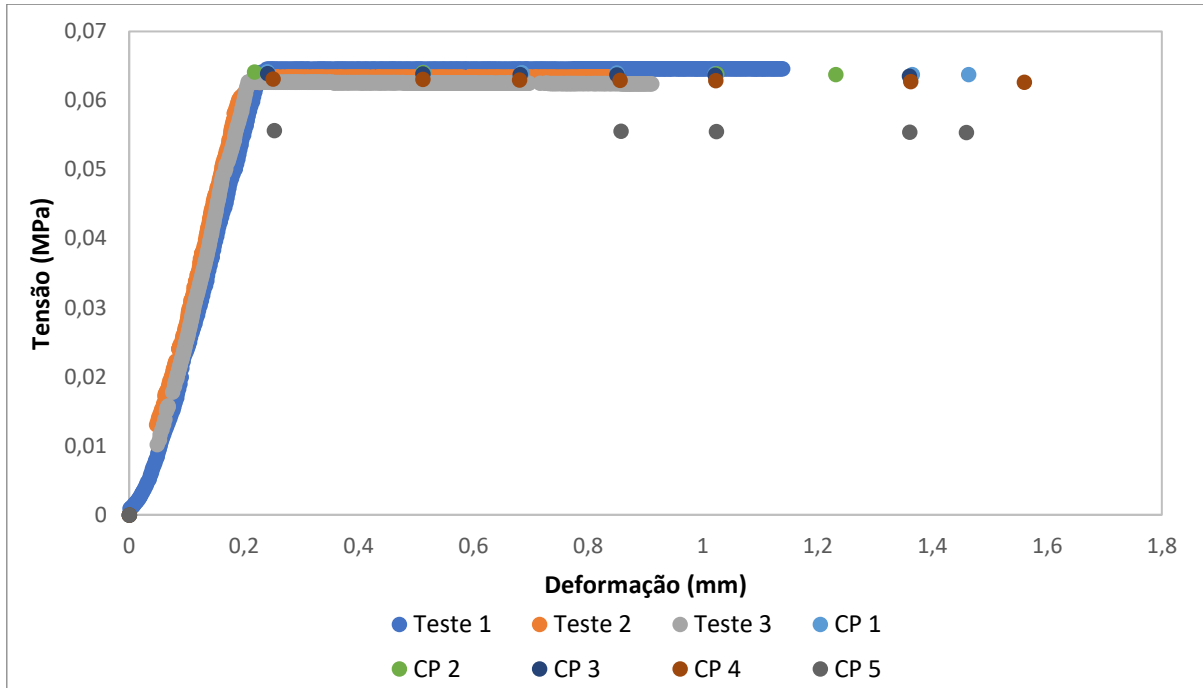
Tabela 6 – Intervalos de confiança

Intervalo Esquerda (MPa)	Média (MPa)	Intervalo Direita (MPa)
251,135	273,982	296,829

Fonte: Autor (2024).

Também se pode observar na Figura 30 o gráfico da tensão vs deformação dos ensaios atualizados (testes), onde se pode observar que apresentam a tendência de um comportamento semelhante aos ensaios anteriores (CP).

Figura 30 – Comparação do comportamento entre os testes corrigidos e os ensaios antigos



Fonte: Autor (2024)

4 RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é a apresentação e análise dos resultados encontrados em todas as fases de investigação.

Ensaio de caracterização do solo

Granulometria

O resultado do teste granulométrico pelo método de peneiramento da fração grossa pode ser observado na tabela 7, que apresenta a composição granulométrica e a tabela 8 mostra o resultado do teste granulométrico pelo método do granulometria a laser úmido para a fração fina. A Figura 31 mostra a curva granulométrica completa do solo.

Tabela 7. Resultado do ensaio granulométrico do solo por peneiramento

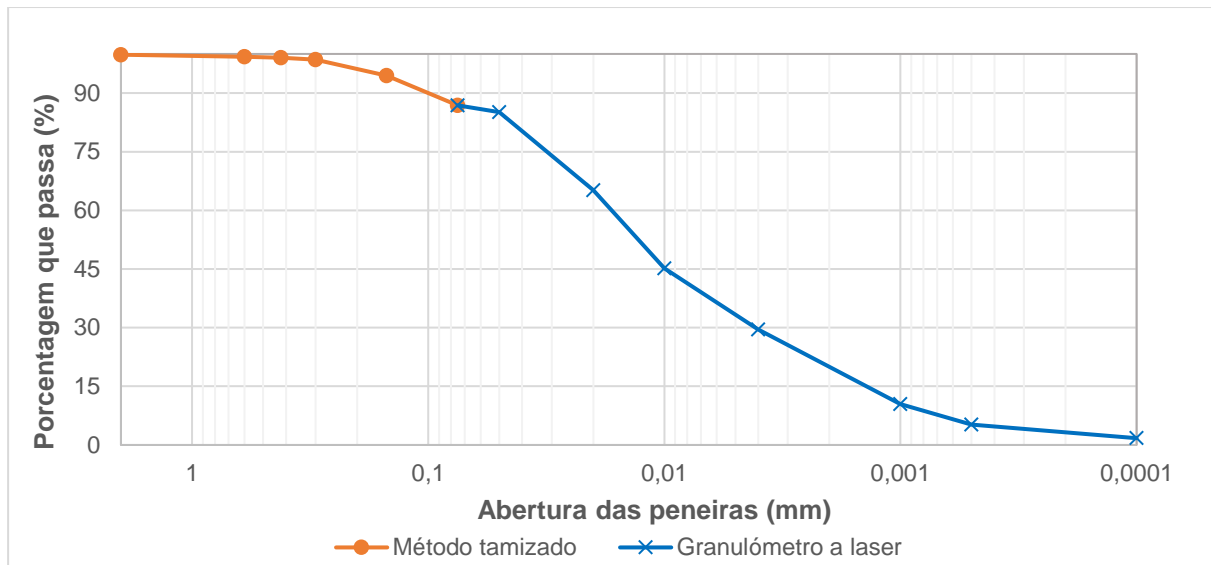
Diâmetro (mm)	% que Passa (%)
2	99,805
0,6	99,26
0,42	99,025
0,3	98,51
0,15	94,47
0,075	86,85

Tabela 8 Resultado do ensaio granulométrico a laser

Diâmetro (mm)	% que Passa (%)
0,075	86,85
0,05	85,113
0,02	65,1375
0,01	45,162
0,004	29,529
0,001	10,422
0,0005	5,211
0,0001	1,737

Fonte: Autor (2024)

Figura 31 – Curva granulométrica do Solo



Fonte: Autor (2024)

Limites de Atterberg - Classificação SUCS e Massa Específica dos Sólidos

Foram realizados os ensaios de limite plástico e limite líquido conforme NBR 7180, (2016) e NBR 6459 (2016), foi possível obter os resultados apresentados na tabela 9.

Segundo Sousa Pinto (2006) os materiais podem ser classificados por meio do índice de plasticidade. O solo e o SCC 6%, apresentam uma plasticidade média, enquanto o SCC 9% e o SCC 12% apresentam um comportamento ligeiramente plástico. A classificação SUCS para o solo resultou em uma argila de baixa plasticidade (CL) resultados semelhantes foram encontrados por OCHOA et al, (2021) para solos da mesma região, e após a adição de cimento observou-se que a plasticidade diminuiu, de modo que todos os ensaios de solo-cimento tinham uma classificação de ML. Os ensaios de massa específica de sólidos realizados conforme NBR 6508, (2016), apresentam os resultados indicados na tabela 9. Com os resultados obtidos, pode-se concluir que quanto mais percentual de cimento foi adicionado, houve aumento da massa específica de sólidos, sendo esse aumento devido ao fato da massa específica do cimento ser maior que a massa específica dos sólidos do solo $2,99 \frac{g}{cm^3}$.

Tabela 9 – Limite de Atterberg, Classificação SUCS e massa específica dos sólidos

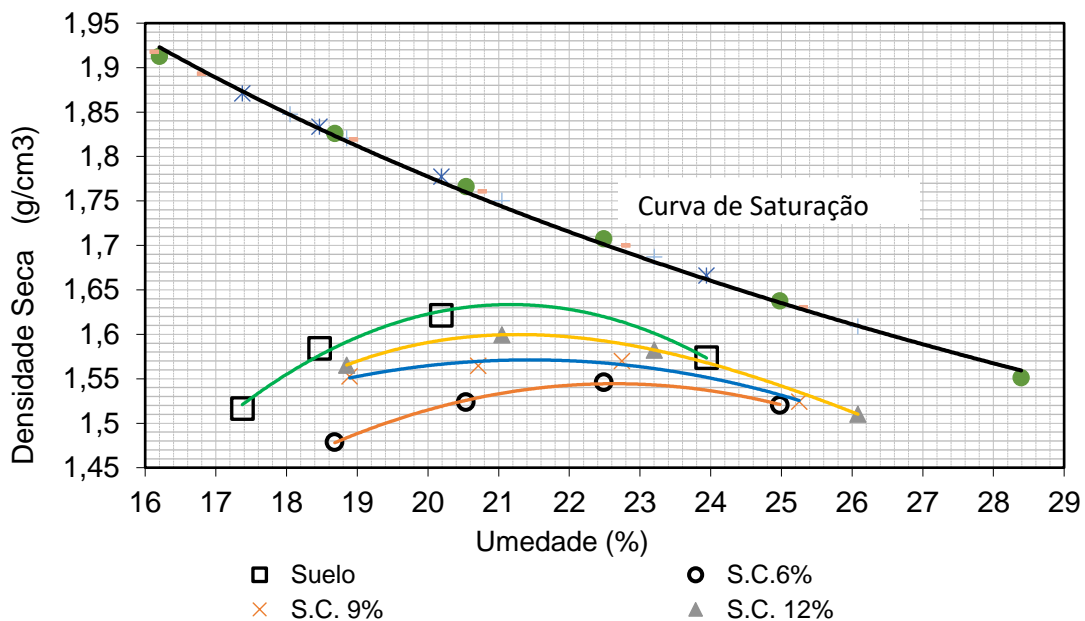
Descrição	Solo	S.C 6%	S.C 9%	S.C 12%
Limite de Plasticidade (%)	23,98	27,57	28,94	32,12
Limite de Liquidez (%)	36,6	37,8	33,7	34,7
Índice de Plasticidade (%)	12,62	10,23	4,76	2,58
Classificação SUCS	CL	ML	ML	ML
Classificação AASHTO	A6	-	-	-
Massa específica dos sólidos (g/cm^3)	2,74	2,79	2,83	2,87

Fonte: Autor (2024)

Compactação

Uma vez realizado o teste de compactação, o comportamento pode ser observado nos gráficos de compactação (Figura 32). Observa-se a diminuição da densidade seca com o aumento da porcentagem de cimento, resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira et al. (2018) para um solo próximo à região de estudo. Também na Figura 32 se pode observar o comportamento da curva de saturação ($S=100\%$), a qual encontra-se acima dos gráficos de compactação constatando assim o comportamento recomendado pela literatura.

Figura 32 – Gráfico de compactação do Solo-cimento com diferente porcentagem de SCC



Fonte: Autor (2024)

A umidade ótima e as densidades secas máximas da curva de compactação foram obtidas com diferentes porcentagens de solo-cimento, os resultados são apresentados na

tabela 10. Esses valores foram importantes, pois com eles foram obtidos os corpos de prova para a realização do ensaio de resistência à compressão simples.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de compactação

Material	Peso específico máximo seco (γ_d)	Umidade óptima (w_{opt})
(-)	(g/cm^3)	(%)
Solo	1,631	21,3
S.C 6%	1,549	22,4
S.C. 9%	1,598	21,5
S.C.12%	1,574	21,9

Fonte: Autor (2024)

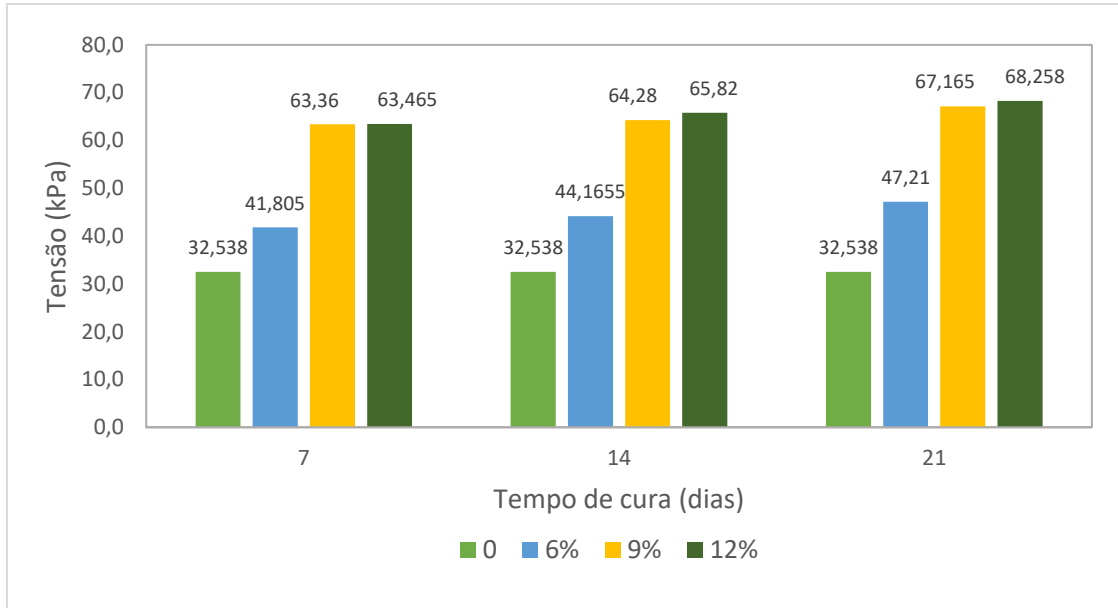
Compressão Simples

A resistência à compressão foi obtida a partir de uma média de 5 corpos de prova para cada tempo de cura e para diferentes porcentagens de solo-cimento, totalizando assim 50 corpos de prova. A Figura 33 mostra os valores de resistência à compressão para 7, 14 e 21 dias com seus respectivos percentuais de cimento de 0, 6, 9 e 12%.

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que quanto maior a adição de cimento, maior a tensão de ruptura. Obviamente, com a adição de um percentual de cimento, há um aumento da tensão de ruptura, porém, quanto maior o tempo de cura, também ocorre um aumento da tensão de ruptura. A resistência à compressão do solo apresentou um coeficiente de variação de 19,38% em média, e os coeficientes de variação misturados com 6, 9 e 12% de SCC apresentaram 14,38, 8,06 e 2,95% respectivamente.

Segundo (Thays Car Feliciano de Oliveira et al., 2018), resultados semelhantes foram obtidos com um molde maior que 10X20 cm com o mesmo cimento.

Figura 33 – Gráfico da resistência a compressão do Solo-cimento com tempo de cura de 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado



Fonte: Autor (2024)

Também pode ser visto na Figura 33 que a adição de cimento com uma porcentagem de 9% e 12% há um pequeno incremento na tensão de ruptura durante o tempo de cura, sendo esse incremento pouco significativo em relação ao custo.

Nesse contexto foram realizados para 9% SCC e 12% SCC o teste de hipótese das medias com o objetivo de avaliar o incremento dos resultados da resistência a compressão. Por meio do teste de hipótese apresenta-se que a média dos ensaios obtidos para 12% SCC se encontram dentro do intervalo de confiança de 6% SCC (tabela 11), assim com a adição de 12% SCC não apresentam valores muito diferentes que com a adição de 9% SCC.

Tabela 11 – Medias e intervalos de confiança do SCC

Tempo (dias)	Intervalo Esquerda (MPa)	Media (MPa) 12% SCC	Intervalo Direita (MPa)
7	58,094	63,624	65,561
14	62,809	65,672	66,529
21	61,332	67,896	70,143

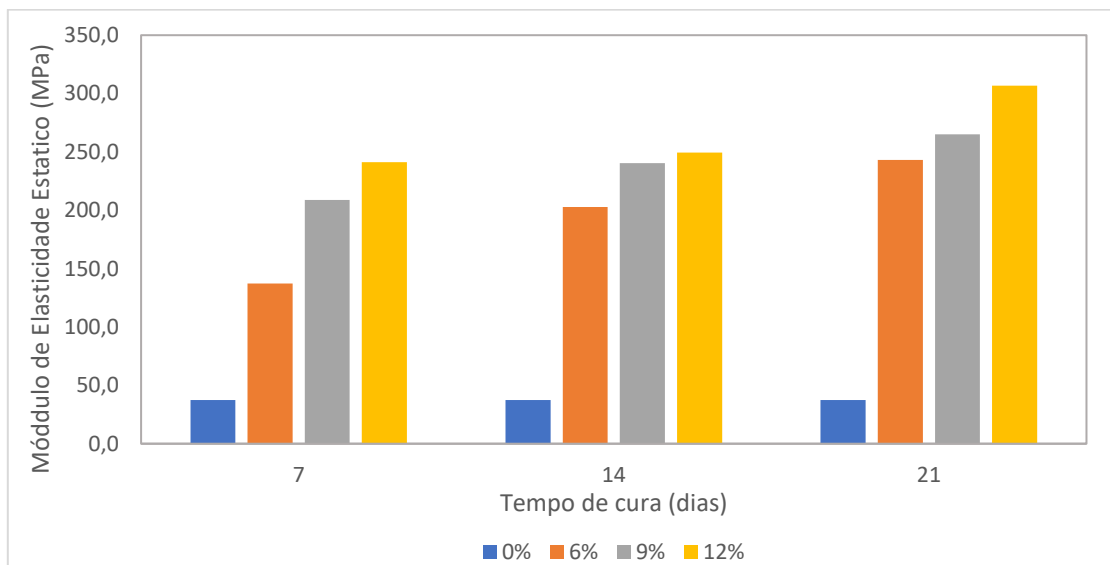
Fonte: Autor (2024)

Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade estático foi obtido a partir de uma média de 5 corpos de prova para cada tempo de cura (7, 14 e 21 dias) e para diferentes porcentagens de solo-cimento (0, 6, 9 e 12%), totalizando assim 50 corpos de prova. Este mesmo procedimento foi realizado para obter os gráficos das frequências, módulo de elasticidade dinâmico e amortecimento.

A Figura 34 mostra os valores de módulo de elasticidade estático com seus respectivos percentuais de cimento. Também na Figura 34 se pode observar o incremento do módulo de elasticidade estático com a adição da porcentagem de cimento e quanto maior o tempo de cura.

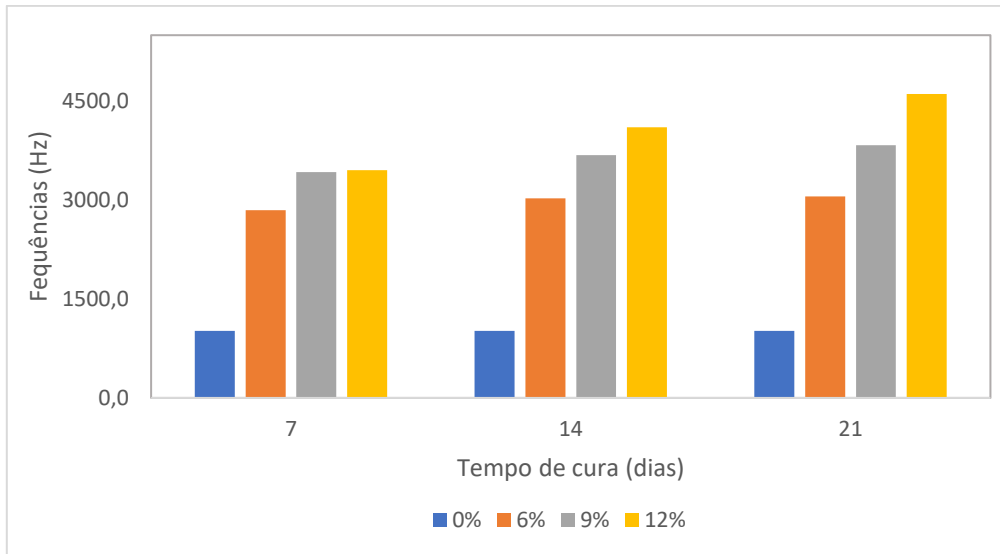
Figura 34 – Módulo de Elasticidade Estático do Solo-cimento com tempo de cura 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado



Fonte: Autor (2024)

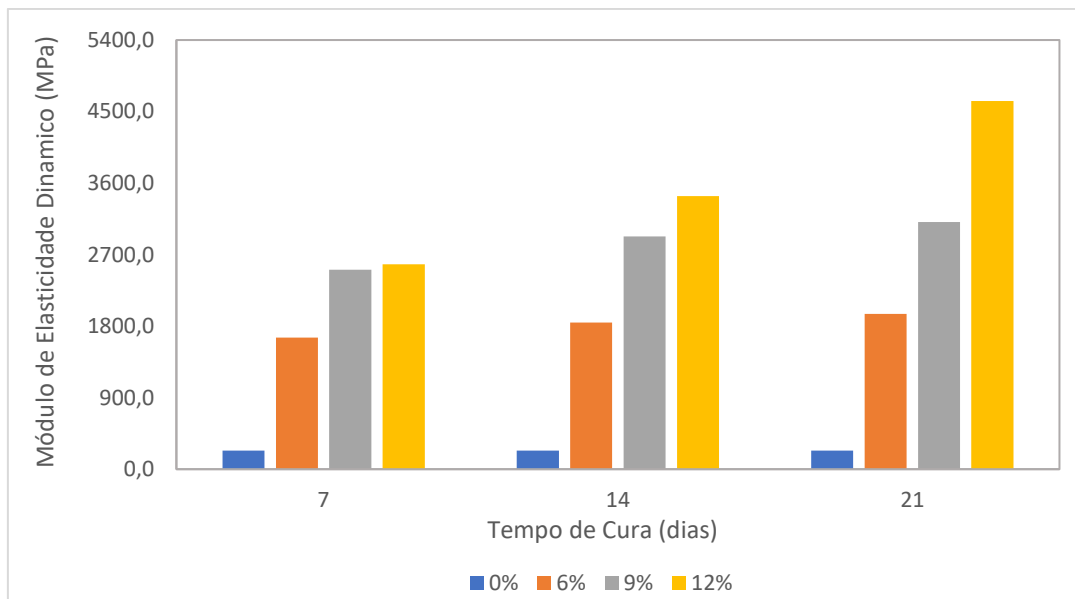
Na Figura 35 pode-se ver que com a soma da porcentagem de cimento, pode-se observar um aumento nas frequências, bem como, quanto maior o tempo de cura, também há um aumento considerável nas frequências. O módulo de elasticidade dinâmico aumenta com o incremento da porcentagem de cimento e com o tempo, aumentando assim a rigidez do material (Figura 36).

Figura 35 – Frequências (Hz) do solo – cimento com tempo de cura 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado



Fonte: Autor (2024)

Figura 36 – Módulo Elasticidade Dinâmico do solo – cimento com tempo de cura 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado



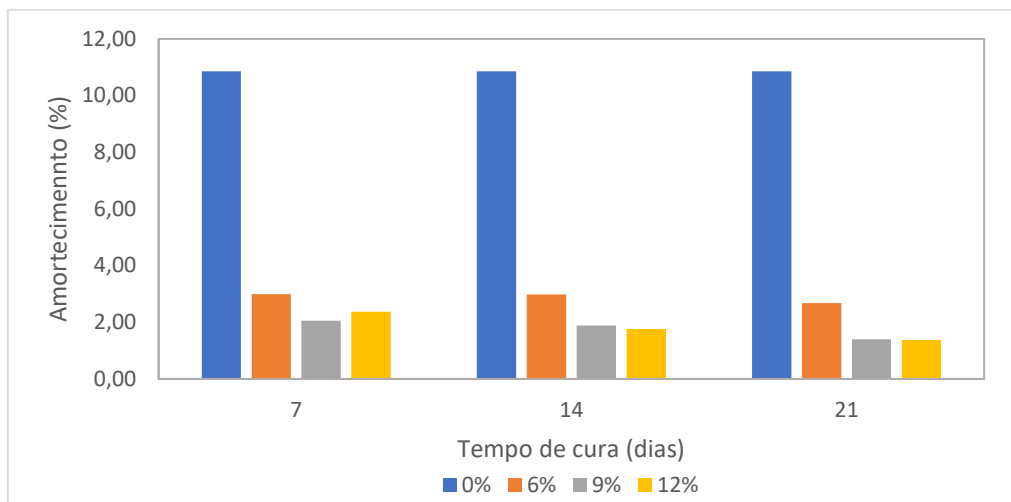
Fonte: Autor (2024)

Para os módulos elásticos estáticos observou-se de 32,07%, e os coeficientes de variação para o SCC de 6, 9 e 12% foram de 14,10, 10,37, 6,03% respectivamente. Os módulos elásticos dinâmicos (longitudinais) para o solo foram apresentados de 25,28% e para o SCC com 6, 9 e 12% foram obtidos 1,9, 3,46 e 5,36% respectivamente. Esta comparação mostra que o módulo de elasticidade dinâmico obtido pela Técnica de

Excitação por Impacto apresentou dispersão menor que o estático, o que se justifica pela baixa suscetibilidade a erros de procedimento neste tipo de experimento.

Da mesma forma, o solo apresenta inicialmente um alto índice de amortecimento que diminui com a adição de cimento e com o tempo de cura a Figura 37 apresenta este comportamento.

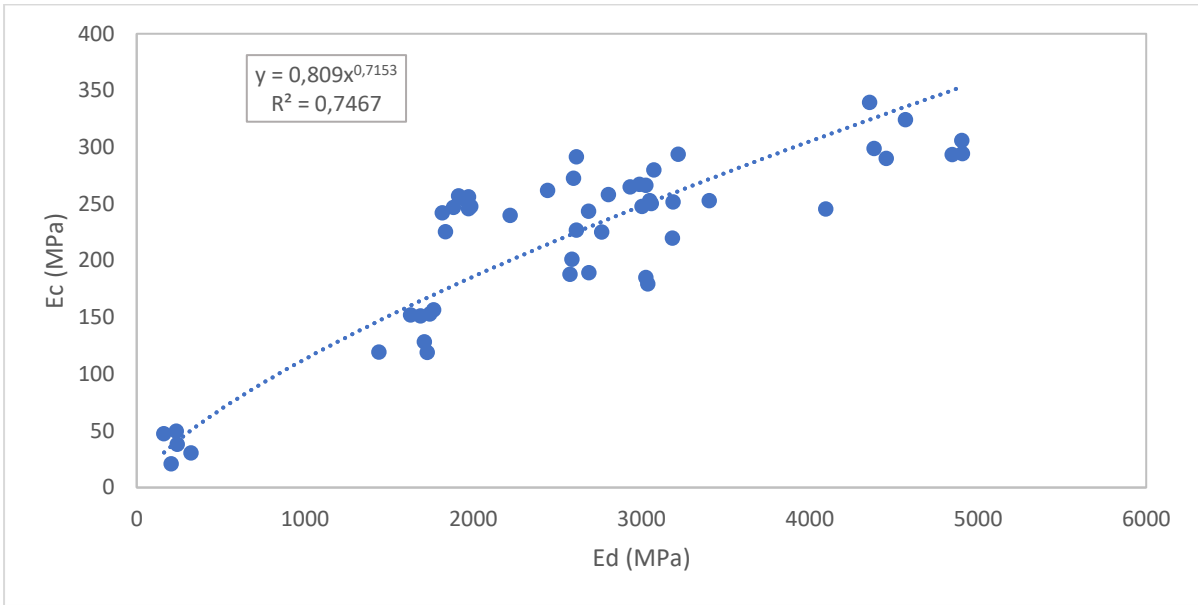
Figura 37 – Amortecimento do solo – cimento com tempo de cura 7,14 e 21 dias para a porcentagem de 0, 6, 9 e 12% de solo – cimento compactado



Fonte: Autor (2024)

A partir do gráfico de dispersão (Figura 38) do módulo de elasticidade estático e dinâmico se pode dizer que foi obtida uma elevada correlação ($R=0,8641$) e que o modelo estadístico obtido consegue representar 74,67% ($R^2=0,7467$) das variações experimentadas pelo módulo de elasticidade estático, isto pode ser devido a que o solo é um material heterogêneo o que poderia ter influenciado para a obtenção de uma correlação mais precisa.

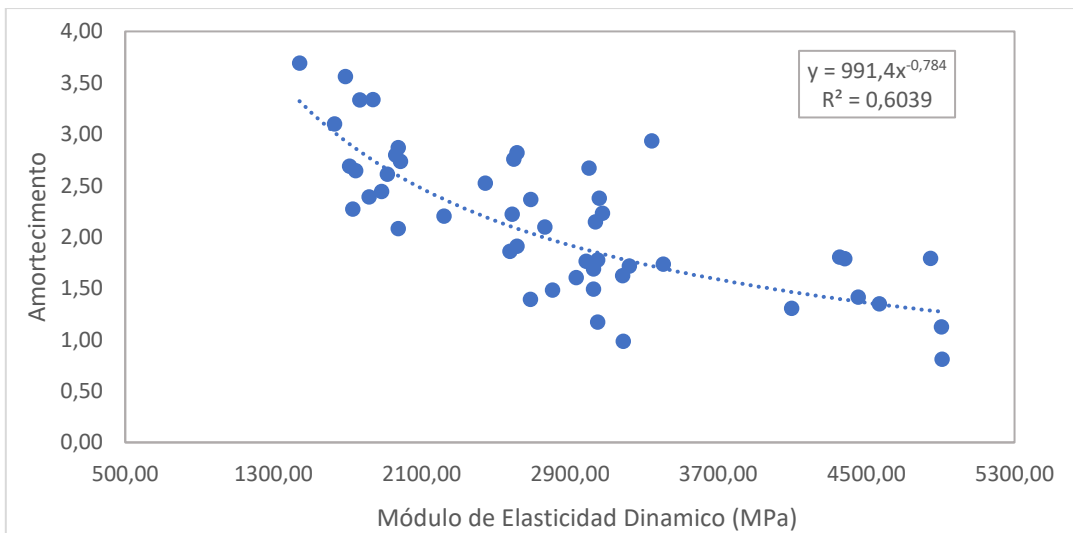
Figura 38 – Correlação do Módulo elasticidade estático e Módulo de elasticidade Dinâmico do solo - cimento



Fonte: Autor (2024)

Na Figura 39 apresenta a correlação do amortecimento e o módulo de elasticidade dinâmico da qual foi obtida uma elevada correlação ($R=0,7534$) e o modelo estadístico obtido consegue representar 60,39% ($R^2=0,6039$) das variáveis experimentadas pelo amortecimento a partir do Módulo de Elasticidade Dinâmico do SCC. Cabe salientar que na Figura 39 não foram incluídos os pontos do solo.

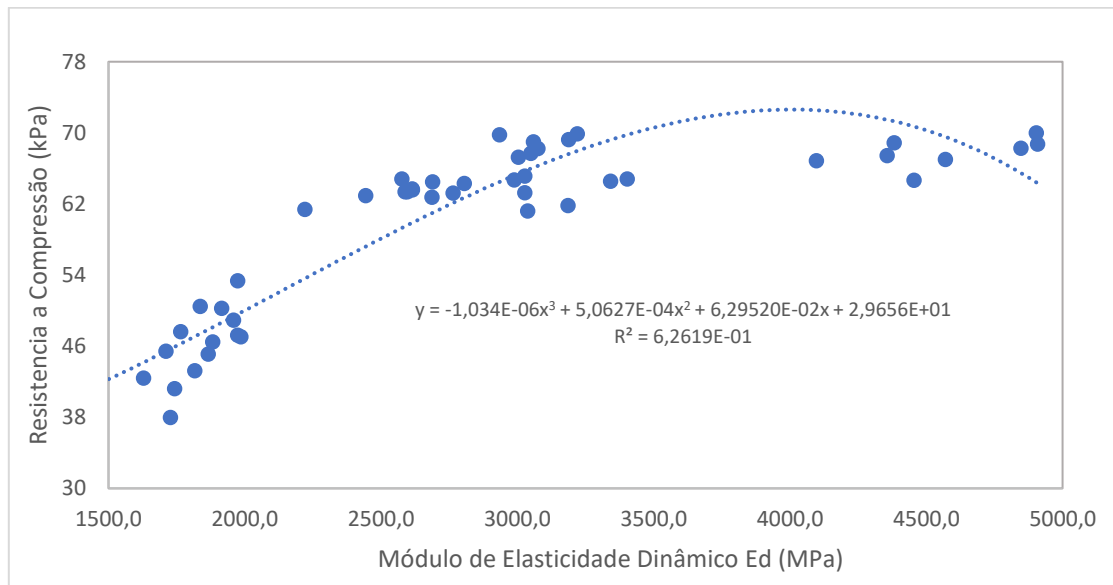
Figura 39 – Correlação do Amortecimento e Módulo de Elasticidade Dinâmico do Solo-cimento



Fonte: Autor (2024)

Na Figura 40 apresenta a correlação da resistência a compressão e o módulo de elasticidade dinâmico da qual foi obtida uma elevada correlação ($R=0,7913$) e o modelo estatístico obtido consegue representar 62,619% ($R^2=0,6261$) das variáveis experimentadas da resistência a compressão.

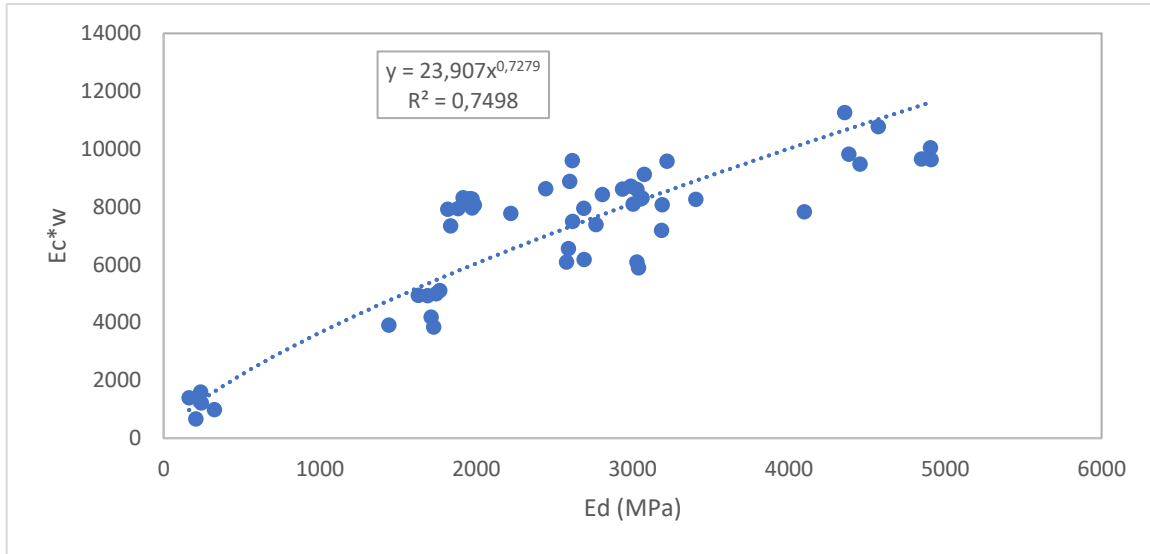
Figura 40 – Correlação da resistência a Compressão - Módulo de Elasticidade Dinâmico do Solo-Cimento



Fonte: Autor (2024)

Na Figura 41 se pode observar a correlação entre módulo estático - umidade e o módulo de elasticidade dinâmico do solo cimento, foi obtida uma elevada correlação ($R=0,8659$) e o modelo estatístico obtido consegue representar 74,98% ($R^2=0,7498$) das variáveis experimentadas pelo módulo de elasticidade estático e a umidade do solo.

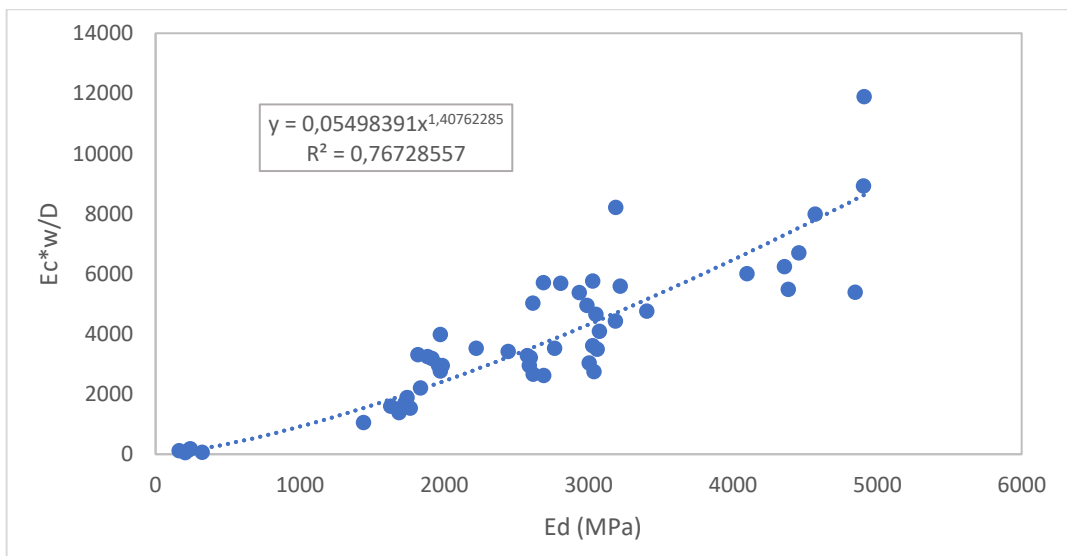
Figura 41 – Correlação do Módulo de Elasticidade Estático - umidade e Módulo de Elasticidade Dinâmico do Solo-Cimento



Fonte: Autor (2024)

Na Figura 42 se pode observar a correlação entre módulo estático - umidade – Amortecimento e o módulo de elasticidade dinâmico do solo cimento, foi obtida uma elevada correlação ($R=0,8759$) e o modelo estatístico obtido consegue representar 76,72% ($R^2=0,7672$) das variáveis experimentadas pelo módulo de elasticidade estático, umidade e amortecimento do solo.

Figura 42 – Correlação do Módulo de Elasticidade Estático – umidade - Amortecimento e Módulo de Elasticidade Dinâmico do Solo-Cimento



Fonte: Autor (2024)

Na tabela 11 apresentam as equações para a estimação do módulo de elasticidade estático a partir do módulo de elasticidade dinâmico, se pode observar que considerando a densidade do material existe um pequeno incremento no coeficiente de determinação, já na equação 13 além de considerar a densidade do material foi considerado o amortecimento a qual apresentou um incremento considerável do coeficiente de determinação o que poderia ser uma boa equação para a estimação do módulo de elasticidade estático.

Tabela 11 – Equações de módulo de elasticidade e coeficiente de determinação

$E_S = 0,809E_d^{0,7153}$	$R^2=0,7467$	(Equação 11)
$E_S * w = 23,907E_d^{0,7279}$	$R^2=0,7498$	(Equação 12)
$\frac{E_S * w}{D} = 0,0549E_d^{0,9263}$	$R^2=0,7672$	(Equação 13)

Fonte: Autor (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação aos resultados do projeto experimental deste trabalho, foi possível averiguar os fatores que influenciam as propriedades mecânicas do solo cimento. Sendo assim podem ser destacados os seguintes pontos:

- Quanto maior a adição de cimento, melhores serão as propriedades mecânicas do solo, aumentando a resistência a compressão simples e o módulo de elasticidade dinâmica;
- Ocorre inversamente no caso do coeficiente de amortecimento quanto maior a adição de cimento menor o amortecimento, aumentando a rigidez do material. Entanto no caso do solo sem adição de cimento foi observado um amortecimento muito elevado, isso pode ser devido à baixa coesão apresentada no solo (comparado ao SCC);
- Através da aplicação do TEI e devido à alta correlação do solo cimento permitiram sua caracterização de forma compacta. Existe uma boa correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático ($R=0,8641$) e conseqüentemente o cimento melhora as propriedades mecânicas do solo;
- A partir das equações derivadas dos gráficos de correlação para estimar o módulo de elasticidade estático, podemos afirmar que: o módulo de elasticidade dinâmico juntamente com o amortecimento e a densidade foram variáveis com melhor representação ao longo do tempo, com uma correlação boa ($R=0,8758$), enquanto uma correlação menos favorável foi obtida para o módulo de elasticidade - densidade ($R = 0,8659$) e uma baixa correlação ao anteriores para o módulo de elasticidade dinâmico ($R = 0,8641$);
- Ressalta-se também que a técnica de vibração acústica é viável para a caracterização de solos misturados com cimento, inclusive solos sem cimento, desde que apresente coesão satisfatória para o ensaio, imagina-se que para solos não coesivos a mesma técnica poderia não ser utilizado, ou para solos coesivos e com baixa coesão, neste caso os ensaios mostraram que foi possível caracterizar o solo, uma vez que foi detectada a primeira frequência de ressonância de flexão. Pode-se então indicar que a elevada coesão do solo permitiu a sua caracterização na forma compactada.

Este trabalho contribuiu em fornecer informações relevantes quanto as propriedades mecânicas do solo cimento que futuramente podem ser considerados para sua aplicação em obras de geotecnia como estradas, muros de contenção as quais são sometidas á ações dinâmicas.

5.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de acrescentar o conhecimento y comportamento do módulo de elasticidade dinâmico e estático do SCC, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Realizar a avaliação continua do pH das amostras de SCC desde o momento da produção para ver impactos da adição de cimento no longo prazo nas propriedades dinâmicas do SCC;
- Alterar a forma de cura dos corpos de prova, utilizando molhagem intermitente (apenas em alguns períodos do dia).

REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland Dosagem Das Misturas De Solo-Cimento Normas De Dosagem e Métodos De Ensaio. 2004.

ALENGARAM, U. J.; MAHMUD, H.; JUMAAT, M. Z. Enhancement and prediction of modulus of elasticity of palm kernel shell concrete. **Materials and Design**, v. 32, n. 4, p. 2143–2148, abr. 2011.

AMARAL, M. F. et al. Compression and shear wave propagation in cemented-sand specimens. **Geotechnique Letters**, v. 1, n. 3, p. 79–84, jul. 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE; ACI 228.22 R-13. **Report on nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures**. Farmington Hills American Concrete Institute, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND AND MATERIALS. ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. **International**. West Conshohocken, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457. Preparação para ensaios de Compactação e ensaio de caracterização. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459. Solo - Determinação do Limite de Liquidez. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484. **Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT-Método de ensaio**. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508. Determinação da massa específica dos sólidos. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180. Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. Ensaio Granulométrico. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182. Solo - Compactação do solo. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522. Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12024. Moldagem corpos cilíndricos - Solo-cimento. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025. Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos. 2012.

- ASTM E1876. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration 1. 2015.
- BAHR, O. et al. Young's modulus and Poisson's ratio of concrete at high temperatures: Experimental investigations. **Materials and Design**, v. 45, p. 421–429, 2013a.
- BALAJI, N. C.; MANI, M.; VENKATARAMA REDDY, B. V. Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, v. 170, n. 1, p. 40–54, 1 fev. 2017.
- BEUSHAUSEN, H.; DITTMER, T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 132–139, 15 jan. 2015.
- BOGAS, J. A.; GOMES, A. Static and dynamic modulus of elasticity of structural lightweight and modified density concrete with and without nanosilica-characterization and normalization. 2014.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION.; BS EN 12504-4. **Testing concrete Determination of ultrasonic pulse velocity**. [s.l.] British Standards Institution, 2004.
- CARLOS DE SOUSA PINTO. CURSO BÁSICO · DE MECANICA DOS SOLOS. Em: ISBN (Ed.). 3 Edição ed. [s.l.: s.n.].
- CARRAZEDO, R. et al. Mechanical Characterization of Concrete by Impact Acoustics Tests. 2018.
- CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C. Cemented Sands Under Static Loading. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 107, n. 6, p. 799–817, 1981.
- COLE, H. A. On-Line Failure Detection and Damage Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures. 1973.
- CONSOLI, N. C. et al. Plate Load Tests on Cemented Soil Layers Overlaying Weaker Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009.
- CONSOLI, N. C. et al. Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cement-Treated Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 11, p. 1126–1131, nov. 2011.
- DA SILVA SEGANTINI, Antonio Anderson. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP**. 2000. Tese de Doutorado.
- DEL ROCIO OCHOA AVEROS, S.; CÉSAR BIZARRETA-ORTEGA, J. Experimental Study on Stabilization Subgrade Soil Soft with Fine Concrete Residue. **ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.**, 30 ago. 2021.
- DILEK, U.; LEMING, M. L. Elastic Dynamic Young's Modulus and Permeability of Concrete in Fire Damaged Structural Members. 2008.

DNER. Manual de Implantação Básica. 1996.

DSOARES E.C. Relatório Técnico de Sondagem a Percussão. 2015.

EL-NEWIHY, A. et al. Effect of polypropylene fibers on self-healing and dynamic modulus of elasticity recovery of fiber reinforced concrete. **Fibers**, v. 6, n. 1, 1 mar. 2018.

ESTOLANO, V. et al. Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, 2018.

FALLSTROM, K.-E.; JONSSON, M. A Nondestructive Method to Determine Material Properties in Anisotropic Plates. 1991.

FALLSTROM, K.-E.; MOLIN, N.-E. A Nondestructive Method to Determine Material Properties in Orthotropic Plates. 1987.

G. Minke, Building with Earth, Birkhäuser (2013)

GUETTALA, A.; ABIBSI, A.; HOUARI, H. Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 3, p. 119–127, abr. 2006.

HAACH, V. G. et al. Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. **NDT and E International**, v. 59, p. 18–24, 2013.

IVÁN DARÍO GOMEZ ARAÚJO. **Análise modal operacional: Métodos de Identificação baseados em Transmissibilidade**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015.

JENDRYSIK, K.; KIECANA, M.; SZABOWICZ, H. **Preliminary results of dry Deep Soil Mixing soil-cement composite testing**. MATEC Web of Conferences. **Anais...EDP Sciences**, 14 dez. 2018.

JUROWSKI, K.; GRZESZCZYK, S. **The influence of concrete composition on Young's modulus**. Procedia Engineering. **Anais...Elsevier Ltd**, 2015a.

JUROWSKI, K.; GRZESZCZYK, S. Influence of selected factors on the relationship between the dynamic elastic modulus and compressive strength of concrete. **Materials**, v. 11, n. 4, 22 mar. 2018.

KOLLURU, S. V.; POPOVICS, J. S.; SHAH, S. P. Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 22, n. 2, p. 81–89, 2000.

LEE, B. J. et al. Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017.

LYDON, F. D.; BALENDRAN, R. V. SOME OBSERVATIONS ON ELASTIC PROPERTIES OF PLAIN CONCRETE. **CEMENT and CONCRETE RESEARCH**, v. 16, p. 314–324, 1986.

MALHOTRA, V. M., AND S. Handbook on nondestructive testing of concrete - Resonant Frequency Methods. 2004.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. p. 160–180, 2004.

MARCIO ANTÔNIO VENDRUSCOLO. **Análise Numérica e Experimental do Comportamento de Fundações Superficiais em Solo Melhorado.** Porto Alegre: Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 1996.

MARIA TERESA DA SILVA. **Interação Solo Estrutura de Fundação em Estaca de Solo-Cimento e Concreto.** Brasília: Curso de Engenharia Civil, 1994.

MEHTA, P. K.; PAULO J. M. MONTEIRO. Concrete Microstructure, Properties and Materials. p. 90, 2013.

MIGUEL F. S. F. DO AMARAL. **Avaliação de módulo de distorção dinâmico em misturas de solo-cimento com recursos a métodos Ultra-Sônicos de impulso no domínio do tempo e registros de modos de ressonância por análise espectral de séries de Fourier.** Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2009.

MILIČEVIĆ, I.; ŠTIRMER, N.; BJEGOVIĆ, D. Relation between the compressive strength and modulus of elasticity of concrete with crushed brick and roof tile aggregates. **Structural Concrete**, v. 18, n. 2, p. 366–375, 1 abr. 2017.

MOORE, R. K.; KENNEDY, T. W.; HUDSON, W. R. **Factors Affecting the Tensile Strength of Cement-Treated Materials.** [s.l.: s.n.].

NBR 12023. Solo-cimento Ensaio de compactação. 1992.

NEVILLE, A. Propriedades do Concreto. 2016.

NORMA EUROPEIA; EUROCÓDIGO 2; EN 1992-1-1. **Projeto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.**, 2004.

PEREIRA, A. H. A.; OTANI, L. B. Determinação do módulo de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso. 2017.

POPOVICS, J. S.; ROSE, J. L. A Survey of Developments in Ultrasonic NDE of Concrete. **IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL**, v. 41, 1994.

POPOVICS, S. Verification of relationships between mechanical properties of concrete-like materials. 1975.

RAMIREZ NUÑEZ, P. A.; DARIO, I.; ARAÚJO, G. UNILastic: Equipment and software to evaluate mechanical properties of materials by acoustic test. 2020.

ROEBBEN, G. et al. The innovative impulse excitation technique for high-temperature mechanical spectroscopy. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 310, p. 284–287, 2000.

SANDRA FREIRE DE ALMEIDA. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura**. São Carlos: Universidade de São Carlos, 2005.

SÍLVIO MARTINS DE ALMEIDA. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de Cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência Ressonante. 2012.

SOCIEDADE AMERICANA DE TESTES; ASTM C597. **Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete 1**. ASTM International, West Conshohocken, 2012.

SONG, W.; ZHONG, Y.; XIANG, J. Mechanical parameters identification for laminated composites based on the impulse excitation technique. **Composite Structures**, v. 162, p. 255–260, 15 fev. 2017.

THAYS CAR FELICIANO DE OLIVEIRA et al. **Estacas de Reforço em Solo Cimento como Forma de Viabilizar o Uso de Sapatas em Solo Residual Mole**. ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2018, Vol. III, GJ35768. Salvador. **Anais...2018**.

THOMAZ, W. DE A.; MIYAJI, D. Y.; POSSAN, E. Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 1 dez. 2021.

TOGNANA, S.; MONTECINOS, S.; SALGUEIRO, W. Young's modulus measurements in metals using impulse excitation technique. **Revista Materia**, v. 23, n. 2, 2018.

VENKATARAMA REDDY, B. V. Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. **Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications**, p. 324–363, 2012.

WASHINGTON PERES NUNEZ. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991.

WILLIAM DE ARAUJO THOMAZ. **Contribuição ao Estudo do Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico de Concretos Contendo Agregados Basálticos: Análise Experimental e proposta de modelo de correlação**. Foz do Iguaçu: UNILA, 2020.

ZHOU, Y. et al. A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 137–145, 15 nov. 2015.