

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO AMORTECIMENTO DE MISTURAS DE AREIA COM RESÍDUOS DE BORRACHA

AFONSO AVIDES MOREIRA MENEZES MAIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientadora: Professora Doutora Cristiana Maria da Fonseca Ferreira

Julho de 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais,

"O verdadeiro conhecimento vem da experiência direta."

Confúcio

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todos que não apenas contribuíram para a elaboração desta tese, mas também enriqueceram a minha vida.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora, a Professora Doutora Cristiana Ferreira, pela orientação, paciência e valiosos conhecimentos ao longo deste processo.

Agradeço também aos colegas de laboratório, Daniela, Mansour, Rashid e Fausto por terem dedicado o seu tempo neste trabalho, as suas contribuições e sugestões construtivas foram inestimáveis para o aprimoramento da tese.

À minha mãe, agradeço pelas conversas, tanto curtas como longas, e pelo carinho e apoio que me dá todos os dias.

Ao meu pai, sou grato por sempre me dar conselhos sobre a vida e pelo carinho e apoio que me dá diariamente.

À Clara, minha querida namorada, agradeço pelo amor e alegria que me dá diariamente, e espero que esse sentimento perdure para sempre. Além disso, devo agradecer-te por teres dado forças para concluir esta tese. Também não posso deixar de agradecer aos colegas do E-learning, Seixas e Esteves.

Aos meus irmãos, Francisco e Isabel, agradeço por me ensinarem a importância de compartilhar tudo na vida e por tornarem meu dia a dia mais divertido.

Ao meu avô, Augusto, agradeço por compartilhar suas aventuras e todo o seu conhecimento. À Celeste, por me tratar com tanto carinho e me cuidar como se eu fosse seu neto.

Aos meus avós, Nincha e Té, agradeço pelos incríveis Natais que proporcionaram, mas também pelo amor que me deram quando eu era pequeno.

À avó Maria Manuel, embora nunca a tenha conhecido, sei que era uma pessoa incrível.

Ao meu cão, Alfa, agradeço por ser o melhor cão do mundo e por me acordar todos os dias com entusiasmo para sair à rua.

Aos meus queridos primos, agradeço por proporcionarem as melhores brincadeiras sempre que nos reunimos, nomeadamente, Pipas, Nico, Tato, Nocas, Cuca, Mercês.

Aos meus amigos, uma gratidão sincera por serem pessoas tão especiais em minha vida, mesmo sem termos laços de sangue, em particular, Jo, Zé, Rijo, Ba, Ema, Nico, Tita, Joana, Tomas, Marga, Rafa, Vasco, Catarina desejo que continuem presentes nas minhas futuras jornadas.

Ao meu grupo de faculdade, Xico, Amaral, Dani, Padrão, Nunes, Miguel, Ciclopes, Pepe, Pj, Grosso, Ralph, Ross, Xavi, Lemos um agradecimento especial. As nossas noites de estudo, que sempre acabavam virando momentos de conversa, jogos e outras coisas que não preciso mencionar, foram fundamentais para o meu progresso académico. Sem vocês, ainda estaria no primeiro ano da faculdade.

RESUMO

A gestão de pneus em fim de vida é um sério desafio ambiental, devido ao seu grande volume e à potencial fonte de insetos e incêndios. No entanto, a borracha surge como uma solução viável para enfrentar este desafio, pois possui propriedades valiosas para aplicações na Engenharia Civil, como durabilidade, resistência e grande quantidade disponível.

Este estudo teve como objetivo analisar misturas de areia de Hostun com adição de resíduos de borracha triturada (com diâmetro entre 0.075mm a 0.840mm). Para tal, foram realizadas análises granulométricas da areia e da borracha, além de estudos sobre o comportamento mecânico dessas misturas através de ensaios CSS (cíclicos de corte simples e corte monotônico) e ensaios CTX (triaxiais cíclicos drenados e não drenados).

O programa experimental incluiu 16 ensaios CSS, nos quais foram efetuados cortes cíclicos e cortes monotônicos, bem como 2 ensaios CTX, nos quais foram efetuados cortes cíclicos drenados e não drenados. A partir dos resultados obtidos, procurou-se obter parâmetros de resistência e deformabilidade para o cálculo do amortecimento (D) e módulo de distorção (G). Também foram calculados a partir de *bender elements* os módulos de distorção inicial (G_0) de modo a validar os resultados e também para a sua normalização.

Concluiu-se que o módulo de distorção reduz e o amortecimento aumenta com o aumento da deformação do solo. A adição de borracha provoca uma redução do módulo de distorção e um aumento no amortecimento, o que também leva o amortecimento e módulo de distorção a apresentarem um comportamento menos exponencial. Foi verificado que a partir de uma adição de 30% de borracha na mistura, não houve alterações significativas nesses fatores, sugerindo que essa percentagem seja a ideal para obter tais benefícios.

PALAVRAS-CHAVE: Areia, Borracha, Amortecimento, Misturas de Areia-Borracha, Ensaios de Corte Simples Cíclicos, Ensaios Triaxiais Cíclicos, *Bender elements*

ABSTRACT

The management of end-of-life tyres is a serious environmental challenge, due to their large volume and potential source of insects and fires. However, tyre rubber emerges as a viable solution to face this challenge, as it has valuable properties for applications in Civil Engineering, such as durability, resistance, and large quantity available.

This study aimed to analyse Hostun sand mixtures with the addition of crushed rubber waste (with a diameter between 0.075mm to 0.840mm). For this purpose, grain size distribution analyses of the sand and rubber were carried out, in addition to studies on the mechanical behaviour of these mixtures through CSS tests (low-amplitude cyclic shear and monotonic shear) and CTX tests (cyclic triaxial in drained and undrained conditions).

The experimental program included 16 CSS tests, in which cyclic and monotonic shear were performed, as well as 2 CTX tests, in which drained and undrained cyclic shear were performed. From the results obtained, it was possible to obtain strength and stiffness parameters for the calculation of damping (D) and shear modulus (G). Initial shear moduli (G_0) were also calculated from the bender elements measurements to validate the data and also for its normalisation.

It was concluded that the shear modulus decreases and damping increases with the increase in soil deformation. The addition of rubber causes a reduction in the shear modulus and an increase in damping, which also leads the damping and shear modulus to exhibit a less exponential behaviour. It was found that, from an addition of 30% rubber in the mixture, there were no significant changes in these factors, suggesting that this percentage is the ideal to obtain such benefits.

KEYWORDS: Sand, Rubber, Damping, Sand-Rubber Mixtures, Cyclic Single Shear Tests, Cyclic Triaxial Tests, Bender elements

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. O Impacto Ambiental dos resíduos e sua aplicação na Engenharia.....	1
1.2. Propósito Desta Investigação.....	2
1.3. Estrutura	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Melhoramento de Solos	4
2.1.1. Contextualização	4
2.1.2. Diferentes abordagens para melhorar os solos	4
2.2. Liquefação	4
2.2.1. Introdução.....	4
2.2.2. Mobilidade Cíclica	7
2.2.3. Análise da Vulnerabilidade dos Solos à Ocorrência de Liquefação.....	8
2.2.4. Mitigação da Liquefação.....	10
2.3. Propriedades-chave do comportamento dinâmico dos solos	11
2.3.1. Índice de vazios.....	11
2.3.2. Módulo de distorção (G).....	12
2.3.3. Amortecimento (D)	14
2.3.3.1. Introdução.....	14
2.3.3.2. Coeficiente de amortecimento viscoso.....	15
2.3.3.3. Amortecimento histerético	18
2.4. Velocidade de ondas sísmicas	22
2.4.1. Introdução.....	22
2.4.2. Ondas Volumétricas	22
2.4.3. Ondas Superficiais	25
2.5. Técnicas para Determinação das Características Dinâmicas	26
2.5.1. Contexto	26
2.5.2. Ensaio em Laboratório.....	26
2.5.2.1. Ensaio de Coluna Ressonante (CR)	26
2.5.2.2. Equipamentos Piezoelétricos	28
2.5.2.3. Ensaio Cíclicos	31
2.5.3. Ensaio <i>in situ</i>	34

3	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	37
3.1.	Materiais Envolvidos no Estudo	37
3.1.1.	Areia de Hostun.....	37
3.1.2.	Borracha	38
3.1.3.	Mistura de Areia com Borracha	40
3.2.	Métodos de laboratório.....	41
3.2.1.	Análise granulométrica	41
3.2.2.	Densidade Máxima e Mínima	42
3.2.3.	Análise das ondas sísmicas	44
3.2.3.1.	Equipamentos.....	44
3.2.3.2.	Procedimentos de ensaio	47
3.3.	Ensaio de corte simples	50
3.3.1.	Equipamento de Corte Simples.....	50
3.3.2.	Procedimento de Ensaio	52
3.4.	Ensaio Triaxial Cíclico	55
3.4.1.	Equipamento Triaxial Cíclico	55
3.4.2.	Procedimento de Ensaio	59
3.5.	Plano de Ensaios.....	60
4	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	63
4.1.	Introdução.....	63
4.2.	Resultados obtidos	63
4.3.	Análise Global dos Ensaios.....	70
4.4.	Comparação de Ensaios	77
5	CONCLUSÕES	81
5.1.	Considerações Finais do Estudo.....	81
5.2.	Trabalhos Futuros	82
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Zona de aterros em Sulaibiya, Kuwait: (a) incêndio (Observador, 2021); (b) Vista aérea (Publico, 2021).....	1
Figura 2 - a) Conjunto habitacional em Kawakishi-cho, Niigata, Japão; b) Pessoas na lateral do edifício em Kawakishi-cho, Niigata, Japão (imagens da Godden Collection, EERC, University of California, Berkeley).....	5
Figura 3 – Ocorrência de Liquefação: (a) antes do evento; (b) durante o fenómeno de liquefação; (c) após a liquefação. (Matos Fernandes, 2011)	6
Figura 4 - Desempenho de areias saturadas sob condições não drenadas durante carregamento monotónico e cíclico (adaptado de (Castro and Poulos, 1977))	7
Figura 5 - Regiões propensas aos efeitos de liquefação (Marcos, 2016).....	8
Figura 6 - Diversidade de tamanhos de partículas suscetíveis à liquefação em solos com granulometria inadequada. (Tsuchida, 1970)	9
Figura 7 - Diversidade de tamanhos de partículas suscetíveis à liquefação em solos com granulometria bem graduada. (Tsuchida, 1970)	9
Figura 8 – Características fundamentais da condição física dos solos (adaptado de (Fernandes, 2011))	11
Figura 9 - Deformação sem alteração de volume (G) (Wood, 1990).....	12
Figura 10 - “Loop” histerético e G (adaptado de (Park, 1998))	13
Figura 11 - Degradação do G ₀ (Fahey, 1998).....	14
Figura 12 - O conceito de “Modelo de Kelvin-Voigt (KV)” (adaptado de (Rio, 2006)).....	16
Figura 13 - Comportamento do sistema em relação ao amortecimento (adaptado de Moreira, 2015).....	17
Figura 14 - O conceito de “modelo de Maxwell” (adaptado de (Rio, 2006))	17
Figura 15 - O conceito de “Modelo linear - Standard Linear Solid Model” (adaptado de (Rio, 2006)) ..	18
Figura 16 – Curva de histerese típica para diferentes níveis de deformação.....	20
Figura 17 - Curva de histerese típica para amortecimento mecânico (ASTM International, 2019) ...	21
Figura 18 - Alteração do coeficiente de amortecimento à medida que a frequência aumenta em solos coesivos.	22
Figura 19 – Deslocamento das partículas causado pela propagação das ondas P (Pinto, 2016)	23
Figura 20 -Deslocamento das partículas causado pela propagação das ondas S (Pinto, 2016)	24
Figura 21 – Vários tipos de ondas superficiais: a) onda Love; b) onda Rayleigh (Pinto, 2016)	25
Figura 22 - Gráfico que representa a redução progressiva do módulo de distorção (G) com o aumento da deformação (adaptado de (Atkinson, 1991))	26

Figura 23 - Diferentes distribuições de tensões ao longo da secção transversal em tipos de amostras Diferentes. a) Secção transversal de uma amostra maciça. b) Secção transversal de uma amostra oca.	27
Figura 24 - Representação comum de um dispositivo piezoelétrico (<i>bender elements</i>) (Pinto, 2016).	29
Figura 25 -Representação simplificada da montagem de um elemento bender (Pinto, 2016)	29
Figura 26 - Variação do comportamento de um elemento piezoelétrico ao longo do tempo	30
Figura 27 - Configuração do ensaio de corte cíclico simples (ASTM International, 2019)	33
Figura 28 - Representação do ensaio cíclico triaxial (Marcos, 2016)	33
Figura 29 - Cross-hole (adaptado de (Matos Fernandes, 2015)).....	34
Figura 30 -Ensaio: a) <i>Up-Hole</i> ; b) <i>Down-Hole</i> (adaptado de (Matos Fernandes, 2015))	35
Figura 31 - CPTU (adaptado de (Matos Fernandes, 2015))	35
Figura 32 - Esquema do ensaio SASW	35
Figura 33 – Areia de Hostun	37
Figura 34 - Curva Granulométrica da Areia de Hostun.....	38
Figura 35 - Curva Granulométrica da Borracha	39
Figura 36 - Curva Granulométrica da areia de Hostun-borracha	40
Figura 37- Várias etapas da análise granulométrica: (a) para efetuar peneiração mecânica; (b) esquartelamento manual; (c) lavagem do peneiro nº200	42
Figura 38 - Equipamentos utilizados para o ensaio de e_{max} e e_{min}	43
Figura 39 - Várias etapas da análise densidade máxima e mínima: (a) passagem da amostra no funil; (b) molde pronto para pesagem; (c) separação da amostra em dez partes iguais	44
Figura 40 - Benders do equipamento de ensaio de corte simples	45
Figura 41 - Gerador de funções TTI TG 1010®.....	45
Figura 42 - Amplificador recetor de sinais.....	46
Figura 43 - Osciloscópio Tektronix TDS200® em funcionamento	46
Figura 44 – Esquema de aparelhos para medir ondas (Marcos, 2016)	47
Figura 45 - Determinação do tempo de propagação de uma onda S, t_s	48
Figura 46 - Determinação do tempo de propagação de uma onda P, t_p	48
Figura 47 – Atraso do Equipamento: (a) onda S; (b) onda P	49
Figura 48 – Câmara de corte simples	50
Figura 49- Controlador de Pressão de Ar (APC)	51

Figura 50 – Amostra dentro do molde pronta para ser medida.....	52
Figura 51 – Amostra na câmara de corte simples: (a) com o molde; (b) sem o molde.....	53
Figura 52 – Fase Final de montagem do Ensaio	54
Figura 53 – Câmara triaxial cíclica	55
Figura 54 – Equipamentos de Controlo de Pressão: (a) coluna de pressões; (b) controlador automático da GDS®	56
Figura 55 – Medidor de Volume.....	57
Figura 56 – Colocação de transdutores Hall-Effects numa amostra.....	58
Figura 57 – Fases do ensaio triaxial cíclico: (a) montagem da membrana; (b) montagem do provete; (c) provete montado; (d) provete dentro da câmara triaxial cíclica; (e) desmontagem do provete.....	59
Figura 58 - Curva de histerese com amplitude de 0.5 mm.....	64
Figura 59 - Curva de histerese com amplitude de 1 mm.....	64
Figura 60- Comparação das duas curvas de histerese.....	65
Figura 61 - Degradação do módulo de distorção G em função da distorção γ na escala logarítmica ..	66
Figura 62- Comparação da curva de degradação G com o G0	66
Figura 63- Degradação do G0 versus γ na escala logarítmica	67
Figura 64- Amortecimento ao longo da distorção.....	68
Figura 65- Modelo normalizado do amortecimento em função da degradação da rigidez	69
Figura 66 – Resultados tensão-deformação	70
Figura 67- Dados de referência: a) gráfico módulo distorção; b) gráfico amortecimento	71
Figura 68 - Dados da mistura com 30% de borracha: a) gráfico módulo distorção; b) gráfico amortecimento.....	73
Figura 69- Dados das misturas com tensão de confinamento 80kPa: a) gráfico modulo distorção; b) gráfico amortecimento.....	74
Figura 70- Dados das misturas com tensão de confinamento 80kPa: a) gráfico modulo distorção; b) gráfico amortecimento.....	75
Figura 71-Comparacao de resultados com Mashiri et al. (2016)	76
Figura 72- Gráfico corte monotónico	77
Figura 73- Dados de ambos equipamentos com amostras de areia: a) gráfico modulo distorção; b) gráfico amortecimento.....	79

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 1 - Variações nas configurações do ensaio de coluna ressonante (adaptado de (Ferreira, 2003))	27
Tabela 2 - Diferentes categorias de sinais de <i>input</i> (adaptado de (Moreira, 2015))	31
Tabela 3 - Ensaio e os respectivos níveis de distorção nos quais são realizados (Ferreira, 2003))	32
Tabela 4 - Dados da Borracha (segundo especificações técnicas do fornecedor).....	39
Tabela 5 - Diferentes tipos de provetes do estudo paramétrico	41
Tabela 6- Abertura dos peneiros da série ASTM (de Matos Fernandes, 2006)	42
Tabela 7 – Parâmetros obtidos nos ensaios	60
Tabela 8 – Plano de ensaios	61

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AH- Areia de Hostun

ASTM - American Society for Testing and Materials

BP - Back-Pressure, contra-pressão, poropressão

CP - Confining-Pressure, pressão de confinamento

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LabGeo - Laboratório de Geotecnia da FEUP

LNec - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LVDT - Linear Variable Differential Transformers

P - Onda de Compressão

S - Onda de Corte

SASW - Spectral Analysis of Surface Waves, Análise espectral de ondas superficiais

SCPT - Seismic Cone Penetration Test

SPT - Standard Penetration Test

CTX - Célula triaxial cíclica

1

INTRODUÇÃO

1.1. O IMPACTO AMBIENTAL DOS RESÍDUOS E SUA APLICAÇÃO NA ENGENHARIA

O setor de transporte por terra na última década teve um crescimento notável de mais 30%, mas trouxe consigo uma série de problemas ambientais como os gases de efeito de estufa provenientes dos gases exaustores. Outro problema tem origem nos pneus em fim de vida, por razões ambientais e económicas, há um interesse contínuo e amplo na reciclagem de sucata de borracha e no desenvolvimento de tecnologias de reciclagem. A utilização de sucata pós-industrial é estabelecida como um negócio sistemático. No entanto, a eliminação e reutilização de pneus inservíveis continua a ser uma séria preocupação ambiental e uma oportunidade de negócio (Myhre and MacKillop, 2002).

No dia 6 de agosto de 2021, um incêndio de grandes proporções devastou o maior depósito de pneus do mundo, localizado em Al Sulaibiya, no Kuwait. Estima-se que existam mais de sete milhões de pneus usados acumulados nesse local. O fogo espalhou-se de forma intensamente, sendo possível avistar a densa fumaça gerada a partir do espaço (Observador, 2021).



(a)



(b)

Figura 1 – Zona de aterros em Sulaibiya, Kuwait: (a) incêndio (Observador, 2021); (b) Vista aérea (Publico, 2021)

No momento, a Comissão Europeia impôs uma proibição da eliminação de pneus inteiros e pneus triturados em aterros em 2003 e 2006, respetivamente (Union, 1999) devido às suas desvantagens, tais como ocuparem um espaço considerável, representarem um risco de incêndio e serem propensos a atrair insetos, como mosquitos, que podem transmitir doenças.

A utilização de borracha reciclada granulada como material leve em aplicações de engenharia civil tem vindo a aumentar consideravelmente nos últimos 20 anos. Os resíduos de pneus processados

misturados com solos foram introduzidos como enchimentos leves para taludes, muros de contenção e aterros. Também tem sido considerado como material de amortecimento sob fundações em zonas sísmicas (AbdelRazek [et al.], 2018).

Além disso, é importante destacar que a adição de borracha no solo envolve um impacto negativo no ambiente. Várias pesquisas extensas no campo e no laboratório têm vindo comprovar que as quantidades de metais cumprem os parâmetros estabelecidos, o que significa que não haja possibilidade de contaminação (Liu [et al.], 2000).

O processo de reciclagem dos pneus pode ser resumido em três etapas principais: trituração dos pneus em pequenas partículas de borracha, remoção das fibras e do aço usando separadores apropriados, e trituração adicional da borracha até um tamanho mais fino, seguida de mistura com diferentes agentes de recuperação (Bressi [et al.], 2019).

Os tamanhos de borracha que podem ser obtidos são (Torretta [et al.], 2015):

- Pedacos de borracha (20–50 mm)
- Granulado de borracha (0,8-20 mm)
- Pó de borracha (<0,8 mm)
- Têxteis

No âmbito desta dissertação foram feitas várias pesquisas para analisar o desempenho e a aplicação de pneus triturados ou combinações de misturas com borracha como a construção de aterros sanitários (Warith [et al.], 2004) (Reddy [et al.], 2010), produção de betão (Siddika [et al.], 2019) (Huang [et al.], 2004) e pavimentos de asfalto (Shu and Huang, 2014).

1.2. PROPÓSITO DESTA INVESTIGAÇÃO

O objetivo principal desta investigação é a determinação do amortecimento de uma areia de referência, bem como da sua mistura com borracha, em diferentes percentagens, a fim de verificar o impacto que esta tem no amortecimento do solo. Além disso, busca-se estabelecer uma comparação entre os ensaios CSS e CTX para verificar se, para as mesmas condições de tensão de confinamento e de densidade, é possível obter os mesmos resultados, não apenas em termos do coeficiente de amortecimento, mas também em termos dos módulos de rigidez.

1.3. ESTRUTURA

A presente tese está estruturada em cinco capítulos, abordando de forma abrangente e aprofundada os principais temas relacionados ao estudo sobre amortecimento, propagação das ondas, liquefação e técnicas para determinação das características dinâmicas.

O capítulo 1 corresponde à introdução, onde são delineados os objetivos da pesquisa, a relevância do estudo no âmbito da engenharia civil e uma visão geral dos temas abordados nos capítulos seguintes. Nesta fase, a revisão bibliográfica desempenha um papel fundamental, fornecendo uma base sólida de conhecimentos consolidados sobre amortecimento, propagação das ondas, liquefação e as diversas técnicas utilizadas para a determinação das características dinâmicas. Essa revisão abrange tanto

estudos pioneiros quanto trabalhos contemporâneos, contribuindo para o embasamento teórico e metodológico da tese.

O capítulo 2 é dedicado ao aprofundamento dos conceitos relacionados ao amortecimento, propagação das ondas, liquefação e técnicas de análise das características dinâmicas. São exploradas teorias e modelos que explicam os fenômenos de dissipação de energia, a propagação das ondas em meios elásticos, os fatores que influenciam a liquefação dos solos e as diversas abordagens utilizadas para determinar as propriedades dinâmicas dos materiais. Nesse contexto, são destacados estudos e experimentos relevantes que contribuíram significativamente para o avanço do conhecimento nessas áreas.

No capítulo 3, é apresentado o detalhamento dos procedimentos dos ensaios realizados em laboratório para investigar o amortecimento, a propagação das ondas, a liquefação e as características dinâmicas dos materiais em estudo. São abordados os materiais utilizados, o método laboratorial adotado e a descrição completa dos ensaios, incluindo os equipamentos e instrumentos utilizados, bem como as condições e parâmetros adotados durante as experimentações.

O capítulo 4 é destinado à apresentação dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados. São expostos os dados coletados durante os testes e a análise aprofundada dos resultados, considerando os parâmetros relevantes relacionados ao amortecimento, propagação das ondas, liquefação e características dinâmicas dos materiais. Além disso, são efetuadas comparações entre os diferentes ensaios realizados, evidenciando suas principais diferenças e semelhanças.

Finalmente, o capítulo 5 corresponde às conclusões da pesquisa, baseadas nos resultados obtidos e nas análises realizadas ao longo da tese. São apresentadas considerações relevantes sobre os principais achados, contribuições e limitações do estudo, bem como as suas implicações para o campo da engenharia civil. Adicionalmente, são sugeridas possíveis direções para trabalhos futuros, visando a ampliação do conhecimento e o aprimoramento das técnicas utilizadas na determinação das características dinâmicas dos materiais.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MELHORAMENTO DE SOLOS

2.1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

No ramo da Engenharia Civil, é essencial que os materiais utilizados atendam a certas características de comportamento e requisitos de segurança, de modo a suportar as cargas estáticas ou cíclicas projetadas. Na área de Geotecnia, os mesmos requisitos são necessários tanto para solos naturais ou artificiais, e é necessário melhorar suas propriedades quando elas não atendem aos requisitos necessários. Embora seja um assunto vasto e com um campo de conhecimento abrangente, este texto apresenta apenas maneiras mais comuns de situações que requerem tratamento do solo e as respostas geralmente concretizadas para tal (Matos Fernandes, 2011).

2.1.2. DIFERENTES ABORDAGENS PARA MELHORAR OS SOLOS

No âmbito da Mecânica dos Solos, procura-se melhorar as suas propriedades por meio de correção granulométrica, introduzindo novas partículas para aumentar a sua heterogeneidade, ou otimizando a organização das partículas. Existem várias abordagens para o melhoramento dos solos, incluindo o aumento da densidade por compactação utilizando equipamentos, a substituição do solo por outro de melhor qualidade e o rebaixamento do nível freático. No entanto, o aumento da densidade por compactação pode ser difícil em áreas já construídas, devido ao impacto negativo das vibrações em estruturas vizinhas, e a substituição do solo existente por solo de características superiores pode ser dispendiosa devido aos custos associados à remoção do solo atual (Shiraishi, 2006).

Dentro do contexto de melhorar o comportamento geral do solo, diversos estudos têm sido conduzidos para a estabilização mecânica por meio da adição de outras partículas e materiais. Exemplos desses estudos incluem a adição de fibras naturais (Motta, 2018) ou fibras de polipropileno (Feuerharmel, 2000). Essas abordagens têm apresentado resultados satisfatórios em relação ao comportamento tensão-deformação dos solos. O âmbito desta dissertação é a avaliação do comportamento do solo após a adição de partículas de borracha na areia.

Nos últimos anos, tem havido uma crescente investigação sobre o uso de partículas de borracha para lidar com diversos desafios. São exemplos de pesquisas até a data: (Ahmed, 1993), (Ecemis [et al.], 2021), (Ehsani [et al.], 2015), (Feng and Sutter, 2000).

2.2. LIQUEFAÇÃO

2.2.1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas quatro décadas, a liquefação de solos soltos e saturados durante terremotos tem sido objeto de extensos estudos. Esse fenómeno tem sido observado em praticamente todos os grandes abalos sísmicos e despertou considerável interesse na comunidade de engenharia geotécnica,

especialmente após os impactos significativos de terremotos no Japão (Figura 2) e no Alasca O termo "liquefação" foi introduzido por Mogami e Kubo em 1953, sendo utilizado para descrever uma variedade de fenômenos que envolvem deformações causadas por carregamentos monotônicos, transitórios ou repetitivos em solos não coesivos e saturados. A questão central da liquefação reside no aumento da pressão neutra durante o carregamento não drenado. Esse tópico é de extrema relevância na engenharia geotécnica, exigindo investigações aprofundadas para compreender seus mecanismos e impactos, contribuindo assim para a conceção de medidas mitigatórias e garantindo a segurança de infraestruturas em áreas propensas a esse fenômeno geotécnico.



(a)



(b)

Figura 2 - a) Conjunto habitacional em Kawakishi-cho, Niigata, Japão; b) Pessoas na lateral do edifício em Kawakishi-cho, Niigata, Japão (imagens da Godden Collection, EERC, University of California, Berkeley)

A liquefação ocorre quando solos não coesivos e saturados são submetidos a carregamentos rápidos, nos quais o carregamento é considerado não drenado. Esse processo resulta no aumento da pressão neutra, o que reduz a tensão efetiva do solo. Na área da mecânica dos solos, a liquefação é definida como a transição de um solo saturado do estado sólido para o estado líquido.

Uma definição mais precisa é fornecida por (Sladen [et al.], 1985), onde a liquefação é descrita como um fenômeno no qual um solo perde parte de sua resistência ao corte quando sujeito a carregamentos monotônicos e cíclicos. Esse fenômeno é de grande importância e pode ter consequências significativas para a estabilidade de estruturas construídas sobre esses solos.

A Figura 3 representa esquematicamente o fenômeno da liquefação, ilustrando visualmente o processo pelo qual o solo perde sua capacidade de suporte e se comporta como um líquido temporariamente. É essencial compreender a liquefação e suas características para projetar e construir estruturas seguras em áreas suscetíveis a esse fenômeno geotécnico.

Observa-se, assim, que a liquefação é um tópico crucial na engenharia geotécnica, exigindo estudos e análises aprofundados para mitigar os riscos associados e garantir a segurança de projetos de engenharia em regiões propensas a esse fenômeno.

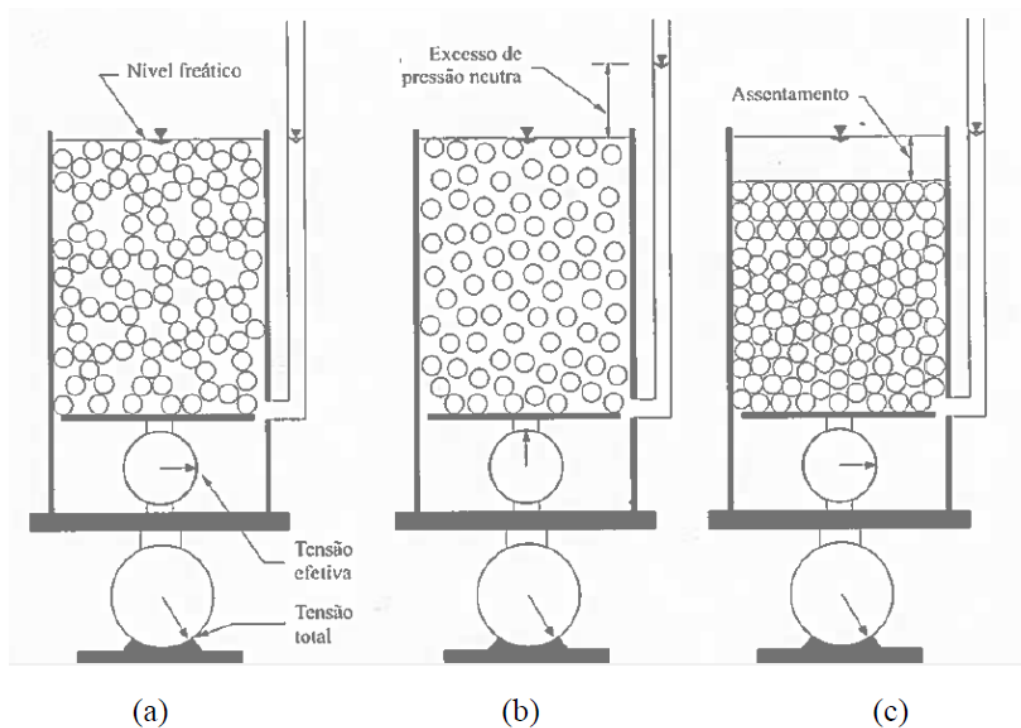


Figura 3 – Ocorrência de Liquefação: (a) antes do evento; (b) durante o fenômeno de liquefação; (c) após a liquefação. (Matos Fernandes, 2011)

A liquefação está associada a diversos mecanismos de rutura, sendo que, (Robertson and Fear, 1996) propuseram um sistema de classificação para uma definição mais precisa. Isto inclui a liquefação por fluxo, que ocorre quando solos saturados e contractivos sofrem fluxo não drenado ao exceder a resistência residual ao corte do solo, seja por carregamento monotónico ou cíclico. O amolecimento cíclico descreve as grandes deformações que ocorrem durante o carregamento cíclico devido ao aumento da pressão neutra em solos que tendem a dilatar-se durante carregamentos monotónicos não drenados. Dentro desta categoria, temos a liquefação cíclica, na qual as tensões de corte impostas pelo carregamento cíclico excedem a resistência inicial ao corte, levando a grandes deformações, e a mobilidade cíclica, na qual as deformações se acumulam a cada ciclo de carregamento sem atingir a condição de tensão efetiva nula.

Na Figura 4 está representado a diferenciação entre os diferentes tipos de liquefação pode ser ilustrada usando um gráfico que relaciona a tensão efetiva de confinamento com os índices de vazios obtidos de um teste não drenado realizado em um solo saturado. A linha dos estados críticos conecta os pontos que correspondem aos índices de vazios no estado crítico, ou seja, o índice de vazios no qual o solo mantém sua deformação com tensão e volume constantes.

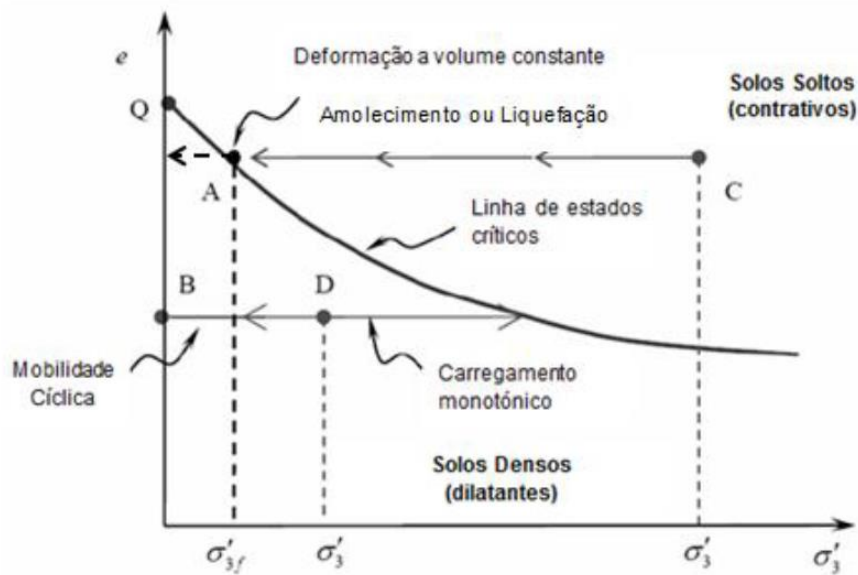


Figura 4 - Desempenho de areias saturadas sob condições não drenadas durante carregamento monotônico e cíclico (adaptado de (Castro and Poulos, 1977))

2.2.2. MOBILIDADE CÍCLICA

A mobilidade cíclica refere-se a um fenómeno em que o solo apresenta menor tensão de corte estática em comparação com as tensões de corte quando liquefeito, conforme descrito por (Rodrigues [et al.], 2014). Esse fenómeno está associado a grandes deformações durante um abalo sísmico, incluindo assentamentos verticais significativos e formação de bolhas de areia. Geralmente, ocorre em areias densas, consolidadas ou sobreconsolidadas, quando submetidas a carregamentos cíclicos rápidos em condições não drenadas. A magnitude e a duração dos ciclos de carregamento, juntamente com a densidade do solo, o grau de confinamento e a estrutura do solo, influenciam as deformações desenvolvidas durante a mobilidade cíclica. Para desencadear a liquefação cíclica, é necessário que o carregamento cíclico apresente características específicas, como alta magnitude e frequência.

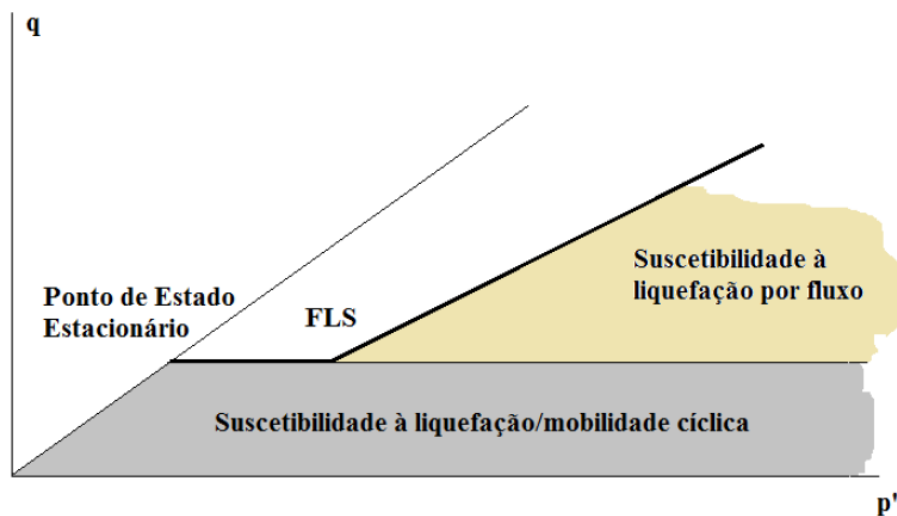


Figura 5 - Regiões propensas aos efeitos de liquefação (Marcos, 2016)

2.2.3. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DOS SOLOS À OCORRÊNCIA DE LIQUEFAÇÃO

A liquefação é um fenômeno em que os solos perdem temporariamente sua resistência devido ao aumento da pressão neutra. Para avaliar a susceptibilidade dos solos à liquefação, existem vários critérios que levam em consideração diferentes aspectos.

O critério histórico se baseia na observação de sismos passados para identificar locais ou condições que podem ser suscetíveis à liquefação em futuros eventos sísmicos. Estudos de campo mostraram que a liquefação ocorre em locais onde as condições do solo e hidrológicas permanecem inalteradas. A extensão dos efeitos da liquefação está confinada a uma zona próxima ao epicentro do terremoto.

O critério geológico considera as condições de deposição, hidrológicas e a idade dos depósitos de solos. Depósitos fluviais são mais suscetíveis à liquefação devido à sua baixa compacidade relativa. A idade do depósito também influencia a susceptibilidade, sendo que solos mais antigos são menos propensos à liquefação. A profundidade do nível da água também afeta a susceptibilidade, com a liquefação sendo mais provável em solos saturados próximos à superfície.

O critério de composição do material leva em conta as características da composição do solo que influenciam a variação volumétrica, que é um fator determinante para a liquefação. Solos bem graduados, com distribuição granulométrica adequada, são geralmente menos suscetíveis à liquefação. A forma das partículas também desempenha um papel, com solos de partículas arredondadas sendo mais propensos à liquefação do que solos com partículas angulares.

Tsuchida (1971) demonstrou intervalos de distribuição de tamanhos de partículas em solos que mostraram ter desenvolvido liquefação ou tinham o potencial para tal, com base em análises da distribuição de tamanhos de partículas em depósitos naturais que experimentaram ou não a ocorrência de liquefação (consulte Figura 6 e7).

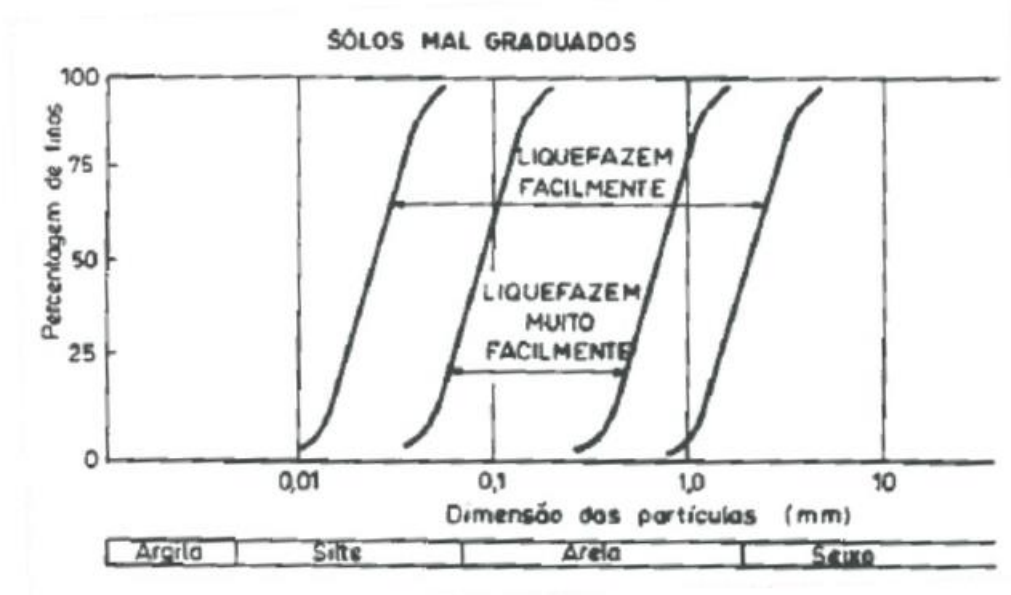


Figura 6 - Diversidade de tamanhos de partículas suscetíveis à liquefação em solos com granulometria inadequada. (Tsuchida, 1970)

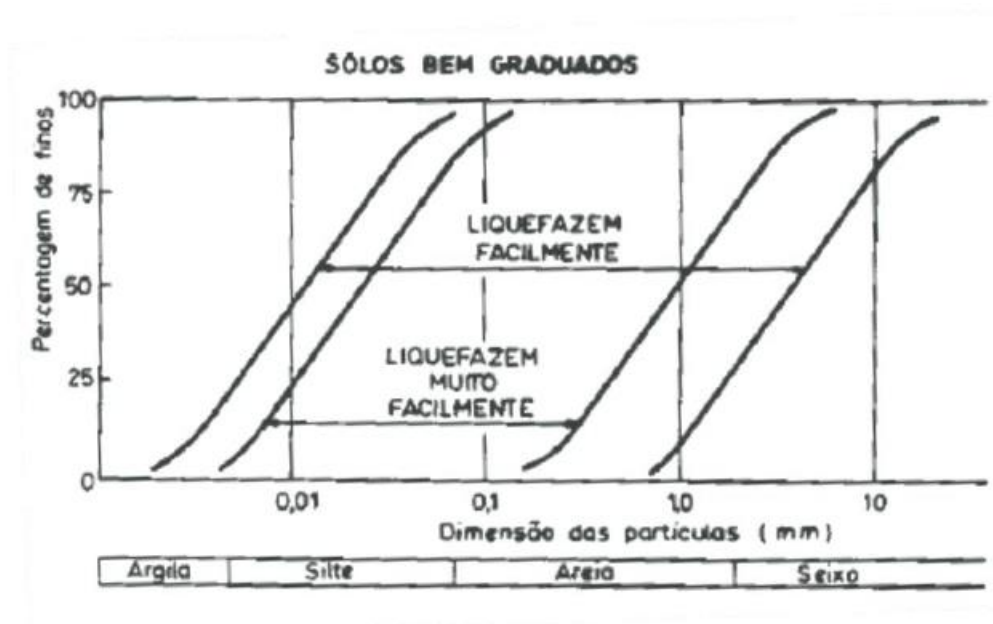


Figura 7 - Diversidade de tamanhos de partículas suscetíveis à liquefação em solos com granulometria bem graduada. (Tsuchida, 1970)

Além desses fatores, o estado inicial do solo, incluindo o índice de compactidade e o estado de tensão, também influenciam a suscetibilidade à liquefação. O índice de vazios crítico é um parâmetro que se baseia na densidade relativa do solo e indica a tendência do solo para apresentar altas deformações. A linha dos estados críticos relaciona o índice de vazios crítico com a tensão de confinamento. O estado de deformação também é considerado, levando em conta se o solo alcançou um novo estado de equilíbrio antes do evento sísmico.

Em resumo, a avaliação da suscetibilidade dos solos à liquefação envolve critérios históricos e geológicos. Esses critérios ajudam a identificar locais e condições propensas à ocorrência de liquefação em eventos sísmicos.

2.2.4. MITIGAÇÃO DA LIQUEFAÇÃO

Para evitar a liquefação e reduzir a suscetibilidade desse fenômeno em solos, é fundamental fortalecer a sua capacidade de resistência ao corte. Existem técnicas que envolvem a compactação das areias para reduzir o seu índice de vazios, eliminando assim a tendência do solo para apresentar afundamentos ou excesso de pressão neutra positiva (Matos Fernandes, 2011). No entanto, essas abordagens são dispendiosas e nem sempre são viáveis para áreas densamente construídas ou com limitações de espaço (Hong [et al.], 2015). Por essa razão, procura-se soluções mais econômicas através da estabilização mecânica, conforme estudado por (Castro, 2015) e (Cristelo, 2001), ou através da estabilização química, como mencionado nos trabalhos de (Boominathan and Hari, 2002) (Castelló, 2008, Castro, 2015) (Sanches, 2012).

Diversos estudos comprovaram a eficácia da utilização de misturas de solo-borracha como método para mitigar a liquefação em solos com potencial para esse fenômeno em seu estado natural (Hazarika [et al.], 2008). A adição de borracha inibe a geração de pressão neutra excessiva em amostras submetidas a um terremoto (Kaneko [et al.], 2013), (Neaz Sheikh [et al.], 2013). Essa abordagem tem-se mostrado promissora na redução da liquefação e pode ser considerada como uma alternativa viável e eficiente.

Nesta dissertação, o foco principal é direcionado ao estudo detalhado do comportamento dinâmico, mais especificamente o amortecimento, em misturas de solo-borracha com diferentes percentagens de borracha. É importante ressaltar que a aplicação dessas misturas como técnica de mitigação da liquefação ultrapassa o âmbito desta investigação. No entanto, os resultados apresentados aqui têm grande relevância e podem ser valiosos para futuros estudos que se debrucem sobre essa temática.

Os dados e análises obtidos neste trabalho fornecem uma compreensão mais aprofundada sobre a influência do teor de borracha nas propriedades dinâmicas dos solos. Essas informações podem ser úteis para projetos de engenharia civil que busquem lidar com os desafios da liquefação do solo em situações de carregamento cíclico.

Embora o estudo se concentre na caracterização das propriedades de amortecimento, os resultados constituem um importante ponto de partida para investigações mais abrangentes e aplicadas em contextos práticos. Pesquisas futuras podem considerar essas descobertas como base para projetos de engenharia geotécnica que envolvam a utilização de misturas de solo-borracha como uma estratégia de prevenção e controle da liquefação durante eventos sísmicos.

Portanto, este estudo representa uma contribuição significativa para o avanço do conhecimento na área de geotecnia e abre caminho para futuros trabalhos que possam explorar de forma mais abrangente e aplicada a utilização dessas misturas como solução para desafios geotécnicos em projetos de engenharia civil.

2.3. PROPRIEDADES-CHAVE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS SOLOS

2.3.1. ÍNDICE DE VAZIOS

O conceito é relativamente fácil de compreender, é importante destacar o significado e o método de cálculo do índice de vazios, pois ele desempenha um papel relevante em várias etapas de montagem de amostras para testes laboratoriais. O índice de vazios, representado por e , indica a quantidade de espaços vazios, como água e ar, em relação à quantidade de matéria sólida numa amostra de solo específica, conforme ilustrado na Figura 8. Embora seja um conceito acessível, a sua compreensão é fundamental para realizar com precisão os ensaios laboratoriais abordados nos próximos capítulos.

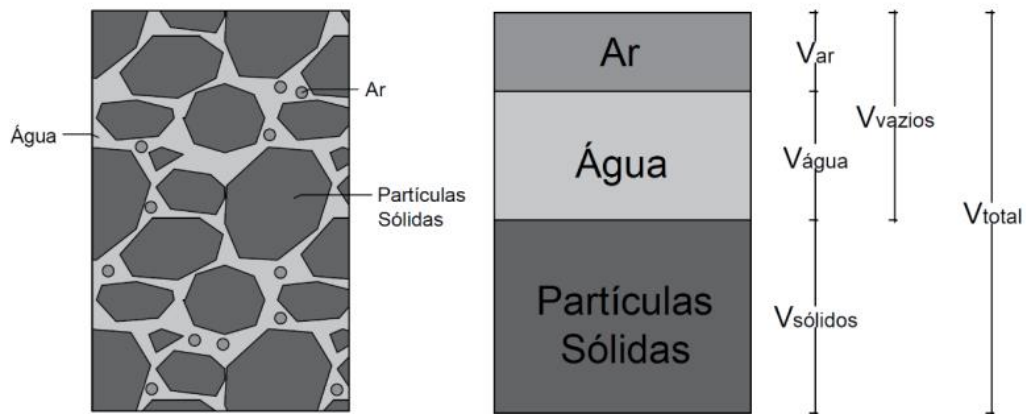


Figura 8 – Características fundamentais da condição física dos solos (adaptado de (Fernandes, 2011))

Com este conceito, obtém-se outros dados que são relevantes na caracterização de um solo específico. Supondo que o volume de sólidos seja igual a um, podemos estabelecer as seguintes relações (Fernandes, 2011):

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad [1]$$

$$G_s w = S_r e \quad [2]$$

$$\gamma = \gamma_s \frac{1 + w}{1 + e} \quad [3]$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e} \quad [4]$$

Com

e – Índice de vazios;

γ_s – Peso volúmico das partículas sólidas;

n – Porosidade;

S_r – Grau de saturação;

γ – Peso volúmico;

γ_d – Peso volúmico seco do solo;

G_s – Densidade das partículas sólidas;

w – Teor em água;

Quando se têm duas amostras do mesmo solo com o mesmo volume de sólidos, mas com volumes de água e ar diferentes, isso pode resultar em variações significativas nos resultados dos ensaios. Essa diferença ocorre devido ao índice de vazios, onde uma amostra com um índice de vazios menor é mais "compacta", tornando-a mais rígida e reduzindo sua capacidade de amortecimento. Portanto, o controle do índice de vazios é um parâmetro essencial durante a preparação das amostras de laboratório, garantindo que todas sejam comparáveis e apresentem uma estrutura sólida e um arranjo de partículas (ou fábrica) semelhantes entre si.

Ao analisarmos os índices de vazios nos solos estudados, obtemos informações cruciais sobre sua densidade e comportamento. Agora, avançamos para o próximo aspeto relevante: o módulo de distorção. Neste novo subcapítulo, exploraremos como os solos respondem a solicitações de deformação, fornecendo insights valiosos para compreender sua capacidade de resistência e resposta a carregamentos. Com essa complementaridade entre índices de vazios e módulo de distorção, aprofundamos nosso conhecimento sobre os materiais geotécnicos em questão, contribuindo para uma análise mais abrangente nesta dissertação.

2.3.2. MÓDULO DE DISTORÇÃO (G)

O módulo de distorção G representa a rigidez de um material quando submetido a deformações de corte, ou seja, a relação entre a tensão de corte e a distorção, sendo especialmente relevante em estudos de dinâmica dos solos e engenharia sísmica, devido às deformações que o solo experimenta durante terremotos. A Figura 9 ajuda a compreender o conceito de distorção, que se refere a uma mudança na forma, sem necessariamente afetar o volume.

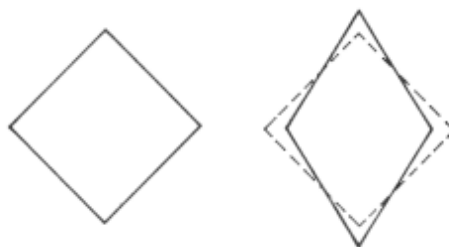


Figura 9 - Deformação sem alteração de volume (G) (Wood, 1990)

Esse valor pode ser expresso em relação à tensão de corte, τ , e à amplitude de distorção, γ , como mostrado na equação (1), ou em termos do coeficiente de Poisson, ν , e do módulo de elasticidade, E , conforme indicado na equação (2).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad [5]$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad [6]$$

O módulo de distorção é representado pelo declive da ligação dos pontos máximos e mínimos da curva, conforme demonstrado na Figura 4.

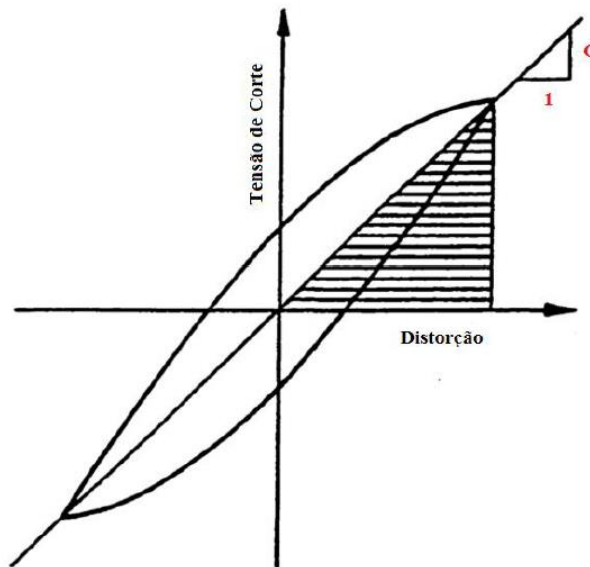
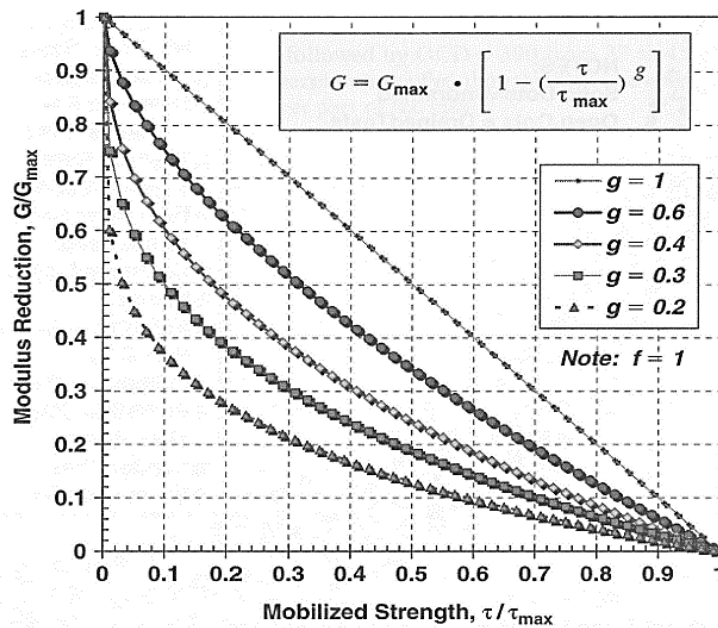


Figura 10 - "Loop" histerético e G (adaptado de (Park, 1998))

O G muda de valor, como o módulo de elasticidade, dependendo do nível de deformação e da tensão aplicada ao material. Portanto, considerando que esse parâmetro também exibe um comportamento não linear, é possível levar em conta a degradação do valor de G usando a equação [7].

$$\frac{G}{G_0} = \left(1 - f \frac{\tau}{\tau_{ult}}\right)^g \quad [7]$$

O valor inicial do módulo de distorção é representado por G_0 , enquanto τ e τ_{ult} representam as tensões de corte aplicada e a tensão de corte máxima suportada, respetivamente. Através da análise da variação do parâmetro G , é possível obter um gráfico ilustrado na Figura 11. Conforme as tensões de corte aumentam, as tensões tangenciais entre as partículas do material também aumentam, superando as forças de resistência e causando a deformação do material. Essa deformação leva à diminuição da rigidez distorcional à medida que a deformação aumenta, até ocorrer a rutura por corte.

Figura 11 - Degradação do G_0 (Fahey, 1998)

Com a análise do módulo de distorção concluída, a atenção é direcionada para outra característica essencial: o amortecimento. No próximo subcapítulo, serão explorados os resultados dos ensaios específicos de amortecimento, realizando-se uma análise comparativa com os dados do módulo de distorção. Essa abordagem proporcionará uma visão abrangente do comportamento dinâmico dos solos estudados, especialmente em relação à dissipação de energia em situações de carregamento cíclico. Com essa abordagem, a dissertação em geotecnia e engenharia civil estará mais próxima de alcançar conclusões significativas.

2.3.3. COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO (D)

2.3.3.1. Introdução

A investigação das propriedades dinâmicas dos solos tem adquirido relevância devido ao desenvolvimento no ramo da engenharia sísmica e ao reconhecimento dos efeitos das vibrações nas estruturas. Enquanto as cargas estáticas foram amplamente investigadas, as cargas dinâmicas, como terremotos e vibrações causadas pelo tráfego de alta velocidade, representam um desafio significativo. Para compreender e antever a reação do conjunto solo/estrutura nessas condições, é fundamental considerar o parâmetro do coeficiente de amortecimento.

O conceito de amortecimento pode ser complexo, mas pode ser ilustrado com um exemplo. Imagine um recipiente infinito cheio de água e um objeto de peso conhecido sendo solto de uma certa altura na superfície da água. Isso geraria uma onda de choque propagando-se para qualquer direção. No entanto, essa onda não se propagará indefinidamente, pois a água possui características que fazem com que a energia da onda diminua à medida que se afasta do ponto inicial.

O amortecimento representa a aptidão de um sistema em dissipar energia. A taxa de dissipação dessa energia dependerá de diversos fatores (Santamarina [et al.], 2001). As perdas relacionadas à atenuação

geométrica estão ligadas à redução da amplitude da onda à medida que a distância aumenta a partir do ponto de origem. Já as perdas associadas às características do material ocorrem devido a fatores como o amortecimento, resultando na diminuição da energia da onda. Por fim, há perdas relacionadas à existência de materiais com diferentes graus de rigidez, os quais podem oferecer resistência ou impedância à propagação da onda.

Embora o exemplo descrito seja difícil de compreender, ele deixa ao leitor perceber a ideia de dissipação de energia. Para analisar as perdas causadas pelo amortecimento de um determinado material, primeiramente, estabelecer a abordagem a ser adotada no estudo. Isso leva a dois conceitos distintos que devem ser esclarecidos para uma melhor entendimento de pesquisas futuras a serem realizados (Inaudi and Kelly, 1995).

Os próximos subcapítulos abordarão os tipos de amortecimento e as diferentes maneiras de calculá-los.

2.3.3.2. Coeficiente de amortecimento viscoso

Uma equação comumente utilizada é a equação [8], que permite calcular o coeficiente de amortecimento viscoso D com base no amortecimento do sistema C e no amortecimento crítico C_c . Essa equação é utilizada para quantificar o amortecimento viscoso num sistema viscoelástico.

$$D = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2\sqrt{km}} \quad [8]$$

Existem diversos modelos que podem ser aplicados ao estudo do comportamento do coeficiente de amortecimento viscoso, incluindo aqueles específicos para solos. Embora possam existir algumas discrepâncias nos pressupostos adotados em cada modelo, três deles serão brevemente apresentados aqui.

O modelo mencionado é do Kelvin-Voigt, que é amplamente utilizado devido à sua simplicidade matemática (Ashmawy [et al.], 1995). Esse modelo é essencialmente um sistema de um grau de liberdade (SDOF) composto por uma mola de rigidez k (Lei de Hooke) e um amortecedor c , dispostos em paralelo, como ilustrado na Figura 12. Esse modelo fornece uma representação simplificada do comportamento do amortecimento viscoso num sistema.

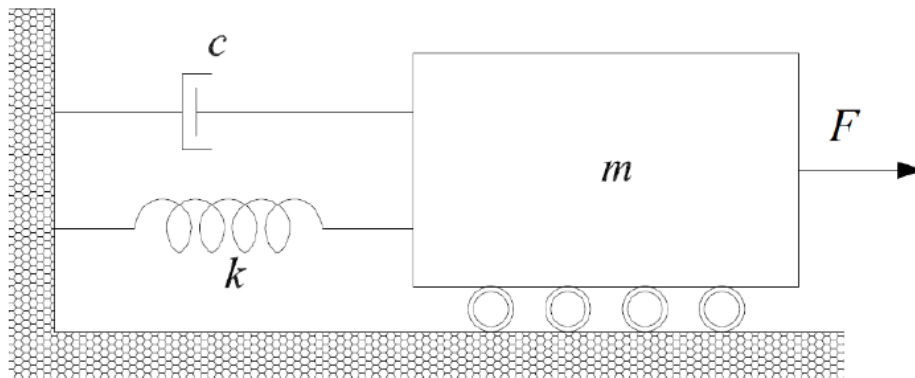


Figura 12 - O conceito de “Modelo de Kelvin-Voigt (KV)” (adaptado de (Rio, 2006))

O modelo de Kelvin-Voigt, representado pela equação [9], permite determinar o movimento resultante da aplicação de um impulso num sistema. Essa equação é conhecida como a Equação Fundamental da Dinâmica das Estruturas e envolve variáveis como deslocamento (u), velocidade ($\dot{u}$) e aceleração ($\ddot{u}$), além dos parâmetros de massa (m), constante da mola (k) e amortecimento (c).

Quando uma força é aplicada a um sistema inicialmente em repouso, este move-se. Após o término da aplicação da força, o sistema tende a retornar à sua posição inicial, dissipando a energia recebida. O tipo de amortecedor presente no sistema determinará a velocidade com que a energia é perdida, resultando em três modos de movimentos distintos, cada um ligado a um nível específico de amortecimento (Figura 14).

$$x(t) = m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u \quad [9]$$

Na primeira situação, criticamente amortecido, ao ser solicitado pela ação F , ele regressará à posição de repouso sem entrar em movimento oscilatório. Segunda situação, quando o sistema possui um amortecimento superior ao crítico, também não ocorrerá movimento oscilatório, mas ele regressará mais lentamente à posição de repouso em comparação ao caso anterior. Na terceira situação tem um amortecimento inferior ao crítico, ele entrará em movimento oscilatório, e a velocidade com que regressará à posição de repouso dependerá da proximidade entre a quantidade do amortecimento e o amortecimento crítico. Os três casos estão representados na Figura 13.

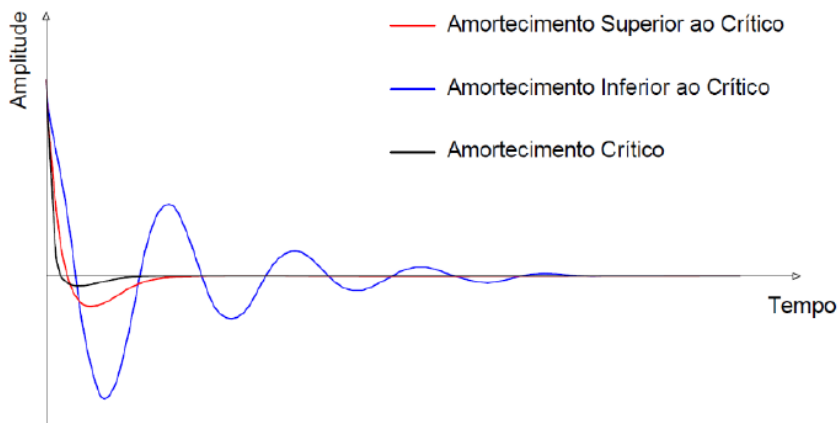


Figura 13 - Comportamento do sistema em relação ao amortecimento (adaptado de Moreira, 2015)

O próximo modelo a ser discutido é o modelo de Maxwell. Nesse modelo, considera-se apenas uma mola (de acordo com a Lei de Hooke), semelhante ao modelo anterior, e um amortecedor (de acordo com a Lei de Newton), que são colocados em série, conforme ilustrado na Figura 14.

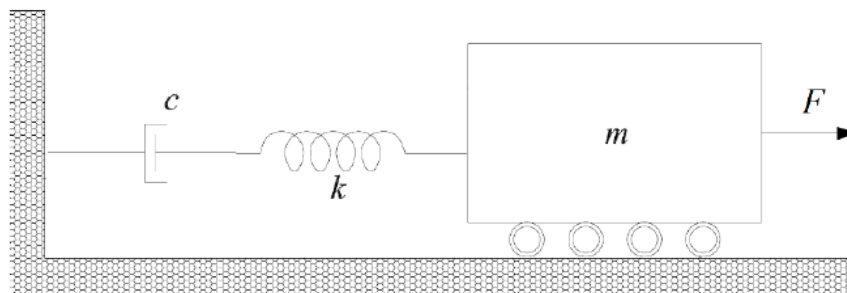


Figura 14 - O conceito de "modelo de Maxwell" (adaptado de (Rio, 2006))

Este modelo é frequentemente usado para caracterizar o comportamento de materiais sob cargas contínuas ao longo do tempo, no qual o deslocamento aumenta linearmente com o tempo, o que é conhecido como efeito de fluência. Devido à sua configuração, a força F aplicada resulta em uma tensão igual em cada elemento, conforme indicado pela equação [10], e a deformação total que ocorre é a soma das deformações de cada elemento.

$$\sigma_{total} = \sigma_{mola} = \sigma_{amortecedor} \quad [10]$$

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{mola} + \varepsilon_{amortecedor} \quad [11]$$

Por último, apresenta-se o modelo linear, também conhecido como "*Standard Linear Solid Model*" é um pouco mais complexo em relação aos outros dois modelos anteriores, sendo uma combinação

deles. Este consiste em duas molas conectadas em série, sendo que uma delas é colocada em paralelo com um amortecedor (Figura 15).

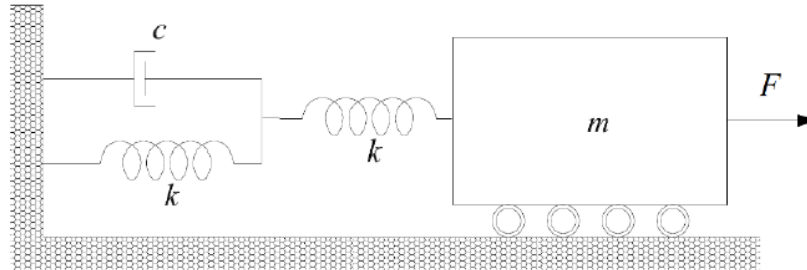


Figura 15 - O conceito de “Modelo linear - Standard Linear Solid Model” (adaptado de (Rio, 2006))

Assim como nos exemplos anteriores, a mola no modelo linear segue a lei de Hooke, o que representa que a força F pode ser relacionada com a deformação δ através da constante da mola k equação [12]. No caso da lei de Newton, a força é descrita em termos da taxa de deformação e do amortecimento viscoso do amortecedor, conforme mostrado nas equações [13] e [14] (Santamarina et al., 2001).

$$k = \frac{F}{\delta} \quad [12]$$

$$F = c \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad [13]$$

$$k = \frac{\frac{d\delta}{dt}}{\delta} \quad [14]$$

Este modelo oferece certa flexibilidade, permitindo ser melhor que os modelos anteriores e adaptar-se à resposta do material em questão. Embora alguns modelos sejam mais complexos que outros, todos eles têm como objetivo simplificar o conceito e o funcionamento do amortecimento.

2.3.3.3. Amortecimento histerético

O coeficiente de amortecimento histerético é um modo de amortecimento que está ligado à dissipação de energia em um material durante um ciclo de carregamento, onde as tensões aplicadas variam entre dois valores estabelecidos. Ao contrário do amortecimento viscoso, o amortecimento histerético não depende da frequência da força ou deformação aplicada, mas está relacionado ao conceito de histerese. A histerese é a capacidade de um material armazenar e dissipar energia quando sujeito a uma força ou deformação específica. Os modelos desenvolvidos para o estudo do amortecimento

histerético linear simplificam o estudo do amortecimento viscoelástico, substituindo parâmetros complexos de rigidez e coeficientes de amortecimento dependentes da frequência de excitação.

Com o passar dos anos, foram propostos diversos modelos para explicar o amortecimento, cada um com suas vantagens e limitações. Um desses modelos é o modelo de Kelvin-Voigt, ilustrado na Figura 12. Nesse modelo, quando um sistema é submetido a uma deformação sinusoidal, a quantidade de energia dissipada em um ciclo de carregamento é proporcional ao quadrado da amplitude Δ_0 e à frequência de deformação $|\bar{w}|$, de acordo com a equação [15].

$$W_{ciclo} = |\bar{w}| \cdot \Delta_0^2 \quad [15]$$

No entanto, em muitos materiais, a quantidade de energia dissipada por ciclo não depende significativamente da frequência de deformação. Portanto, é necessário recorrer a outros modelos nos quais essa condição seja atendida. Para que isso ocorra, é necessário que a transformada de Fourier da força aplicada e da deformação sofrida obedeçam à seguinte relação:

$$F(j\bar{w}) = k[1 + j\eta \operatorname{sgn}(\bar{w})]\Delta(j\bar{w}) \quad [16]$$

A equação [16] representa o "Modelo de Elemento Mecânico", onde F representa a força aplicada, k é o parâmetro de rigidez, j é a unidade imaginária $\sqrt{-1}$, η é o fator de perda, $\operatorname{sgn}(x)$ é a função signum e Δ é a deformação ocorrida. Ao considerar uma deformação sinusoidal com amplitude inicial Δ_0 , podemos definir a seguinte expressão:

$$W_{ciclo} = \pi k \eta \Delta_0^2 \quad [17]$$

Em contraste, no modelo proposto por Biot, conforme expresso na equação [18], embora esse modelo seja praticamente insensível à frequência para valores de $\frac{\bar{w}}{\varepsilon} > 10$, onde ε é uma constante positiva, uma vez que aumenta indefinidamente à medida que a frequência se aproxima do infinito.

$$w_{ciclo} = 2k\eta\Delta_0^2 \tan^{-1}\left(\frac{\bar{w}}{\varepsilon}\right) \quad [18]$$

Utilizando o exemplo ilustrado na Figura 16 para visualizar vários níveis de carga e valores aplicados em cada amplitude. Essa representação é conhecida como Curva de Histerese e permite determinar o módulo de rigidez do material.

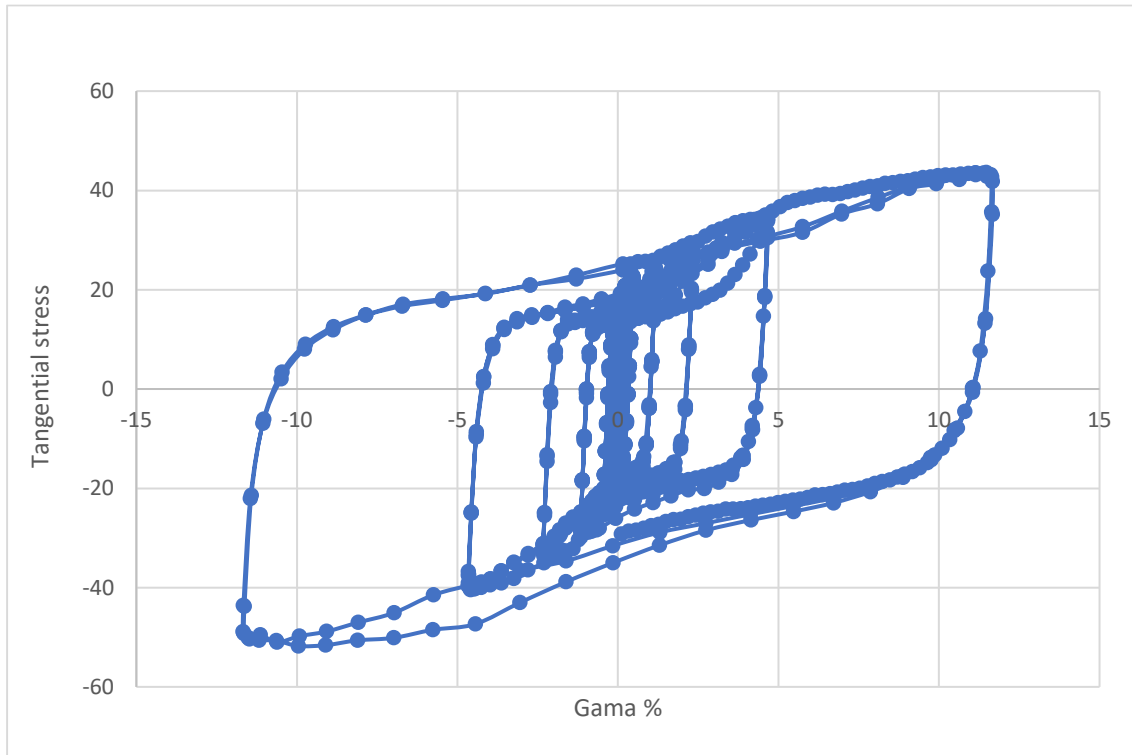


Figura 16 – Curva de histerese típica para diferentes níveis de deformação

Além da curva de histerese, também é fornecido um detalhe de um dos ciclos de carregamento, a partir do qual é possível calcular a quantidade de energia dissipada calculando a área da elipse formada. A Figura 17 representa o amortecimento histerético pode ser determinado utilizando a equação [19], em que A_H corresponde à área do loop histerético e A_{S1}/A_{S2} é as áreas dos triângulos (ASTM International, 2019).

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{A_H}{A_{S1} + A_{S2}} \times 100 \quad [19]$$

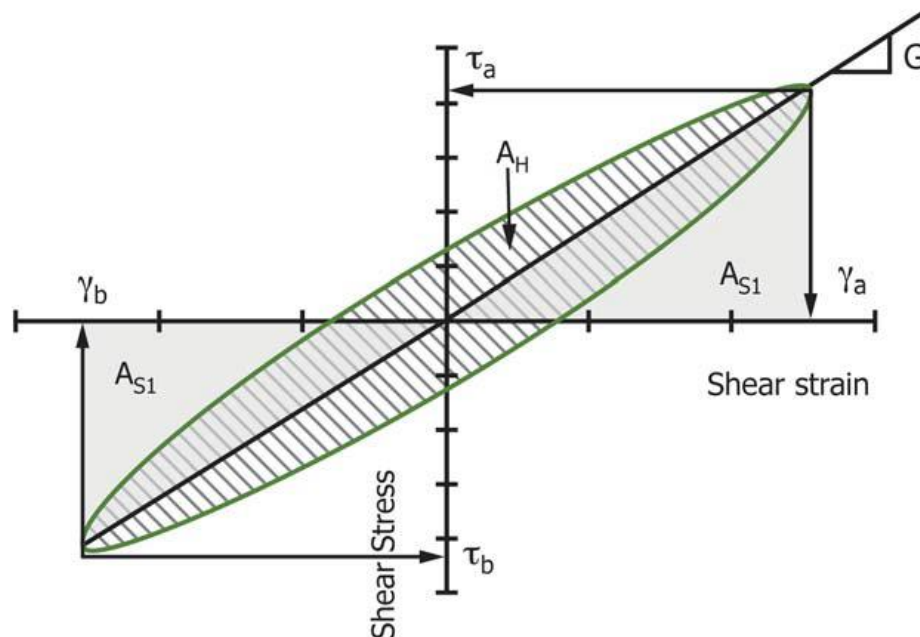


Figura 17 - Curva de histerese típica para amortecimento mecânico (ASTM International, 2019)

Essa equação é amplamente utilizada em ensaios laboratoriais, mas é importante fazer algumas ressalvas sobre sua capacidade de caracterizar com precisão o verdadeiro coeficiente de amortecimento de um solo específico ou de uma mistura de solo-borracha.

De acordo com pesquisas de (dos Santos, 1999), o amortecimento histerético e o amortecimento viscoso são semelhantes apenas para pequenas deformações, após as quais o amortecimento histerético diminui significativamente para grandes distorções.

Durante os ensaios laboratoriais realizados, a frequência de aplicação utilizada foi de 0,2 Hz, conforme mostrado na Figura 18. Nessa faixa de frequência, correspondente à Fase B, o comportamento do material é constante em relação à frequência, indicando um predomínio do amortecimento histerético. Nas fases A e C, o amortecimento viscoso é predominante e varia com a frequência de aplicação.

É importante ressaltar que os equipamentos de laboratório utilizados neste estudo não permitem a análise do amortecimento viscoso, pois essa análise requer dispositivos capazes de controlar frequências de aplicação mais altas, superiores a 600 Hz, como mencionado por (Hardin, 1965).

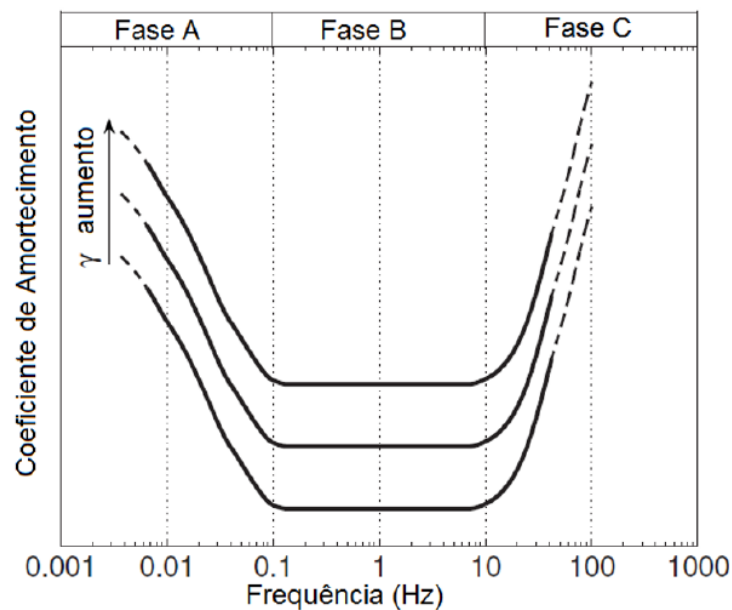


Figura 18 - Alteração do coeficiente de amortecimento à medida que a frequência aumenta em solos coesivos.

(adaptado de Fukuda *et al.* 1995)

Após a exploração do conceito importante de amortecimento nos solos, o estudo direciona sua atenção para outro fenômeno crucial: a liquefação. No próximo subcapítulo, serão examinados os efeitos da perda de resistência em solos saturados, que pode levar a comportamentos fluidos durante carregamentos cíclicos ou sísmicos. A compreensão da liquefação é essencial para a avaliação da estabilidade e segurança de estruturas em regiões suscetíveis a esse fenômeno. A relação entre amortecimento e liquefação é fundamental para a análise de riscos geotécnicos, e, portanto, a investigação detalhada complementa a busca por uma compreensão mais completa do comportamento dos solos.

2.4. VELOCIDADE DE ONDAS SÍSMICAS

2.4.1. INTRODUÇÃO

Nesta dissertação, foram utilizados transdutores piezoelétricos denominados *bender elements* para medir a velocidade das ondas, antes de apresentar os ensaios laboratoriais realizados, é importante compreender os diferentes tipos de ondas e suas principais características. De forma simples, as ondas podem ser vistas como meios de transporte de energia de um ponto do espaço para outro, sem necessariamente envolver o transporte de matéria.

2.4.2. ONDAS VOLUMÉTRICAS

No contexto desta pesquisa, as ondas volumétricas desempenham um papel crucial, pois estão intimamente ligadas às características elásticas do meio. Supondo um meio infinito, isotrópico, homogêneo e com comportamento elástico linear, durante um terremoto, são geradas as ondas P e as

ondas S, propagando-se em todas as direções do meio, ou seja, de forma esférica. Essas ondas, também conhecidas como ondas primárias, de compressão, longitudinais ou de dilatação, afetam todo o volume do meio, propagando-se através de variações volumétricas, com compressões e extensões na mesma direção da propagação. Isso pode ser observado na Figura 19.



Figura 19 – Deslocamento das partículas causado pela propagação das ondas P (Pinto, 2016)

As ondas P têm a particularidade de se propagarem a uma velocidade maior em meios sólidos do que em meios líquidos. Além disso, a sua velocidade de propagação é geralmente maior do que a das ondas S, sendo assim, são normalmente as primeiras a serem registradas em medições durante ensaios dinâmicos. Estas ondas podem também ser utilizadas como um método alternativo para verificar o grau de saturação, uma vez que se propagam em meios líquidos. À medida que o grau de saturação aumenta, a velocidade de propagação das ondas P também aumenta, atingindo um valor máximo quando a amostra está completamente saturada (Viana da Fonseca and Ferreira, 2002). Assim depende das características do meio e pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad [20]$$

Quanto às ondas S, estas apresentam um movimento puramente de distorção e não causam variação de volume no meio. A perturbação ocorre na direção perpendicular à direção de propagação, conforme mostrado na Figura 19. Durante um terremoto, por exemplo, o solo desloca-se na direção ortogonal à propagação da onda. Além disso, este tipo de onda requer um meio sólido para se propagar, não se propagando em meios líquidos ou gasosos. Na Figura 20, é possível observar a capacidade das ondas S de se propagarem apenas em meios sólidos.

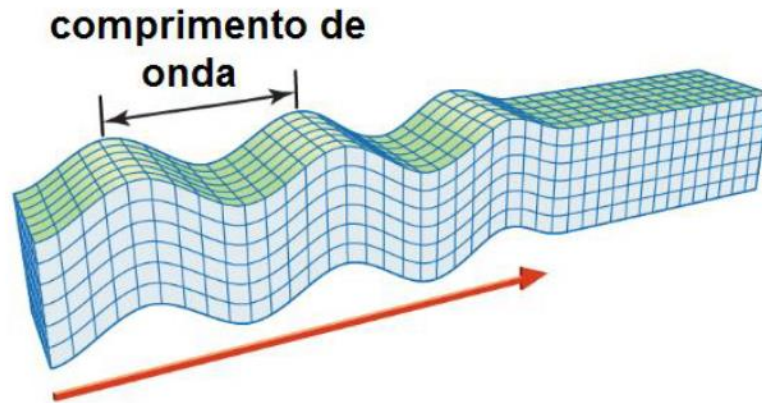


Figura 20 -Deslocamento das partículas causado pela propagação das ondas S (Pinto, 2016)

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [21]$$

Por meio da relação entre as velocidades V_p e V_s e das propriedades elásticas do meio, é possível determinar os parâmetros elásticos do material, como o coeficiente de Poisson, o módulo de distorção e o módulo de elasticidade. Esses parâmetros podem ser calculados utilizando as seguintes equações, como descrito por (Ferreira, 2003):

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad [22]$$

$$G = V_s^2 \times \rho \quad [23]$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad [24]$$

Além de serem úteis para calcular parâmetros elásticos tanto em laboratório como no campo, as ondas volumétricas também fornecem um método alternativo para determinar o parâmetro B de Skempton (Skempton, 1954), que mede o grau de saturação de uma amostra. Esse método utiliza a velocidade de propagação das ondas P, conhecida como V_p . Para avaliar o estado de saturação de uma amostra, sabe-se que a velocidade das ondas P na água é aproximadamente 1500 m/s, correspondendo à velocidade do som na água. Numa amostra completamente saturada, onde todos os poros estão preenchidos com água, a velocidade de propagação das ondas P tenderá a aproximar-se desse valor (Viana da Fonseca and Ferreira, 2002).

2.4.3. ONDAS SUPERFICIAIS

Quando se abordaram as ondas volumétricas, foi enfatizada a importância de um meio infinito e isotrópico para sua propagação. No entanto, considere-se agora um cenário em que um sismo ocorre em um meio finito com comportamento linear elástico.

Conforme as ondas P e S se propagam em direção à superfície, teoricamente não encontram obstáculos. No entanto, ao atingir a superfície, a presença de uma fronteira entre os dois meios resulta na geração de dois tipos de ondas mais destrutivas: as ondas Love e as ondas Rayleigh.

As ondas Love propagam-se na superfície perpendicularmente à direção de propagação, sem qualquer componente de deslocamento vertical ou horizontal. Por outro lado, as ondas Rayleigh propagam-se ao longo da superfície do meio, combinando movimentos de compressão e dilatação longitudinal que resultam num movimento elíptico retrógrado da superfície. Esse movimento possui uma componente vertical de deslocamento, contribuindo significativamente para os efeitos destrutivos durante um sismo. A Figura 21 representa visualmente as ondas mencionadas acima.

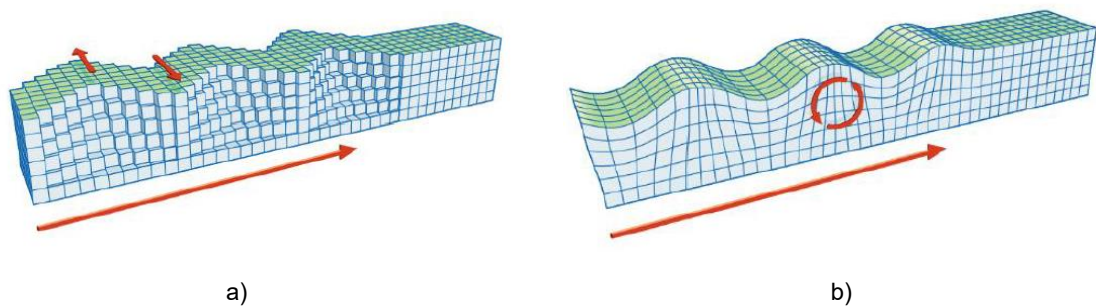


Figura 21 – Vários tipos de ondas superficiais: a) onda Love; b) onda Rayleigh (Pinto, 2016)

É possível determinar a velocidade das ondas Rayleigh (V_R) por meio da seguinte relação com as velocidades das ondas P (V_P) e S (V_S) (Amer [et al.], 1987).

$$\left(2 - \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2\right)^2 - 4\left(1 - \left(\frac{V_R}{V_P}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}\left(1 - \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} = 0 \quad [25]$$

Após uma análise detalhada sobre a propagação das ondas em meios geotécnicos, o estudo direciona sua atenção para as técnicas utilizadas na determinação das características dinâmicas dos solos. No próximo subcapítulo, serão abordadas as principais metodologias empregadas na literatura para avaliar parâmetros como amortecimento, rigidez, resposta dinâmica e comportamento sob carregamentos cíclicos. Essa transição permitirá ao leitor compreender as ferramentas e abordagens utilizadas para investigar o comportamento dinâmico dos solos, mesmo que não tenham sido realizados ensaios específicos neste trabalho. Dessa forma, a dissertação em geotecnia e engenharia civil avança para um patamar ainda mais aprofundado e abrangente na compreensão desses importantes temas.

2.5. TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS

2.5.1. CONTEXTO

A caracterização física e mecânica de um maciço pode ser realizada utilizando uma variedade de ensaios. No entanto, a seleção dos ensaios deve ser feita levando em consideração os parâmetros e o tipo de maciço que se deseja avaliar. Antes de apresentar os ensaios, é importante esclarecer um conceito que às vezes pode ser mal interpretado pela maioria dos leitores.

Os ensaios abordados neste subcapítulo são todos ensaios dinâmicos, ou seja, o tipo de carga aplicada é caracterizado por uma determinada intensidade, velocidade e frequência, diferenciando-se dos ensaios estáticos. A escolha de ensaios dinâmicos pode estar relacionada com os parâmetros que se deseja calcular. Por exemplo, o módulo de distorção mencionado anteriormente pode ser determinado tanto por ensaios estáticos tradicionais quanto por ensaios dinâmicos.

No entanto, é importante notar que o nível de deformação ao qual o solo é submetido em cada caso não é o mesmo. Isso resulta em dois valores diferentes para o módulo de distorção: um para baixos níveis de deformação (da ordem de 10^{-5}) designado por G_0 ou G_{max} , e outro simplesmente denominado G , cujo valor será menor, uma vez que resulta da degradação do G_0 . A Figura 22 ilustra a curva de degradação do parâmetro G em relação ao nível de deformação.

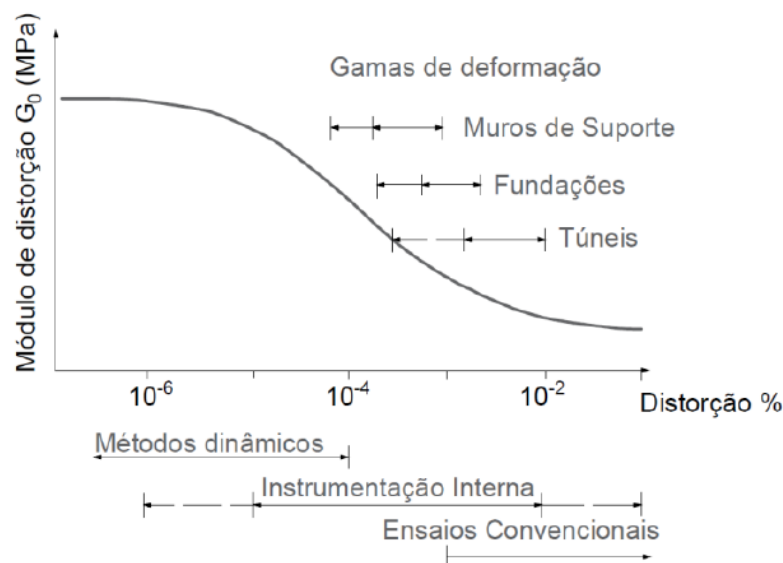


Figura 22 - Gráfico que representa a redução progressiva do módulo de distorção (G) com o aumento da deformação (adaptado de (Atkinson, 1991))

2.5.2. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

2.5.2.1. Ensaio de Coluna Ressonante (CR)

O ensaio de coluna ressonante é amplamente utilizado para determinar parâmetros dinâmicos do solo, especialmente o coeficiente de amortecimento e o módulo de distorção. Esses parâmetros são calculados com base na frequência de ressonância do sistema solo-equipamento e na diferença

de fase entre os sinais recebidos e emitidos. De forma simples, o ensaio envolve a aplicação de um momento de torção em uma amostra cilíndrica previamente consolidada dentro de uma célula triaxial.

Quanto aos tipos de amostras utilizadas, estas podem ser sólidas ou ocas. No caso das amostras sólidas, as variações de tensão ao longo da secção transversal ocorrem de forma não uniforme. Por outro lado, ao usar amostras ocas, também conhecidas como "*hollow*", essas variações de esforços são atenuadas, tornando-se mais uniformes (Figura 23 b). Embora a preparação de uma amostra oca seja mais complexa, ela permite obter resultados mais similares aos obtidos por meio de métodos analíticos.

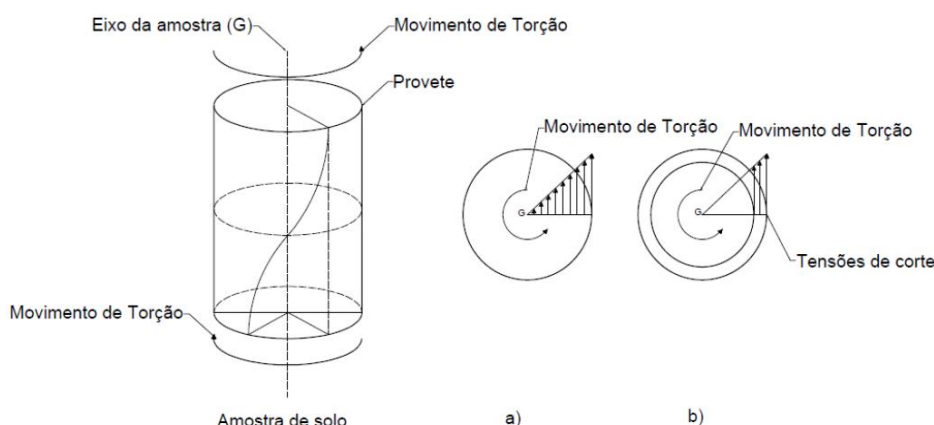
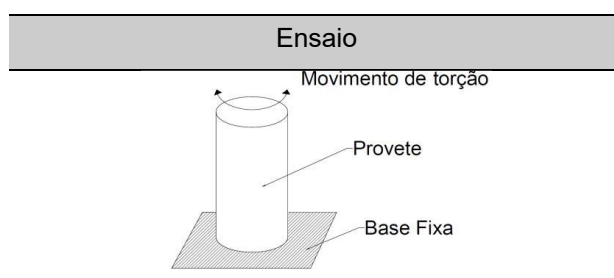


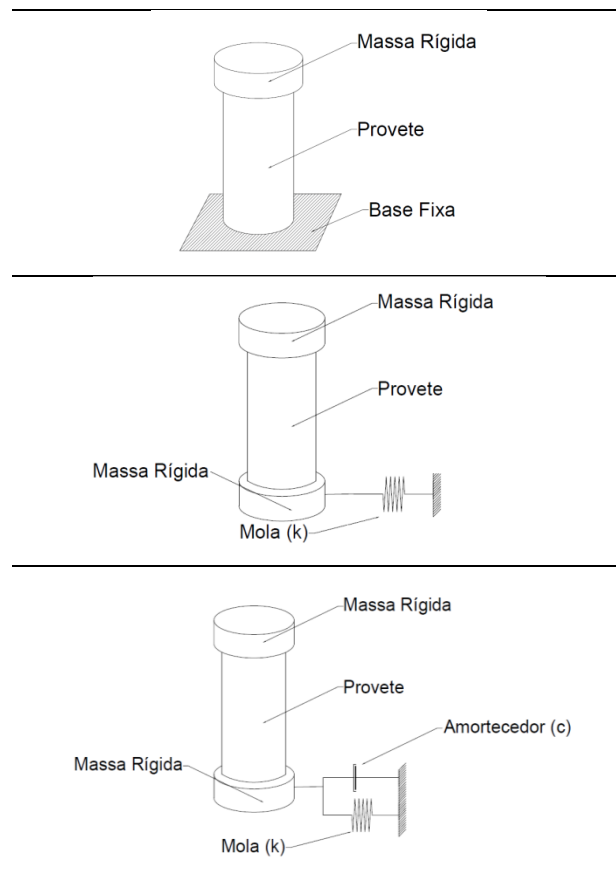
Figura 23 - Diferentes distribuições de tensões ao longo da secção transversal em tipos de amostras Diferentes.
a) Secção transversal de uma amostra maciça. b) Secção transversal de uma amostra oca.

No que diz respeito à deformação induzida, esta pode ocorrer de duas formas: longitudinal (ϵ) ou transversal (γ). Na deformação longitudinal, uma deformação é aplicada na direção axial da peça, gerando esforços ao longo de toda a amostra. Por outro lado, na deformação transversal ou de corte, como o próprio nome sugere, um momento torsor é aplicado, resultando em variações de tensão ao longo da secção transversal. Essas variações são nulas no centro da amostra e máximas no perímetro da peça.

A deformação torsional pode ser aplicada em uma ou em ambas as extremidades, dependendo da variante do ensaio que se deseja realizar. A Tabela 1 apresenta algumas das possíveis configurações que podem ser utilizadas.

Tabela 1 - Variações nas configurações do ensaio de coluna ressonante (adaptado de (Ferreira, 2003))





2.5.2.2. Equipamentos Piezoelétricos

Antes de abordar os diversos equipamentos piezoelétricos usados para analisar a dinâmica dos solos, é importante entender o conceito de piezoelectricidade. A piezoelectricidade refere-se à capacidade de um material de converter uma deformação física em corrente elétrica e vice-versa. Isso significa que quando o material é deformado, ele produzirá um sinal elétrico correspondente à natureza da deformação, da mesma forma que quando é submetido a um impulso elétrico, ele altera suas dimensões e se deforma de acordo com as características do sinal recebido.

Essa descoberta levou ao desenvolvimento de novos equipamentos com diversas aplicações em laboratórios. Com a compreensão da piezoelectricidade, torna-se possível entender por que ela é usada na engenharia geotécnica. Esses equipamentos têm a capacidade de transformar deformações físicas em corrente elétrica, permitindo interpretar como o solo responde a determinadas solicitações por meio desse sinal elétrico. Entre os vários equipamentos piezoelétricos disponíveis, destacam-se os bender elements.

Todos esses elementos podem ser fabricados a partir do mesmo material, mas o tipo de funcionamento varia de acordo com a polarização e a configuração do equipamento. O termo "funcionamento" refere-se ao tipo de deformação que o material experimenta quando submetido a corrente elétrica. A Figura 24 ilustra um esquema típico de um equipamento piezoelétrico.

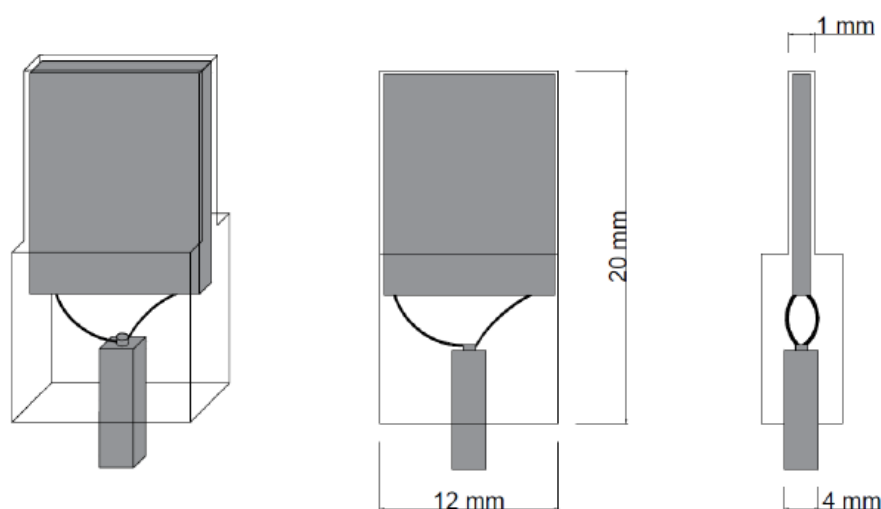


Figura 24 - Representação comum de um dispositivo piezoelétrico (*bender elements*) (Pinto, 2016)

Além da ilustração do dispositivo, é possível observar algumas das suas medidas, o que confirma que se trata de um equipamento de dimensões reduzidas. Essa característica compacta representa uma grande vantagem, pois permite que o equipamento seja facilmente adaptado a outros tipos de ensaios, sem a necessidade de modificar os procedimentos convencionais. No entanto, é possível que algumas alterações nos equipamentos sejam necessárias para uma instalação adequada dos *bender elements* (Figura 25).

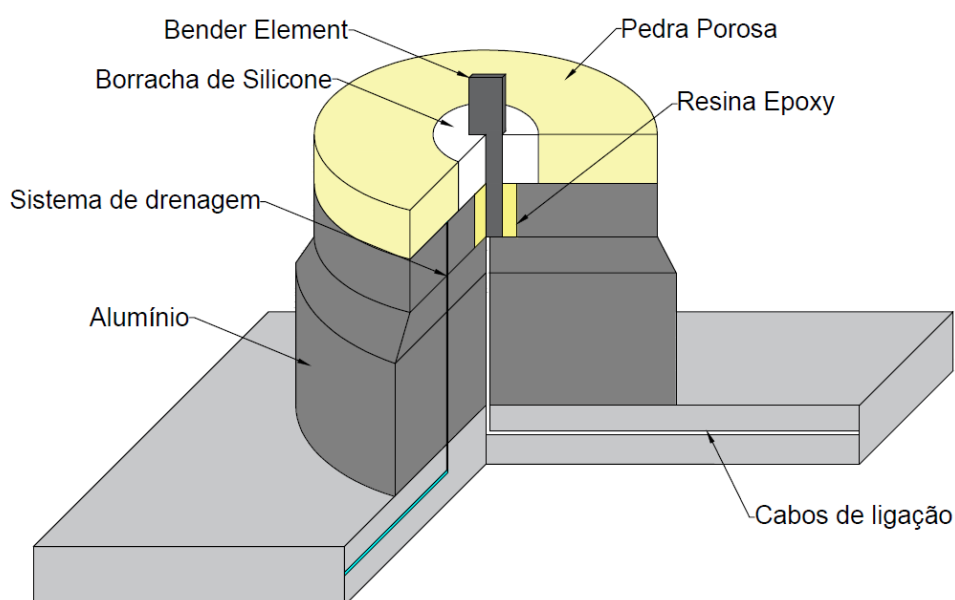


Figura 25 -Representação simplificada da montagem de um elemento bender (Pinto, 2016)

Exemplos de ensaios nos quais esses tipos de equipamentos podem ser aplicados são o ensaio triaxial e o ensaio de coluna ressonante. Além das informações normalmente coletadas durante esses ensaios, esses equipamentos permitem a obtenção de informações adicionais (Viana da Fonseca and Ferreira, 2002). É importante mencionar que esses instrumentos operam em uma faixa de deformação da ordem de 10^{-5} .

São apresentados os *bender elements*. Esse transdutor é composto por duas placas finas de material piezocerâmico, rigidamente ligadas entre si, com superfícies condutoras tanto entre elas quanto nas faces externas, formando uma estrutura em formato de "sandwich". Essas placas são capazes de converter energia mecânica em movimento e vice-versa (Moreira, 2015). O material piezocerâmico é protegido por uma resina epóxi, que evita o contato direto com o solo e a água (Viana da Fonseca and Ferreira, 2002). Quando uma corrente elétrica é aplicada, uma das placas se alonga enquanto a outra encurta, resultando em um movimento de flexão representado na Figura 26. Essas placas podem ser dispostas em série ou em paralelo. É interessante destacar que os *bender elements* podem atuar tanto como emissor quanto como recetor de sinais (Viana da Fonseca and Ferreira, 2002).

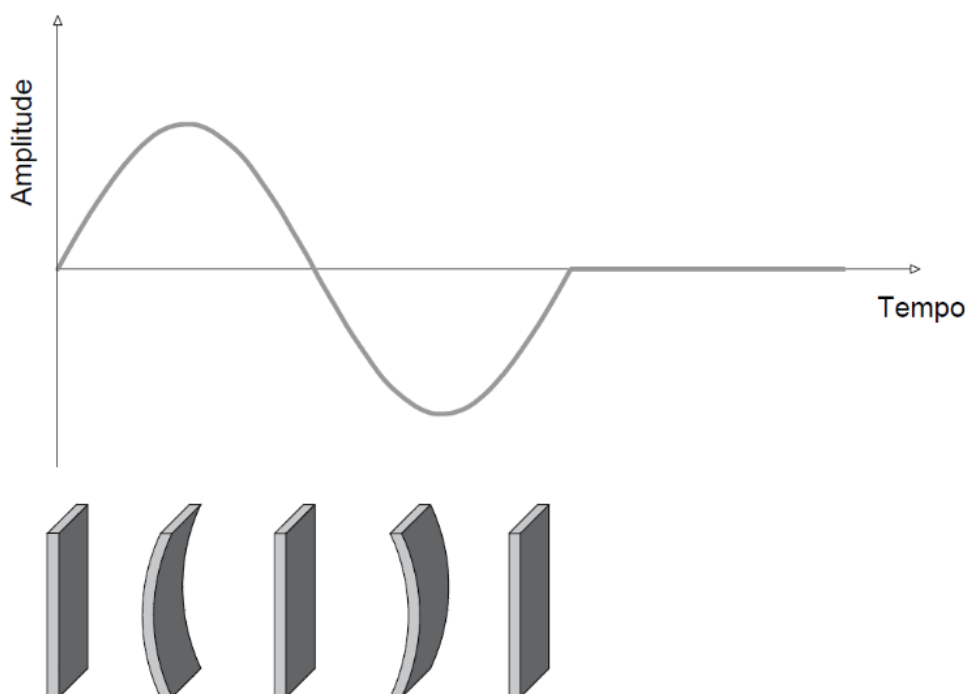
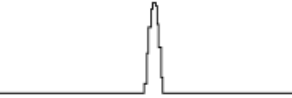
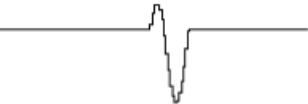
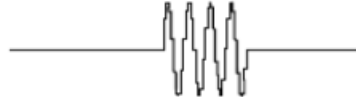
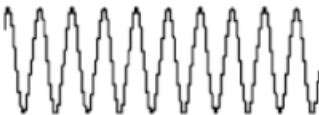


Figura 26 - Variação do comportamento de um elemento piezoelétrico ao longo do tempo

Apesar das vantagens e da fácil aplicação desses equipamentos, é importante mencionar que há algumas limitações na leitura dos sinais recebidos pelo transdutor. A interpretação adequada do sinal recebido depende de diversos parâmetros, mas neste momento abordaremos apenas os aspetos relacionados ao sinal emitido ou de *input*. Isso inclui considerações sobre a natureza do sinal e suas características, como frequência e amplitude, por exemplo. Existem diferentes teorias que discutem qual sinal deve ser utilizado para obter a melhor resposta possível (

Tabela 2). A leitura do sinal recebido pode ser influenciada por esses fatores, e é necessário levar em conta essas considerações para uma interpretação precisa dos resultados.

Tabela 2 - Diferentes categorias de sinais de *input* (adaptado de (Moreira, 2015))

Representação	Descrição
	Degrau
	Impulso
	Onda Sinusoidal
	Pulso (ângulo de fase igual a 90°)
	Sinal distorcido;
	Oscilação forçada;
	Sinal contínuo de frequência contínua;
	Varrimento de frequências (normalmente entre 100 Hz até 20 kHz);
Sinal aleatório	Barulho aleatório

2.5.2.3. Ensaios Cíclicos

Serão abordados dois dos principais ensaios cíclicos utilizados na área de engenharia geotécnica: o ensaio de corte simples cíclico e o ensaio triaxial cíclico. Essas avaliações são aplicadas não apenas para determinar características dinâmicas do solo, como o módulo de distorção e o coeficiente de amortecimento, mas também para investigar o fenômeno de liquefação nos solos. Entre os três ensaios mencionados, o ensaio de corte simples cíclico é especialmente recomendado para esse tipo de

estudo. A Tabela 3 oferece uma visão geral dos níveis de deformação nos quais esses ensaios são conduzidos.

Tabela 3 -Ensaio e os respectivos níveis de distorção nos quais são realizados (Ferreira, 2003))

Condições do ensaio	Ensaio	Distorção
Pequenas deformações	Coluna ressonante	$10^{-6} - 10^{-4}$
	Bender elements	10^{-6}
	Ultrassons	$10^{-4} - 10^{-3}$
Elevadas deformações	Corte simples cíclico	$10^{-4} - 10^{-2}$
	Triaxial cíclico	
	Torção cíclico	

O ensaio de corte simples cíclico (representado na Figura 27) é amplamente empregue para investigar a liquefação dos solos. Nesse ensaio, uma carga horizontal é aplicada ciclicamente no topo e na base de uma amostra, restringindo sua deformação lateral, a fim de simular a resposta do solo sob uma onda de corte, como aquela gerada durante um terremoto (Park, 1998). Esse ensaio foi desenvolvido como uma alternativa ao ensaio de corte direto cíclico, que apresentava valores imprecisos de resistência ao corte devido à distribuição não uniforme das tensões ao longo da amostra. Atualmente, existem equipamentos de ensaio capazes de controlar separadamente as tensões verticais e horizontais, permitindo a aplicação de diferentes estados de tensão além do estado K_0 (Karl, 2005).

Entretanto, o ensaio de corte simples cíclico possui algumas limitações. Por exemplo, apresenta dificuldades em simular com precisão as condições in situ do solo, uma vez que a aplicação de momentos torsionais no topo e na base da amostra resulta em uma distribuição não uniforme de tensões ao longo da seção transversal.

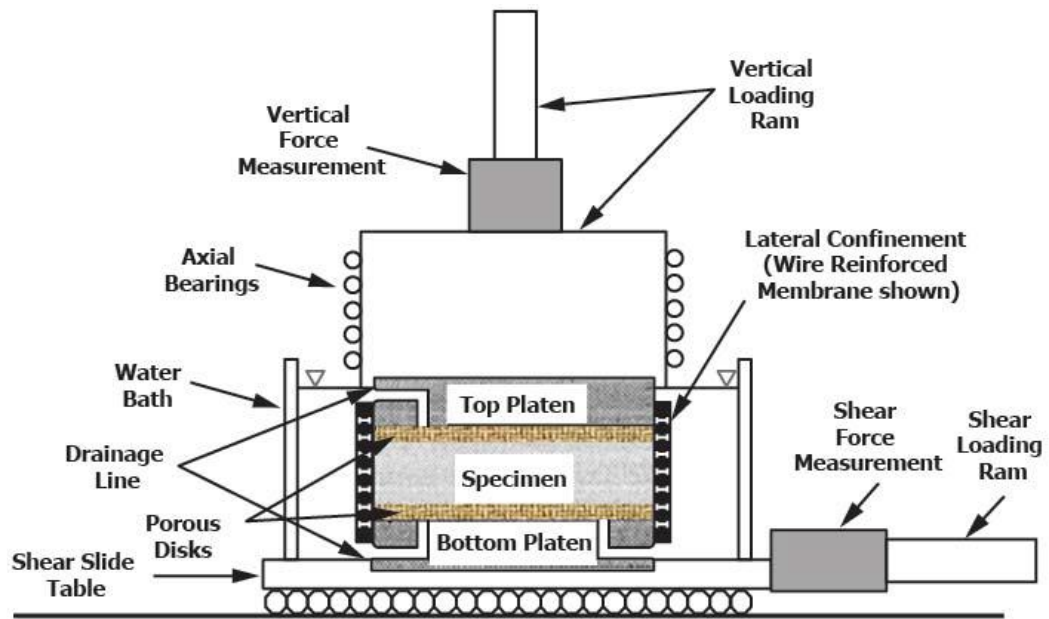


Figura 27 - Configuração do ensaio de corte cíclico simples (ASTM International, 2019)

Por último, temos o ensaio triaxial cíclico (representado na Figura 28). De acordo com (Amer [et al.], 1987) este ensaio é amplamente utilizado para avaliar as características de solos coesivos. É frequentemente utilizado para determinar parâmetros como o módulo de distorção e o coeficiente de amortecimento em condições de grandes deformações. Nesse ensaio, utiliza-se uma célula triaxial convencional, equipada com uma unidade de carga axial capaz de aplicar carregamentos cíclicos. Em alguns casos, a própria câmara triaxial possibilita a aplicação de pressões de forma cíclica. É possível consolidar as amostras em condições isotrópicas ou anisotrópicas, dependendo do tipo de estudo desejado (Park, 1998).

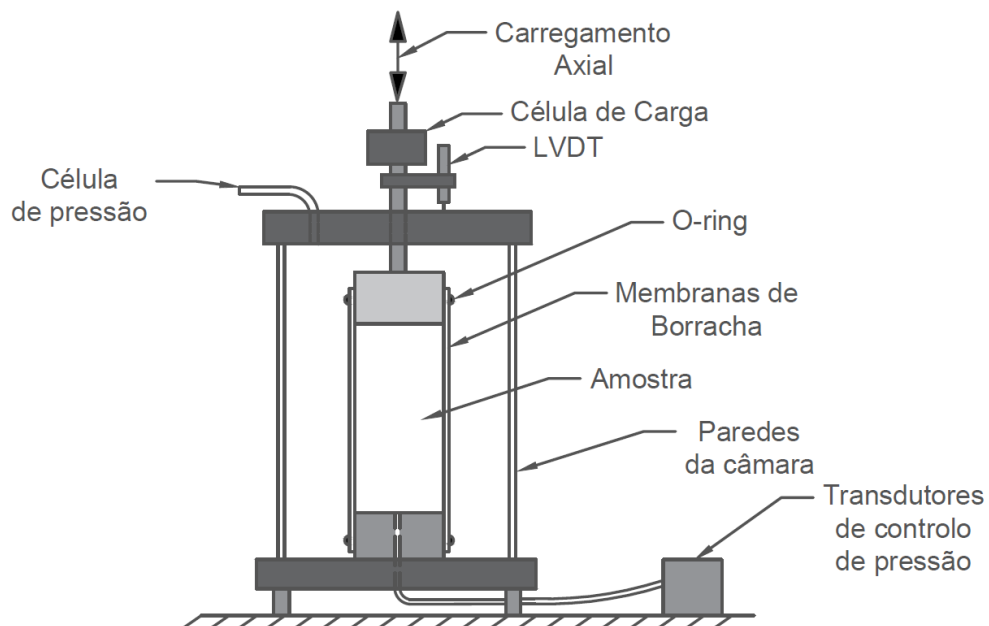


Figura 28 - Representação do ensaio cíclico triaxial (Marcos, 2016)

O ensaio triaxial cíclico apresenta limitações que restringem o número de deformações avaliáveis. O efeito de penetração da membrana na amostra também pode gerar erros, especialmente em solos com areias grossas ou cascalho. Esses problemas podem afetar a precisão dos resultados (Marcos, 2016).

2.5.3. ENSAIOS *IN SITU*

Estes ensaios de campo ou *in situ* oferecem vantagens em termos de velocidade de obtenção de resultados, maior quantidade de material disponível e resultados mais confiáveis. No entanto, eles têm limitações, como a falta de controle do volume de solo ensaiado ou a indefinição quanto às condições fronteira.

Dentre os ensaios *in situ*, o *Cross-Hole* é amplamente utilizado para determinar a velocidade de propagação das ondas e, conseqüentemente, o módulo de distorção do solo. Nesse ensaio, é registrado um sinal emitido e um sinal recebido após percorrer a distância entre dois furos, permitindo calcular esses parâmetros.

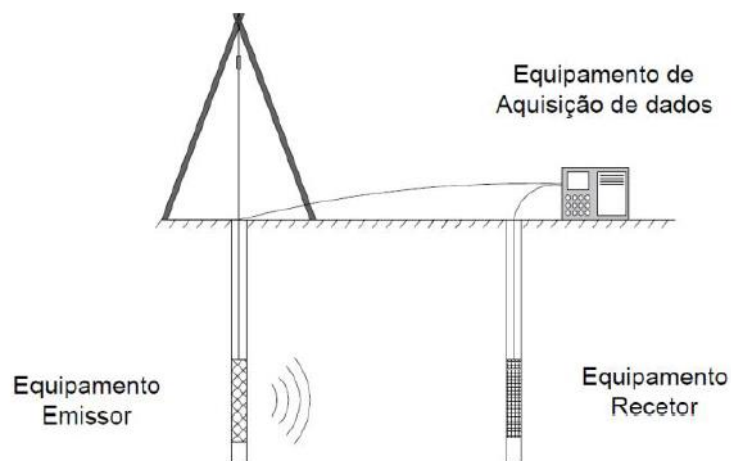


Figura 29 - Cross-hole (adaptado de (Matos Fernandes, 2015))

Os ensaios *Up-Hole* e *Down-Hole* são alternativas com menos custo que o *Cross-Hole*. O *Up-Hole* coloca a fonte emissora dentro do furo, enquanto o *Down-Hole* a coloca na superfície. Ambos permitem obter informações semelhantes, e a interpretação dos resultados é feita visualmente ou por meio de correlações cruzadas.

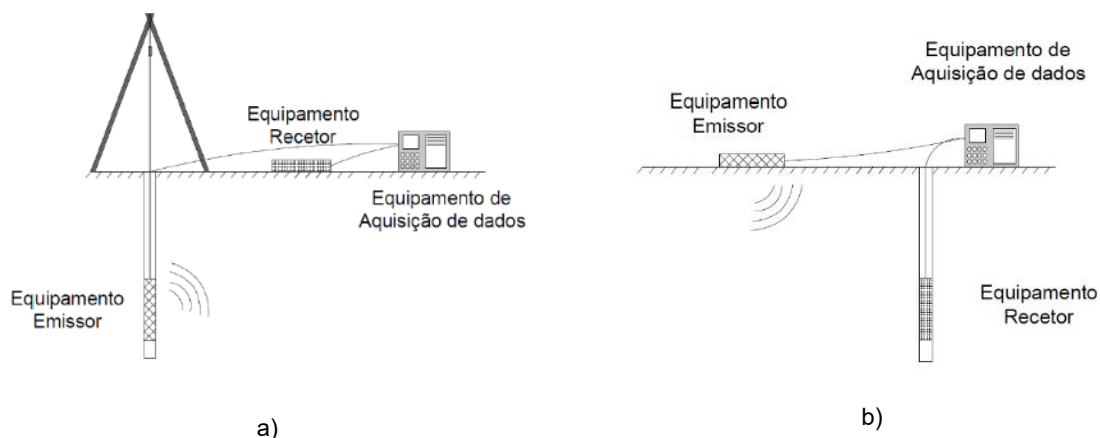


Figura 30 -Ensaio: a) *Up-Hole*; b) *Down-Hole* (adaptado de (Matos Fernandes, 2015))

O SCPT (*Seismic Cone Penetration Test*) é uma versão melhorada do ensaio *Down-Hole*, utilizando um cone (CPT) sísmico que é introduzido estaticamente no solo.

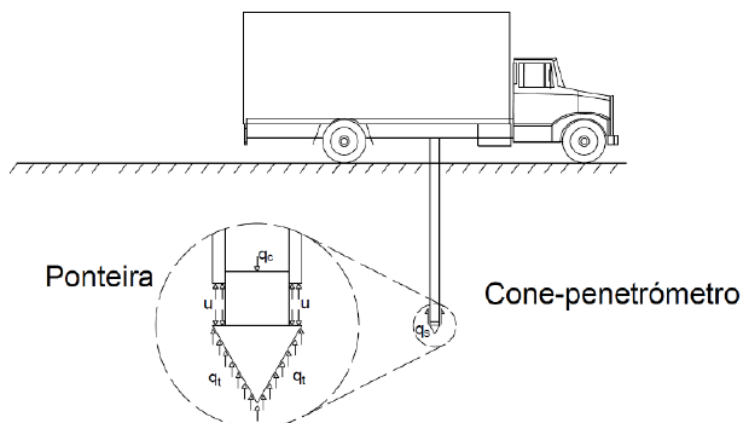


Figura 31 - CPTU (adaptado de (Matos Fernandes, 2015))

O SASW é outro ensaio in situ que analisa a propagação de ondas superficiais para obter dados do solo. Ele permite calcular esses parâmetros sem perturbar a amostra do solo e é uma opção econômica. Ambos os ensaios sísmicos se baseiam na velocidade de propagação das ondas para determinar o G .

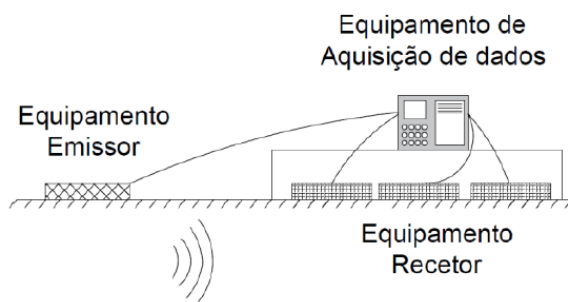


Figura 32 - Esquema do ensaio SASW

No capítulo anterior, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre os temas essenciais desta dissertação, com foco no estudo do amortecimento, propagação das ondas, liquefação e técnicas para determinação das características dinâmicas. A revisão bibliográfica proporcionou uma sólida fundamentação teórica, destacando os avanços científicos e as contribuições relevantes de estudos anteriores nessa área.

A partir do embasamento teórico adquirido, este capítulo tem como objetivo detalhar os procedimentos experimentais e laboratoriais realizados para a investigação dos fenômenos de interesse. Serão abordados os materiais selecionados para os ensaios, o método laboratorial empregado e a descrição completa dos ensaios realizados. Essa seção fornecerá informações detalhadas sobre os equipamentos e instrumentos utilizados, bem como as condições e parâmetros adotados durante as experimentações.

As informações obtidas neste capítulo são fundamentais para a compreensão da metodologia de pesquisa empregada e constituem uma etapa essencial para a análise dos resultados apresentados no capítulo subsequente. Ao conhecer os detalhes dos procedimentos de ensaio, o leitor poderá avaliar a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos, bem como compreender como os fenômenos de amortecimento, propagação das ondas, liquefação e características dinâmicas dos materiais foram investigados em condições controladas em laboratório.

A transição do capítulo anterior para este capítulo reflete o momento em que o estudo passa da revisão da literatura para a aplicação prática dos conceitos e teorias em experimentos reais. É aqui que a pesquisa toma forma concreta, dando vida aos conhecimentos teóricos adquiridos anteriormente e permitindo a coleta de dados que fundamentarão as análises e conclusões apresentadas ao longo da dissertação.

No capítulo subsequente, os resultados obtidos a partir dos ensaios serão minuciosamente discutidos e relacionados às teorias e conceitos estudados na revisão bibliográfica. Dessa forma, será possível elucidar as contribuições desta pesquisa para o avanço do conhecimento no campo do amortecimento, propagação das ondas, liquefação e técnicas de determinação das características dinâmicas dos materiais estudados.

3

PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.1. MATERIAIS ENVOLVIDOS NO ESTUDO

3.1.1. AREIA DE HOSTUN

A areia de Hostun RF, representado na Figura 33, é um material amplamente utilizado como referência na engenharia geotécnica. Sua origem remonta às fábricas Sika localizadas em Hostun (Drôme), na região ocidental de Vercors. A pedreira de Beauregard, situada a dois quilômetros de Hostun, é a fonte da areia Hostun RF (Flavigny [et al.], 1990) .

As partículas dessa areia têm dimensões que variam de 0,075mm a 0,840mm, conforme ilustrado na Figura 34. Essa granulometria específica torna-a uma escolha ideal para testes e estudos geotécnicos, pois representa com precisão as características de muitos solos naturais.

A areia de Hostun RF é reconhecida por sua homogeneidade e uniformidade, fatores essenciais para obter resultados confiáveis e comparáveis em pesquisas científicas e ensaios práticos. Sua ampla utilização como material de referência é um reflexo da sua relevância na investigação de propriedades geotécnicas e na concepção segura de estruturas em diversas aplicações.

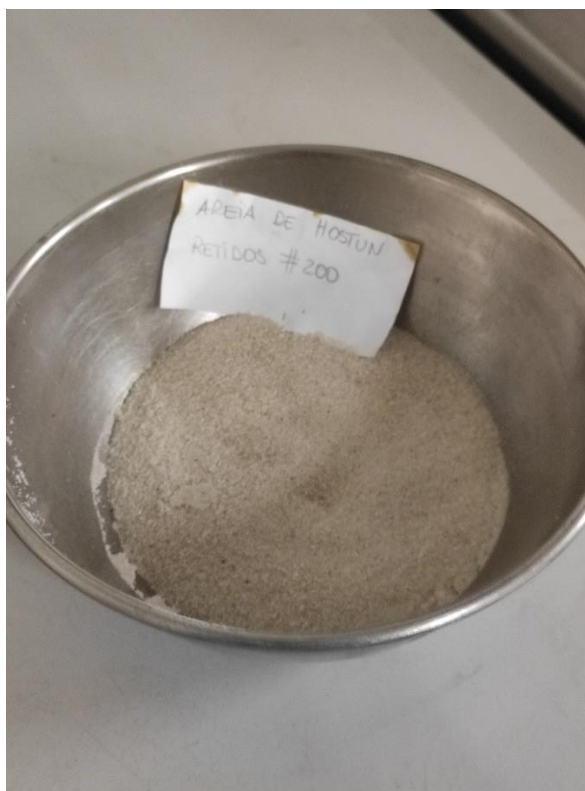


Figura 33 – Areia de Hostun

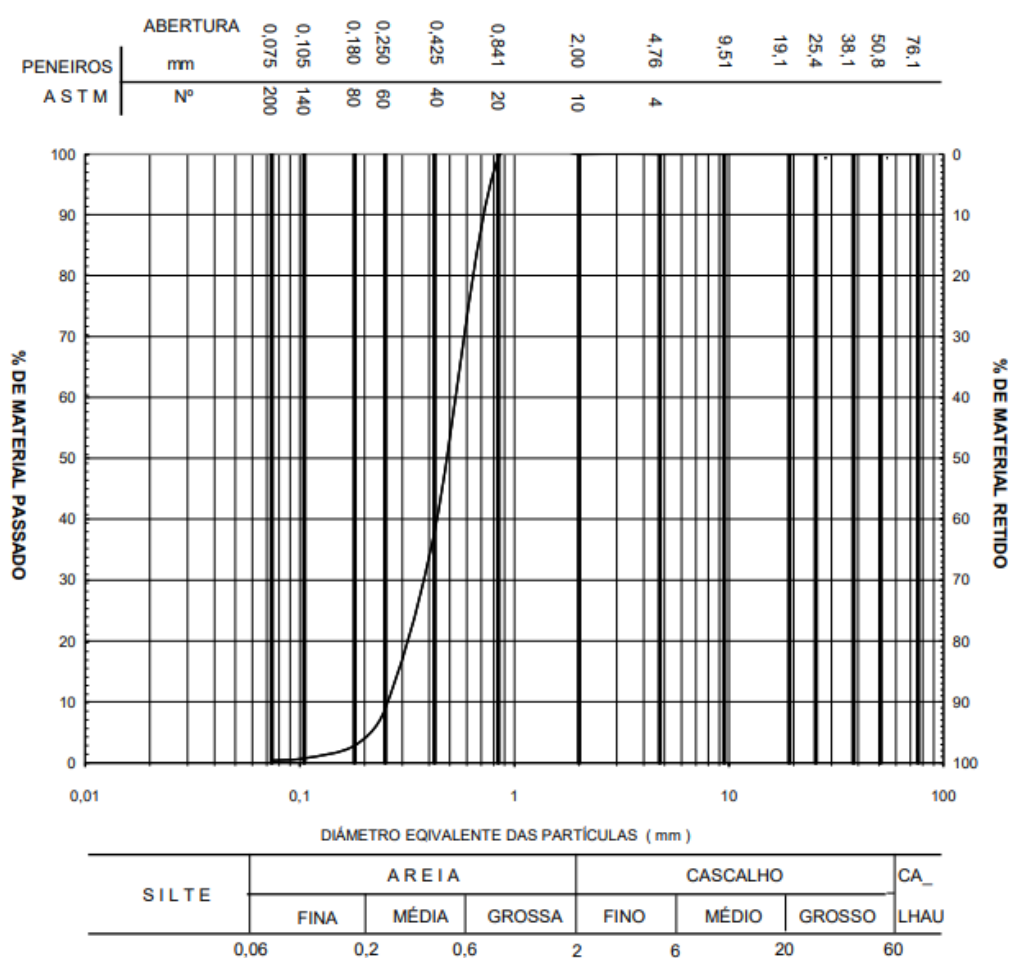


Figura 35 - Curva Granulométrica da Borracha

Segundo os dados da Tabela 4, alguns dados foram fornecidos pela Genan como humidade, partículas metálicas, partículas têxteis, inertes e partículas contaminação, os restantes dados foram analisados no LabGeo.

Tabela 4 - Dados da Borracha (segundo especificações técnicas do fornecedor)

Dados	Valores
Cor	Preta
Densidade (Gs)	1.168
Humidade (% peso)	<1,0
Partículas metálicas (% peso)	< 0,002
Partículas têxteis (% peso)	< 0,001
Inertes (% peso)	8
Partículas contaminação (% peso)	< 0,002
Tamanho das partículas (mm)	0,075-0,840

3.1.3. MISTURA DE AREIA COM BORRACHA

Neste estudo, foi adicionado borracha em diferentes proporções na areia para investigar o seu comportamento mecânico. No caso das misturas de areia com borracha, a distribuição granulométrica permanece dentro da faixa de solos de possível fenômeno de liquefação, uma vez que tanto a areia e a borracha possuem uma granulometria semelhante, como ilustrado na Figura 36.

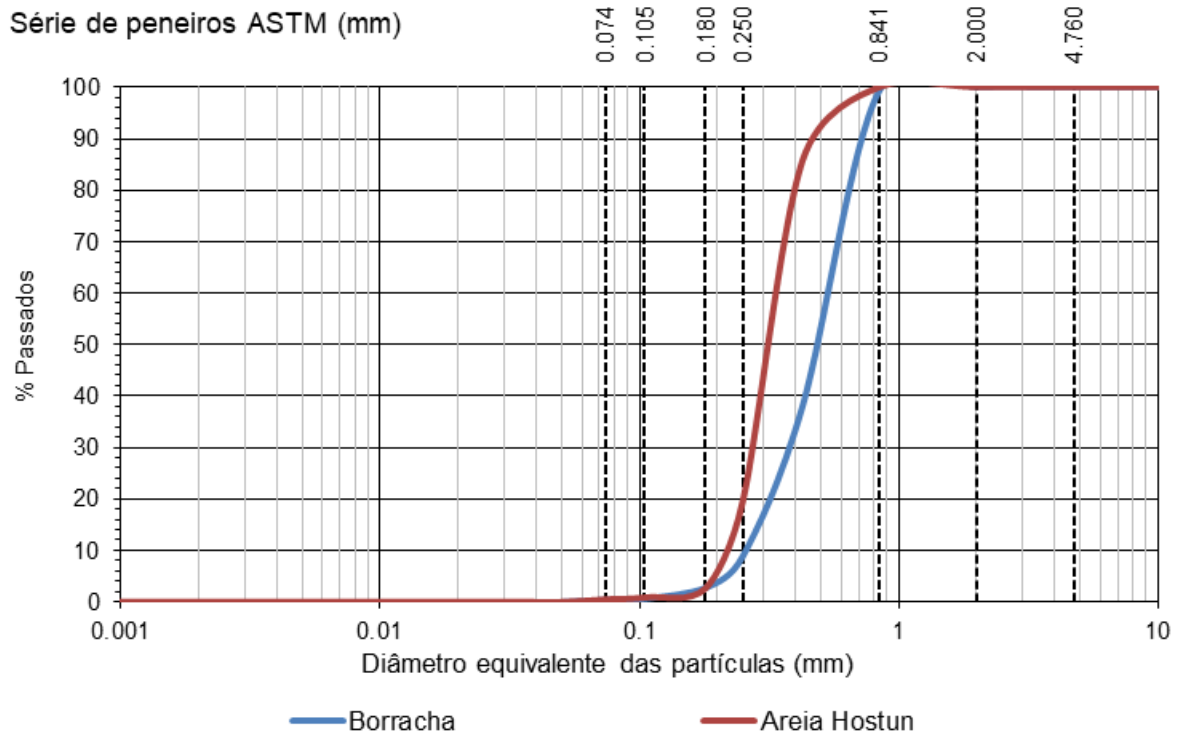


Figura 36 - Curva Granulométrica da areia de Hostun-borracha

No cálculo do peso volúmico das partículas sólidas da amostra, foi realizado utilizando uma média ponderada dos pesos específicos dos materiais, tendo em conta a quantidade de borracha presente. As fórmulas 26 e 27 foram usadas para calcular o peso volúmico das amostras. De forma esquemática, a Tabela 5 apresenta várias amostras utilizados.

$$\gamma_{S_{mistura}} = \gamma_{S_{solo}} \times \%_{solo} + \gamma_{S_{borracha}} \times \%_{borracha} \quad [26]$$

$$G_{S_{mistura}} = \frac{\gamma_{S_{mistura}}}{\gamma_w} \quad [27]$$

Tabela 5 - Diferentes tipos de provetes do estudo paramétrico

Amostra	γ_s (kN/m ³)	G_s
100% Areia Hostun	26,0	2,651
100% Borracha	11,4	1,168
90% AH + 10% B	24,54	2,50
70% AH + 30% B	21,62	2,20
50% AH + 50% B	18,7	1,91

Ao longo do estudo, optou-se por identificar as misturas e ensaios com base na sua percentagem de borracha presente no solo.

Com a apresentação detalhada dos materiais envolvidos no estudo, o trabalho agora se concentra na descrição do método laboratorial empregado para a análise dos solos. Neste novo subcapítulo, serão expostos os procedimentos experimentais adotados em laboratório para investigar as características dinâmicas dos materiais em questão. Através do método laboratorial, será possível obter dados e resultados fundamentais para a compreensão do comportamento dos solos sob condições específicas de carregamento, tornando a dissertação ainda mais embasada e conclusiva.

3.2. MÉTODOS DE LABORATÓRIO

3.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foi necessário analisar as curvas granulométricas da areia de Hostun e da Borracha, sendo o método realizado a partir da Norma Portuguesa (LNEC E 196-1966). Assim, os dois materiais foram separados em vários diferentes tipos de dimensões como está representado na Tabela 6. A força mecânica foi aplicada por uma máquina durante 10 minutos de modo a respeitar a norma. Antes de passar as amostras pelos peneiros, foi necessário reduzir as amostras (esquartelamento manual), de modo a garantir que a amostra reduzida contenha as características da amostra inicial. Além disso, na análise da areia, os retidos no peneiro nº200 foram passados por água de modo a retirar partículas de menor dimensão. Na Figura 37 demonstram-se as várias fases do ensaio.

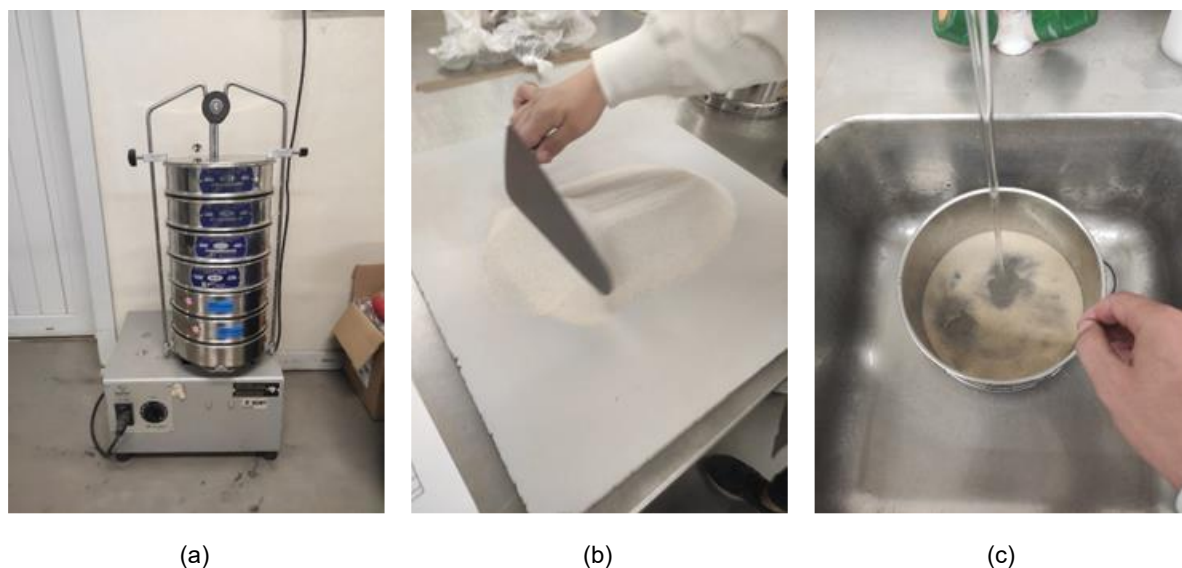


Figura 37- Várias etapas da análise granulométrica: (a) para efetuar peneiração mecânica; (b) esquartelamento manual; (c) lavagem do peneiro nº200

Tabela 6- Abertura dos peneiros da série ASTM (de Matos Fernandes, 2006)

Peneiros	3"	2"	1,5"	1"	3/4"	3/8"	n.º4	n.º10	n.º20	n.º40	n.º60	n.º80	n.º140	n.º200
Abertura(mm)	75,0	50,	37,5	25,0	19,0	9,5	4,75	2,00	0,850	0,425	0,250	0,180	0,106	0,075

3.2.2. DENSIDADE MÁXIMA E MÍNIMA

Conforme mencionado no Capítulo 2, a densidade relativa é um parâmetro chave que influencia o comportamento do solo e a resistência à liquefação. Nesse sentido, a determinação das densidades máxima e mínima dos solos, bem como das respectivas razões de vazios mínima e máxima, é crucial para a determinação precisa da densidade relativa das amostras.

Os materiais estudados foi Areia de Hostun e a Borracha Triturada foi utilizado o método da Japanese Geotechnical Society Standart (JGS), detalhado no padrão JGS 0161-2009, que exige uma massa mínima da amostra de 500 g. A Figura 38 mostra o molde de ensaio, funil, régua e martelo usados no processo.



Figura 38 - Equipamentos utilizados para o ensaio de e_{max} e e_{min}

A determinação da densidade seca mínima, ρ_{dmin} , (e a correspondente razão de vazios máxima, e_{max}), é realizada vertendo a amostra em um funil colocado no centro da parte inferior do molde e levantando-o a uma taxa constante até transbordar o molde acima da sua borda superior. Em seguida, o nível de areia é nivelado com a parte superior do molde e a massa da amostra é determinada.

Quanto à densidade seca máxima, ρ_{dmax} , (e a correspondente razão de vazios mínima, e_{min}), o procedimento envolve a separação da amostra em dez partes iguais e o despejo da amostra em dez camadas. Para cada camada, são aplicados 100 impactos na lateral do molde, com um martelo de madeira com diâmetro de 30 mm, girando o molde a cada 5 impactos. Após a compactação, o nível de areia é nivelado e a massa da amostra é determinada. Na figura 39, está representado as várias etapas para o cálculo da densidade seca máxima e mínima.

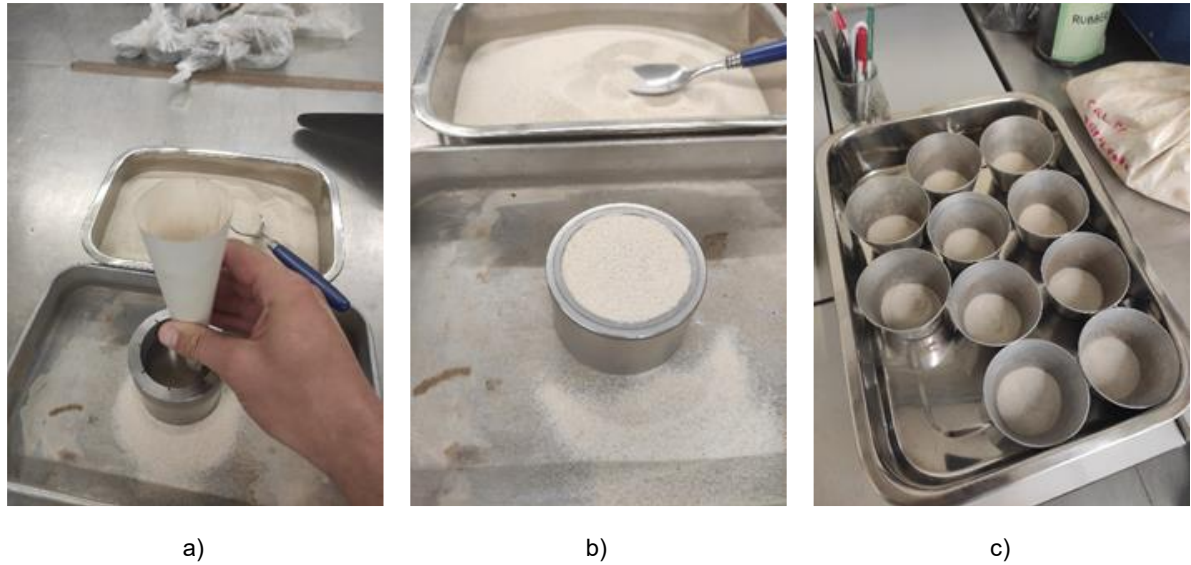


Figura 39 - Várias etapas da análise densidade máxima e mínima: (a) passagem da amostra no funil; (b) molde pronto para pesagem; (c) separação da amostra em dez partes iguais

3.2.3. ANÁLISE DAS ONDAS SÍSMICAS

3.2.3.1. Equipamentos

Para analisar a velocidade das ondas sísmicas e calcular o módulo de distorção inicial, G_0 , foi preciso utilizar vários equipamentos. O equipamento que está em contacto com a amostra são os bender elements. Esse equipamento foi fabricado no LabGeo da FEUP com aproximadamente 5.6mm de comprimento, 1mm de espessura e 4 mm de largura.

Na Figura 40, é apresentada uma fotografia dos bender elements localizados no topo e na base da câmara do ensaio de corte simples.



Figura 40 - Benders do equipamento de ensaio de corte simples

Para a geração e aquisição das ondas sísmicas, é necessário recorrer a um conjunto de equipamentos eletrônicos. Assim, foi utilizado um gerador de funções Thurlby Thandar Instruments, modelo TTI TG 1010®, que é capaz de gerar sinais de diferentes tipos, como sinusoidais ou em degrau, no intervalo de frequência de 0,1 mHz a 10 MHz. Além disso, esses sinais podem ser gerados de forma contínua ou por impulso. A Figura 41 mostra o equipamento utilizado para essa finalidade.



Figura 41 - Gerador de funções TTI TG 1010®

Foi também utilizado um amplificador de sinal, cuja principal função é de amplificar os sinais em até 10 vezes, de modo a possibilitar uma leitura e registo mais precisos por meio do osciloscópio, como demonstrado na Figura 42.



Figura 42 - Amplificador recetor de sinais

O osciloscópio utilizado, o Tektronix TDS200®, desempenha um papel importante para a leitura e registo das ondas que são emitidas e recebidas pelos benders. Esse equipamento permite a aquisição de aproximadamente 2500 pontos por canal, com a possibilidade de ajustar a escala horizontal e vertical de modo a obter uma melhor leitura. Na Figura 43 é apresentado o equipamento.



Figura 43 - Osciloscópio Tektronix TDS200® em funcionamento

As ondas apresentadas no ecrã do osciloscópio podem ser guardadas num computador para ser analisadas com ajuda do software WaveStar®. Este software possibilita a avaliação do tempo de chegada dos sinais no domínio do tempo. Na Figura 44 é apresentado um esquema como os aparelhos funcionam em conjunto.

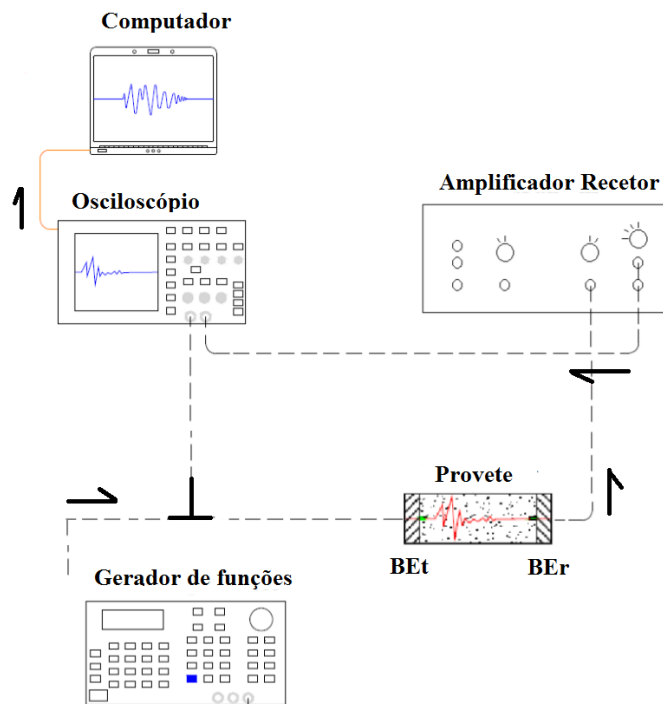


Figura 44 – Esquema de aparelhos para medir ondas (Marcos, 2016)

O gerador de funções envia o sinal para o bender transmissor, estando também ligado ao osciloscópio, que lê e mostra o sinal enviado.

A onda propaga-se pela amostra e é recebida pelo bender recetor, sendo a onda lida pelo osciloscópio. Por fim, os resultados podem ser transferidos e guardados num computador para posterior análise.

3.2.3.2. Procedimentos de ensaio

A determinação da velocidade das ondas sísmicas foi realizada no domínio do tempo, utilizando o método do primeiro instante de chegada da onda recebida (Ferreira, 2003). Para isso, foi escolhido gerar um sinal sinusoidal, devido à sua resposta menos complexa, com diferentes frequências, a fim de obter um espectro abrangente de resposta.

Realizou-se o cálculo de intervalo de tempo quando a onda é emitida e quando a onda é recebida, buscando a média desse intervalo para todas as frequências. Foram utilizadas as frequências de 1kHz, 2kHz, 4kHz e 6kHz para propagação de ondas S, e as frequências de 8kHz, 10kHz, 12kHz, 40kHz, 50kHz e 60kHz para propagação de ondas P.

A Figura 45 mostra a determinação do tempo da onda S, t_s e a Figura 46 mostra a determinação do tempo da onda P, t_p .

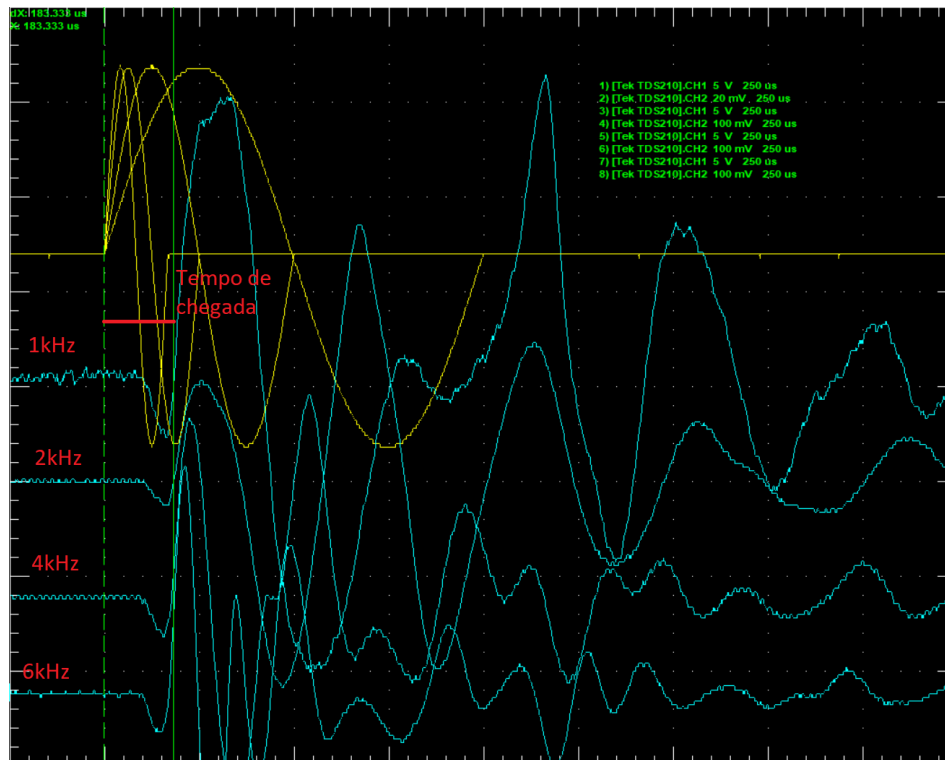


Figura 45 - Determinação do tempo de propagação de uma onda S, t_s

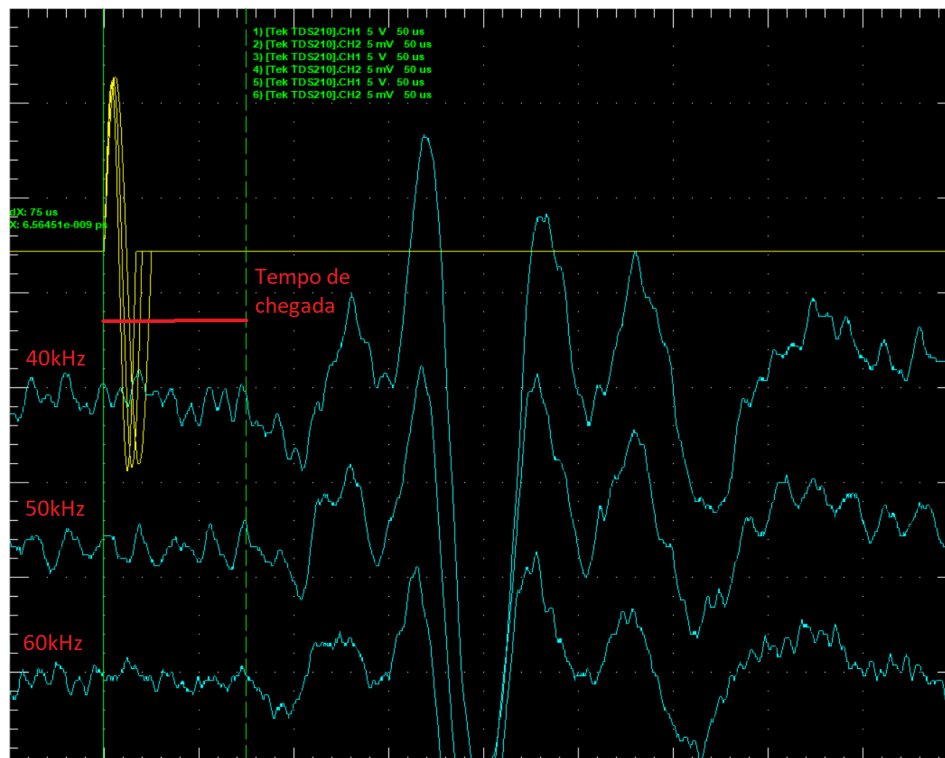


Figura 46 - Determinação do tempo de propagação de uma onda P, t_p

Este método envolve alguma subjectividade, podendo variar consoante o operador, portanto é recomendável utilizar mais de que uma frequência, de modo a reduzir o erro associado.

Posteriormente, utilizam-se as equações seguintes para determinar a velocidade da onda S, V_s , e a velocidade da onda P, V_p . É relevante destacar que o parâmetro L representa a distância entre as extremidades dos transdutores, ou seja, corresponde à altura do provete deduzida pela diferença entre as alturas do transdutor emissor e do transdutor recetor.

$$V_s = \frac{L}{t_s} \quad [28]$$

$$V_p = \frac{L}{t_p} \quad [29]$$

Uma outra consideração relevante refere-se ao atraso do equipamento ou tempo de calibração, que pode ser medido aproximando os dois bender elements um ao outro. Quando o L é zero, esperaríamos que a onda recebida chegasse exatamente quando é emitida. No entanto, existe um atraso de $4\mu s$ para as ondas S e de $1\mu s$ para as ondas P, que foi levado em conta na análise das ondas. Na Figura 47 pode observar-se o resultado da medição desses atrasos.

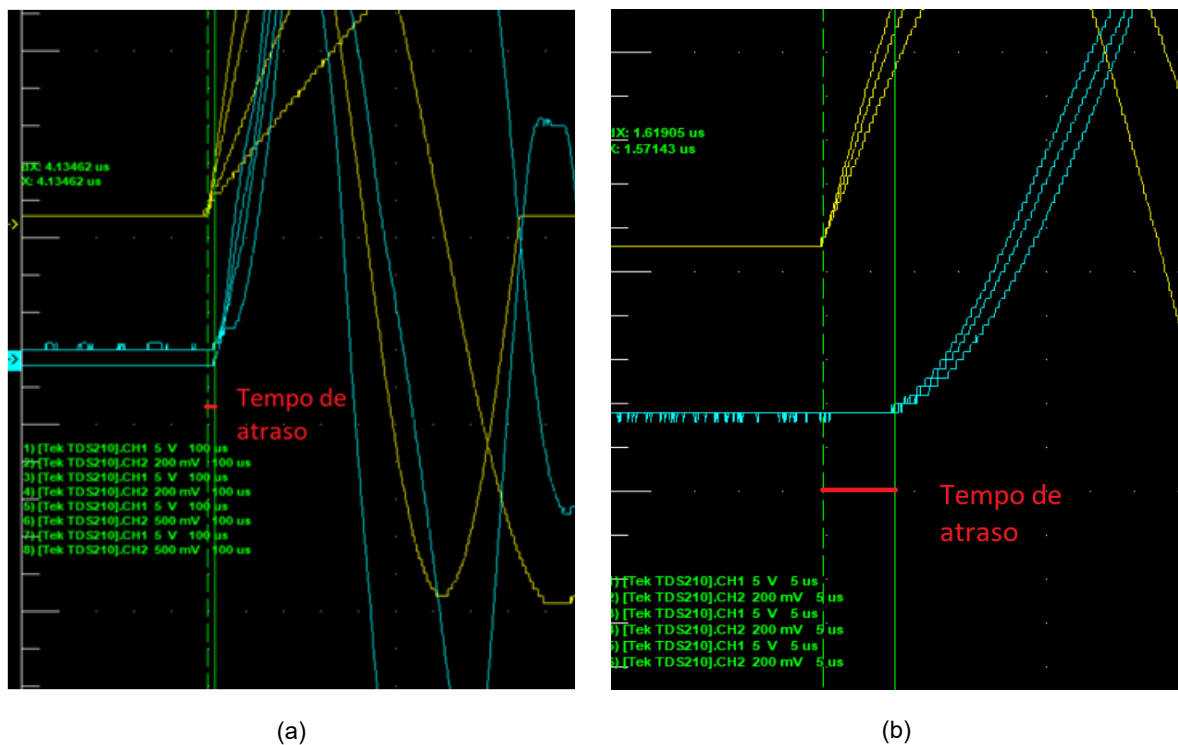


Figura 47 – Atraso do Equipamento: (a) onda S; (b) onda P

3.3. ENSAIO DE CORTE SIMPLES

3.3.1. EQUIPAMENTO DE CORTE SIMPLES

O equipamento de ensaio de corte simples cíclico (CSS) é composto por quatro componentes principais: a câmara de corte simples, o Controlador de Pressão de Ar (APC), um aparelho eletrônico de medição de volume e um computador conectado à internet com o software GEOsys instalado. A câmara de corte simples permite a realização de ensaios de corte estáticos e cíclicos (Figura 48).

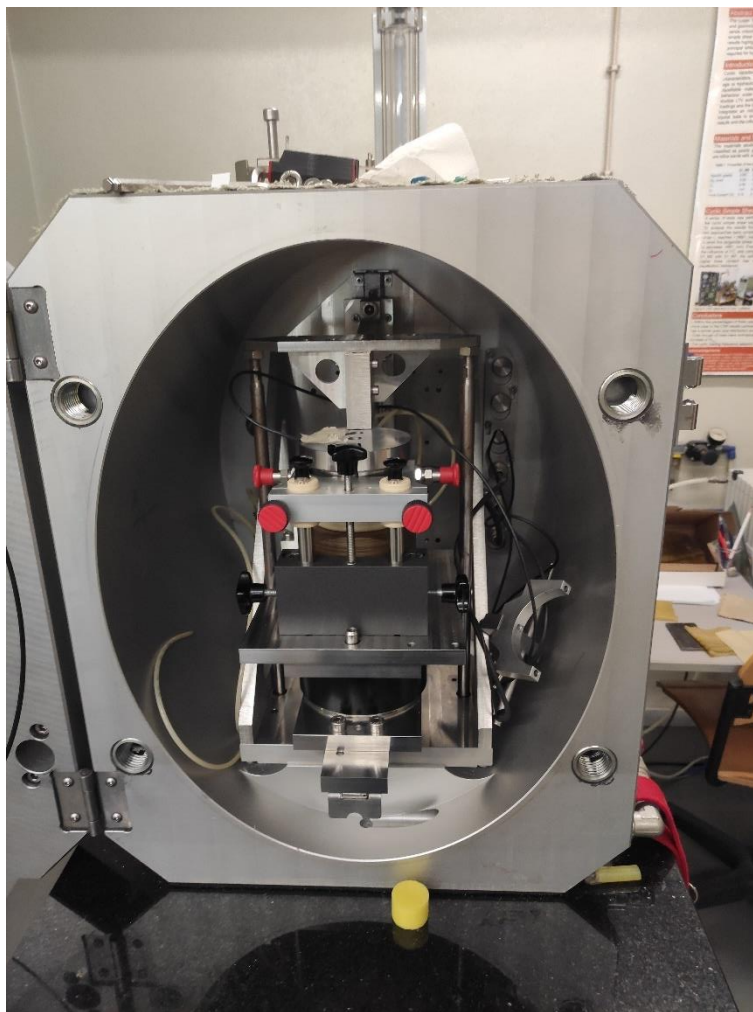


Figura 48 – Câmara de corte simples

O equipamento permite o controlo das condições de saturação, com um transdutor de contrapressão conectado ao interior do provete para registar o desenvolvimento da pressão de água nos poros. A pressão de confinamento é aplicada através de ar, e a contrapressão está ligada a um medidor de mudança de volume que regista as variações volumétricas.

Durante esta pesquisa, todos os ensaios foram realizados com a configuração de pilha de anéis de cobre, portanto, todas as amostras foram confinadas por uma membrana de borracha e uma série de anéis de cobre empilhados que restringiram as deformações laterais, mas permitiram a distorção da amostra.

O aparelho inclui uma célula de carga multi-eixo, com capacidade máxima de força vertical de 5 kN (estática e dinâmica) e força horizontal máxima de 4 kN (estática e dinâmica). O software utilizado para controlar e adquirir dados é o GEOsys®, onde o procedimento do ensaio é configurado e controlado.

O Controlador de Pressão de Ar (APC), representado na Figura 49, possui três canais de pressão automatizados, que medem e controlam a pressão do ar. Ele pode ser controlado manualmente ou através do software instalado em um computador. Na parte frontal do equipamento, encontra-se o painel de controlo, onde as pressões podem ser monitorizadas, e na parte traseira estão as conexões pneumáticas de entrada e saída, além das conexões elétricas, principalmente três pressões de saída, canais analógicos e uma conexão Ethernet.



Figura 49- Controlador de Pressão de Ar (APC)

3.3.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Começando com a determinação das quantidades em massa de solo e borracha, com base na densidade e na percentagem de borracha, foram feitas variações nos valores de pressão de confinamento.

Uma amostra cilíndrica, com diâmetro de 71,38mm e altura de 42,44mm, é colocada dentro de uma membrana impermeável de látex com aproximadamente de 0,33 mm de espessura e posicionada no pedestal. As pedras porosas são posicionadas na parte de cima e na parte de baixo da amostra, juntamente com papel de filtro. O provete é preparado de forma a garantir completa estanquidade, utilizando-se o-rings tanto na parte de cima quanto na parte de baixo do conjunto.

Em seguida, os anéis de cobre são posicionados no molde ao redor da membrana. A segunda metade do molde deve ser posicionada e fixada com 4 parafusos para garantir sua estabilidade. No topo do molde, é colocado um o-ring, e em seguida, o vácuo é aplicado para eliminar todo o ar presente dentro do molde, garantindo uma perfeita vedação.

A seguir, coloca-se um filtro de papel na parte inferior, acima da pedra porosa, e o solo é cuidadosamente adicionado usando um funil até atingir o topo. Após a preparação, a altura restante é medida (realizando três medições e calculando a média) para determinar a altura real da amostra, conforme representado na Figura 50.

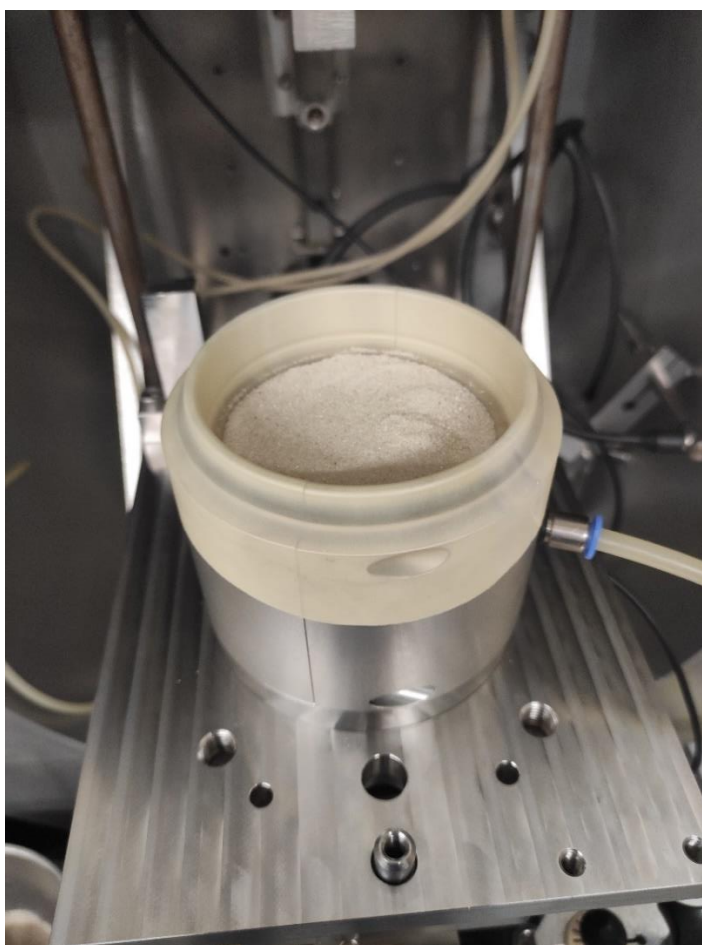


Figura 50 – Amostra dentro do molde pronta para ser medida

Deve-se colocar um filtro de papel sobre a pedra porosa na parte superior e fixar a peça de suporte nos furos pré-definidos na placa de base. Em seguida, a peça superior com a pedra porosa deve ser posicionada na peça de suporte e abaixada até tocar na amostra.

As membranas e os o-rings superiores devem ser colocados. O vácuo deve ser desligado, permitindo que a pressão se estabilize dentro da amostra, e o molde deve ser cuidadosamente desparafusado. Após remover o molde, a peça inferior deve ser inserida para fixar os anéis de cobre no lugar. Esta peça deve ser parafusada para garantir a estabilidade dos anéis, conforme ilustrado na Figura 51.



(a)



(b)

Figura 51 – Amostra na câmara de corte simples: (a) com o molde; (b) sem o molde

No software de controle, o deslocamento horizontal deve ser ajustado para uma posição de modo que o topo da amostra passe para ser empurrada para o interior da câmara e depois deve ser fixado a peça horizontal na parte de trás da máquina. Em seguida, o pistão vertical deve descer até tocar no topo da amostra. Os dois parafusos superiores devem ser parafusados para fixar a peça superior ao pistão vertical. Por fim, a peça de suporte deve ser removida e coloca-se a instrumentação interna (LVDT) na amostra, de modo a ter resultados mais precisos. Agora, a amostra está pronta para iniciar o ensaio. Na Figura 52, representa-se a amostra pronta para o ensaio.

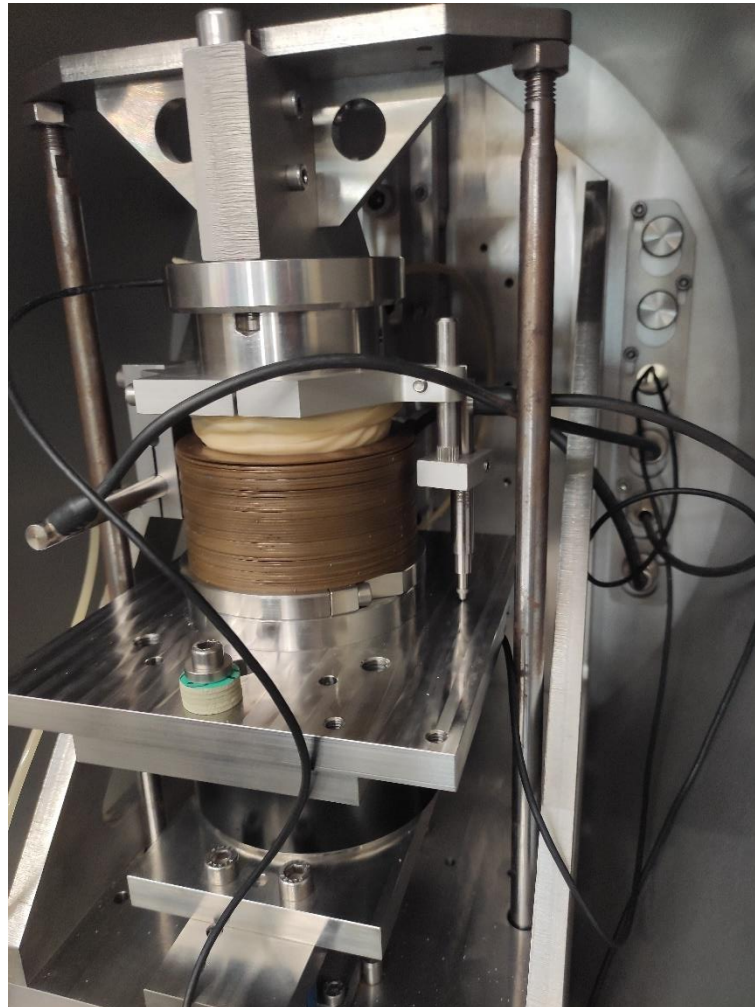


Figura 52 – Fase Final de montagem do Ensaio

Com a conclusão da análise do ensaio de Corte Simples Cíclico, a dissertação segue para o próximo passo: a exploração do ensaio Triaxial Cíclico. Neste subcapítulo, serão abordados os procedimentos específicos utilizados para avaliar as características dinâmicas dos solos sob carregamentos cíclicos mais complexos. O ensaio Triaxial Cíclico desempenha um papel fundamental na investigação das respostas dos solos a carregamentos tridimensionais repetitivos, permitindo a análise mais abrangente de seu comportamento dinâmico e a compreensão de como esses materiais se comportam sob diferentes condições de tensão. Com base nos resultados obtidos neste ensaio, será possível aprofundar ainda mais a investigação sobre a dissipação de energia e a capacidade de amortecimento dos solos estudados. Assim, a dissertação avança de forma estruturada e criteriosa, proporcionando uma análise abrangente do tema proposto.

3.4. ENSAIO TRIAXIAL CÍCLICO

3.4.1. EQUIPAMENTO TRIAXIAL CÍCLICO

A câmara triaxial cíclica é capaz de realizar ensaios de corte monotônicos e cíclicos, tanto em compressão quanto em extensão. Neste trabalho, foram utilizadas amostras cilíndricas, com diâmetro de 70mm e uma altura de 140mm, protegidas por uma membrana impermeável em latex com uma espessura aproximadamente 0,33 mm. Na Figura 53, é mostrado o equipamento utilizado.

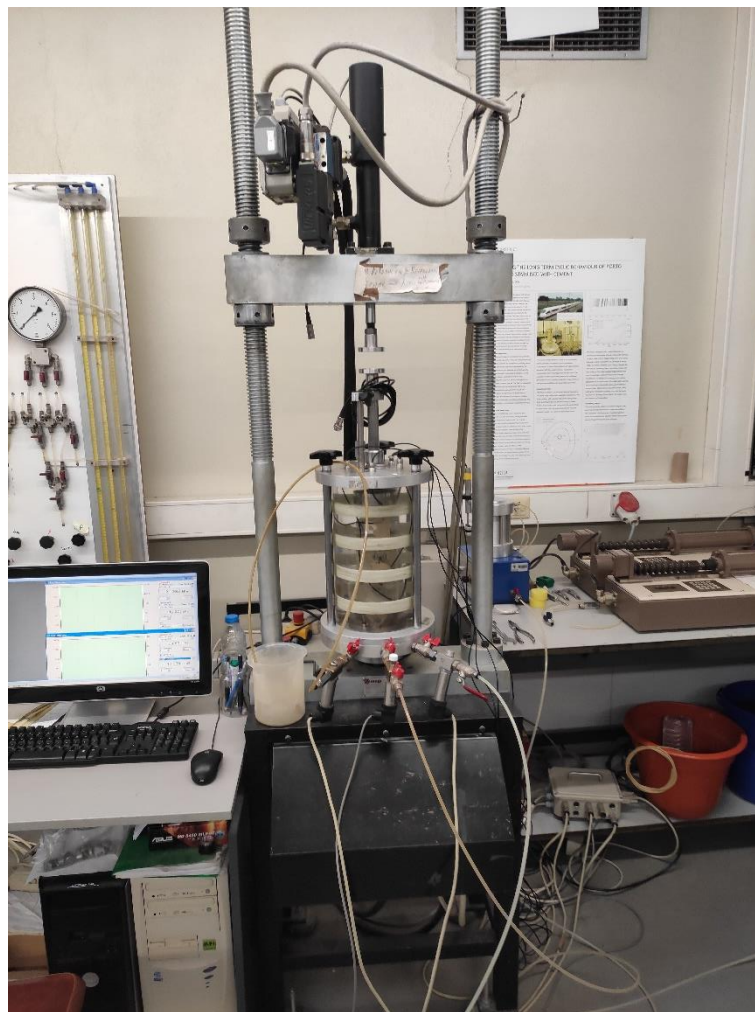
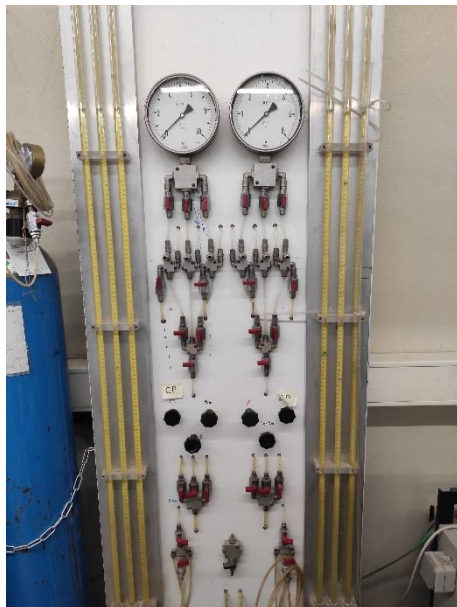


Figura 53 – Câmara triaxial cíclica

Durante o ensaio, o CP (cell pressure ou pressão de confinamento) e o BP (back pressure ou contrapressão) são regulados utilizando câmaras de ar, com capacidade de aproximadamente 700 kPa, ou através do uso de um GDS com capacidade de até 1400 kPa. Ambos os equipamentos estão ilustrados na Figura 54.



(a)



(b)

Figura 54 – Equipamentos de Controlo de Pressão: (a) coluna de pressões; (b) controlador automático da GDS®

O controlador automático da GDS® regula a pressão por meio do volume de fluido dentro dele, funcionando como uma seringa. O pistão gera força para expulsar a água do equipamento, criando pressão na câmara. A tela do controlador exibe a variação da pressão em tempo real e permite configurar o valor desejado. Em comparação com os reguladores de pressão de ar, esse equipamento oferece maior precisão ao manter uma pressão constante ao longo do tempo e pode aumentar gradualmente para atingir a pressão desejada. Além disso, é capaz de gerar pressões mais altas.

Outro equipamento utilizado foi o medidor de volume, mostrado na Figura 55. Esse medidor permite medir a variação volumétrica da amostra ao permitir a entrada e saída de água do interior do provete. É essencial nos ensaios triaxiais drenados para calcular a deformação da amostra testada. No entanto, neste estudo, o dispositivo foi usado apenas durante a fase de consolidação, uma vez que todos os ensaios foram realizados em corte não drenado.



Figura 55 – Medidor de Volume

No presente trabalho, são obtidos a partir do software DynaTester V3. Este programa desempenha o papel de controlar e ajustar a força e a frequência, de acordo com a configuração de ensaio pré-estabelecida.

Nestes ensaios, é possível utilizar instrumentação interna para medição local de deformações, através de transdutores do tipo Hall-Effect. Esses dispositivos, ilustrados na Figura 56, consistem em sensores

axiais (HEA) e sensores radiais (HER) que medem os deslocamentos axial e radial da amostra. Os transdutores Hall-Effect possuem uma resolução de 10^{-5} .

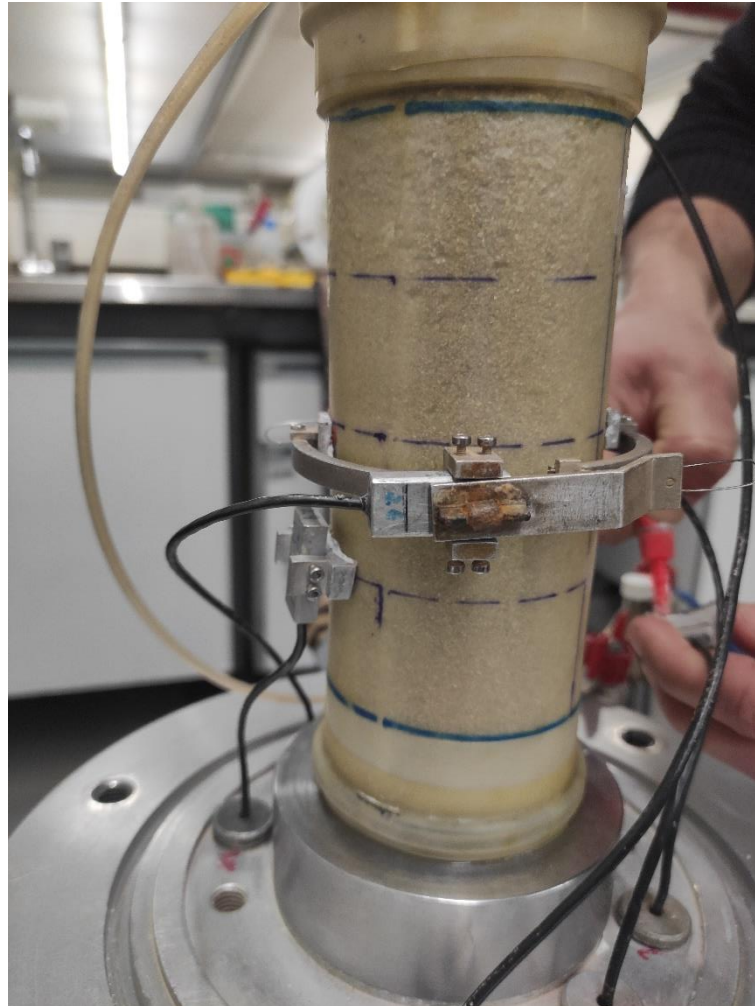


Figura 56 – Colocação de transdutores Hall-Effects numa amostra

Este equipamento utiliza ímãs e a análise da deformação é obtida com base na mudança do campo magnético, de acordo com a calibração realizada previamente. Os dispositivos mencionados são colocados na amostra com cola à membrana latex.

3.4.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento do ensaio triaxial cíclico (CTx) é constituído por várias fases que se podem resumir a: preparação e montagem das amostras, percolação, saturação, consolidação, corte e desmontagem. A Figura 57 ilustra as várias fases do ensaio triaxial.

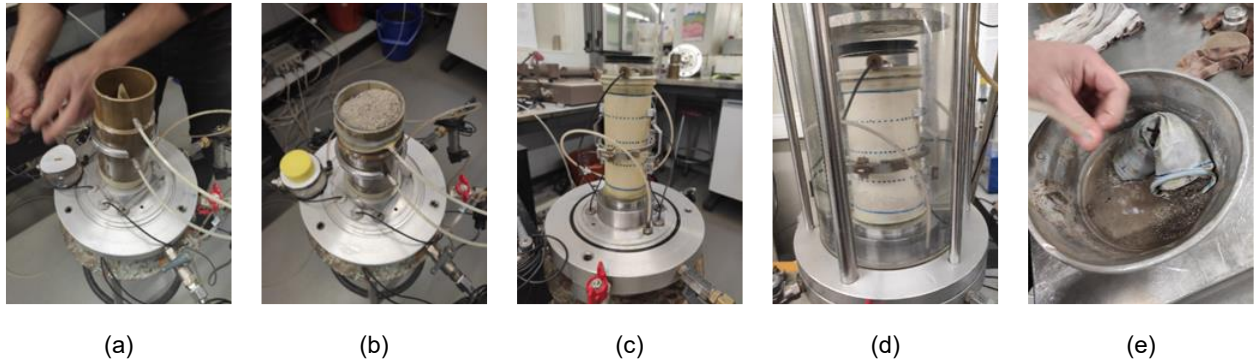


Figura 57 – Fases do ensaio triaxial cíclico: (a) montagem da membrana; (b) montagem do provete; (c) provete montado; (d) provete dentro da câmara triaxial cíclica; (e) desmontagem do provete

Numa forma resumida são apresentados os vários passos para a realização dos ensaios:

- As quantidades de solo e borracha foram determinadas com base no índice de vazios e na percentagem de borracha.
- O provete foi montado na câmara triaxial, começando com a limpeza das pedras porosas e a colocação de papel de filtro. A membrana foi fixada ao pedestal com o uso de o-rings, seguida pela colocação de papel de filtro na pedra porosa, dentro da membrana. A mistura preparada foi introduzida no molde.
- Após a montagem, o vácuo foi aplicado para remover o ar presente entre a membrana e o molde, e o molde metálico foi cuidadosamente removido.
- A percolação foi realizada para obter um grau de saturação próximo de 1 em que a percolação de CO₂ serve para remover bolhas de ar e facilitar o fluxo da água ao percorrer a amostra.
- O provete foi saturado aumentando gradualmente as pressões de confinamento e de contrapressão, a uma tensão efetiva constante de 10 kPa. O parâmetro B de Skempton, definido na equação [30], foi calculado medindo o incremento da pressão intersticial. Adotou-se B = 0,98, como valor mínimo para considerar o solo saturado.
- A consolidação foi realizada para a pressão de confinamento efetiva desejada.
- Foram aplicados ciclos de deformação controlado a diferentes amplitudes de deformação, em condições drenadas. Em seguida, foi realizado o corte cíclico não drenado nos provetes até a rutura ou até um máximo de 100 ciclos.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad [30]$$

A fase final do ensaio é crucial para a determinação rigorosa dos parâmetros de ensaio, nomeadamente do índice de vazios final. Para tal, é necessário desmontar o ensaio, sendo que a célula triaxial é aberta e o provete é retirado e colocado no recipiente. O teor em água é determinado pelo método de secagem em estufa (NP-84 1965), que envolve os seguintes passos (de Matos Fernandes, 2006) resumidos a seguir:

- Medição da massa húmida da amostra de solo que será utilizada para determinar o teor de água (massa 1).
- Secagem da amostra em estufa a uma temperatura mínima de 100°C por pelo menos 24 horas.
- Medição da massa seca da amostra de solo (massa 2).
- Cálculo da diferença entre as massas massa 1 e massa 2 que representa a massa de água inicial (massa 3).
- Cálculo da relação entre massa 3 e massa 2, que representa a quantidade de água no solo, W .

Com a conclusão do ensaio Triaxial Cíclico, o estudo direciona-se para a próxima etapa: a apresentação do Plano de Ensaio. Neste subcapítulo, serão detalhados os procedimentos e parâmetros que serão adotados nos ensaios subsequentes, considerando as características específicas dos materiais estudados e os objetivos da pesquisa. O Plano de Ensaio é fundamental para garantir a consistência e a eficiência das investigações, bem como para fornecer uma estrutura clara para a coleta de dados e análise dos resultados. Com base nos conhecimentos adquiridos até o momento, o pesquisador estabelecerá uma abordagem cuidadosa para conduzir os próximos ensaios e obter informações relevantes sobre as características dinâmicas dos solos em estudo.

3.5. PLANO DE ENSAIOS

Para investigar a influência da borracha no comportamento estático e dinâmico da areia, foram realizados diversos ensaios de modo a ter vários valores físicos relevantes. Na Tabela 7, estão resumidos os ensaios conduzidos e os parâmetros obtidos.

Tabela 7 – Parâmetros obtidos nos ensaios

Ensaio	Parâmetros
Peso Volúmico das Partículas	γ_s
Análise Granulométrica	Curva granulométrica
Triaxial Cíclico	G , D , N_{liq}
Corte Simples Cíclico	G , D , ϕ'

Foram realizados vários ensaios de corte simples e triaxiais cíclicos para examinar a influência da adição de borracha em amostras submetidas a diferentes pressões de confinamento. Os ensaios têm três

diferentes proporções de borracha e dois níveis de tensão, de modo a compreender o efeito dessa adição nas amostras sob solicitação mecânica. Os detalhes de todos os ensaios realizados neste estudo, juntamente com os valores que cada amostra foi preparada, são apresentados na Tabela 8.

A nomenclatura dos ensaios adota a seguinte convenção: o solo utilizado é identificado como AH (para misturas com areia de Hostun). Além disso, é indicada a quantidade de borracha em massa presente na amostra, a percentagem da densidade, bem como a tensão aplicada.

Tabela 8 – Plano de ensaios

Nome do Ensaio	%Borracha	%Densidade Relativa	Tensão Efetiva de Confinamento (kPa)	Equipamento
AH_0%_40%_80kPa	0	40	80	Corte Simples
AH_0%_40%_160kPa			160	
AH_0%_80%_80kPa		80	80	
AH_0%_80%_160kPa			160	
AH_10%_40%_80kPa	10	40	80	
AH_10%_40%_160kPa			160	
AH_10%_80%_80kPa		80	80	
AH_10%_80%_160kPa			160	
AH_30%_40%_80kPa	30	40	80	
AH_30%_40%_160kPa			160	
AH_30%_80%_80kPa		80	80	
AH_30%_80%_160kPa			160	
AH_50%_40%_80kPa	50	40	80	
AH_50%_40%_160kPa			160	
AH_50%_80%_80kPa		80	80	
AH_50%_80%_160kPa			160	
AH_0%_40%_50kPa	0	40	50	Triaxial
AH_0%_40%_100kPa			100	

Após a apresentação do plano de ensaios, é necessário destacar algumas considerações em relação às pressões de confinamento efetivas adotadas, que foram de 50 kPa e 100 kPa para ensaios triaxiais cíclicos e de 80kPa e 160kPa para ensaios de corte simples. Essas pressões foram selecionadas com o objetivo de garantir a mesma tensão efetiva média (p') nos dois tipos de ensaios, de 50 e 100 kPa, respetivamente, calculada segundo a seguinte expressão clássica da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos:

$$p' = \frac{\sigma'_{v0} + 2 \cdot (K_0 \cdot \sigma'_{v0})}{3} \quad [31]$$

De facto, uma vez que os ensaios triaxiais cíclicos são realizados em consolidação isotrópica da amostra ($K_0=1$), a tensão efetiva média coincide com a tensão de confinamento. Por outro lado, no caso dos ensaios de corte simples, nos quais as deformações horizontais da amostra se encontram totalmente restringida por ação dos anéis de cobre, o carregamento é feito segundo K_0 , que para este solo se estimou ser igual a 0,44, a partir de um ângulo de atrito do solo de 34° . De modo a aplicar uma tensão efetiva média (p') semelhante à dos ensaios triaxiais cíclicos, é necessário calcular a correspondente tensão vertical. Assim, para $p' = 50$ kPa, a tensão vertical correspondente em condição K_0 é de 80 kPa, sendo o dobro desse valor (160 kPa) para $p' = 100$ kPa.

Neste capítulo, foi abordado em detalhes o procedimento dos ensaios realizados, incluindo os materiais utilizados, o método laboratorial empregado e a descrição completa dos ensaios de corte simples cíclico e triaxial cíclico. As informações obtidas durante essa etapa experimental são de fundamental importância para a compreensão do comportamento dinâmico dos materiais em estudo, especialmente em relação ao amortecimento, à propagação das ondas e à liquefação.

No próximo capítulo, os resultados obtidos a partir dos ensaios serão minuciosamente analisados e discutidos. Será realizada uma interpretação aprofundada dos dados coletados, considerando as diferentes condições de carga, densidades e níveis de rigidez dos materiais. A análise dos ensaios permitirá estabelecer relações entre os parâmetros dinâmicos obtidos e as características dos materiais, identificando padrões e tendências relevantes.

Os dados experimentais serão comparados com as teorias e modelos apresentados na revisão bibliográfica do capítulo 2, buscando-se validar as informações obtidas e verificar a concordância com as previsões teóricas. Adicionalmente, eventuais divergências ou discrepâncias serão investigadas e explicadas, contribuindo para uma compreensão mais completa dos fenómenos estudados.

Além disso, no seguinte capítulo incluirá gráficos, tabelas e demais recursos visuais para facilitar a apresentação dos resultados de forma clara e objetiva. As interpretações e análises realizadas ao longo do capítulo servirão de embasamento para a conclusão dos fenómenos de amortecimento, propagação das ondas e liquefação, bem como para a caracterização das técnicas utilizadas na determinação das propriedades dinâmicas dos materiais.

A apresentação dos resultados é uma etapa crucial da pesquisa, pois é por meio dessa análise que se estabelecem as conclusões e contribuições deste estudo para o conhecimento científico na área em estudo. Além disso, os resultados obtidos serão comparados e contrastados com estudos similares existentes na literatura, permitindo identificar lacunas de conhecimento e direcionar futuras pesquisas na área geotécnica.

Dessa forma, o capítulo 5 é fundamental para a compreensão dos resultados experimentais e para a discussão dos fenómenos investigados, contribuindo para o avanço da área de geotecnia e fornecendo subsídios para a formulação de conclusões sólidas no capítulo seguinte. A análise criteriosa dos resultados permitirá também estabelecer conexões entre as informações obtidas e as teorias existentes, promovendo uma visão ampla e consistente do comportamento dinâmico dos materiais em questão.

4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados de todos os ensaios realizados no LabGeo, no equipamento de corte simples cíclico (CSS) e no triaxial cíclico (CTX) com foco na obtenção de dados relevantes para a análise de parâmetros de amortecimento. Dos dados obtidos, destaca-se a tensão tangencial, extensão vertical e horizontal, força vertical e horizontal.

4.2. RESULTADOS OBTIDOS

Os ensaios realizados no equipamento CSS forneceram uma série de dados cruciais para a avaliação do comportamento do material em diversas condições. Entre os principais parâmetros analisados, destaca-se o amortecimento que apresenta um interesse especial.

O valor de distorção (γ (%)) foi calculado por meio da equação 33, a qual estabelece a correspondência entre a extensão vertical inicial antes do corte e a variação da extensão horizontal durante o corte.

$$\gamma = \frac{\Delta EH}{EH_i} \times 100 \quad [32]$$

Na Figura 58 e Figura 59, são apresentados os gráficos obtidos a partir de um ensaio com várias amplitudes de extensão horizontal, com o objetivo de avaliar o comportamento do material sob diferentes condições de carga.

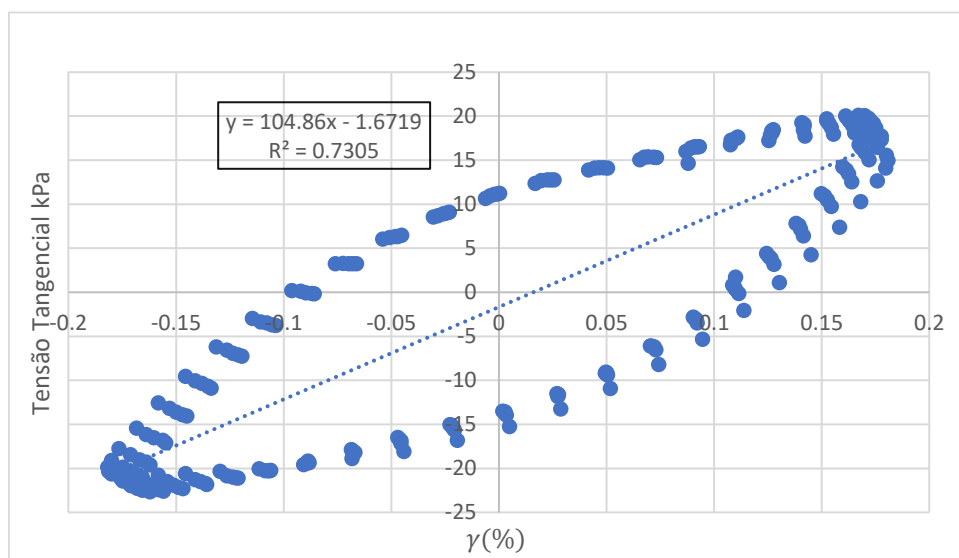


Figura 58 - Curva de histerese com amplitude de 0.5 mm

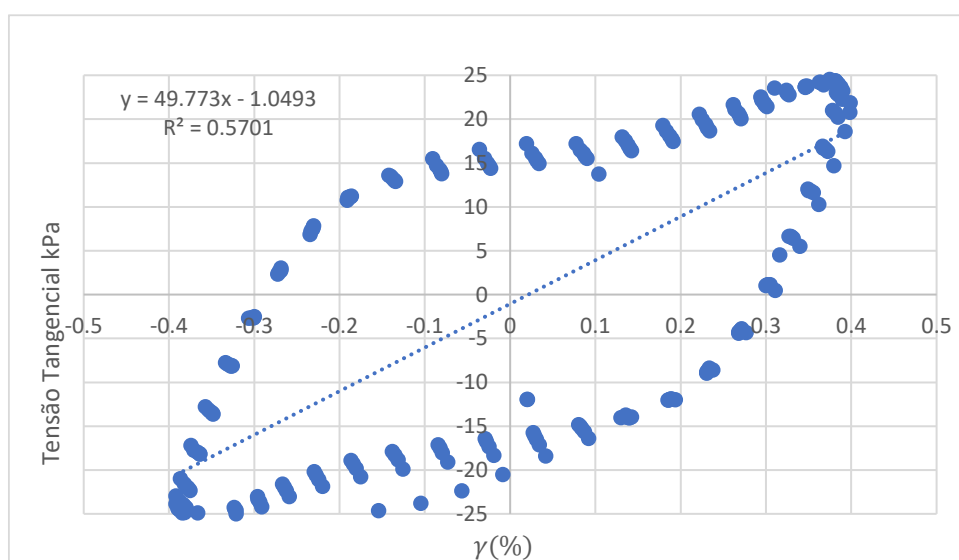


Figura 59 - Curva de histerese com amplitude de 1 mm

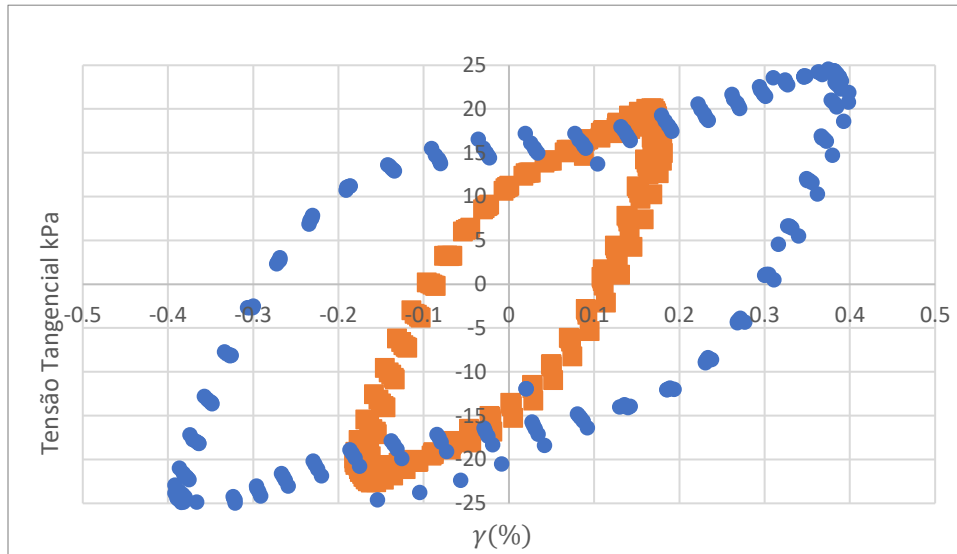


Figura 60- Comparação das duas curvas de histerese

Os gráficos acima apresentados mostram a relação entre γ (%) e τ (kPa). Através da inclinação da regressão linear, é possível obter diretamente o valor de G . Para obter esses gráficos de degradação do módulo G e realizar uma análise ao longo do aumento das amplitudes aplicadas na amostra, foi utilizada a equação 34.

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_{max} + \gamma_{min}}{2} \quad [33]$$

Na amostra com 0% de borracha, densidade de 80% e tensão de confinamento de 80kPa, obteve-se a curva de degradação do módulo G , conforme representado na Figura 61. Os dados experimentais indicam que o aumento de γ resulta numa redução em G , como esperado.

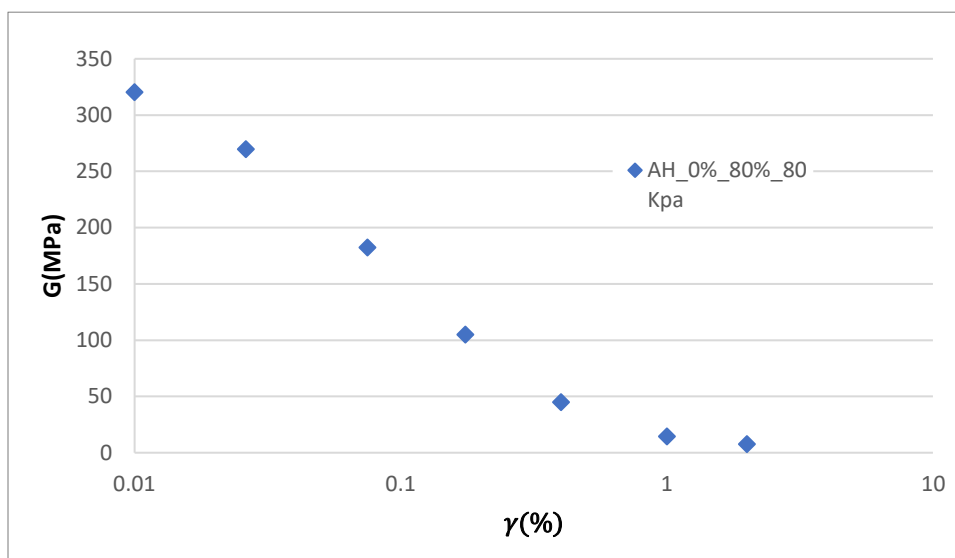


Figura 61 - Degradação do módulo de distorção G em função da distorção γ na escala logarítmica

Em seguida, foram utilizadas as velocidades das ondas S para calcular o G_0 de cada amostra e para comparar e confirmar a validade dos resultados obtidos pelo equipamento. A distorção induzida pelos bender elements durante a propagação das ondas S encontra-se na faixa entre 10^{-6} e 10^{-5} (Ferreira, 2009). Considerando que o primeiro valor de G obtido pelo equipamento foi 10^{-4} , utilizou o valor conservativo de 10^{-5} como referência para a leitura do G_0 através de V_s .

Conforme apresentado na Figura 62, o valor de G_0 está relativamente próximo ao valor inicial e encontra-se dentro do comportamento esperado da curva. Portanto, podemos afirmar que os dados obtidos são fiáveis. Com esta etapa concluída, torna-se possível analisar o comportamento do solo em relação ao G/G_0 , proporcionando uma análise mais detalhada, conforme ilustrado na Figura 63.

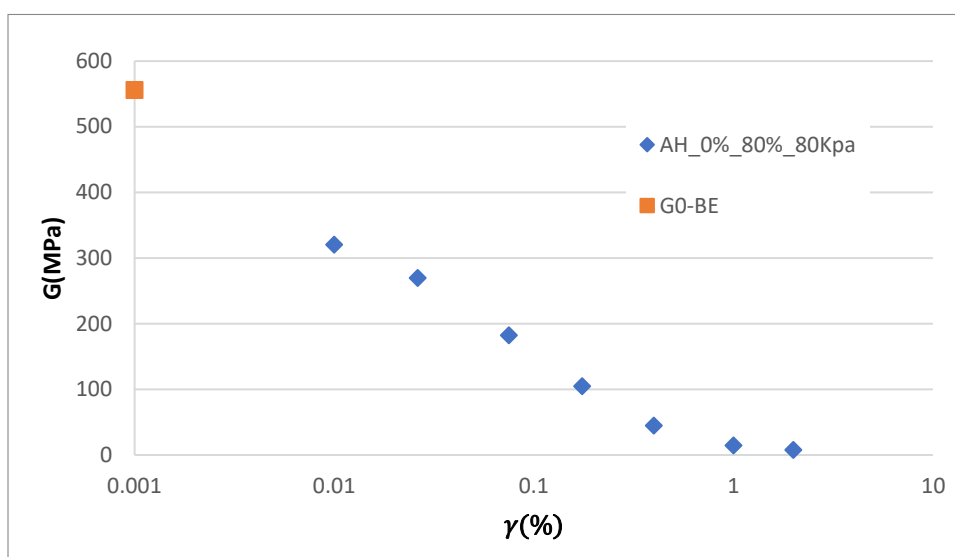
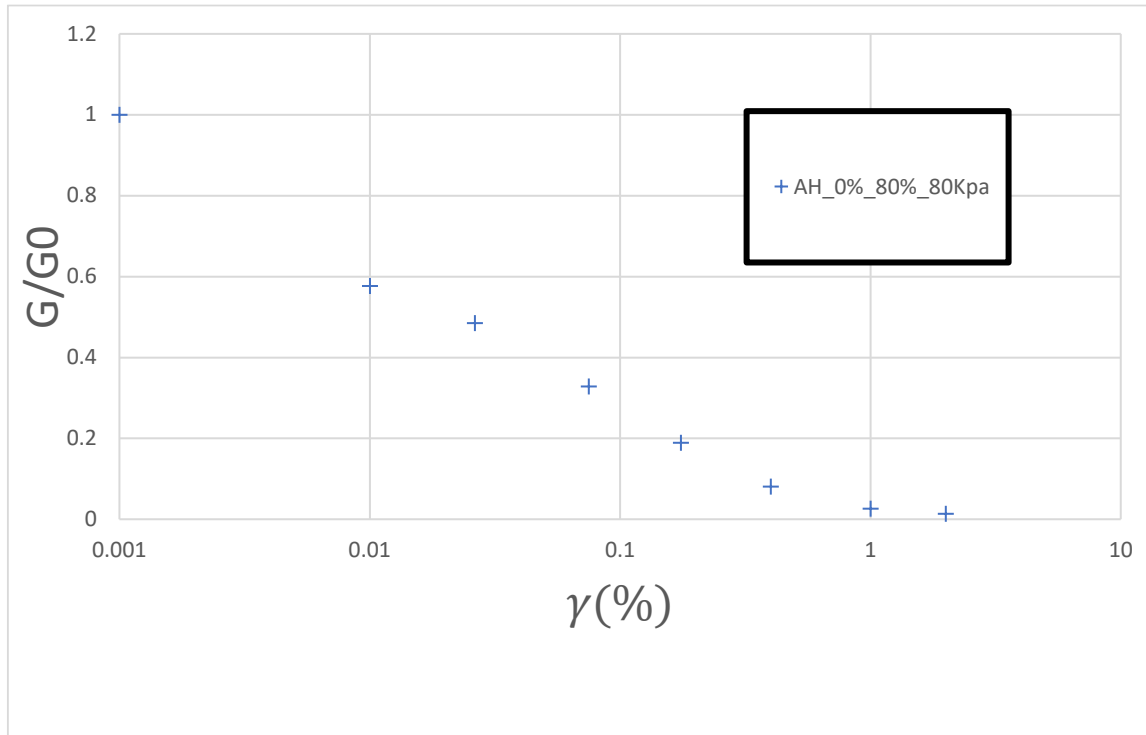


Figura 62- Comparação da curva de degradação G com o G_0

Figura 63- Degradação do G_0 versus γ na escala logarítmica

Posteriormente, foi necessário analisar o amortecimento (D). Para isso, foi utilizado o software AutoCAD para calcular a área dos *loops* das curvas de histerese. Ao utilizar a fórmula do cálculo de amortecimento que é adimensional, não se coloca a questão da escala dos gráficos. Dessa forma, a partir das áreas calculadas graficamente, obteve-se um tipo de gráfico que relaciona o amortecimento com a distorção γ conforme ilustrado na Figura 64.

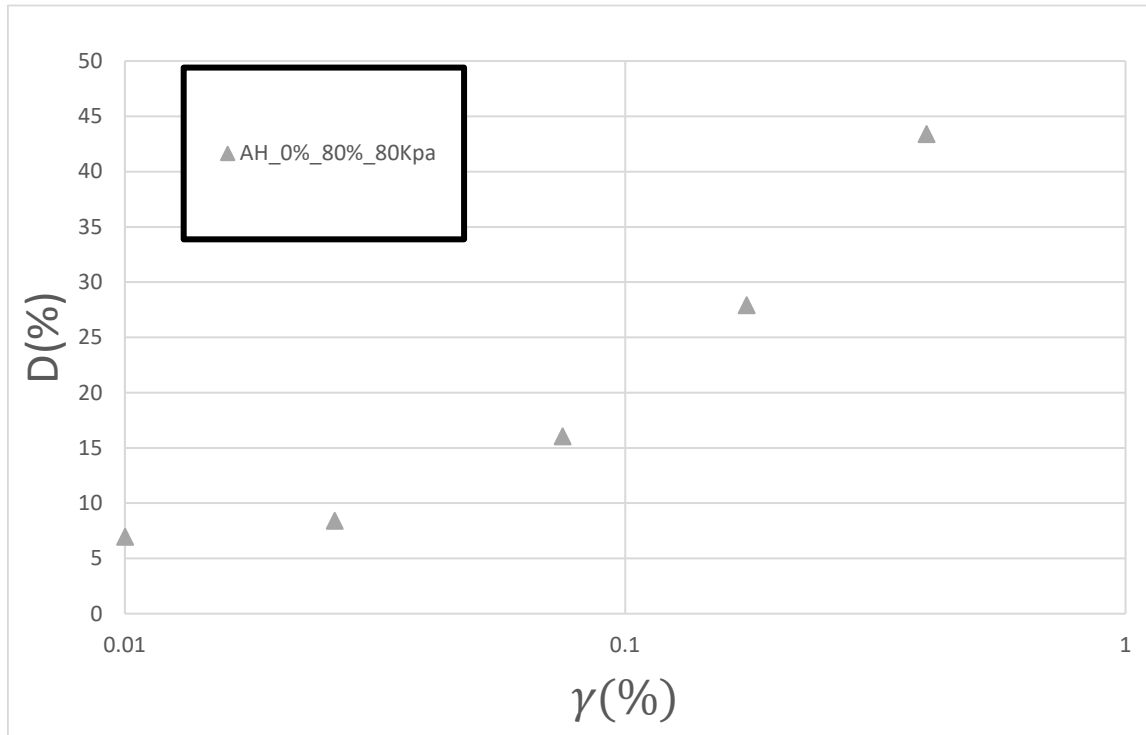


Figura 64- Amortecimento ao longo da distorção

Conclui-se que o amortecimento aumenta conforme as amplitudes são incrementadas, tornando os gráficos de extrema importância para a análise do comportamento das amostras, fornecendo informações diretas sobre o comportamento do solo e qual será o impacto da presença da borracha no mesmo. Além disso, ao relacionar o amortecimento com a degradação G/G_0 , como ilustrado na Figura 65, podemos obter uma visão mais abrangente e precisa do comportamento do solo ao longo do tempo e das diferentes condições de teste.

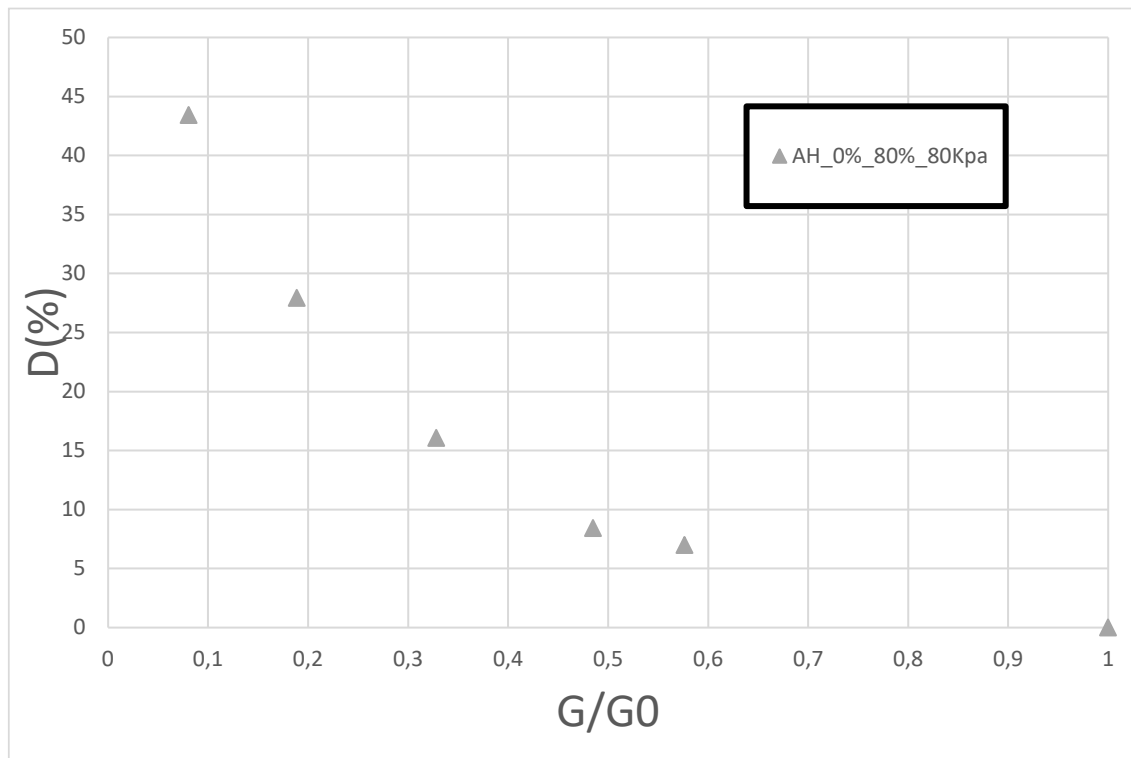


Figura 65- Modelo normalizado do amortecimento em função da degradação da rigidez

Além disso, realizou-se o corte monotônico utilizando o equipamento CSS para estudar o comportamento mecânico de resistência do material. Os gráficos obtidos nesse ensaio são ilustrados na Figura 66 a), e a partir desses dados, foi possível determinar o ângulo de atrito das curvas de corte. Na Figura 66 b), os dois pontos de cada reta representam duas tensões de confinamento: 0,32 kN que corresponde a 80 kPa de tensão de confinamento e 0,64 kN que corresponde a uma tensão de confinamento de 160 kPa.

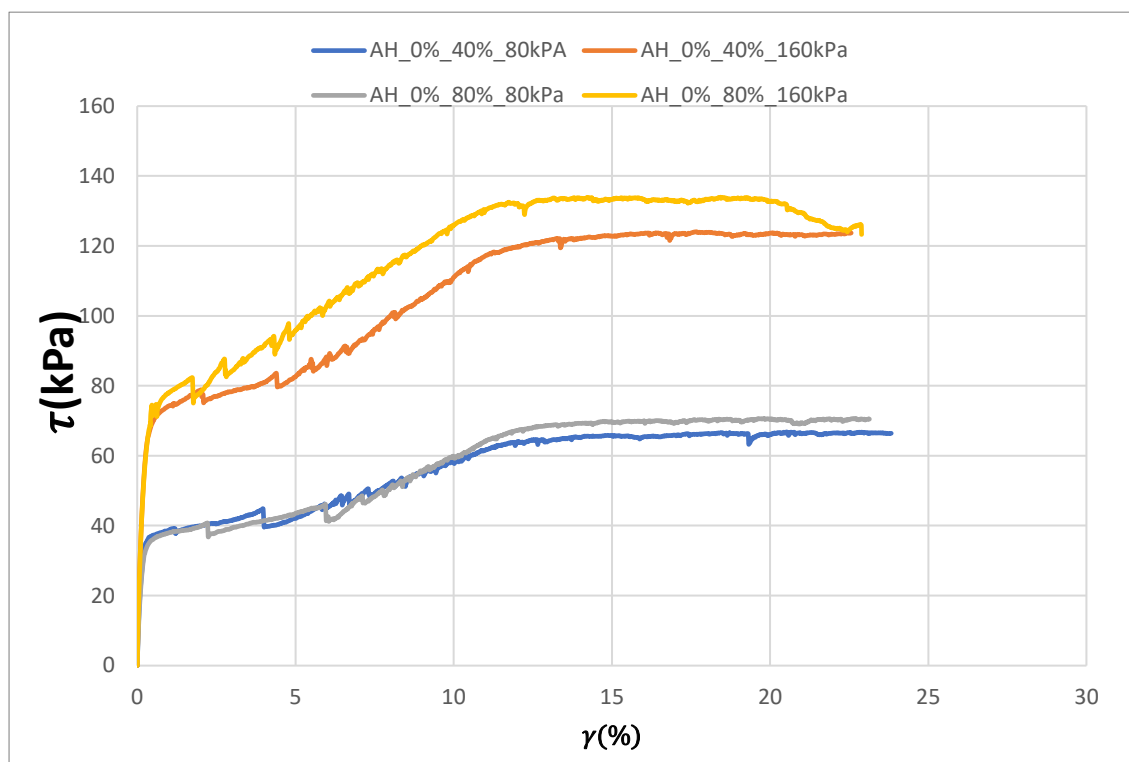


Figura 66 – Resultados tensão-deformação

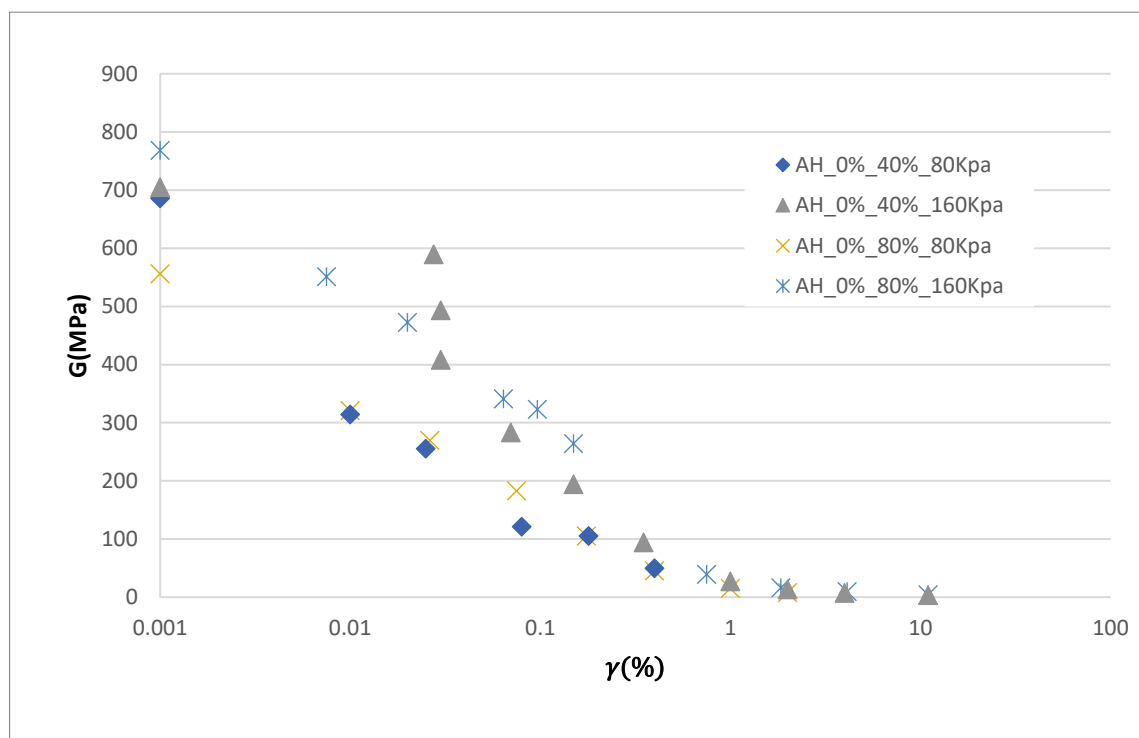
Durante a análise das misturas com 50% de borracha e com uma tensão de confinamento de 160 kPa, o equipamento apresentou algumas limitações, devido ao alto teor de borracha nas amostras. Ao aplicar a carga, as amostras tiveram uma grande extensão vertical descendente, ultrapassando o limite de medição do equipamento. Isso exigiu a remoção dos LVDTs para uma análise possível.

Além disso, a análise das ondas também foi desafiadora em todas as amostras com 50% de borracha, o que pode ser justificado pela capacidade de a borracha absorver vibrações. Isso dificultou a leitura precisa de qualquer tipo de onda através do bender recetor. Somente com tensões de confinamento de 160 kPa foi possível obter uma leitura clara e precisa das ondas. No primeiro ensaio do CTX, foi utilizada uma amostra de areia com uma densidade de 40% e uma tensão de confinamento de 50 kPa. Foram realizados 36 ciclos antes de ocorrer o fenômeno da liquefação.

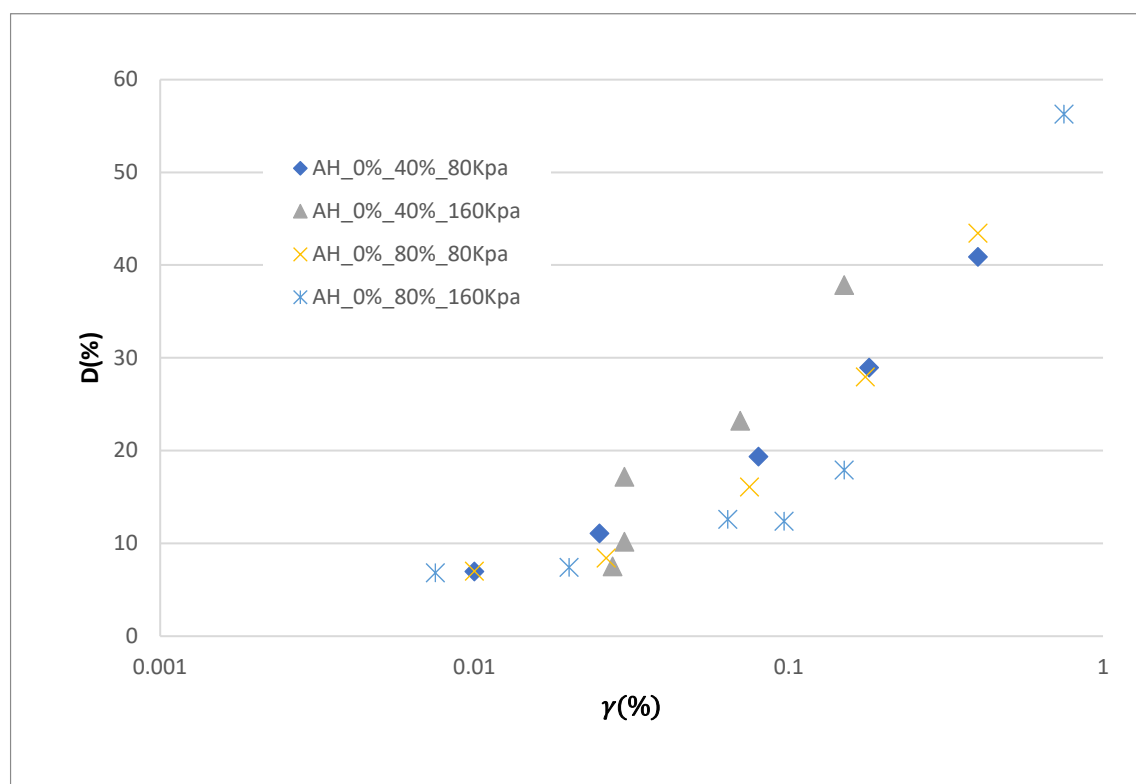
4.3. ANÁLISE GLOBAL DOS ENSAIOS

A análise dos diversos ensaios realizados visa obter uma visão geral e compreender de que forma o comportamento do solo é influenciado pela variação da tensão de confinamento, da percentagem de borracha e da densidade relativa.

Inicialmente, será realizada uma análise focada somente em misturas de areia, servindo como referência para estabelecer um termo de comparação que permitirá avaliar o efeito dessas variáveis, sendo que a borracha é o fator mais relevante abordado nesta dissertação, representado na Figura 67.



a)

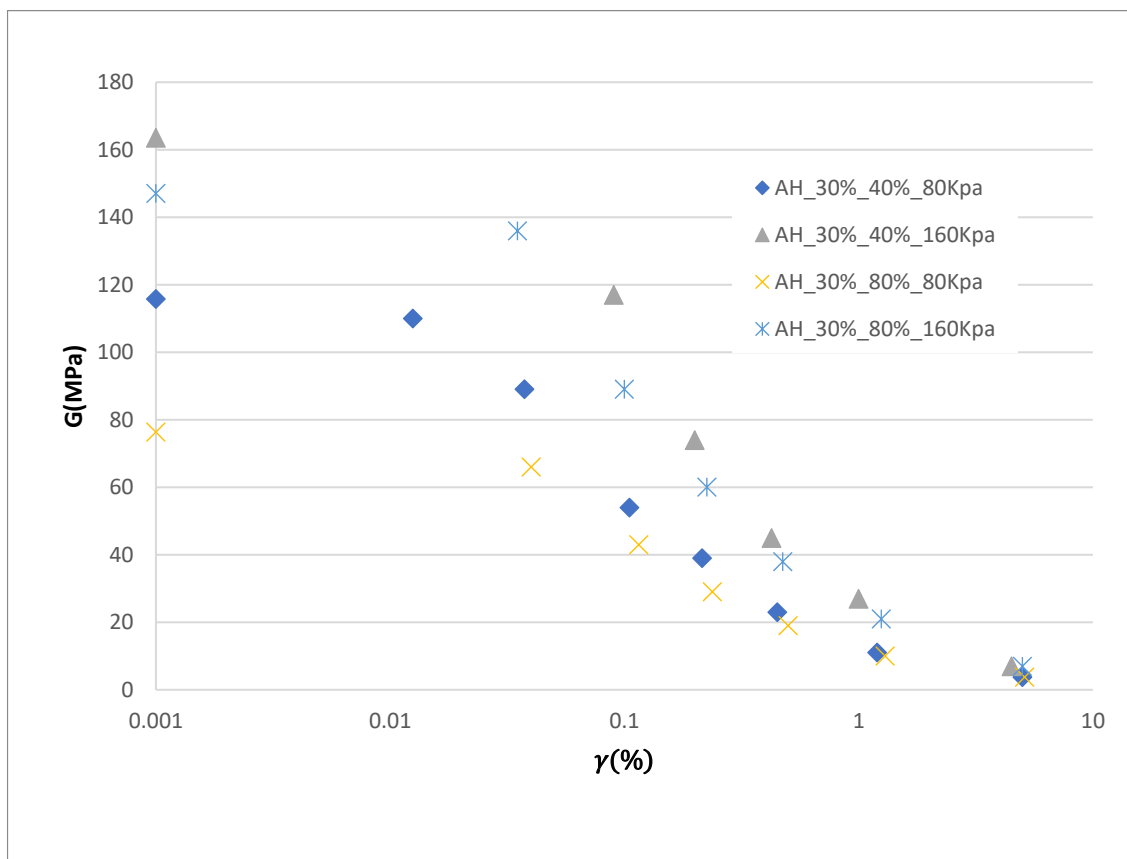


b)

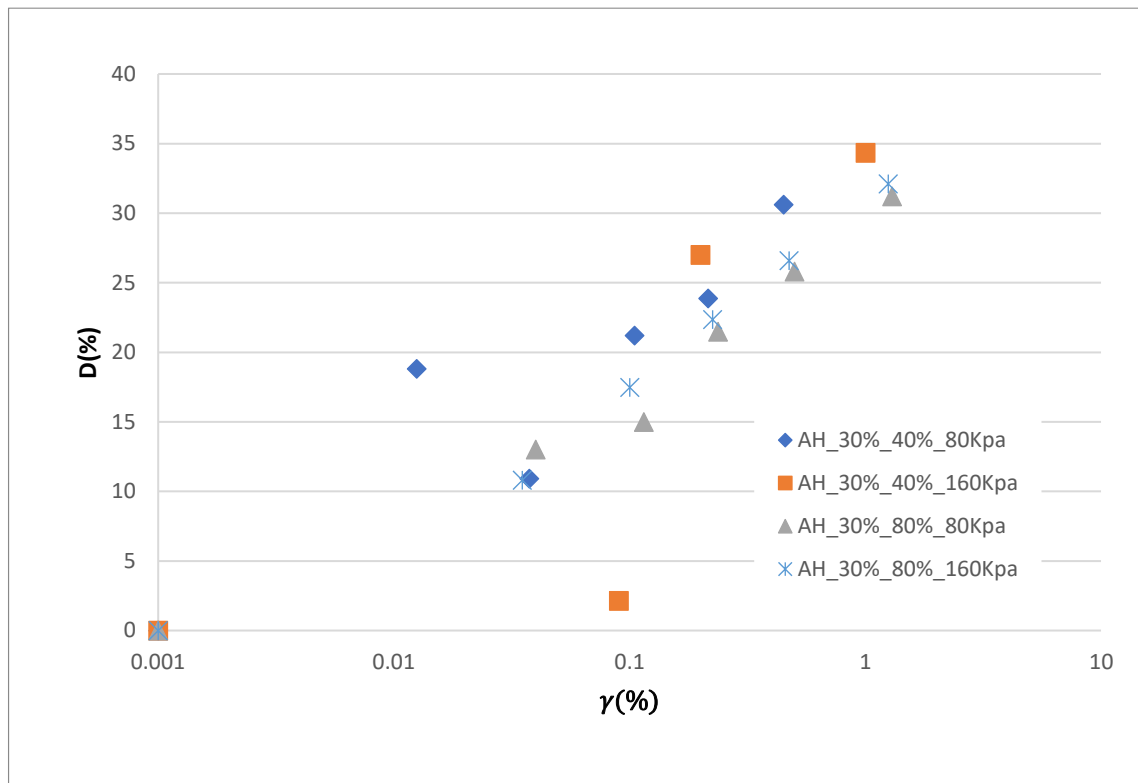
Figura 67- Dados de referência: a) gráfico módulo distorção; b) gráfico amortecimento

Conforme evidenciado na Figura 67 a), os resultados indicam um aumento no módulo de distorção com o incremento da tensão de confinamento, porém o mesmo não é observado para o amortecimento. Adicionalmente, ao aumentar a densidade da amostra, espera-se uma redução no amortecimento, e embora a diferença não seja significativa, isso é ilustrado na Figura 67 b). Em contraste, para o módulo de distorção, não se observa uma relevância notável em relação à densidade.

Por outro lado, nas misturas de areia com 30% de borracha, a densidade relativa exerce um papel inverso no solo. Conforme se aumenta a massa da mistura, percebe-se que o solo se torna menos resistente, apesar de ter um volume maior. Essa peculiaridade pode ser explicada pelo método de composição das misturas que foi baseado na proporção de massa de cada amostra. Como a borracha é cinco vezes mais leve que a areia, a quantidade de volume de borracha na mistura é significativamente maior, resultando em uma maior influência da borracha no comportamento do solo. Os dados são apresentados na Figura 68.



a)



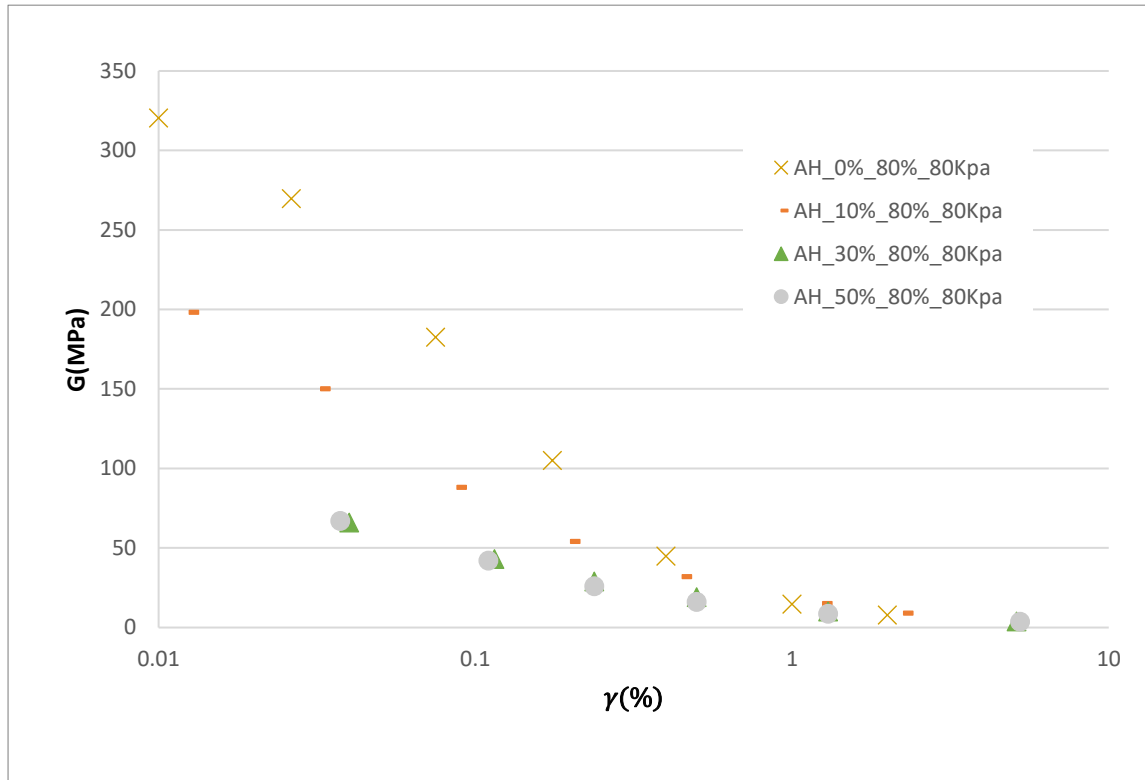
b)

Figura 68 - Dados da mistura com 30% de borracha: a) gráfico módulo distorção; b) gráfico amortecimento

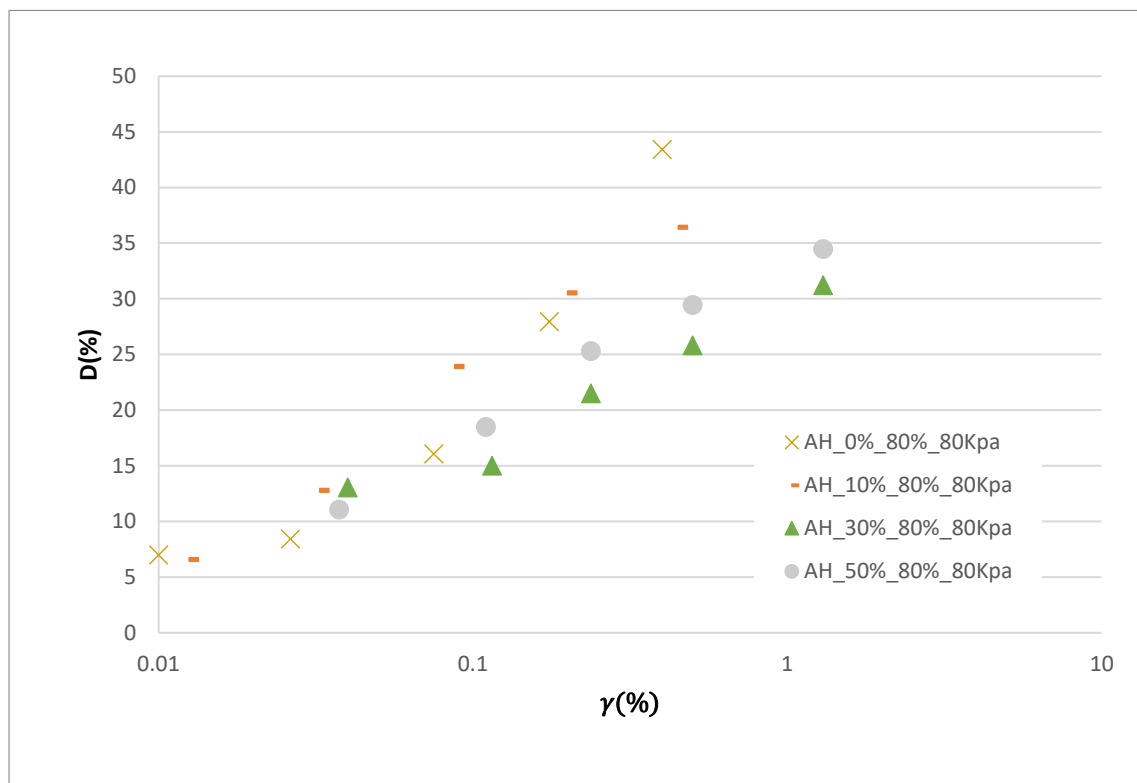
Para avaliar o efeito da borracha nas misturas, utilizaram-se amostras com 80% de densidade, pois esse valor proporciona uma maior distinção nos resultados, conforme mencionado anteriormente. Além disso, optou-se por aplicar uma tensão de confinamento de 80 kPa, já que os ensaios com 160 kPa nas misturas de 50% de borracha não foram viáveis devido às limitações do equipamento.

Conforme apresentado na Figura 69, é possível observar que a mistura sem borracha (0%) possui um módulo de distorção G mais elevado em comparação com as demais misturas, o que era esperado, resultando em um baixo amortecimento. Em ordem decrescente, as misturas com 10% de borracha apresentam um módulo de distorção e amortecimento maior. Por sua vez, nas misturas com 30% e 50% de borracha, nota-se que a partir de 30% não há mudanças significativas no comportamento das amostras, apresentando os menores valores de módulo de distorção e aumento no amortecimento. Também é possível observar que, no amortecimento, quanto mais borracha é adicionada, menos exponencial é o comportamento, começando com valores altos, mas com os aumentos da distorção, o aumento não é significativo. Dessa forma, pode-se afirmar que, a partir de uma leitura de 0,1% do γ , já há um erro bastante significativo, e assim podem ser ignorados os dados de gammas maiores.

Já na Figura 70, podemos observar que todos os dados estão dentro do comportamento esperado em relação ao G_0 , o que nos permite validar os resultados obtidos para essas quatro misturas.

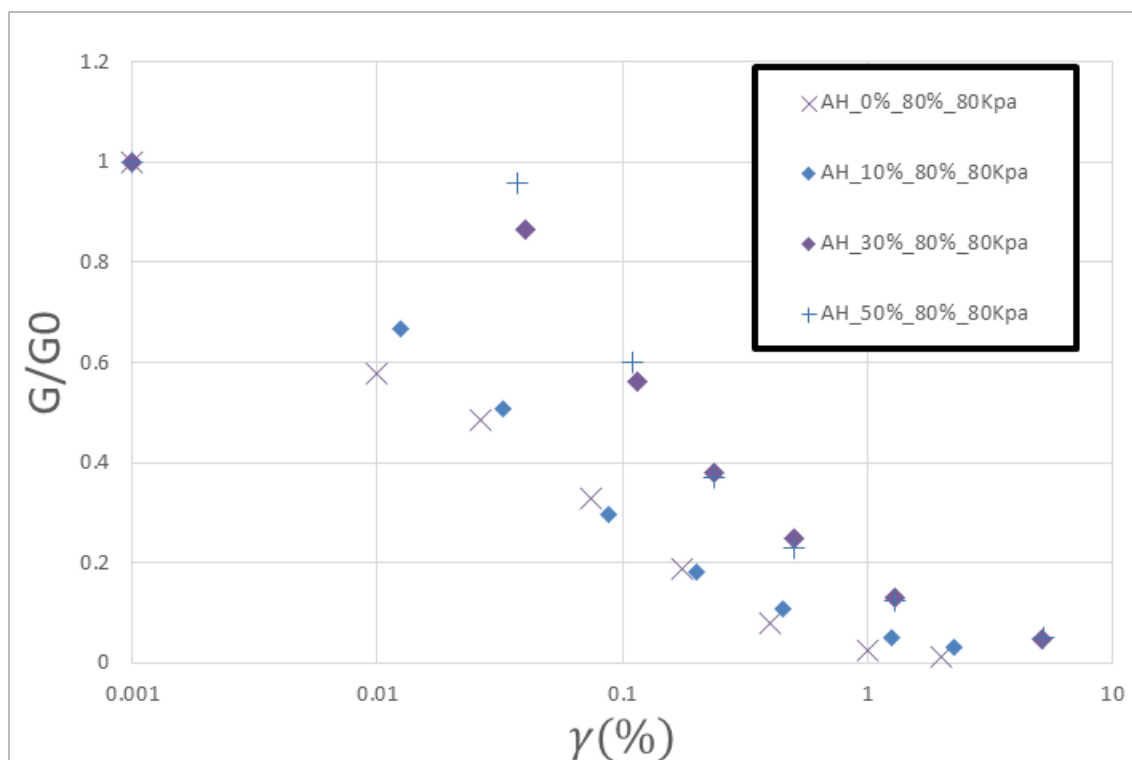


a)

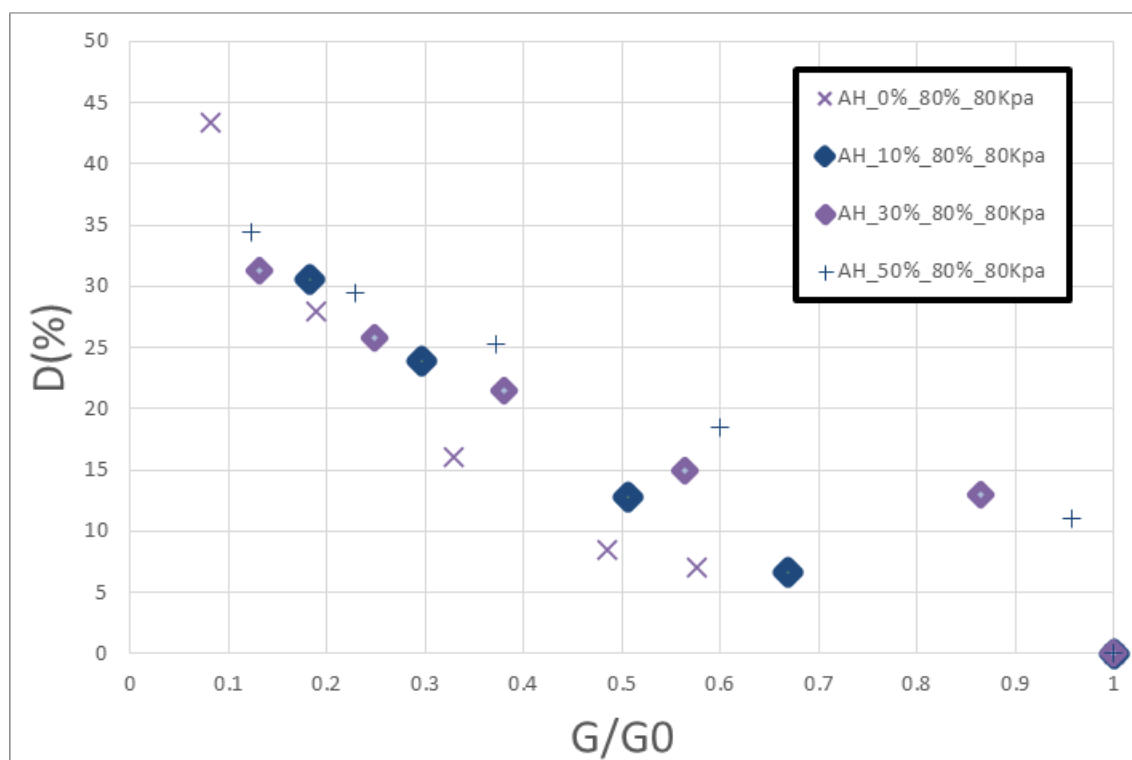


b)

Figura 69- Dados das misturas com tensão de confinamento 80kPa: a) gráfico módulo distorção; b) gráfico amortecimento



a)



b)

Figura 70- Dados das misturas com tensão de confinamento 80kPa: a) gráfico módulo distorção; b) gráfico amortecimento

Os coeficientes de amortecimento de todas as misturas sob uma pressão de confinamento de 50 kPa estão representados na Figura 71, juntamente com os limites propostos por Mashiri et al. (2016).

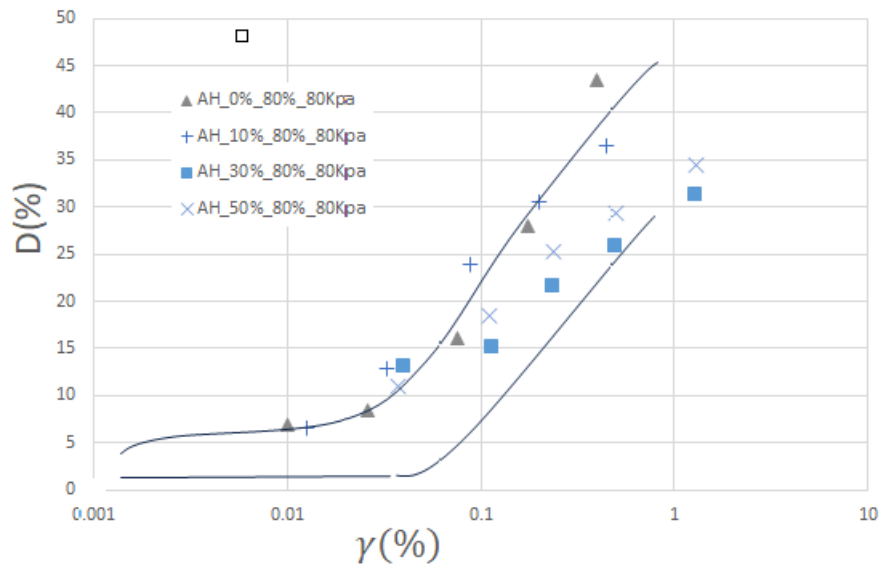


Figura 71-Comparacao de resultados com Mashiri et al. (2016)

Ao avaliar o corte monotônico, observa-se que as misturas de 0% e 10% têm comportamentos semelhantes. A única diferença é que na mistura com 10%, o comportamento elástico é mais uniforme em comparação com a mistura de 0%. No entanto, pode-se afirmar que a adição de borracha resulta em uma menor tensão tangencial, conforme ilustrado na Figura 72 e também apresenta um comportamento elástico maior. Na tabela 9 está representado, ângulos de atritos calculados com as diferentes percentagens de borracha nas misturas que se observa quanto mais percentagem de borracha tiver menor o ângulo de atrito.

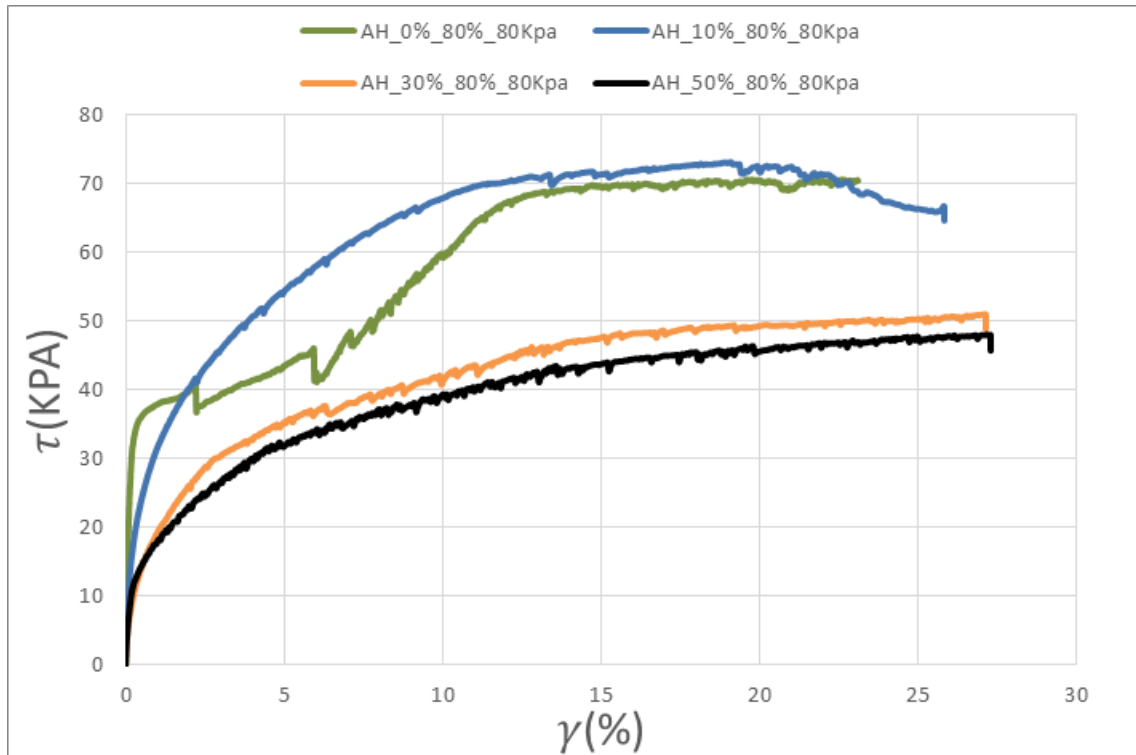


Figura 72- Gráfico corte monotônico

Tabela 9- Valores do ângulo de atrito para amostras de areia

Percentagem de Borracha na amostra	ϕ'
0%	36°
10%	30°
30%	27°
50%	26°

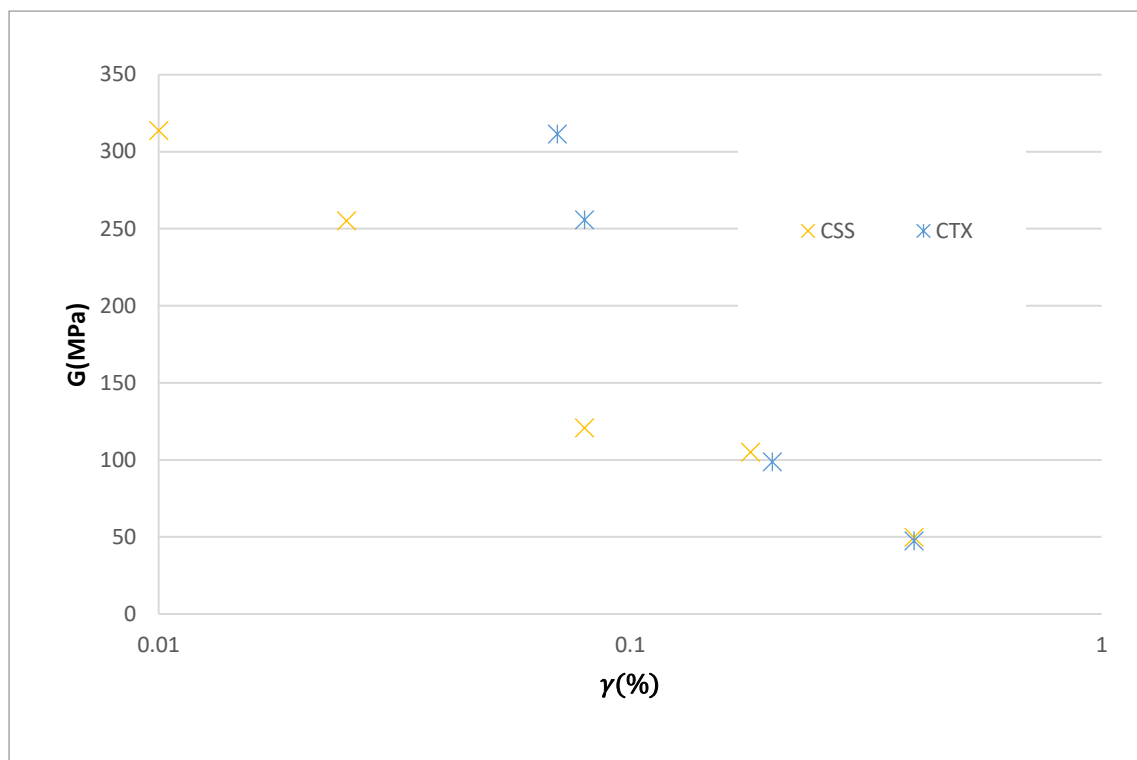
4.4. COMPARAÇÃO DE ENSAIOS

Neste subcapítulo, aborda-se a correlação entre os ensaios realizados nos equipamentos CSS e CTX, a fim de verificar se os dados obtidos podem ser comparados entre si. Conforme mencionado anteriormente, as tensões de confinamento de 80 kPa e 160 kPa nos ensaios CSS correspondem a 50 kPa e 100 kPa, respectivamente, nos ensaios triaxiais cíclicos. É importante destacar que apenas dois ensaios CTX foram realizados, de areia limpa, isto é, sem borracha.

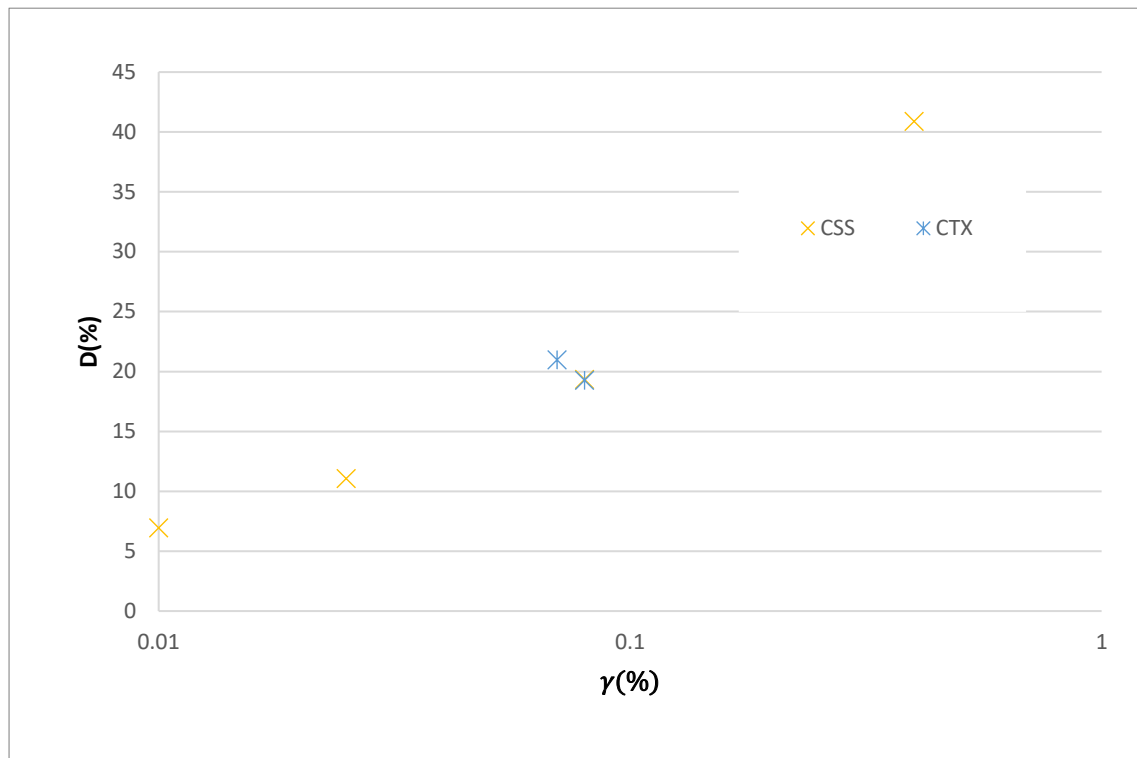
Portanto, não temos informações sobre como a correlação se comportaria para misturas com borracha. Além disso, chegou-se à conclusão de que essa comparação entre os ensaios só é possível para cortes cíclicos não drenados, pois os valores do módulo de distorção são significativamente altos e não apresentam alterações, como observado nos ensaios CSS.

Em primeiro lugar, na Figura 73, temos os dois ensaios com tensão de confinamento de 50 kPa e 80 kPa, nos quais podemos observar uma correlação bastante próxima entre os valores obtidos, principalmente na Figura 73 b), que, como já mencionado anteriormente, tem como foco principal o amortecimento, verifica-se que os valores são praticamente iguais.

Por outro lado, nos ensaios com tensão de confinamento de 100 kPa e 160 kPa, não foi possível realizar comparações, pois no corte triaxial cíclico, assim como ocorreu na amostra de 50 kPa, não havendo qualquer tipo de variação no módulo de distorção. Isso indica que não é possível fazer qualquer tipo de comparação com amostras nas quais não ocorra o fenómeno de liquefação.



a)



b)

Figura 73- Dados de ambos equipamentos com amostras de areia: a) gráfico modulo distorção; b) gráfico amortecimento

Neste capítulo, foram apresentados e discutidos detalhadamente os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados, assim como as análises e interpretações dos dados coletados. Com base nessas informações, foi possível obter uma compreensão mais aprofundada do comportamento dinâmico dos materiais em estudo, especialmente em relação aos fenômenos de amortecimento, propagação das ondas e liquefação.

No próximo capítulo, serão apresentadas as conclusões finais deste estudo, que constituem um importante aspecto para o fechamento da pesquisa e a resposta aos objetivos propostos no início deste trabalho. As conclusões são o resultado da análise crítica dos resultados obtidos e da comparação com as teorias e modelos apresentados na revisão bibliográfica.

Serão destacados os principais achados e descobertas obtidos ao longo deste estudo, bem como as contribuições significativas para o conhecimento na área de geotecnia. Será enfatizada a relevância dos resultados alcançados para a compreensão dos fenômenos de interesse e seu impacto potencial em aplicações práticas na Engenharia Civil.

Além disso, no capítulo seguinte também abordará possíveis limitações do estudo, identificando eventuais fontes de incertezas ou vies que possam ter influenciado os resultados. Essas reflexões são fundamentais para garantir a robustez e confiabilidade das conclusões apresentadas, bem como para apontar oportunidades de melhorias e futuras pesquisas na área.

Em seguida, serão propostas sugestões para trabalhos futuros, indicando áreas de pesquisa que podem se beneficiar dos resultados e metodologias desenvolvidas neste estudo. Essas sugestões visam

expandir o conhecimento e explorar aspectos ainda não abordados, buscando aprimorar a compreensão dos fenômenos estudados e suas implicações na Engenharia Civil.

Por fim, o capítulo encerrará com uma síntese das principais contribuições deste trabalho para o campo de geotecnia e suas aplicações práticas. Será enfatizada a importância das descobertas para o avanço científico e tecnológico na área, bem como a sua relevância para o desenvolvimento de soluções mais seguras e eficientes em projetos geotécnicos.

O capítulo é de suma importância para a consolidação dos resultados e a apresentação final das principais conclusões e contribuições deste estudo. Com base nas informações apresentadas neste capítulo, a tese poderá ser encerrada de forma coerente e sólida, proporcionando um valioso acréscimo ao conhecimento científico e prático no campo da geotecnia.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO ESTUDO

O descarte de pneus em fim de vida é um sério problema ambiental, devido ao seu grande volume e à potencial fonte de insetos e incêndios. No entanto, a borracha surge como uma solução viável para enfrentar este desafio, pois possui propriedades valiosas para aplicações na Engenharia Civil, como durabilidade, resistência e grande quantidade disponível.

Este estudo teve como objetivo analisar misturas de areia de Hostun com adição de resíduos de borracha triturada (com diâmetro entre 0.075mm a 0.840mm). Para isso, foi realizada a caracterização física da areia e da borracha e foi estudado o comportamento mecânico dessas misturas por meio de ensaios CSS (de corte simples cíclico, em ciclos de amplitude de distorção controlada e corte monotônico) e ensaios CTX (triaxiais cíclicos em condições drenados e não drenados). Em ambos os equipamentos de ensaio, a instalação de bender elements foi essencial para avaliar as propriedades mecânicas elásticas das misturas.

A medição da velocidade das ondas sísmicas revelou-se útil para calcular o módulo de distorção inicial (G_0) das diferentes misturas, porém é importante levar em conta que a utilização adequada dos bender elements e o processo de aquisição das ondas são fundamentais para minimizar a subjetividade no método baseado no domínio do tempo.

Os resultados obtidos mostraram que o aumento da quantidade de borracha nas misturas resultou numa redução no valor de G_0 , enquanto o aumento da pressão de confinamento efetiva teve um efeito oposto, aumentando esse parâmetro. Além disso, os ensaios CSS permitiram avaliar o impacto da borracha na curva de tensão-deformação e nos parâmetros de resistência da areia de Hostun. Constatou-se que a resistência ao corte das misturas aumenta com o aumento da pressão de confinamento, como seria esperado.

Adicionalmente, os ensaios CSS permitiram calcular o coeficiente de amortecimento histerético (D) e o módulo de distorção (G) dos parâmetros de rigidez cíclicos. Os resultados indicaram que o coeficiente de amortecimento aumenta e o módulo de distorção diminui à medida que a distorção (γ) é incrementada, o que está em acordo com a bibliografia existente sobre o tema. Também se observou que o aumento da quantidade de borracha nas misturas resultou em uma redução linear nos valores de D e G , sugerindo um efeito benéfico da borracha no amortecimento. Foi verificado que, a partir de uma adição de 30% de borracha na mistura, não houve alterações significativas nesses fatores, sugerindo que essa percentagem seja a ideal para obter tais benefícios.

Em suma, os resultados deste estudo reforçam a viabilidade e eficiência do uso de borracha triturada como um componente na mistura de areia para aplicações na Engenharia Civil, contribuindo assim para a redução do impacto ambiental causado pelo descarte de pneus em fim de vida. Além disso, os resultados obtidos fornecem informações importantes sobre o comportamento mecânico das misturas, o que pode auxiliar em futuros projetos e iniciativas relacionadas com o uso sustentável de resíduos de borracha.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Sem dúvida que a realização desta dissertação levanta questões importantes sobre o comportamento das misturas de solo com borracha e é importante ter em consideração que esta investigação ainda não está concluída.

Com base nos resultados obtidos, sugere-se alguns desenvolvimentos futuros para complementar o estudo realizado.

Primeiramente, é fundamental realizar mais ensaios contemplando diferentes percentagens de borracha, abrangendo valores entre 10% e 30%, e variando as tensões de confinamento. Essas análises adicionais são necessárias para reduzir a incerteza presente nas misturas e fornecer mais dados para o cálculo dos parâmetros de rigidez e resistência. Além disso, esses ensaios permitirão uma análise mais detalhada sobre a possível existência de coesão efetiva resultante da adição de borracha.

Outro aspeto relevante é a realização de ensaios CSS saturados, os quais serão úteis para comparação com os ensaios realizados em condições secas. Essa comparação ajudará a entender se há diferenças significativas entre os resultados dos ensaios CSS saturados e secos, fornecendo *insights* valiosos sobre o comportamento das misturas de solo com borracha sob diferentes condições de saturação.

Para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados, é importante também considerar a repetição dos ensaios, aumentando o tamanho da amostra para reduzir a possibilidade de erros experimentais e garantir a robustez dos resultados obtidos.

Por fim, para enriquecer ainda mais a investigação, sugere-se explorar outras propriedades mecânicas das misturas, como o comportamento a longo prazo, a resistência à fadiga ou a deformação permanente, contribuindo para uma análise mais abrangente do desempenho das misturas de solo com borracha.

A consideração e implementação das sugestões de desenvolvimento futuro irão aprimorar o estudo realizado, fornecendo resultados mais completos e confiáveis sobre o comportamento das misturas de solo com borracha, bem como sua aplicabilidade e benefícios em aplicações de Engenharia Civil.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AbdelRazek, Ahmed; El-Sherbiny, Rami M; Lotfi, Hani A - Mechanical properties and time-dependent behaviour of sand-granulated rubber mixtures. *Geomechanics and Geoengineering*. Vol. 13. n.º 4 (2018). p. 288-300. ISSN: 1748-6025
- Ahmed, Imtiaz - Laboratory study on properties of rubber-soils. Purdue University, 1993. ISBN: 9798208018798
- Amer, MI; Kovacs, WD; Aggour, MS - Cyclic simple shear size effects. *Journal of geotechnical engineering*. Vol. 113. n.º 7 (1987). p. 693-707. ISSN: 0733-9410
- Ashmawy, AK; Salgado, Rodrigo; Guha, Soumitra; Drnevich, VP - Soil damping and its use in dynamic analyses. (1995). ISSN:
- Atkinson, JH - Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and-in-situ tests. General report. 1991. ISBN/ISSN:
- Boominathan, A; Hari, S - Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 22. n.º 9-12 (2002). p. 1027-1033. ISSN: 0267-7261
- Bressi, Sara; Fiorentini, Nicholas; Huang, Jiandong; Losa, Massimo - Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: State of the art and statistics. *Coatings*. Vol. 9. n.º 6 (2019). p. 384. ISSN: 2079-6412
- Castelló, JDB - El Tratamiento de Suelos Arcilloso co Cal. Fundamentos técnicos y Diseño de Mezclas. TRATCICA-Seminário de tratamneto de solos com cal e cimento. (2008). ISSN:
- Castro, Gonzalo; Poulos, Steve J - Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. Vol. 103. n.º 6 (1977). p. 501-516. ISSN: 0093-6405
- Castro, Joana Filipa Araújo - Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina. (2015). ISSN:
- Cristelo, Nuno - Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. 2001. ISBN/ISSN:
- de Matos Fernandes, Manuel - Mecânica dos solos. Conceitos e Princípios Fundamentais. Vol. 1. (2006). p. 3. ISSN:
- dos Santos, Jaime Alberto - Caracterização de solos através de ensaios dinâmicos e cíclicos de torção: aplicação ao estudo do comportamento de estacas sob acções horizontais estáticas e dinâmicas. 1999. ISBN:
- Ecemis, Nurhan; Valizadeh, Hadi; Karaman, Mustafa - Sand-granulated rubber mixture to prevent liquefaction-induced uplift of buried pipes: a shaking table study. *Bulletin of Earthquake Engineering*. Vol. 19. (2021). p. 2817-2838. ISSN: 1570-761X
- Ehsani, Mahdi; Shariatmadari, Nader; Mirhosseini, SM - Shear modulus and damping ratio of sand-granulated rubber mixtures. *Journal of Central South University*. Vol. 22. (2015). p. 3159-3167. ISSN: 2095-2899
- Fahey, Martin - Deformation and in situ stress measurement. CRC Press/Balkema, 1998. ISBN/ISSN:
- Feng, Zheng-Yi; Sutter, Kevin G - Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures. *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 23. n.º 3 (2000). ISSN: 0149-6115
- Fernandes, Manuel de Matos - Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais. Volume I, 2ª Edição, FEUP, Porto. (2011). ISSN:
- Ferreira, Cristiana Maria da Fonseca - Implementação e aplicação de transdutores piezoelétricos na determinação de velocidades de ondas sísmicas em provetes: avaliação da qualidade de amostragem em solos residuais. (2003). ISSN:
- Feuerharmel, Marcos Roberto - Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. (2000). ISSN:
- Flavigny, E; Desrues, J; Palayer, B - Note technique: le sable d'Hostun «RF». *Revue française de géotechnique*. n.º 53 (1990). p. 67-70. ISSN: 0181-0529

- Hardin, Bobby O - The nature of damping in sands. *Journal of the soil mechanics and foundations division*. Vol. 91. n.º 1 (1965). p. 63-97. ISSN: 0044-7994
- Hazarika, H; Yasuhara, K; Hyodo, M; Karmokar, AK; Mitarai, Y - Mitigation of earthquake induced geotechnical disasters using a smart and novel geomaterial. The International Association for Earthquake Engineering (IAEE) Tokyo, Japan, 2008. ISBN/ISSN:
- Hong, Y; Yang, Z; Orense, RP; Lu, Y - Investigation of sand-tire mixtures as liquefaction remedial measure. 2015. ISBN/ISSN:
- Huang, Baoshan; Li, Guoqiang; Pang, Su-Seng; Eggers, John - Investigation into waste tire rubber-filled concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 16. n.º 3 (2004). p. 187-194. ISSN: 0899-1561
- Inaudi, Jose A; Kelly, James M - Linear hysteretic damping and the Hilbert transform. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 121. n.º 5 (1995). p. 626-632. ISSN: 0733-9399
- Kaneko, Takashi; Orense, Rolando P; Hyodo, Masayuki; Yoshimoto, Norimasa - Seismic response characteristics of saturated sand deposits mixed with tire chips. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Vol. 139. n.º 4 (2013). p. 633-643. ISSN: 1090-0241
- Karl, Lutz - Dynamic soil properties out of SCPT and bender element tests with emphasis on material damping. (2005). ISSN:
- Liu, HS; Mead, JL; Stacer, RG - Environmental effects of recycled rubber in light-fill applications. *Rubber Chemistry and Technology*. Vol. 73. n.º 3 (2000). p. 551-564. ISSN: 1943-4804
- Marcos, Filipe Afonso Barbosa - Estudo do comportamento dinâmico de misturas de solos com resíduos de borracha. (2016). ISSN:
- Matos Fernandes, Manuel - Mecânica dos Solos-Introdução à Engenharia Geotécnica. FEUP edições, Porto. (2011). ISSN:
- Matos Fernandes, Manuel - Mecânica dos solos-Introdução à engenharia geotécnica. FEUP edições, Porto. (2015). ISSN:
- Moreira, Abílio Renato Matos Oliveira - Experimental determination of soil damping: application to the residual soil from Porto granite. Universidade do Porto (Portugal), 2015. ISBN/ISSN:
- Motta, Thales Goretti - Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras naturais. (2018). ISSN:
- Myhre, Marvin; MacKillop, Duncan A - Rubber recycling. *Rubber Chemistry and Technology*. Vol. 75. n.º 3 (2002). p. 429-474. ISSN: 1943-4804
- Neaz Sheikh, M; Mashiri, MS; Vinod, JS; Tsang, Hing-Ho - Shear and compressibility behavior of sand-tire crumb mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 25. n.º 10 (2013). p. 1366-1374. ISSN: 0899-1561
- Observador - Maior cemitério de pneus do mundo está a arder há pelo menos dois dias no Kuwait. <https://observador.pt/2021/08/06/maior-cemiterio-de-pneus-do-mundo-esta-a-arder-ha-pelo-menos-dois-dias-no-kuwait/>: 2021. ISBN/ISSN:
- Park, Dugkeun - Evaluation of dynamic soil properties: strain amplitude effects on shear modulus and damping ratio. Cornell University, 1998. ISBN: 059184169X
- Pinto, João Pedro da Costa - Determinação Experimental do Amortecimento de um Solo: Desenvolvimento de uma ferramenta de aplicação laboratorial. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016. ISBN/ISSN:
- Publico - Kuwait vai transformar o maior "cemitério de pneus" do mundo numa cidade. <https://www.publico.pt/2021/09/01/p3/fotogaleria/kuwait-vai-transformar-maior-cemiterio-pneus-mundo-numa-cidade-406687>: Publico, 2021. ISBN/ISSN:
- Reddy, Krishna R; Stark, Timothy D; Marella, Aravind - Beneficial use of shredded tires as drainage material in cover systems for abandoned landfills. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. Vol. 14. n.º 1 (2010). p. 47-60. ISSN: 1090-025X
- Rio, Joao Filipe Meneses Espinheira - Advances in laboratory geophysics using bender elements. University of London, University College London (United Kingdom), 2006. ISBN: 1303402203
- Robertson, PK; Fear, CE - Soil liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT. 1996. ISBN/ISSN:
- Rodrigues, Carlos; Amoroso, Sara; Viana da Fonseca, António; Cruz, Nuno - ESTUDO DA RISCO DE LIQUEFAÇÃO DAS AREIAS DE AVEIRO A PARTIR DE ENSAIOS SCPTU E SDMT STUDY OF LIQUEFACTION RISK OF AVEIRO SANDS FROM SCPTU AND SDMT TESTS. (2014). ISSN:
- Sanches, Sara Inês Diegues Pimentel - Reforço de solos moles de fundação de aterro em deep soil mixing: modelação de caso de estudo. (2012). ISSN:

- Santamarina, J Carlos; Klein, A; Fam, Moheb A - Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring. *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 1. n.º 2 (2001). p. 130-130. ISSN: 1439-0108
- Shiraishi, Shunta - Method for preventing seismic liquefaction of ground in urbanized area and facilities used in this method. Google Patents, 2006. ISBN/ISSN:
- Shu, Xiang; Huang, Baoshan - Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*. Vol. 67. (2014). p. 217-224. ISSN: 0950-0618
- Siddika, Ayesha; Al Mamun, Md Abdullah; Alyousef, Rayed; Amran, YH Mugahed; Aslani, Farhad; Alabduljabbar, Hisham - Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*. Vol. 224. (2019). p. 711-731. ISSN: 0950-0618
- Skempton, AW - The pore-pressure coefficients A and B. *Geotechnique*. Vol. 4. n.º 4 (1954). p. 143-147. ISSN: 0016-8505
- Sladen, JA; D'hollander, RD; Krahn, J - The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian geotechnical journal*. Vol. 22. n.º 4 (1985). p. 564-578. ISSN: 0008-3674
- Torretta, Vincenzo; Rada, Elena Cristina; Ragazzi, Marco; Trulli, Ettore; Istrate, Irina Aura; Cioca, Lucian Ionel - Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste management*. Vol. 45. (2015). p. 152-160. ISSN: 0956-053X
- Tsuchida, H - Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. 1970. ISBN/ISSN:
- Union, Council of the European - Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. (1999). ISSN:
- Viana da Fonseca, A; Ferreira, C - Bender-elements como técnicas laboratoriais excelentes para avaliação de parâmetros geotécnicos referenciais. 2002. ISBN/ISSN:
- Warith, MA; Evgin, E; Benson, PAS - Suitability of shredded tires for use in landfill leachate collection systems. *Waste Management*. Vol. 24. n.º 10 (2004). p. 967-979. ISSN: 0956-053X
- Wood, David Muir - Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge university press, 1990. ISBN: 0521337828