



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

TESE DE DOUTORADO

**“CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE
MATERIAIS GRANULARES E RESPOSTAS
CARACTERÍSTICAS A
PULSOSULTRASSÔNICOS.”**

ALUNA: Fernanda Vescovi Gonçalves.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Adilson de Castro.



Volta Redonda

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA

FERNANDA VESCOVI GONÇALVES

**“CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE
MATERIAIS GRANULARES E RESPOSTAS
CARACTERÍSTICAS DE PULSO ULTRASSÔNICO”.**

Área de Concentração: Processamento e Caracterização de Materiais

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Ph.D. Dr. José Adilson de Castro

Volta Redonda
2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM
Gerada com informações fornecidas pelo autor

G635c Gonçalves, Fernanda Vescovi
Correlações entre Propriedades de Materiais Granulares e Respostas Características a Pulsos Ultrassônicos. / Fernanda Vescovi Gonçalves ; José Adilson de Castro, orientador. Volta Redonda, 2020.
141 f. : il.

Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEM.2020.d.11712303708>

1. Ultrassom. 2. Solo. 3. Porosidade. 4. Propriedade do material. 5. Produção intelectual. I. Castro, José Adilson de, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. III. Título.

CDD -

FERNANDA VESCOVI GONÇALVES

**CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE MATERIAIS GRANULARES E
RESPOSTAS CARACTERÍSTICAS DE PULSO ULTRASSÔNICO.**

Aprovada em 30 de julho de 2020.

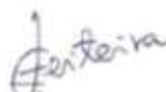
BANCA EXAMINADORA



Prof. Jose Adilson de Castro -UFF (Presidente)



Prof. Ladário da Silva -UFF (Examinador Interno)



Prof. José Flavio Silveira Feiteira -UFF (Examinador Interno)



Prof. Marcelo Costa Cardoso – UFRJ (Examinador Externo)



Prof. David Vilas Boas de Campos -UFRRJ/Embrapa (Examinador Externo)

Volta Redonda
2020

*A minha doce Carolina
e ao meu querido Thiago.
Com todo o meu amor.*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao Professor Ph.D. Dr. José Adilson de Castro, por acreditar nesta pesquisa, por sua orientação e pela amizade. Agradeço, também, a todos os Professores da Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e em Engenharia Mecânica, pelo conhecimento transmitido, ao longo do Curso.

Ao Técnico de Laboratório, Bonifácio, por sempre ajudar e pelos conhecimentos práticos compartilhados. A minha gratidão aos Amigos e Colegas da Pós-graduação, em especial, ao Duílio.

Agradeço também, ao Centro Universitário de Barra Mansa, pela disponibilização dos Laboratórios; e, principalmente, pelo incentivo e apoio. À Universidade Federal Fluminense, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte técnico e material. À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, ao Departamento de Geociências; e, ao Laboratório de Mapeamento Geotécnico, em especial ao Professor José Miguel Peters Garcia.

Aos meus Pais, que me ensinaram a ter perseverança e resiliência, a minha eterna gratidão. Aos meus queridos Irmãos, Sobrinhos e Amigos, por alegrarem os meus dias. À minha Filha, Carolina, por me ensinar todos os dias a beleza da vida; e, ao meu Thiago, pela paciência, pelo suporte, carinho e companheirismo, durante toda essa jornada.

Por fim, agradeço a Deus, que colocou todas essas pessoas em meu caminho; permitindo a realização desta Tese de Doutorado.

RESUMO

O Ensaio de Ultrassom é indispensável na Indústria do Aço e, sua utilização, vem ganhando adeptos para análise materiais cerâmicos, madeiras, concreto e rochas. Ao se tratar do solo, os esforços são grandes para entendimento do comportamento, características e propriedades através de parâmetros que empregam a velocidade de propagação de onda. No entanto, pouco se discute a respeito das características das ondas ultrassônicas no domínio do tempo e da frequência. Assim, este trabalho utilizou o Ensaio de Ultrassom em amostras de areias saturadas, argila de baixa e alta plasticidade, compactadas com diferentes valores de umidade; e, misturas de areias e finos compactadas com diferentes energias. As leituras ultrassônicas foram realizadas na técnica da Transparência, com transdutores de 50 kHz e na técnica do Pulso Eco, com transdutor de 3,5 MHz. Analisou-se a amplitude máxima, o coeficiente de amortecimento, frequência dominante e a velocidade do pulso ultrassônico. Os resultados apresentam a possibilidade correlação entre o índice de vazios, a amplitude máxima, o coeficiente de amortecimento, a frequência dominante e a velocidade do pulso ultrassônico para diferentes tipos de solos. Há também a identificação de frequências características e de zonas de transição. Portanto, as novidades do presente estudo são, principalmente, o desenvolvimento de uma técnica viável para investigar o índice de vazios usando medidas diretas das características das ondas ultrassônicas.

Palavras-chave: Ultrassom, Porosidade, Solos, Propriedade do Material.

ABSTRACT

The Ultrasound Test is indispensable in the Steel Industry and, its use, has been gaining adepts for analysis ceramic materials, wood, concrete and rocks. When dealing with the soil, great efforts are made to understand its behavior, characteristics, and properties through parameters that employ the wave propagation speed. However, little is discussed about the characteristics of ultrasonic waves in the time and frequency domain. Thus, this work used the Ultrasound Test on samples of saturated sands, low and high plasticity clay, compacted with different moisture values; and mixtures of sand and fines compacted with different energies. The measurement were performed using the transmit and receive technique with 50 kHz transducers and the Pulse-Echo technique with 3.5 MHz transducers. The maximum amplitude, damping coefficient, dominant frequency, and ultrasonic pulse velocity were analyzed. The results presented the use of the characteristics of the ultrasonic pulse in the time and frequency domain as an important tool to identify moisture and estimate void ratio, as well as to obtain the best resistance and stability for compacted soils. Thus, this work contributes in a relevant way to expand the interpretation of the ultrasonic spectrum given the geotechnical properties of high- and low-plasticity soils through the transmit and receive and Pulse-Echo ultrasonic techniques. We newly determine the granular compaction characteristics using obtained correlations with the ultrasonic wave measured parameters.

Keywords: Ultrasound, Porosity, Material Property, Soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Influência do Arranjo das Partículas do Solo na sua Compacidade. Em (a), Porosidade Igual a 0,2146. Em (b), Porosidade Igual a 0,0931. (Neves, 2009).....	25
Figura 2: Influência do Arranjo das Partículas do Solo na sua Compacidade (3D). Em (a), Porosidade Igual a 0,4764. Em (b), Porosidade Igual a 0.2595. (Neves, 2009).	25
Figura 3: Misturas de Argila com Areia e os Respectivos Comportamentos de seus Grãos, durante a Compressão. (Cunha, 2012)	30
Figura 4 - Curva de Compactação (Das, 2014).....	31
Figura 5 - Curva de Compactação e Curva de Saturação (Caputo e Caputo, 2015)..	32
Figura 6 - Efeito da Energia de Compactação sobre a Compactação de uma Argila Arenosa. Das e Sobhan (2014).	33
Figura 7 - Efeitos da Compactação em Estruturas de Solos Argilosos. Das e Sobhan (2014).	34
Figura 8: Exemplo do Formato da Onda de Ultrassom, após a Passagem pelo Concreto; Apresentando Dispersão. (Adaptado Quiviver et al., 2012).....	38
Figura 9: Parâmetros Seleccionados, Obtidos pelo Formato da Onda de Ultrassom, no Domínio do Tempo – Onda, Obtida, por meio de Leitura, Realizada na Lateral de uma Placa de Concreto Sã. (Carelli, 2014).	39
Figura 10: Espectro de Frequência e Exemplo de Parâmetros Avaliados (Carelli, 2014).....	39
Figura 11 - Comparação entre Movimentos com Tipos Diferentes de Amortecimento (RAO, 2009).	41
Figura 12: Exemplo de Curva do Sistema de Variações da Velocidade para o Sub Amortecido. (Correa, 2010).....	43
Figura 13: Resumo Esquemático da Metodologia.	47
Figura 14: Amostra de Areia Saturada. Em (a) Vista Superior da Amostra de Areia Saturada Moldada em Cápsula de Alumínio. Em (b) Amostra de Areia Saturada, Fechada, em Cápsula de Alumínio.	48
Figura 15: Amostras Compactadas com Diferentes Porcentagens de Finos.....	50
Figura 16: Equipamento de Ultrassom Utilizado.....	51
Figura 17: Esquematização do Sistema Ultrassônico para o Método da Transparência (Ferronato, 2016).....	52

Figura 18: Bancada de Realização das Medições com o Sistema de Ultrassom.	52
Figura 19: Tela do Osciloscópio (Ferronato, 2016).....	54
Figura 20: Imagem do Algoritmo em MatLab e a Exibição do Formato de Onda. Adaptado de Ferronato (2016).....	55
Figura 21: Formato de Onda e sua Envoltória para um Solo Granular Saturado, com Índice de Vazios (e) de 0,84.	57
Figura 22: Imagem, no MEV, da Areia. Medidas e Formato Arredondado.	58
Figura 23: Curva Granulométrica das Areias, utilizada, neste Trabalho.	59
Figura 24: Imagem, no MEV, dos Materiais de Granulometria Fina. Em (a) de Baixa Plasticidade; e, em (b) e (c) Alta Plasticidade.	60
Figura 25: EDS Material de Baixa Plasticidade.....	60
Figura 26: Curva de Limite de Liquidez para o Solo de Baixa e Alta Plasticidade...	61
Figura 27: Curva de Compactação do Solo Fino de Baixa Plasticidade.....	62
Figura 28: Microscopia Ótica (50x) para as Amostras, com 10% (a), 30% (b), 50% (c), 80% (d) e 100% (e) de Finos. Em (f), Amostra, com 100% de Finos, com Amostra Úmida, no dia da Compactação. Energia de Compactação Normal.....	63
Figura 29: Comparação entre Mistura, com 50% de Finos Compactados com Energia Normal (a) e Energia Modificada (b).	65
Figura 30: Ensaio de Compressão Simples para Misturas de Areia e Finos, Compactados em Energia Normal.	65
Figura 31: Correlação entre a Resistência à Compressão Simples e à % de Finos para Misturas de Areia e Finos.....	66
Figura 32: Formato de Onda no Domínio do Tempo. Método da Transparência para Areias Saturadas, com $D_{50} = 0,40\text{mm}$. Em (a) $e = 0,56$; (b) $e = 0,64$; (c) $e = 0,74$; (d) $e =$ $0,84$; (e) $e = 0,92$	67
Figura 33: Relação entre Índice de Vazios e Coeficiente de Amortecimento.	69
Figura 34: Relação entre Índice de Vazios e Amplitude para Solos Arenosos.....	70
Figura 35: Variação entre a Média da Frequência Dominante e o Índice de Vazios.	71
Figura 36: Variação do Índice de Vazios e a Média da Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU).	73
Figura 37: Variação da Compacidade Relativa (C_r) e a Média da Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU).	73

Figura 38: Correlação Estatística entre Coeficiente de Amortecimento, Amplitude e Compacidade Relativa. Em (a) $D_{50} = 0,4$ mm, em (b) $D_{50} = 1,00$ mm e em (c) $D_{50} = 1,15$ mm. 75

Figura 39: Formato de Onda, no Domínio do Tempo, para Solo Fino, de Baixa Plasticidade. Método da Transparência. Um dia de Compactação. Em (a) $w = 21\%$; (b) $w = 24,5\%$ (umidade ótima); (c) $w = 27\%$; (d) $w = 30\%$; (e) $w = 35\%$; (f) $w = 40\%$ 77

Figura 40: Correlação entre a Média da Amplitude e a Umidade para Solos de Baixa Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e da Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação. 79

Figura 41: Correlação entre a Média da Amplitude e a Umidade para Solos de Alta Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação. 80

Figura 42: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento e a Umidade para Solos de Baixa Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação. 81

Figura 43: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento e a Umidade para Solos de Alta Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). 82

Figura 44: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento e o Índice de Vazios para Solos de Baixa Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação. 83

Figura 45: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento e o Índice de Vazios para Solos de Alta Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação. 83

Figura 46: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento, Umidade e Índice de Vazios para Solos de Baixa Plasticidade. Método da Transparência. 84

Figura 47: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento, Umidade e Índice de Vazios para Solos de Alta Plasticidade. Método da Transparência. 85

Figura 48: Relação entre Frequência Dominante e Umidade para Solos Finos de Baixa Plasticidade. Técnica da Transparência. 85

Figura 49: Relação entre Frequência Dominante e Umidade para Solos Finos de Alta Plasticidade. Técnica da Transparência. 86

Figura 50: Relação entre Frequência Dominante e Índice de Vazios para Solos Finos de Baixa Plasticidade pela Técnica da Transparência.	87
Figura 51: Relação entre Frequência Dominante e Índice de Vazios para Solos Finos de Alta Plasticidade pela Técnica da Transparência.	88
Figura 52: Variação da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função da Umidade para Solo de Baixa Plasticidade. Ensaio Realizado, no Dia da Compactação (1D); e, Após Secagem Completa (Seco). Técnica da Transparência.....	89
Figura 53: Variação da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função da Umidade para Solo com Alta Plasticidade, no Dia da Compactação (1D); e, após Secagem Completa (Seco). Técnica da Transparência.....	89
Figura 54: Variação da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função do Índice de Vazios para as Amostras de Baixa Plasticidade. Ensaio Realizado, no Dia da Compactação (1D) e Após Secagem Completa (Amostras Secas). Técnica da Transparência.	90
Figura 55: Variação da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função do Índice de Vazios para as Amostras de Alta Plasticidade. Ensaio Realizado, no Dia da Compactação (1D) e Após Secagem Completa (Seco). Técnica da Transparência.	91
Figura 56: Correlação entre Média do Coeficiente de Amortecimento, VPU (m/s) e Índice de Vazios para Solos de Baixa Plasticidade. Técnica TR.	92
Figura 57: Correlação entre Média do Coeficiente de Amortecimento, VPU (m/s) para as Amostras Secas e Índice de Vazios para Solos de Baixa Plasticidade. Técnica TR.....	92
Figura 58: Formato de Onda no Domínio do Tempo e Envoltória da Curva de Amortecimento para Misturas com (a) 10% de Finos, (b) 50% Finos e (c) 100% Finos. Técnica da Transparência. Amostras Úmidas.	95
Figura 59: Variação da Média do Coeficiente de Amortecimento com a porcentagem de Finos Utilizando as Técnicas de Pulso Eco (PE) e Transparência (TR) para Amostras Úmidas Compactadas com Energia Normal (N), Intermediária (I) e Modificada (M).	96
Figura 60: Variação da Média do Coeficiente de Amortecimento em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação, para as Amostras, em 3 dias Compactadas (3d) e após Secagem Completa (30d). N – Energia de Compactação Normal, I – Energia de Compactação Intermediária e M – Energia de Compactação Modificada. Técnica Transparência.....	97

Figura 61: Correlação entre Coeficiente de Amortecimento, Porcentagem de Finos e Resistência à Compressão Simples (kN/cm²) para as Amostras Compactadas com Energia Normal..... 99

Figura 62: Correlação Estatística entre a Média do Coeficiente de Amortecimento, a Porcentagem de Finos e o Índice de Vazios, em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação do Índice de Vazios para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal; (e) Energia Intermediária; e, (f) Modificada. Medição após Amostras Secas..... 102

Figura 63: Variação da Média da Amplitude Máxima em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação, para as Amostras, com 3 Dias de Compactação; e, após Secagem Completa (30d). N – Energia de Compactação Normal, I – Energia de Compactação Intermediária e M – Energia de Compactação Modificada. Técnica Transparência..... 103

Figura 64: Correlação entre Índice de Vazios, Média da Amplitude Máxima e Porcentagem de Finos em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação do Índice de Vazios, para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 Dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal, (e) Energia Intermediária e (f) Modificada. Medição após Amostras Secas..... 105

Figura 65: Variação da Média da Frequência Dominante em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação, para as Amostras, com 3 dias de Compactação (3d) e após Secagem Completa (30d). N – Energia de Compactação Normal, I – Energia de Compactação Intermediária e M – Energia de Compactação Modificada. Técnica Transparência..... 106

Figura 66: Variação da Média da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação, para as Amostras, com 3 Dias de Compactação (3d) e após Secagem Completa (30d). N – Energia de Compactação Normal, I – Energia de Compactação Intermediária e M – Energia de Compactação Modificada. Técnica Transparência..... 107

Figura 67: Correlação entre Índice de Vazios, Velocidade do Pulso Ultrassônico e Porcentagem de Finos, em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação

do Índice de Vazios para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 Dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal, (e) Energia Intermediária e (f) Modificada. Medição após Amostras Secas. 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Valores Típicos de Índice de Vazios e Peso Específicos de Solos Granulares (Adaptado de Sowers, 1979).	24
Tabela 2: Limites de Atterberg dos Minerais Argílicos (Adaptado de Lambe e Whitman, 1969).	27
Tabela 3- Energia de Compactação. Adaptado de NBR 7182 (2016).	31
Tabela 4: Características Geotécnicas dos Solos de Baixa e Alta Plasticidade, utilizados neste Trabalho.	62
Tabela 5: Valores do Coeficiente de Permeabilidade para as Misturas de Solo, utilizadas neste Trabalho.	64
Tabela 6: Valores Referentes ao Peso Específico Seco Máximo, Umidade Ótima e Índice de Vazios, para as Energias com Compactação, utilizadas neste Trabalho.	64
Tabela 7: Variação Média do Coeficiente de Amortecimento e Índice de Vazios para as Areias, com $D_{50} = 1.15\text{mm}$	68
Tabela 8: Valores Referentes do Índice de Vazios e Média do Coeficiente de Amortecimento; incluindo o Desvio Padrão (DP) para as Areias, estudadas neste Trabalho.	68
Tabela 9: Variação da Média da Amplitude Máxima com o Índice de Vazios	70
Tabela 10: Valores da Velocidade do Pulso Ultrassônico com a Variação do Diâmetro Representativo e Índice de Vazios.	72
Tabela 11: Variação da Média da Amplitude Máxima em Função da Umidade para Solo de Baixa Plasticidade.	78
Tabela 12: Variação da Média da Amplitude Máxima em Função da Umidade para Solo de Alta Plasticidade.	78
Tabela 13 : Variação da Média do Coeficiente de Amortecimento em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação. Ensaio Realizado 3 Dias Após a Compactação.	96
Tabela 14: Variação da Média do Coeficiente de Amortecimento em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação. Ensaio Realizado Após Amostras Secas.	97
Tabela 15: Variação do Índice de Vazios em Função da Energia de Compactação.	100

LISTA DE SÍMBOLOS

C_c = Coeficiente de Amortecimento Crítico

D_{50} = Diâmetro Representativo

e = Índice de Vazios

G_s = Peso específico dos Grãos

k = constante de propagação

K_s = Coeficiente de Permeabilidade

K = Constante de Compressibilidade do Material

p_* = Constante de Amplitude

t = Tempo

VPU = Velocidade do Pulso Ultrassônico

V_v = Volume de Vazios

V_t = Volume Total

w = Umidade

w_{otm} = Umidade Ótima de Compactação

$\gamma_{seco\ max}$ = Peso Específico Seco Máximo

ρ_0 = Densidade Média

ω = Frequência angular da onda

ω_a = Frequência Natural Amortecida

ω_n = Frequência Natural do Sistema Não Amortecido

ω_d = Frequência Natural de Amortecimento do Sistema

ζ = Fator ou Coeficiente de Amortecimento

η = Porosidade

Ψ = Decremento Logaritmo

SUMÁRIO

1. Introdução.....	19
1.1. Objetivo	21
1.1.1. Objetivos Específicos.....	21
2. Revisão Bibliográfica.....	23
2.1. Materiais Granulares - Areias	23
2.2. Materiais Finos	26
2.3. Misturas de Areias e Finos.....	28
2.4. Compactação.....	30
2.5. O Ultrassom	35
2.5.1. Ondas de Ultrassom	35
2.5.2. Análise do Formato de Onda.....	37
2.5.3. Amortecimento e Atenuação da Onda Ultrassônica.	40
2.6. O Ultrassom no Solo.....	43
3. Materiais e Métodos	47
3.1. Caracterização Geotécnica dos Materiais e Montagem das Amostras	47
3.1.1. Materiais Granulares - Areias	48
3.1.2. Materiais Finos.....	49
3.1.3. Misturas de Areia e Finos	50
3.2. Ensaio de Ultrassom	51
3.3. Análise dos Dados	54
4. Resultados e Discussões.....	58
4.1. Características Geotécnicas dos Materiais.....	58
4.1.1. Materiais Granulares - Areias	58
4.1.2. Materiais Finos.....	59
4.1.3. Misturas de Areias e Finos.....	62
4.2. Ultrassom em Materiais Granulares Saturados.....	66
4.2.1. Coeficiente de Amortecimento	68
4.2.2. Amplitude.....	69
4.2.3. Frequência Dominante	71
4.2.4. Velocidade do Pulso Ultrassônico	72
4.3. Ultrassom em Materiais Finos	76

4.3.1. Amplitude e Umidade	78
4.3.2. Amplitude e Índice de Vazios	79
4.3.3. Coeficiente de Amortecimento e Umidade	81
4.3.4. Coeficiente de Amortecimento e Índice de Vazios	82
4.3.5. Frequência Dominante, Umidade e Índice de Vazios	85
4.3.6. Velocidade do Pulso Ultrassônico e Umidade	88
4.3.7. Velocidade do Pulso Ultrassônico e Índice de Vazios	90
4.4. Ultrassom em Misturas de Areia e Finos	94
4.4.1. Coeficiente de Amortecimento e Porcentagem de Finos.	95
4.4.2. Coeficiente de Amortecimento e Índice de Vazios	99
4.4.3. Amplitude Máxima, Porcentagem de Finos e Índice de vazios.	103
4.4.4. Frequência dominante e Porcentagem de finos	106
4.4.5. VPU, Porcentagem de Finos e Índice de Vazios.	107
5. Conclusão	113
6. Sugestões para trabalhos futuros	114
7. Referencias Bibliográficas	115
Anexo A	122
Anexo B	125
Anexo C	128
Anexo D	130
Anexo E	134
Anexo F	137

1. INTRODUÇÃO

O Ensaio de Ultrassom é, amplamente, utilizado na Indústria do Aço; e, conforme Andreucci (2014) constitui uma ferramenta indispensável para garantir a qualidade de peças de grandes espessuras, geometria complexa, de juntas soldadas e chapas. Nesse sentido, nota-se grande avanço e domínio da utilização do Ultrassom na Metalurgia, incluindo uma série de Normas Técnicas Brasileiras e dezenas de Normas Internacionais.

No entanto, diferentemente dos materiais produzidos em Indústrias, onde possuem as propriedades e características mecânicas controladas, o solo é um material complexo, com alta variabilidade, por ser resultado de processos de intemperismo dos mais variados tipos de rochas. Assim, muitos problemas na Geologia e na Engenharia Geotécnica envolvem a análise de sistemas heterogêneos complicados e de processos acoplados; como, processos termomecânicos, hidromecânicos e quimio-mecânicos. Esses problemas dependem, fortemente, de relações desenvolvidas por meio do trabalho experimental (BOUTIN *et al.*, 2011).

Os solos arenosos são importantes materiais de Engenharia utilizados, por exemplo, em barragens, represas e enrocamentos. São, ainda, os principais materiais encontrados em terreno natural coluvial de encostas. Portanto, a investigação da estrutura micro porosa pode fornecer informações importantes; tais como, a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade e a condutividade hidráulica. As argilas são materiais complexos, que possuem uma importante propriedade: a coesão. Assim, as misturas dos materiais, areia e argila, são, amplamente, encontradas na natureza e utilizados em obras de geotecnia; como, aterros, estradas, barragens de terra e barreiras impermeáveis.

Na construção dessas obras, é importante a utilização de um processo de densificação, chamado de Compactação; em que, por meio da redução do ar, busca-se a melhor estabilidade e a resistência nos solos; evitando, assim, possíveis recalques. O processo de compactação dos solos está presente na grande maioria das obras de Engenharia. Mitchell *et al.* (2005) destacam que a compressibilidade dos solos é, diretamente, influenciada pela quantidade dos solos finos. Segundo Boutin *et al.*, 2011, a umidade e a densidade relativa seca dependem, altamente, da natureza dos constituintes do solo; especialmente, dos minerais argílicos e suas proporções. Assim, depende diretamente da umidade, da densidade seca, da energia aplicada e do tipo de solos a ser compactado.

Os índices de vazios, que devem ser reduzidos em um processo de compactação, influenciam, diretamente, a microestrutura dos solos granulares; e, são dependentes da distribuição dos grãos. No entanto, a medição dos índices de vazios não é simples, conforme demonstrado nos trabalhos de El Ghoraiiby *et al.* (2020), Carey *et al.* (2019) e Bastidas *et al.* (2016). Logo, a identificação da fração de vazios, de forma rápida, não destrutiva e *in situ* se torna uma prática interessante.

Uma compactação ruim, segundo Weidinger *et al.* (2019) destacam, pode resultar em grandes deformações do solo, o que causará excesso de desvios na superfície do solo exigindo serviços de reparo. Fica claro, então, a importância do controle de compactação para as obras de Engenharia. No entanto, conforme Nagaraj *et al.* (2015) e Rocha *et al.* (2019), os ensaios laboratoriais de compactação levam tempo e esforços significativos; o que leva à busca por ensaios, técnica e economicamente, mais viáveis.

Frente aos bons resultados, obtidos pelo Ensaio de Ultrassom, em outras áreas da Ciência e dos problemas geotécnicos apresentados, uma linha de pesquisa se desenvolveu, dentro da Engenharia Geotécnica; utilizando o Ultrassom, agora, no material solo; com o objetivo de estabelecer correlações entre propriedades elásticas dinâmicas e propriedades estáticas; como resistência ao cisalhamento, densidade, grau de saturação, teor de umidade e limites de Atterberg. Assim, diversos Trabalhos foram publicados, como, por exemplo: Zimmer (2003), Mandal *et al.* (2016) e Pu *et al.* (2019), com objetivos de correlacionar as propriedades geotécnicas e a velocidade do pulso ultrassônico para solos granulares e misturas de solos. Contudo, conforme citado por Gheibi e Hedayat (2018), são grandes os esforços para o entendimento sobre o efeito da deformação das partículas do solo, por meio da velocidade de propagação da onda ultrassônica; mas, pouco se discute em relação às características das ondas ultrassônicas, no domínio do tempo e da frequência.

Assim, este Trabalho propõe o desenvolvimento de uma técnica viável, a fim de investigar os índices de vazios, a compactação; e, identificar as zonas de transição de solos; usando medições diretas das características das ondas ultrassônicas.

1.1. Objetivo

Desenvolver uma técnica viável a fim de investigar os índices de vazios, compactação e zonas de transição de solo não coesivo, coesivos e misturas; usando medições diretas das características das ondas ultrassônicas.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Encontrar uma consistência geral entre coeficiente de amortecimento e índice de vazios para os solos.
- Avaliar se o coeficiente de amortecimento é um parâmetro representativo da forma de onda e independente da técnica ultrassônica utilizada.
- Encontrar uma consistência geral entre amplitude máxima e índice de vazios do solos.
- Encontrar uma consistência geral entre amplitude, coeficiente de amortecimento e a umidade ótima de compactação.
- Identificar a zona de frequência característica; facilitando a análise de meios dominantes e zonas de transição.
- Avaliar se a velocidade do pulso ultrassônico para ondas de compressão varia com o diâmetro representativo do solo não coesivo (D_{50}).
- Avaliar se a velocidade do pulso ultrassônico para ondas de compressão longitudinal varia com os índices de vazios do solos e de energia de compactação.

1.2. Organização da Tese

Este Trabalho se organiza em sete Capítulos e seis Anexos. O Primeiro Capítulo, intitulado de Introdução, descreve, de forma breve, a problemática envolvida e a motivação para a realização desta Pesquisa. Este Capítulo, também, traz os objetivos, geral e específicos, os quais nortearam o desenvolvimento deste Trabalho.

O Segundo Capítulo, Revisão Bibliográfica, traz, de forma sucinta, a Revisão Bibliográfica, com um foco maior em Ultrassom em Materiais Granulares.

Em Materiais e Métodos, Capítulo 3, apresentam-se os materiais utilizados e os locais de obtenção; bem como, o planejamento para a montagem das amostras; e, realização dos ensaios; e, ainda, os equipamentos aplicados neste Trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões. Está subdividido por tipo de material granular; a começar por areias saturadas e a influencia da variação dos vazios, nas respostas características do pulso ultrassônico. Na sequência, apresentam-se os resultados obtidos na avaliação de dois tipos de materiais finos, com diferentes percentagens de umidade; e, as resposta ultrassônicas. Por fim, apresentam-se os resultados, comparando as diferentes respostas do Ensaio de Ultrassom às características dos materiais granulares, que são misturas de areias e finos; compactados em três energias de compactação diferentes.

Finalizando, no Capítulos 5, apresenta-se a conclusão desta Pesquisa; e, sugerem-se Pesquisas futuras. No Capítulo 7, encontram-se todas as Referências Bibliográficas, utilizadas para o desenvolvimento deste Trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais Granulares - Areias

As Areias ou Solos Não Coesivos, muitas vezes, chamados simplesmente de Solos Arenosos, são resultantes do intemperismo, principalmente o físico, de diversas rochas. Os tamanhos dos grãos variam de 0,06 a 2mm, de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995); possibilitando a classificação das areias em grossas (grãos entre 0,6 mm e 2,0 mm), médias (grãos entre 0,2 mm e 0,6 mm) e finas (grãos entre 0,06 mm e 0,2 mm).

Zhang e Li (2010) destacam que os Solos Arenosos são importantes materiais de Engenharia, utilizados em barragens, represas e enrocamentos. São, ainda, os principais materiais, encontrados em terreno natural coluvial de encostas. Portanto, a investigação da estrutura micro porosa, durante esses processos, pode fornecer informações importantes; tais como, a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade e a condutividade hidráulica (LOSS, 2012). Segundo Bicalho (2008), algumas das características mais importantes para a determinação do comportamento mecânico de um solo granular são o tamanho dos grãos, a forma das partículas, a distribuição granulométrica, a microestrutura, mineralogia e cimentação.

Os índices de vazios e a porosidade influenciam, diretamente, a microestrutura dos solos granulares; e, são dependentes da distribuição dos grãos. Esses índices são determinados, de forma indireta; e, são representados, respectivamente, pelas Equação 1 e Equação 2.

$$e = \frac{V_V}{V_s} \quad (1)$$

onde V_V é o volume de vazios e V_s o volume de partículas.

$$n = \frac{V_V}{V_t} \quad (2)$$

onde V_V é o volume de vazios e V_t o volume total da amostra.

Lambe e Whiman (1969) e Sowers (1979) apresentaram valores característicos do índice de vazios, máximo e mínimo, para solos granulares (Tabela 1). Segundo Loss (2012), a distribuição granulométrica tem uma influência direta no volume dos vazios do solo. Um solo bem graduado; ou seja, com vários tamanhos de grãos, apresentam menores valores de índice de vazios, máximo e mínimo; e, mais entrosamento (encaixe) entre os grãos; portanto, um maior ângulo de atrito macroscópico. Esses solos possuirão um melhor comportamento, em termos de resistência e compressibilidade, que solos, com granulometria uniforme.

Tabela 1 : Valores Típicos de Índice de Vazios e Peso Específicos de Solos Granulares (Adaptado de Sowers, 1979).

Descrição	Umidade	Índice de Vazios	
		Máximo	Mínimo
Areia uniforme subangular Gs = 2,67	Seca	0,85	0,45
	Saturada	0,85	0,45
Areia bem graduada subangular Gs = 2,67	Seca	0,75	0,35
	Saturada	0,75	0,35
Areia micácea, siltosa Gs = 2,70	Seca	1,25	0,80
	Saturada	1,25	0,80

Para Araujo (2017), a quantificação da distribuição dos tamanhos das partículas e dos parâmetros da forma das partículas é importante, na caracterização do solo granular; e, é, frequentemente, usada na estimativa das propriedades mecânicas e hidráulicas desses solos.

No caso das areias, que possuem como mineral predominante o quartzo, resulta em partículas equidimensionais, como cubos ou esferas, com baixa atividade superficial (PINTO, 2006). As propriedades, como índice de vazios, máximo e mínimo, parâmetros da resistência ao cisalhamento e compressibilidade, também, são influenciados pelo formato das partículas, conforme citado, em Das e Sobhan (2014).

O meio de transporte dos fragmentos de rochas, para formação dos mais variados solos, influenciam no formato das partículas (DAS e SOBHAN, 2014). Pequenas partículas de areia, localizadas próximas à rocha de origem, são, normalmente, muito angulares; diferentemente, das areias transportadas por rios, as quais apresentam forma mais arredondada. Quanto mais angulosos forem os grãos, maior será a resistência ao movimento relativo entre as partículas; já que existe um maior grau de encaixe entre eles,

do que entre grãos arredondados. Assim, o material formado por grãos angulosos possui um maior ângulo de atrito macroscópico (Bell (2007) *apud* Neves, (2009)).

O arranjo geométrico; ou seja, a disposição das partículas, também, influencia nas propriedades e nas características do solo (Figura 1e Figura 2).



Figura 1: Influência do Arranjo das Partículas do Solo na sua Compacidade. Em (a), Porosidade Igual a 0,2146. Em (b), Porosidade Igual a 0,0931. (Neves, 2009).

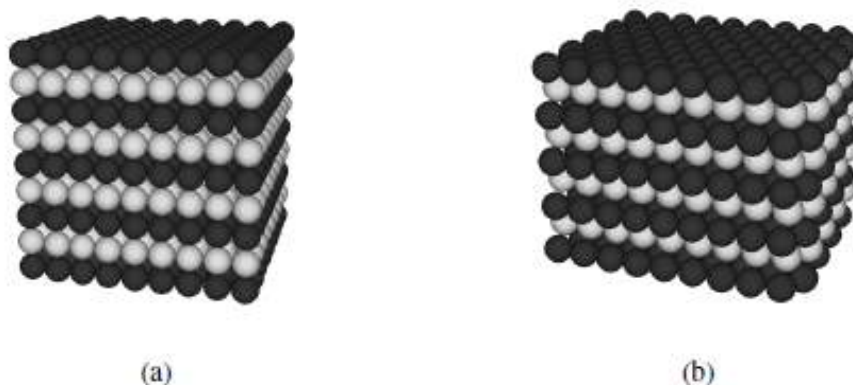


Figura 2: Influência do Arranjo das Partículas do Solo na sua Compacidade (3D). Em (a), Porosidade Igual a 0,4764. Em (b), Porosidade Igual a 0.2595. (Neves, 2009).

Segundo Neves (2009), o comportamento de um material granular, para um mesmo índice de vazios, pode se mostrar distinto, conforme o arranjo dos grãos. No entanto, a medição dos índices de vazios não é simples. El Ghoraiby *et al.* (2020) realizaram testes para medir os índices de vazios máximos e mínimos, na areia de Ottawa F65, com dois diferentes métodos. Um, baseado na ASTM D4253 e D4252; e, o outro método, proposto por Lade *et al.* (1998). Os resultados apontam uma ampla gama de variações entre os valores obtidos. Resultados semelhantes foram encontrados por Carey (2019). Bastidas (2016), também, relata essa variação nos valores dos índices de vazios, em função de diferentes tamanhos de moldes e na forma de executar o procedimento. Logo, nota-se a

necessidade de desenvolvimento de técnicas, capazes de identificar a fração de vazios, de forma rápida, não destrutiva e *in situ*.

2.2. Materiais Finos

O termo geral “finos” é utilizado, segundo a classificação universal, para designar as partículas de solo, que passam na peneira nº 200; ou seja, possuem tamanhos menores que 0,075mm. Portanto, podem ser constituídas de Siltes (menor que 0,06mm e maior que 0,002mm) e argilas (menor que 0,002mm). Loss (2012) destaca que esse tipo de solo, também, pode ser chamado de Matriz Argilosa; em que a sua classificação é baseada na plasticidade (ábaco de Casagrande). Destaca, ainda, que nem todo solo com partículas, menores que 0,075mm, é, necessariamente, constituído de material argílico. Neste Trabalho, Solos Finos e Matriz Argilosa possuem o mesmo significado; e, a sua classificação é baseada na plasticidade.

Segundo Das e Sobhan (2014), os Argilominerais são silicatos de alumínio complexos, compostos por duas unidades básicas: (1) tetraedro de sílica e (2) octaedro de alumina. Assim, podem-se dividir as argilas, em três grupos: as Caulinitas, as Ilitas e as Montmorilonitas.

As Caulinitas consistem em camadas repetidas de elementos de lâmina de sílica-gibbsita, em uma estrutura 1:1. As camadas são mantidas ligadas, por pontes de hidrogênio. As Ilitas consistem em lâminas de gibsitas, ligadas às folhas de sílicas – uma, na parte superior; e, outra, na parte inferior. As camadas são ligadas por íons de potássio (PINTO, 2006)

No caso das Montmorilonitas, tem-se uma estrutura semelhante a Ilitas; ou seja, uma lâmina de gibbsita entre duas lâminas de sílica. Os íons de potássio não são presentes, como, na Ilita; e, uma grande quantidade de água é atraída para os espaços entre as camadas. A estrutura das Montmorilonitas se caracteriza, por apresentar moléculas de água entre as unidades estruturais; e, assim, tal estrutura apresenta elevada expansibilidade e plasticidade (LOSS, 2012).

As partículas de argila carregam carga negativa, na superfície. Nas argilas secas, a carga negativa é equilibrada com cátions intercambiáveis, como Ca^+ , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ , ao redor de partículas, mantidas pela atração eletrostática. Quando a água é adicionada à

argila, esses cátions e alguns ânions flutuam em volta das partículas de argila. Essa configuração é chamada de Dupla Camada Difusa (DAS e SOBHAN, 2014).

Segundo Mitchell *et al.* (2005), a plasticidade, o potencial de expansão e a compressibilidade são, diretamente, influenciados pela quantidade de mineral argílico. Já, as características de permeabilidade e o ângulo de atrito diminuem, com o aumento da presença desse material. Destaca-se, também, que a compressibilidade dos solos é, diretamente, influenciada pela quantidade dos solos finos.

Segundo Boutin *et al.* (2011), a umidade e a densidade relativa seca dependem, altamente, da natureza dos constituintes do solo; especialmente, dos minerais argílicos e de suas proporções. Nota-se, então, que a presença de água altera, significativamente, o comportamento dos solos finos; e, portanto, é necessário que sejam definidos índices de referência, para que seja possível medir e avaliar o comportamento mecânico do solo. Segundo Lambe e Whitman (1969) e Mitchell *et al.* (2005), a determinação do teor de umidade, definindo os estados dos solos, entre sólido, plástico e líquido, dá-se, por meio dos Limites de Atterberg. A Tabela 2 apresenta valores típicos dos limites de Liquidez e Plasticidade, para alguns minerais argílicos.

Tabela 2: Limites de Atterberg dos Minerais Argílicos (Adaptado de Lambe e Whitman, 1969).

Mineral	Íon trocável	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Limite de Contração (%)
Montmorilonita	Na	710	54	656	9,9
	K	660	98	562	9,3
	Ca	510	81	429	10,5
	Mg	410	60	350	14,7
	Fe	140	75	65	10,3
Illita	Na	120	53	67	15,4
	K	120	60	60	17,5
	Ca	100	45	55	16,8
	Mg	95	46	49	14,7
	Fe	110	49	61	15,3
Caulinita	Na	53	32	21	26,8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24,5
	Mg	54	31	23	28,7
	Fe	59	37	22	29,2

Conforme explicitado, no item 2.1., o índice de vazios é um fator importante, pois muitos comportamentos mecânicos dependem desse índice. No entanto, sua determinação

para os solos coesivos, também, é difícil, conforme citado, por Burton et al. (2019), Fourie e Papageorgiou (2001) e Rochi e Coop (2014).

2.3. Misturas de Areias e Finos

Segundo (Boutin *et al.* (2011), Misturas de Areia e Argila são, amplamente, encontradas na natureza; e, utilizadas em obras de Geotecnia, como, aterro de estrada, barragens de terra e barreiras impermeáveis. Citam, ainda, que as propriedades dos materiais das Misturas de Areia e Argila dependem, altamente, da natureza dos constituintes; especialmente, da mineralogia das argilas e de suas proporções; assim, como, sobre a densidade relativa dos sólidos e a umidade.

Vários estudos vêm sendo realizados, ao longo dos anos, no sentido de classificar e determinar a fração de Finos, que determina o comportamento da Matriz do Solo. Conforme dito, anteriormente, neste Trabalho, a fração de Finos será determinada, por Argila e Silte; que são materiais, os quais passam na peneira número 200 (0,075mm).

Wasti e Alyanak (1968) *apud* (OLMEZ, 2008) apontam que, quando o teor de Argila Caulinita for suficiente, aproximadamente, 25%, para preencher os vazios da Matriz Granular, em seu máximo de porosidade, o comportamento do solo será determinado, pela Matriz Argilosa. Georgiannou *et al.* (1990), em estudos, utilizando areia, retirada do Rio Ham, Nova Zelândia; e, argila Caulim, concluíram que 30% de frações de argila são suficientes, para alterar o comportamento da Mistura. Thevanayagem (2000) demonstra que o índice de vazios é importante no comportamento de Misturas, ao realizar ensaios de cisalhamento triaxial não drenado, em areias e fios não plásticos; e, que, para fração de Finos, maior que 30%, o comportamento da Matriz do Solo passa a ser determinado, pelas propriedades e características do material siltoso. O mesmo resultado foi apontado, posteriormente, por Zhang *et al.* (2010), em que demonstram que, acima de 30% de Finos ao solo, apresenta comportamento controlado pela Matriz de Finos. Além disso, concluíram que, quando a Matriz do Solo apresenta mais de 70% de material granular; ou seja, menos de 30% de Finos, possui as características de sua estrutura controlada, pelo material granular; e, portanto, pouco sensível à mudança de umidade.

Bicalho e Gonçalves (2017), ao estudarem as curvas de retenção e a condutividade hidráulica, estimadas pela equação de van Genuchten (1980), para diferentes tipos de

solo, apresentam a variação dos valores do coeficiente de permeabilidade (K_s), com o percentual de Finos, para o Banco de Dados do Programa Rosetta. Verificou-se que, para valores de Finos, até aproximadamente, 30%, uma tendência na diminuição do valor de K_s com o aumento do percentual de Finos. Para teores de Finos, maiores que 30%, observou-se que a variação de K_s com o teor de Finos, é indefinida e dispersa. Os Autores concluem que esses resultados podem ser devido aos Finos preencherem todos os vazios dos solos arenosos; e, nesse caso, a permeabilidade passa a ser definida, pela permeabilidade do solo fino.

Skempton (1985) aponta que, para solo, com fração de argila inferior a 25%, o comportamento é característico de areia ou silte; e, apresenta ângulo de resistência residual ao cisalhamento, maior do que 20° . Nesse Estudo, Skempton (1985) chama de Zona de Transição de Comportamento, quando a porcentagem de argila se situa entre 25% e 50%. Pitman et al. (1994) definiram essa Zona de Transição, entre 20 e 30%, de Finos, na Matriz do Solo, em estudos sobre Mistura de Finos (Caulinita e Silte). Apontaram, também, que, em 20% de teor de Finos, há uma redução do índice de vazios, máxima, sob compressão isotrópica. Os Autores concluíram que esse fenômeno se deve ao fato de que teor de Finos, até 20%, é, apenas, o suficiente para ocupar os espaços entre os grãos; e, não contribuiria, eficazmente, para a mudança de comportamento.

Monkul e Ozden (2007) investigaram a Zona de Transição e o comportamento do solo quando submetido à compressão unidimensional; realizando ensaios edométricos, em Misturas de Areia e Finos (Caulinita e Silte). Concluíram que, para valores maiores, que o intervalo de 19 e 34% de Finos, a Matriz do Solo pode ser controlada, pela fração argilosa. Para valores, abaixo de 19% de Finos, o solo apresenta comportamento de material granular. Além disso, com teor de Finos, maior que a Zona de Transição, verificou-se que a resistência ao cisalhamento tende a diminuir.

Castelo e Polido (1994) *apud* (LOSS, 2012) basearam-se no comportamento dos grãos da mistura, durante o processo de compressão, para classificar essas Misturas, como Misturas “com pouca areia”, “com areia” e “com muita areia” (Figura 3). A Matriz Argilosa de uma Mistura com “pouca areia” é comprimida, uniformemente; e, não há alteração do arranjo, formado pelos grãos de areia. A compressão da Matriz Argilosa de uma Mistura “com areia” é desuniforme; e, cria concentrações de tensões entre os grãos de areia; mas, o arranjo geral é mantido. Já, em Misturas com “muita areia”, a

compressibilidade da amostra ocorre, principalmente, na fração arenosa; a qual apresenta alteração de seu arranjo, durante o processo.

Bicalho et al. (2002) demonstram, por meio de ensaios de compressão e limites de Atterberg, em Misturas de Areia Fina e Bentonita, que a proposta de classificação de Castelo e Polido (1994) é válida, para porcentagens de Finos, maiores que 20%.



Figura 3: Misturas de Argila com Areia e os Respectivos Comportamentos de seus Grãos, durante a Compressão. (Cunha, 2012)

2.4. Compactação

A Compactação é um processo de densificação onde, por meio da redução do ar, busca-se a melhor estabilidade e resistência nos solos; evitando, assim, possíveis recalques. Foi idealizado por Ralf Proctor, e, assim, muitas vezes, chama-se de Ensaio de Proctor. Mitchell *et al.* (2005) destacam que a compressibilidade dos solos é, diretamente, influenciada pela quantidade dos solos finos. Segundo Boutin *et al.* (2011), a umidade e a densidade relativa seca dependem, altamente, da natureza dos constituintes do solo; especialmente, dos minerais argílicos e de suas proporções. Assim, dependem, diretamente, da umidade, da densidade seca, da energia aplicada e do tipo de solos a ser compactado.

Pela Curva de Compactação (Figura 4), resultado do Ensaio de Compactação NBR 7182 (ABNT, 2016d), é possível determinar a umidade ótima e a densidade seca máxima, que um solo pode alcançar; determinando, assim, a sua melhor configuração, no sentido de se obter a melhor estabilidade e resistência. Sua realização necessita de aparelhos, como, balanças de alta precisão, estufa, peneiras de 19 e 4,8 mm, conforme a NBR 5734 (ABNT, 1989); bandejas metálicas, cápsulas metálicas com tampa, régua biselada,

espátulas de lâmina flexível, cilindro de Proctor, que varia, conforme a energia de compactação a ser utilizada (Tabela 3).



Figura 4 - Curva de Compactação (Das, 2014).

Tabela 3- Energia de Compactação. Adaptado de NBR 7182 (2016).

Cilindro	Características inerentes a cada energia de Compactação		Energia	
	Soquete	Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Número de camadas	Pequeno	Grande	Grande
	Número de Golpes por Camada	3	3	5
	Soquete	26	21	27
Grande	Número de Camadas	Grande	Grande	Grande
	Número de Golpes por Camada	5	5	5
	Soquete	26	21	27
	Altura do disco espaçador(mm)	63,5	26	55

Considerando que a Compactação depende da energia aplicada e do teor de umidade, (PINTO, 2006) reafirma o conceito de que, mesmo com o aumento do grau de saturação, causado pela Compactação, ao expulsar o ar, presente nos vazios, ainda, existe ar aprisionado por entre os grãos do solo.

Caputo e Caputo (2015) ressaltam que, como o ar não é, totalmente, removido dos vazios dos solos, não é possível que a Curva de Compactação alcance a Curva de Saturação, por meio da compactação; seja qual for a energia aplicada. A Curva de Saturação, conforme ilustrado, na Figura 5, é originada, pelo volume de ar inexistente.

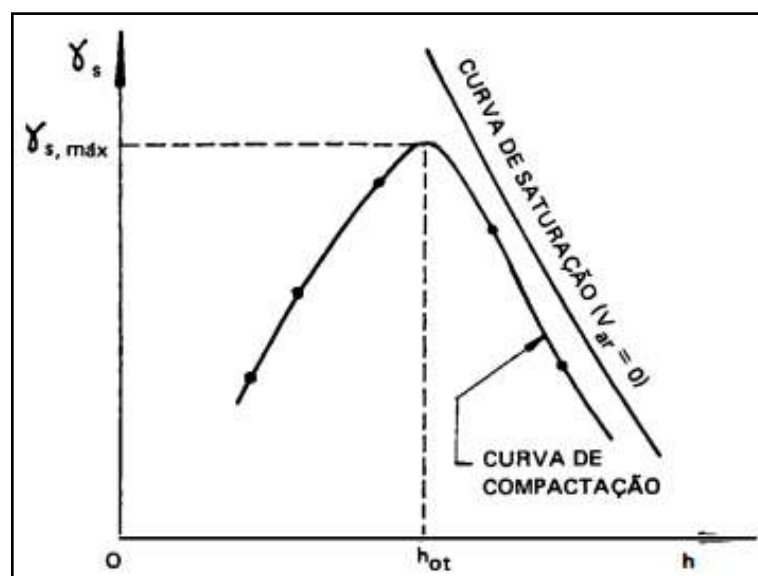


Figura 5 - Curva de Compactação e Curva de Saturação (Caputo e Caputo, 2015).

Sendo assim, Das e Sobhan (2014) observam que no ponto do valor máximo da massa específica aparente seca, podemos encontrar a umidade, denominada Umidade Ótima; dividindo a Curva, em ramo seco e úmido. No primeiro ramo, dito seco, as partículas do solo podem se aproximar mais, devido à lubrificação, oferecida pela adição de água. No ramo úmido, a densidade diminui, em consequência do afastamento das partículas sólidas, ocasionada pelo excesso de água. Pinto (2006) reforça, ainda, que os menores valores de recalques e os maiores valores de resistência acontecem, quando o solo está na sua Umidade Ótima.

No Ensaio de Proctor, a energia usada, ao compactar, é um fator que influencia a Curva de Compactação; podendo alterar o seu formato, de acordo com o aumento do número de golpes (Figura 6).

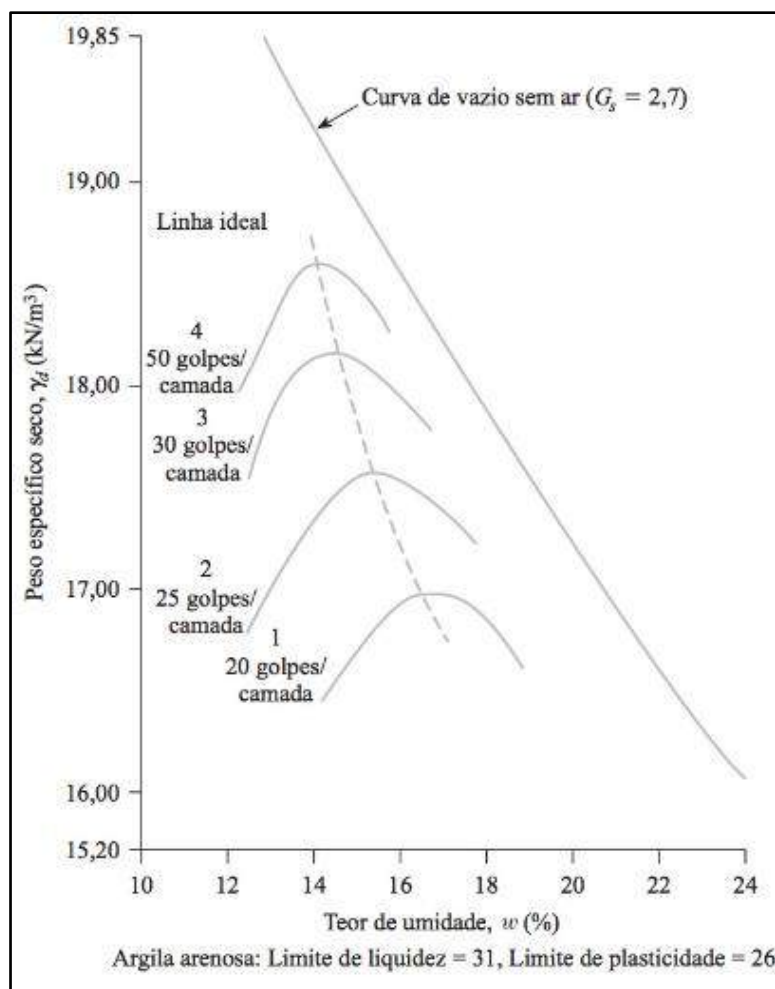


Figura 6 - Efeito da Energia de Compactação sobre a Compactação de uma Argila Arenosa. Das e Sobhan (2014).

Nota-se que, à medida que a energia de compactação aumenta, o peso específico seco máximo, também, cresce; e, o teor de umidade ótimo reduz, parcialmente; porém, a energia de compactação não é o único fator, que influencia, diretamente, o grau de compactação do solo (DAS e SOBHAN, 2014).

Santos et al. (2015) destacam que o tipo de solo, arenoso ou argiloso, possui comportamentos diferentes, na Compactação. Os solos arenosos são bastante permeáveis; o que torna a Compactação mais difícil e com limitações, em obras, como barragens. Já, os solos argilosos são mais impermeáveis; ou seja, eles retêm a umidade e facilitam a compactação; contudo, podem gerar, nas edificações, algumas patologias indesejáveis, devido ao alto teor de umidade.

Lambe e Whitman (1969) descreveram o comportamento dos solos argilosos para diferentes umidades e energia de compactação. Das e Sobhan (2014) apresentam esse

comportamento, com a Figura 7. Os solos argilosos compactados, no ramo seco, possuem uma estrutura floculada, pois a menor umidade, as camadas duplas difusas de íons, ao redor das partículas de argila, não estão, inteiramente, desenvolvidas; fazendo com que a repulsão das partículas seja menor (Figura 7, ponto A).

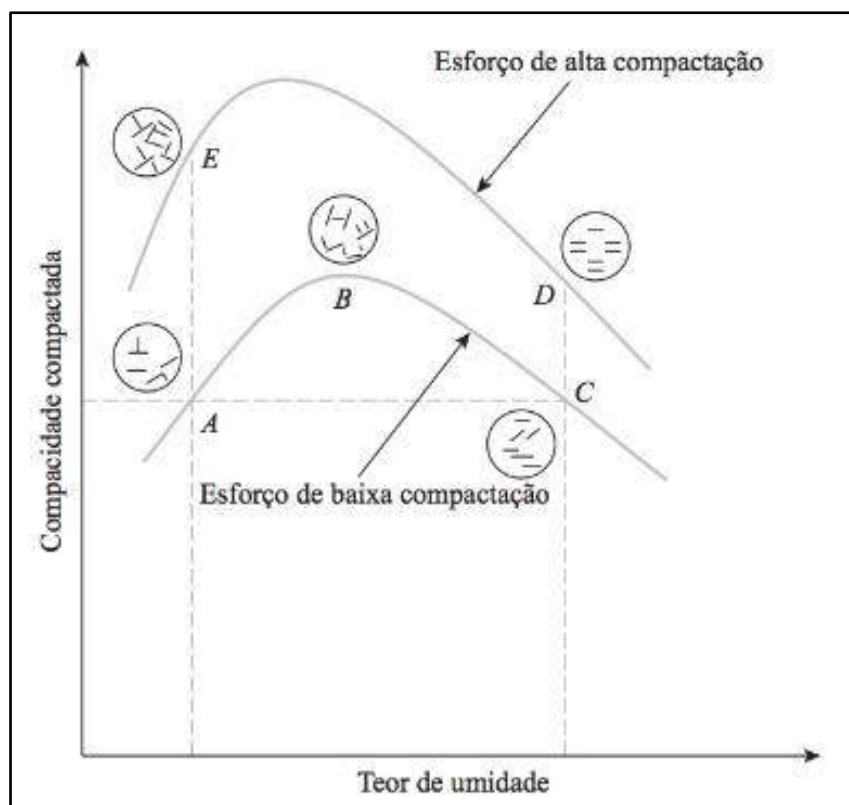


Figura 7 - Efeitos da Compactação em Estruturas de Solos Argilosos. Das e Sobhan (2014).

À medida que a umidade aumenta, conforme o ponto B, as camadas duplas difusas das partículas se ampliam; provocando o aumento da repulsão entre as partículas; diminuindo a floculação. Quando esse solo é submetido à compactação, acarreta uma orientação paralela das partículas; originando uma estrutura conhecida, como, Dispersa (Figura 7, ponto C). Considerando uma mesma umidade, quanto maior a compactação, maior será o grau de dispersão. Isso pode ser notado, comparando-se o ponto A e E; e, os pontos C e D da Figura 7.

A umidade, a energia de compactação e o tipo de solo, então, influenciarão, diretamente, na compactação do solo; um processo, amplamente, utilizado em diversas obras de Engenharia; como, a construção de estradas, barragens aterros, entre outros. Sendo assim, fica evidente a importância do controle de compactação, para as obras

Geotécnicas. Weidinger *et al.* (2019) destacam que uma compactação ruim pode resultar em grandes deformações do solo; o que causará excesso de desvios, na superfície do solo; e, exigindo serviços de reparo. No entanto, conforme Nagaraj *et al.* (2015) e Rocha *et al.* (2019), os ensaios laboratoriais de compactação levam tempo, além de esforços significativos. Assim, há a necessidade de desenvolvimento de técnicas, capazes de controlar a compactação, de forma rápida, não destrutiva e *in situ*.

2.5. O Ultrassom

2.5.1. Ondas de Ultrassom

Amplamente, citado, na literatura, o termo Ultrassom se refere à técnica, que utiliza ondas mecânicas, com frequências superiores a 20 kHz. A Onda Ultrassônica é tratada, como um distúrbio mecânico; e, propaga-se, de molécula a molécula, a uma determinada velocidade; causando variação, na densidade ou na pressão do meio, ao seu redor; não podendo ser propagada, no vácuo. Assim sendo, Christensen (1988) define a equação para a Onda Ultrassônica, como (Equação 3):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \rho_0 K \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

Onde ρ_0 representa a densidade média do material; K é a constante de compressibilidade do material; e, t representa o tempo.

A Equação 4 é uma solução para a Equação Diferencial, quando se considera a constante de propagação k , dada pela Equação 5.

$$p = p_* \cos(\omega t - kz) \quad (4)$$

$$k^2 = \rho_0 K \omega^2 \quad (5)$$

Onde p_* representa a constante de amplitude; e, ω é a frequência angular da onda [rad/s].

Panzer *et al.* (2011) destacam que as Ondas de Ultrassom podem relacionar uma série de informações sobre o meio, em que se propagam; pois, essas Ondas sofrem modificações, quando há mudança, nas propriedades mecânicas de qualquer material. Para Berutti (2004), além da densidade do material e o módulo de elasticidade, a quantidade de fases do material e os defeitos presentes, também, influenciam as Ondas Ultrassônicas.

Quanto à sua propagação, Daciuk (2008) cita três maneiras de classificá-las: longitudinalmente, transversalmente e superficialmente. Segundo Chung-Shin (1984), as Ondas, mais comumente, usadas são, frequentemente, chamadas de Ondas P e Ondas S. A primeira se refere às Ondas Longitudinais ou Ondas Compressivas. As Ondas S referem-se às Ondas Secundárias ou Ondas Cisalhantes, ou, Ondas Transversais. As menos comuns seriam as Ondas de Rayleigh e Lamb. A ASNT (2006) classifica a forma de propagação da Onda Ultrassônica, em (1) Ondas Longitudinais, chamadas de Ondas de Compressão; (2) Ondas Transversais, ou, também, chamadas de Ondas de Cisalhamento; (3) as Ondas Superficiais ou de Rayleigh; e, (4) Ondas de Lamb.

As Ondas de Lamb são específicas para objetos, com espessura igual a três comprimentos de Onda Ultrassônica, ou, menos. Esse tipo de propagação de ondas é ideal para a aplicação em monitoramento estrutural, revestimentos, caracterização material de placas elásticas e placas viscoelásticas, inspeção de colagens e defeitos e medição de espessuras finas; uma vez que podem viajar longas distâncias, com pouca atenuação.

As Ondas Rayleigh, segundo Ferronato (2016), são as mais utilizadas entre as Ondas, que se propagam, superficialmente, por serem uma ferramenta, extremamente, útil na detecção de defeitos. A concentração de energia de propagação da onda, próxima à superfície de um meio sólido e sua atenuação, devida a distância de propagação, é considerada baixa, em relação às Ondas Longitudinais (CHUNG-SHIN, 1984).

As Ondas Cisalhantes, segundo Andreucci (2014), possuem vibração perpendicular à propagação da onda; e, são indicadas para a detecção de tensões residuais e espessuras. Ihara (2008) ressalta que, em função da resistência ao cisalhamento, as Ondas Cisalhantes só existem, em meios sólidos. E, por fim, as Ondas P ou Longitudinais, que foram utilizadas, neste Trabalho, produzem oscilação das partículas, na direção de propagação da onda. Voigt (2004) destaca que esse tipo de Onda possui uma maior velocidade de propagação, que as, anteriormente, citadas.

As Ondas Ultrassônicas são geradas, por um transdutor eletroacústico que, ligado a um circuito eletrônico, recebe um estímulo, para oscilar, mecanicamente; em uma frequência, que pode ser, de 20 até 1000 kHz, dependendo do transdutor. Esse transdutor eletroacústico é formado, por materiais cristalinos, de efeito piezoelétrico (Medeiros (2007)). Assim, para se obter um pulso ultrassônico, normalmente, utilizam-se transdutores, constituídos por lâminas de cristal, que possuem a capacidade de responder a uma tensão elétrica; gerando deformações físicas, no cristal. Esse fenômeno, denominado Piezeletricidade, é uma propriedade natural de certos cristais e substâncias cristalizadas, que apresentam anisotropia; ou seja, a capacidade de reagir, diferentemente, de acordo com a direção de propagação de um fenômeno físico sobre si; como, a luz e o calor (MAKSE *et al.*, 2015).

Segundo Maia (2001), as Ondas Ultrassônicas podem sofrer reflexão, refração ou difração, quando colidem com um meio, ou, ao encontrarem uma interface entre esses dois meios. Baseados nesse comportamento, dois Métodos Experimentais são, geralmente, utilizados, para a caracterização dos meios, por Ultrassom: o Método Pulso Eco, onde um transdutor é utilizado para transmitir e receber os sinais; e, o Método Transmissão-Recepção, onde se utilizam dois transdutores, um transmissor e outro receptor. A combinação desses dois Métodos permite obter informações sobre a distância entre os objetos, a velocidade de propagação e a atenuação de Ondas Ultrassônicas, nos meios.

Para realizar testes, utilizando o Ultrassom, o transdutor deve ficar em contato com o material a ser analisado. O acoplamento entre o transdutor e o meio, em estudo, é um ponto crítico do Ensaio; pois, a rugosidade da superfície do transdutor e do material pode gerar regiões preenchidas de ar; criando uma barreira para o sinal de Ultrassom (DACIUK, 2008). Krautkramer e Krautkramer (1990) afirmam que uma solução é a utilização de líquidos acoplantes, entre o transdutor e o meio. Esses líquidos devem possuir impedância elevada; como, por exemplo, a glicerina e o óleo SAE 30.

2.5.2. *Análise do Formato de Onda*

O solo é um meio, fortemente, heterogêneo para a análise de propagação de ondas elásticas, por Ultrassom. Quiviger *et al.* (2012) citam que frentes de ondas emitidas tendem a ricochetear por entre os grãos, que compõem o material; ocorrendo o efeito

de espalhamento de parte da onda; o que explica, basicamente, a sua forma aleatória (Figura 8). Meios porosos, segundo Carelli (2014), dificultam a interpretação do formato da Onda Ultrassônica; podendo apresentar forte atenuação (redução da amplitude) e dispersão (modificação do formato da Onda).

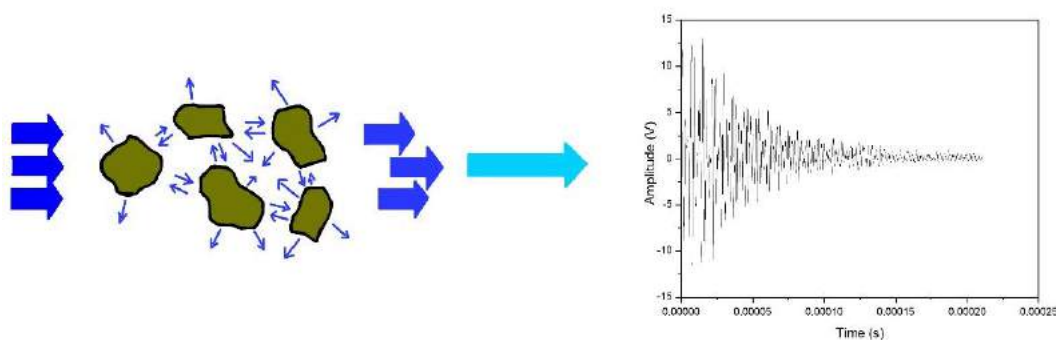


Figura 8: Exemplo do Formato da Onda de Ultrassom, após a Passagem pelo Concreto; Apresentando Dispersão. (Adaptado Quiviver et al., 2012).

Workman e Kishoni (2007) apresentam quatro critérios básicos para validar a interpretação dos resultados do Ensaio de Ultrassom. O primeiro é conhecer o processo físico subjacente; incluindo a propagação da onda, no item analisado. O segundo está relacionado ao conhecimento das técnicas e dos equipamentos, utilizados para a aquisição e a exibição de dados. O terceiro critério trata sobre o conhecimento dos detalhes do(s) item(ns) analisados (configuração, propriedade dos materiais, processo de fabricação, potenciais descontinuidades e condições de serviços a que o item é destinado). E, por último, possíveis fontes de ruído, que possam ser confundidas com Ondas Ultrassônicas. Assim, há a necessidade de se encontrarem parâmetros de análise adequados.

Os parâmetros de análise do tempo e da frequência são, mais comumente, analisados para ensaios em aço, concretos e argamassas. Assim, para a análise dos solos, esses parâmetros serão considerados; uma vez que, pouca análise de Ondas Ultrassônicas, específicas para solos, foi encontrada, na literatura.

Carelli (2014) define o domínio do tempo, como o padrão gerado, nos Aparelhos de Ultrassom. O formato da Onda, gerada por eles, permite, além da obtenção da velocidade de pulso, a aquisição de outros parâmetros; tais como, a velocidade de grupo, a amplitude máxima, a amplitude pico a pico e a energia. A Figura 9 ilustra alguns desses parâmetros. Carelli (2014) afirma, ainda, que, para a análise no domínio da frequência (Figura 10), requer recursos matemáticos, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT),

para a transposição de domínios e a exibição do espectro de frequência; formando um gráfico “magnitude X frequência”. Nele, os parâmetros avaliados são frequência central, pico de frequência máxima e magnitude.

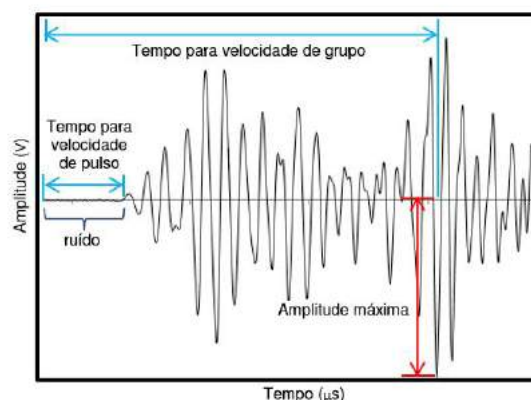


Figura 9: Parâmetros Seleccionados, Obtidos pelo Formato da Onda de Ultrassom, no Domínio do Tempo – Onda, Obtida, por meio de Leitura, Realizada na Lateral de uma Placa de Concreto Sã. (Carelli, 2014).

No caso específico dos solos, podem-se citar os Trabalhos de Gheibi e Hedayat (2018) e Dutta *et al.* (2019), os quais detectaram alterações na mudança da amplitude, com o diâmetro representativo (D_{50}) do solo granular. Solo, com menor diâmetro representativo, possui maior amplitude. Gheibi e Hedayat (2018) citam que mudanças na amplitude máxima, transmitida em materiais granulares, são dependentes da área de contato e do tamanho dos poros entre as partículas. Além disso, Dutta *et al.* (2019) demonstram que a variação na razão das Transformadas Rápidas de Fourier, do sinal recebido para o sinal transmitido, para diferentes valores de D_{50} , a uma determinada frequência, reduz-se, com o aumento de D_{50} .

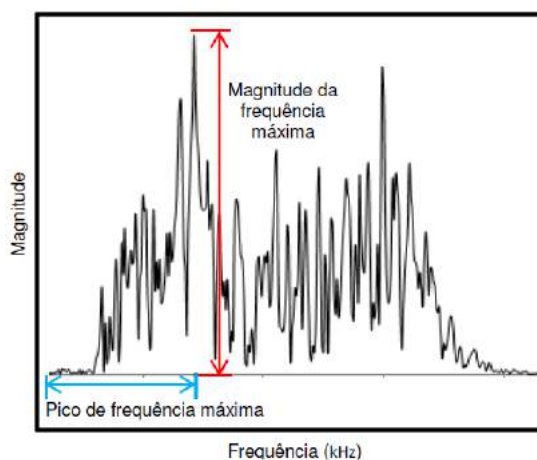


Figura 10: Espectro de Frequência e Exemplo de Parâmetros Avaliados (Carelli, 2014).

2.5.3. Amortecimento e Atenuação da Onda Ultrassônica.

A Onda Ultrassônica, em materiais não atenuantes, apresenta-se, de forma a reduzir a amplitude, em função, apenas, da propagação do feixe; uma vez que a intensidade da Onda Ultrassônica diminui, com a distância, Liu *et al.* (2018). No entanto, os materiais reais exibem atenuação; e, para Shemerr (1998), isso deve ser considerado, em qualquer sistema completo de medição ultrassônico. Liu *et al.* (2018) definem Atenuação Ultrassônica, como o decaimento da amplitude, à medida que a Onda se propaga, no material. Em seu estudo, com amostras de gelo, de diferentes morfologias, ficou demonstrado que a Atenuação Ultrassônica variou, devido à diferença estrutural do cristal de gelo e da porosidade.

Segundo Shemerr (1998), geralmente, a Atenuação acontece, em função da dispersão de grãos (espalhamento); e, também, por absorção. A redução por dispersão ou o espalhamento de grãos ocorre, porque a Onda incidente, ao encontrar os grãos, espalha-se em muitas direções; resultando em uma perda de amplitude, conforme representado na Figura 8. As perdas por absorção são devido à conversão de energia mecânica em calor, durante o movimento das Ondas. Para Berutti (2004), adicionalmente, essas perdas, também, podem ser causadas pelos efeitos de histerese elástica, devido aos deslocamentos cíclicos em grãos ou em fronteiras de grãos.

Para Skripkunas (2009), a transformação de energia mecânica em calor, durante a vibração ou a deformação, é chamada de Amortecimento; e, para Lazan (1968), essa é a propriedade de maior sensibilidade, em uma estrutura; seja micro, ou, macroscopicamente.

Segundo Silva (2007), é importante para a caracterização de um sistema, compreender como a energia mecânica é dissipada; e, analisar a sua dependência com a velocidade e com a amplitude de vibração. Para isso, cálculos comparativos de Amortecimento Interno podem ser representados, pelo Modelo de Amortecimento Visco Elástico, o qual descreve um sistema massa mola, com, apenas, um grau de liberdade; sistema, utilizado neste Trabalho. Nesse caso, Correia (2015) admite as condições de uma vibração forçada, determinística, com abordagem linear e amortecimento viscoso. Assim, a energia de vibração é dissipada, devido às forças de amortecimento; e, quando a oscilação é livre, sua amplitude vai decrescendo, com o tempo. Logo, a Equação de

Movimento é dada, pela Equação 6; uma Equação Diferencial de Segunda Ordem e Coeficientes Constantes:

$$M x''(t) + C x'(t) + K x(t) = 0 \quad (6)$$

A solução para Equação 6 é da forma $x(t) = Ae^{st}$, e, após a substituição na Equação 6, anterior, tem-se:

$$Ae^{st}(Ms^2 + C s + K) = 0 \quad (7)$$

e dado que o termo Ae^{st} não pode ser nulo, para todos os valores de t :

$$Ms^2 + C s + K = 0 \quad (8)$$

que é conhecida, como a Equação, característica do sistema

$$s_{1,2} = \frac{1}{2M} (-C \pm \sqrt{C^2 - 4 M K}) \quad (9)$$

Segundo Correa (2010), têm-se 3 situações distintas, exemplificadas, na Figura 11:

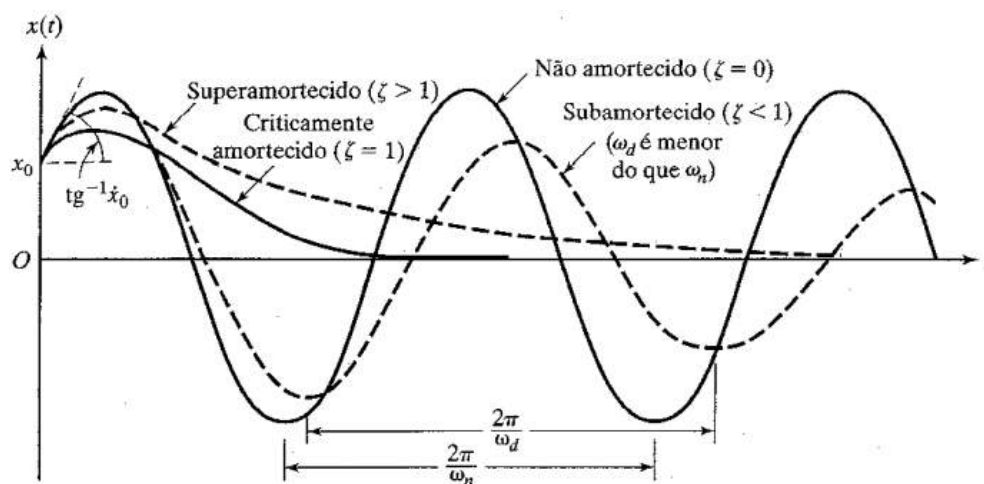


Figura 11 - Comparação entre Movimentos com Tipos Diferentes de Amortecimento (RAO, 2009).

1. Sistema Super Amortecido: $C^2 > 4 M K$ – As raízes são reais e a força de amortecimento é a que governa.
2. Sistema Sub Amortecido: $C^2 < 4 M K$ – A resposta provém de duas raízes complexas conjugadas; prevalecendo as forças de inércia. Esse caso se refere ao objeto de estudo deste Trabalho.
3. Sistema Amortecimento Crítico: $C^2 = 4 M K$ – A raiz quadrada é nula; possuindo duas raízes reais e iguais; gerando uma resposta. Constitui o limite entre os dois casos anteriores.

Em qualquer Sistema Vibratório, pode-se definir o Coeficiente de Amortecimento Crítico (C_c); e, também, definir o Fator ou o Coeficiente de Amortecimento (ζ); representados, respectivamente, pelas Equação 10 e Equação 11.

$$C_c^2 = 4 M K \rightarrow C_c = 2 M \sqrt{\frac{K}{M}} \rightarrow C_c = 2 M \omega_n \quad (11)$$

onde ω_n é a frequência natural do Sistema Não Amortecido.

$$\zeta = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2 M \omega_n} \quad (12)$$

Logo, ζ é a relação entre o Amortecimento Efetivo de um Sistema e o seu Amortecimento Crítico. E, para a condição de Amortecimento Crítico, o valor de ζ equivale a 1.

Assim, as soluções para a Equação (6), ao introduzir condições para o instante inicial, onde teremos $t = 0$, $x(t) = x(0)$ e $x'(t) = x'(0)$; teremos a Equação 13, para um Sistema com Amortecimento Crítico; ou seja, $\zeta = 1$

$$x(t) = e^{-\omega_n t} [x(0)(1 + \omega_n t) + x'(0)t] \quad (13)$$

Caso o Sistema seja Super Amortecido ($\zeta > 1$), a solução da Equação 6 passa a ser a Equação 14. Nesse caso, o Sistema não tende a oscilar; já que as funções hiperbólicas de variável real não são periódicas.

$$x(t) = e^{-\omega_n t} [x(0) \cdot \cosh(\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} t) + \frac{x'(0) + \zeta \omega_n x(0)}{\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}} \sinh(\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} t)] \quad (14)$$

Para o Sistema Sub Amortecido ($0 < \zeta < 1$), tem-se, como solução, a Equação 15

$$x(t) = e^{-\zeta \omega_n t} [x(0) \cdot \cos(\omega_n t \sqrt{1 - \zeta^2}) + \frac{x'(0) + \zeta \omega_n x(0)}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_n t \sqrt{1 - \zeta^2})] \quad (15)$$

que descreverá um movimento periódico de frequência natural amortecida $\omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$, menor que a frequência natural do Sistema Não Amortecido ω_n ; e, que é afetado por um Fator de Atenuação, com o valor dado, por $e^{-\zeta \omega_n t}$. A Figura 12 exemplifica a Curva do Sistema de Variações da Velocidade para o Sub Amortecido.

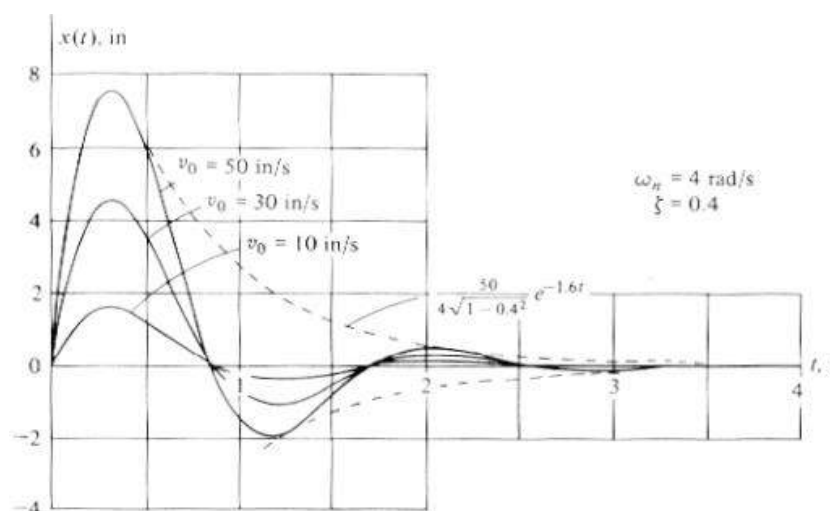


Figura 12: Exemplo de Curva do Sistema de Variações da Velocidade para o Sub Amortecido. (Correa, 2010)

2.6. O Ultrassom no Solo

Há décadas, a obtenção das propriedades elásticas do solo tem sido de interesse da Área da Geotecnia; e, avanços contínuos, na melhoria de medições e na Tecnologia, foram obtidos (Marjanovic, 2012).

A utilização de Ondas Ultrassônicas, segundo Frederick (1965), deu-se, por meio do interesse de Geólogos e Sismólogos em entender melhor o comportamento dos materiais, que compõem a crosta terrestre; e, cita, então, com uns dos Trabalhos pioneiros, para os solos granulares, os Trabalhos de Iida (1936) e Iida (1939).

O Ultrassom vem sendo utilizado, com sucesso, para estudos em concreto ((Lorenzi *et al.* (2003), Medeiros (2007), Wiggenhauser *et al.* (2017)); em determinação de fissuras em materiais cerâmicos, madeira e argamassas ((CARDOSO, 2009); (BARONI *et al.*, 2008); (BERUTTI, 2004)); e, em mecânica das rochas (NOURANI *et al.*, 2017). No entanto, Ferreira *et al.* (2014) ressaltam que, apesar de a técnica do Ultrassom ser bem difundida, em outros materiais, para o solo, há a necessidade de determinar quais fatores influenciam nos resultados do Ensaio, como a energia de compactação, o teor de umidade, a massa específica, o índice de vazios e a direção da realização das leituras. Além disso, Medeiros (2007) Quiviger *et al.* (2012) destacam a complexidade sobre a interpretação dos resultados, para casos de materiais heterogêneos.

Assim, vários Trabalhos, visando a melhorar e ampliar o uso do Ultrassom em solos, estabelecendo correlações entre propriedades elásticas dinâmicas e propriedades estáticas, como a resistência ao cisalhamento, densidade, grau de saturação, teor de umidade e limites de Atterberg para solos (por exemplo, ARACNE-RUDDLE *et al.* (1999); YESILLER (2000);(YESILLER *et al.* (2001); (LEONG *et al.* (2004);(FENER *et al.*(2005); (WEIDINGER *et al.* (2009)) foram publicados.

Prasad e Meissner (1992) apresentaram a possibilidade para a visualização e o empacotamento de solos granulares, por meio de Ondas Ultrassônicas. Para os solos compactados, os estudos de Milani (2008), Ferreira *et al.*(2014), Teixeira *et al.* (2015) e Sarro (2017) apontam a possibilidade do emprego do Ultrassom, com resultados satisfatórios.

Makse *et al.* (2015), utilizando a velocidade do pulso ultrassônico, apresenta a possibilidade em fornecer informações importantes sobre as propriedades do solo e materiais rochosos. Variações de velocidade são observadas, relacionadas ao volume, ao cisalhamento e ao contato entre as partículas. Zimmer (2004) mediu a velocidade para areias secas e saturadas, com porosidade, variando de 0,24 a 0,44. Para essa faixa de porosidade, concluiu que, para as amostras secas, a uma dada pressão, as velocidades sofrem pouca influência. Já, para as amostras saturadas, a velocidade de Onda de Compressão apresenta significativo aumento, com a diminuição da porosidade. Dutta *et*

al. (2019) demonstraram que a velocidade de compressão e cisalhamento são independentes de diâmetro representativo D_{50} do material granular. Xu *et al.* (2013) apresentam valores e relacionam, de forma linear, a velocidade da Onda de Cisalhamento e o Índice de Vazios, para diferentes tensões. Choobbasti *et al.* (2019) apresentam equações que relacionam a resistência de compressão não confinada e a velocidade do pulso ultrassônico, para solos argilosos reforçados.

Atualmente, podem-se citar os Trabalhos de Mandal *et al.* (2016); Rios, *et al.* (2017); Wang *et al.* (2018); Selcuk e Seker (2018), Pu *et al.* (2019), com objetivos em correlacionar as propriedades geotécnicas e a velocidade do pulso ultrassônico para solos granulares e misturas de solos. Rios *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2018) trabalharam para correlacionar a velocidade do pulso ultrassônico ao módulo de rigidez do solo, para solos estabilizados e congelados. Weidinger *et al.* (2019), ao trabalharem com siltes compactados, afirmam que a velocidade de pulso ultrassônico pode fornecer informações sobre a estabilidade de solos compactados, parcialmente, saturados. Weidinger *et al.* (2019) destacam, ainda, que, na literatura, as propriedades elásticas dinâmicas de um solo, como as de Poisson, a relação e o módulo de cisalhamento e o módulo de Young, em pequenas tensões são, frequentemente, estimadas, usando equações empíricas estabelecidas. As correlações empíricas publicadas, no entanto, foram encontradas, como dependentes do tipo de solo e de sua homogeneidade. Além disso, a maioria delas é válida, apenas, para solos naturais; o que dificulta a avaliação dos solos compactados, artificialmente.

Ao se tratarem das propriedades físicas das Ondas Ultrassônicas, Knuth *et al.* (2013) demonstram uma relação de dependência entre as características do solo e a capacidade do solo em transmitir a energia. Gheibi e Hedayat (2018) concluem que mudanças na amplitude transmitida estão relacionadas a mecanismos que controlam estrutura e arranjos do solo granular. Concluem, ainda, que as Ondas de Compressão viajam, com maior frequência, pelos solos granulares finos. Pyrak-Nolt (1992) apresenta uma correlação entre frequência e fratura em rochas. Kimura *et al.*, (2018) propuseram a Técnica de Medição Ultrassônica, a fim de monitorar a saturação em bentonitas compactadas. Concluem que, apesar da grande atenuação das Ondas Ultrassônicas, no método do domínio da frequência, há a possibilidade em se determinar o tempo de trânsito; mesmo em materiais, com alta atenuação.

Conforme citado por Gheibi e Hedayat (2018), são grandes os esforços para o entendimento sobre o efeito da deformação das partículas do solo, por meio da velocidade de propagação da Onda Ultrassônica; mas, pouco se discute em relação às características das Ondas Ultrassônicas, no domínio do tempo e da frequência.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descreve-se detalhadamente os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, sendo resumido esquematicamente pela Figura 13. Observa-se, no método empregado um importante passo formado por *looping* entre Ensaio de ultrassom, Processamento de Sinais e Construção do formato de curva. A importância desta etapa está atrelada ao grau de confiabilidade dos resultados pois, se a curva de amortecimento calculada não for representativa do formato onda do ultrassom, há a necessidade de retornar para obtenção Processamento de materiais. Não sendo possível a obtenção da envoltória, é preciso retornar aos ensaios de ultrassom para conferência e ajustes dos resultados. Assim, somente após a curva de amortecimento é possível correlacionar as características dos materiais granulares com as propriedades das ondas ultrassônicas.

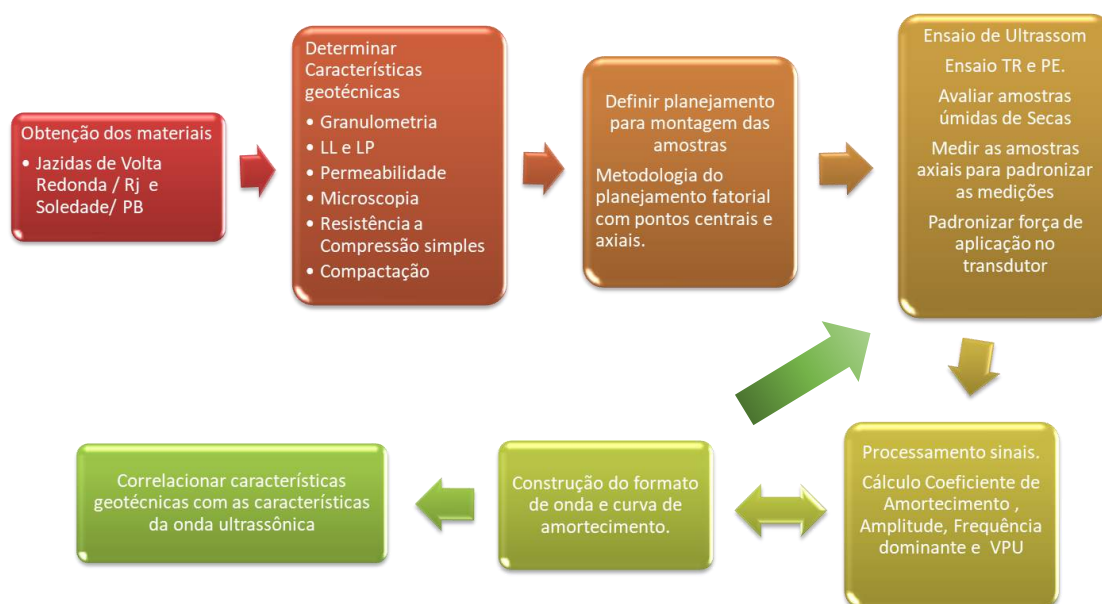


Figura 13: Resumo Esquemático da Metodologia.

3.1. Caracterização Geotécnica dos Materiais e Montagem das Amostras

A caracterização das partículas dos solos foi realizada, por meio do Ensaio de Microscopia e da Análise Granulométrica NBR 7181 (2016), realizada pelo peneiramento (Granulometria superior a #200).

Para a caracterização dos solos coesivos, os limites de liquidez e de plasticidade foram determinados, segundo os procedimentos recomendados pelas NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (2016), respectivamente. Os Ensaios Geotécnicos foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil, do Centro Universitário de Barra Mansa.

Neste Trabalho, os Ensaios Geotécnicos empregados são de amplo conhecimento e muito citados, na literatura. Assim, para tornar a leitura mais objetiva, optou-se por descrever, detalhadamente, apenas, o Ensaio de Ultrassom e a forma de Processamento dos Dados.

Nos itens 3.1.1 a 3.1.3, são descritos os Materiais, utilizados neste Trabalho, a localização de sua extração e a montagem das amostras para os Ensaios.

3.1.1. *Materiais Granulares - Areias*

Este Trabalho utilizou areia, obtida do Areal de Barreira Cravo, no Estado do Rio de Janeiro - Brasil. Trabalhou-se com três diferentes tipos de areia: a areia média; a fina, com grãos, variando, entre 0,59 mm a 0,074mm e diâmetro representativo (D_{50}) igual a 0,4mm; areia grossa, com grãos, entre 2,0mm a 0,6mm e $D_{50} = 1$ mm; e, areia grossa uniforme, com grãos, entre 1,18mm e 0,6mm e $D_{50} = 1,15$ mm. As amostras foram compostas, por areia saturada, moldadas no dia do Ensaio de Ultrassom, em cápsulas de alumínio (Figura 14), com 60mm de comprimento e diâmetro de 50 mm. A variação do Índice de Vazios foi obtida, variando-se, cuidadosamente, a intensidade da vibração da cápsula de alumínio, ao se colocarem água e areia.



Figura 14: Amostra de Areia Saturada. Em (a) Vista Superior da Amostra de Areia Saturada Moldada em Cápsula de Alumínio. Em (b) Amostra de Areia Saturada, Fechada, em Cápsula de Alumínio.

Para a obtenção do Índice de Vazios, máximo e mínimo, seguiram-se as recomendações do Ensaio de Compacidade; utilizando o procedimento das Normas NBR 12004 (1990) e NBR12051 (1990), respectivamente; que, apesar de cancelada, em 2015, não fora substituída, por nenhuma; e, portanto, seguiu-se com ela, no sentido de se ter uma Metodologia.

Para o Ensaio de Ultrassom, aplicou-se a Técnica da Transparência (Transmissão - Recepção), com transdutor de 50KHz; e, para cada amostra, realizaram-se 3 medições; sendo a resposta final, para cada característica do Pulso Ultrassônico, a média dessas leituras. Assim, realizaram-se 156 leituras ultrassônicas, para amostras, com variação de Índice de Vazios, entre 0,5 a 1,1.

3.1.2. Materiais Finos

Utilizaram-se, neste Trabalho, dois tipos de Solos Finos, conforme a classificação do Sistema Unificado: um, com baixa plasticidade; e, outro, com alta plasticidade. O Solo Fino, de baixa plasticidade, foi obtido do Areal de Barreira Cravo, no Estado do Rio de Janeiro - Brasil. O Solo Fino, de alta plasticidade, é uma Argila Bentonita obtida da Empresa União Brasileira de Mineração, produzida na cidade de Soledade-PB.

Para a caracterização geotécnica desses Materiais, realizaram-se os Ensaios, seguindo as Normas da ABNT, de Limite de Liquidez, de Limite de Plasticidade, de Compactação e Permeabilidade. Realizou-se, também, a Microscopia Eletrônica de Varredura, por meio do Equipamento Evo MA10, do fabricante ZEISS; possuindo detectores de elétrons retro espalhados; e, Espectroscopia, por energia dispersiva (EDS).

As amostras para o Ensaio de Ultrassom foram compactadas, com energia de proctor normal; possuindo 50 mm de comprimento e diâmetro de 50 mm. A variação da umidade foi determinada, a partir dos resultados da Curva de Compactação, do Limite de Liquidez; e, utilizou-se a Metodologia do Planejamento Fatorial, com pontos centrais e axiais. Assim, compactaram-se, em triplicata, as amostras para as umidades 18%, 21%, 24,5 %, 27%, 30%, 35% e 40%, para o Solo Fino, de baixa plasticidade. Para a Bentonita, compactaram-se, em triplicata, as amostras, com 40%, 75%, 115%, 190% e 227,5% de umidade. Os Solos Umedecidos ficaram 24 horas, embalados, para a homogeneização; e, em seguida, foram compactados.

As leituras ultrassônicas foram realizadas, no dia da compactação. Aplicou-se a Técnica da Transparência (Transmissão - Recepção), com transdutor de 50KHz; e, a Técnica do Pulso Eco, com transdutor de 3,5MHz. A Técnica da Transparência, também, foi aplicada, com transdutores de 50KHz, com as amostras, totalmente, secas. Uma vez que foi difícil identificar o eco, nas medições, após as amostras secas, a Técnica do Pulso Eco não foi utilizada, nesse caso.

Para a interpretação dos resultados e a confecção dos diagramas, usou-se o *software statistica8.0*, produzido pela Empresa STATSOFT. A análise da interação entre as diferentes variáveis foi realizada, pelo *software statistica8.0*, do fabricante STATSOFT; com a finalidade de se obter a combinação de valores, que ilustram o Modelo de Superfície de Resposta.

3.1.3. Misturas de Areia e Finos

As Misturas foram realizadas, utilizando a areia, obtida do Areal de Barreira Cravo, no Estado do Rio de Janeiro – Brasil; e, conforme o item 3.1.1, trata-se de uma areia grossa, com grãos, entre 2,0mm a 0,6mm e $D_{50} = 1\text{mm}$; e, o solo de baixa plasticidade, também, obtido do Areal de Barreira Cravo, no Estado do Rio de Janeiro – Brasil (conforme item 3.1.2).

As amostras foram montadas, com diferentes porcentagens de Finos. Para a determinação da fração de Finos, que comporá a amostra, utilizou-se a Metodologia do Planejamento Fatorial, com pontos centrais e axiais. Assim, montaram-se as amostras, com 10, 30, 50, 80 e 100% de Finos (Figura 15).



Figura 15: Amostras Compactadas com Diferentes Porcentagens de Finos.

Para o Ensaio de Microscopia, utilizou-se o Microscópio Ótico, da marca OLYMPUS BX51M (OLYMPUS, Tokyo, Japão), acoplado à Câmera Digital

OLYMPUS SC30. O *software* STREAM BASIC (OLYMPUS, 8.1, Tokyo, Japão) foi utilizado, a fim de capturar as imagens.

O Ensaio de Ultrassom foi feito, por meio da Técnica Transparência; utilizando transdutores de 50KHz; e, pela Técnica Pulso Eco, com transdutores de 3,5 MHz. Além disso, as medições, com Ultrassom, foram realizadas 3 dias, após a compactação; e, após as amostras estarem, completamente, secas ao ar.

A análise da interação entre as diferentes variáveis foi realizada, pelo *software* *Statistica 8.0*, do fabricante STATSOFT; com a finalidade de se obter a combinação de valores, que ilustram o Modelo de Superfície de Resposta.

3.2. Ensaio de Ultrassom

O Ensaio de Ultrassom foi realizado, utilizando o Equipamento THE PANAMETRICS®, modelo 5058PR *High Voltage Pulser-Receiver* (Figura 16), projetado, segundo a fabricante OLYMPUS (2016), especialmente, para testes e medições em meios materiais atenuadores; em que se permite determinar as propriedades e qualidades dos materiais, de acordo com a intenção do usuário; sendo muito recomendado para a análise de concreto, pedra, solo ou areias. O Equipamento pertence à Universidade Federal Fluminense, *Campus Volta Redonda*.



Figura 16: Equipamento de Ultrassom Utilizado.

O Osciloscópio utilizado foi o KEYSIGGHT TECHNOLOGIES®, modelo DSO 1072B; e, com *firmware* versão 01.20.00 SP2. A montagem dos Equipamentos, Gerador Ultrassônico, Osciloscópio e Transdutores estão esquematizados, na Figura 17; e, ilustrados, na Figura 18.

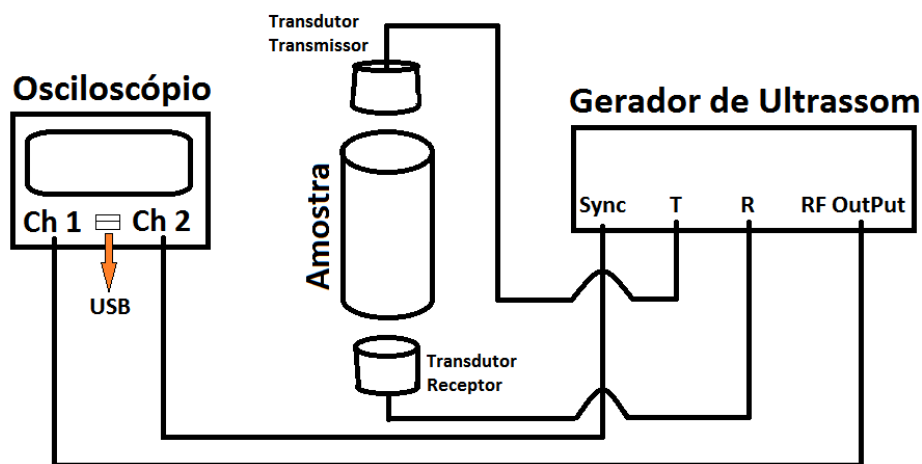


Figura 17: Esquematização do Sistema Ultrassônico para o Método da Transparência (Ferronato, 2016).

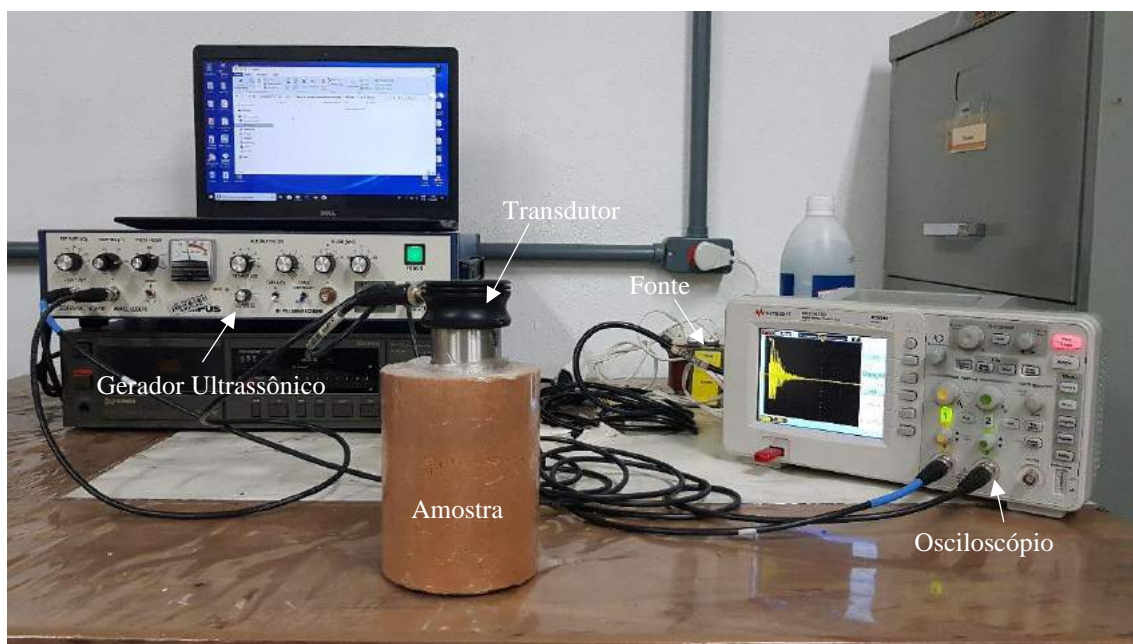


Figura 18: Bancada de Realização das Medições com o Sistema de Ultrassom.

Os canais para os sinais analógicos estão representados por Ch1 e Ch2. O canal Ch1 recebe o sinal, gerado pelo Ultrassom. O Ch2 é responsável por sincronizar o sinal do Gerador Ultrassom e o Osciloscópio. Conforme mencionado, anteriormente, a Técnica,

utilizada neste Trabalho, é a Transparência e o Pulso Eco. Assim, conexões para o Método da Transparência do Sinal, criado pelo Gerador de Ultrassom, são, respectivamente, T e R; no caso do Método Pulso Eco, utiliza-se, somente, a conexão T. A conexão para sincronismo do sinal analógico, produzido pelo Gerador de Ultrassom, que é transmitido para o Osciloscópio, é a indicada, como *Sync*; e, o *RF OutPut* é a saída analógica de rádio frequência do Gerador de Ultrassom. *Sync* e o *RF OutPut* estão, diretamente, ligados ao Osciloscópio; e, são responsáveis pela exibição da forma de onda gerada, quando se passa o sinal ultrassônico, pelo material em análise.

No Método da Transparência, o transdutor transmissor emite as ondas; e, boa parte delas são captadas, pelo transdutor receptor; demonstrando, na tela do Osciloscópio, o espectro, com o seu decaimento exponencial, que representa o coeficiente de amortecimento e as suas perdas, por espalhamento ou absorção da energia ultrassônica. Para o Método Pulso Eco, utiliza-se, apenas, um transdutor. A medida do tempo, decorrido de propagação da onda, é feita vinculada diretamente, à base de tempo, selecionada no Osciloscópio. Nesse caso, é tomada uma referência comum a dois ecos consecutivos; que pode ser o ponto de máximo dos ecos ou o ponto de inflexão (GUERRA, 2014).

Para cada material, mediam-se, primeiramente, as amostras de menor e maior umidade, o Índice de Vazios ou % de Finos, a fim de padronizar a visualização das medidas. Assim, manteve-se, sempre, a divisão, na base de tempo; e, uma escala de tensão para medir a amplitude do sinal constante; e, que enquadrava toda a forma de onda e a sua atenuação, na tela do Osciloscópio. Além disso, alinhou-se o ruído de base da forma de onda, com o eixo x central da tela. (Figura 19).

Os Transdutores Longitudinais, de faces planas, e, frequência de 50kHz (para a Técnica da Transparência); e, 3,5 MHz (para a Técnica Pulso Eco), da marca OLYMPUS, foram utilizados, neste Trabalho; ligados ao Osciloscópio, por meio de cabos coaxiais, fornecidos pelo próprio fabricante. Segundo Teixeira *et al.* (2015), essa é a frequência ideal para as dimensões das amostras estudadas, devido à função do comprimento de onda; uma vez que, quanto maior o número de ondas, percorrendo o material, mais proximidade com a hipótese de meios infinitos.

Neste Estudo, o material de acoplamento (gel condutor) entre a amostra e os transdutores, a preparação da amostra e o procedimento de teste foi repetido, sistematicamente, conforme sugerido por Gheibi e Hedayat (2018).



Figura 19: Tela do Osciloscópio (Ferronato, 2016).

Para todos os testes e para cada uma das amostras, realizaram-se 3 leituras; retirando e colocando os transdutores, a cada leitura. Além disso, a força aplicada a cada transdutor, também, foi padronizada, por meio de um bloco de madeira, apoiado sobre o transdutor. Portanto, as variações da amplitude transmitida, da velocidade e da frequência dominante foram devidas; principalmente, pelas mudanças de propriedades das amostras de solo.

Em cada Ensaio, através do Osciloscópio, salvaram-se os dados de forma de onda, que continham os pontos para a reprodução da curva posteriormente. Ao total, são fornecidos 600 pontos. Com o Osciloscópio, é possível, ainda, salvar a imagem, que aparece no visor do Osciloscópio e um arquivo, em .txt; que contém a configuração desse, na realização do Ensaio.

3.3. Análise dos Dados

Um Programa Computacional, em MatLab®, para exibir a forma de onda, da tela do Osciloscópio; e, capturar os pontos, manualmente, necessários à avaliação do formato de onda, no domínio do tempo, foi utilizado (Figura 20). O primeiro pico se refere ao pico de maior amplitude; e, a partir deste, contaram-se, em média, de 30 a 40 picos, para a análise do formato de onda. Esse mesmo processo foi utilizado, por Ferronato (2016), para argamassas; e, concluiu-se que, apesar de ser feito, manualmente, ofereceu mais precisão, rapidez e organização sobre as informações.

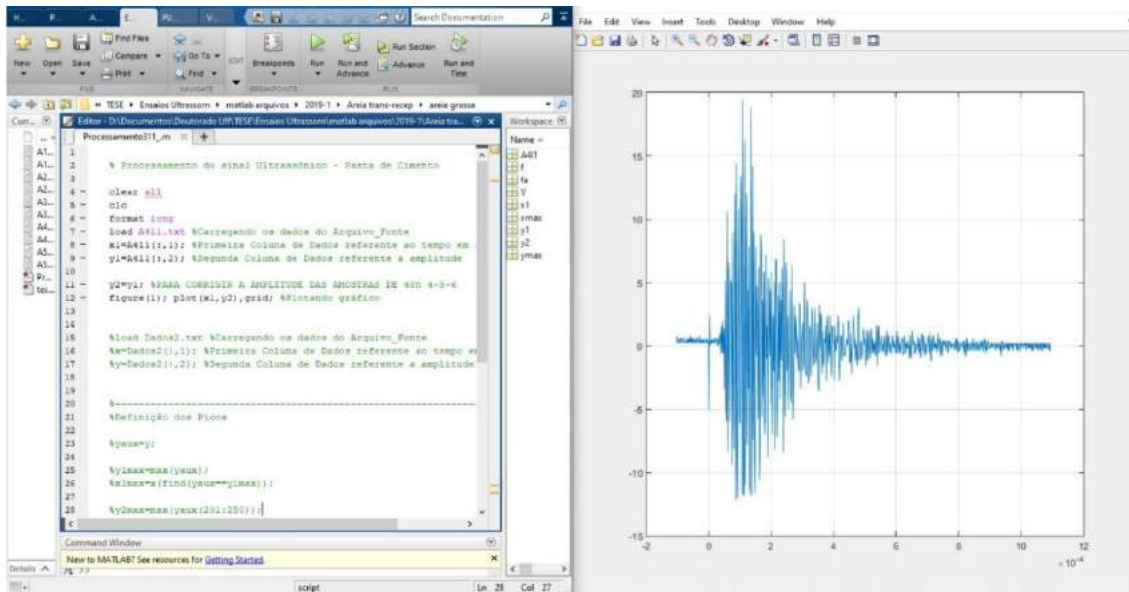


Figura 20: Imagem do Algoritmo em MatLab e a Exibição do Formato de Onda. Adaptado de Ferronato (2016).

Realizou-se, então, o cálculo do decremento logarítmico (Equação 16), para a obtenção do Coeficiente de Amortecimento (Equação 17).

$$\Psi = \ln \frac{U_1}{U_2} \quad (16)$$

Onde:

Ψ é o decremento logarítmico

U_1 é o valor da amplitude do primeiro maior pico;

U_2 é o valor da amplitude do n ésimo pico, após a perda de amplitude do sinal capturado.

$$\zeta = \frac{\Psi}{\sqrt{4\pi^2 \cdot n^2 + (\Psi^2)}} \quad (17)$$

ζ é o Fator ou o Coeficiente de Amortecimento, para Sistemas Sub Amortecidos;

n é o número de períodos do segundo ponto captado, distantes da amplitude do primeiro maior pico.

A Curva, que tangencia a forma de onda, produzida no Ensaio de Ultrassom, no domínio do tempo, foi o resultado da Equação 18.

$$A.e^{-\zeta\omega_n t} \quad (18)$$

Sendo A é a amplitude máxima da forma de onda, com um acréscimo visual do valor, tendo, como base, o comportamento da curva a ser gerada; e é uma função exponencial negativa e positiva, para criar uma envoltória na forma de onda, com seus expoentes, calculados, anteriormente; e, t representa a duração da forma de onda, na base de tempo da forma. ω_n é a frequência natural do Sistema Não Amortecido, representado pela Equação 19.

$$\omega_n = \frac{\omega d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (19)$$

Onde $\omega d = 2\pi/TD$ e representa a frequência natural de Amortecimento do Sistema. O valor de TD foi calculado, pela Equação 20; e, determina o período de vibração amortecida, entre o pico de maior amplitude e o enésimo pico, após a perda de vibração (FERRONATTO, 2016).

$$TD = \frac{t_f - t_i}{n} \quad (20)$$

Onde:

t_i é o valor do tempo, no primeiro pico mais alto;

t_f é o valor do tempo, no enésimo pico, após a perda da energia de vibração;

n é o valor dos picos, distantes do primeiro pico mais alto.

Conforme citado, anteriormente, realizaram-se 3 leituras, para cada amostra; e, com os resultados das análises de todas a leituras, uma média aritmética definiu o valor final de ζ e ω_n para o cálculo da Curva, que tangencia o formato de onda obtido. Conforme explicado, em Ferronato (2016), o valor para a amplitude é estimado, aleatoriamente; entretanto, seguiu-se uma curva imaginária, estipulando valores próximos à amplitude máxima, que tendem a respeitar ao decaimento e ao contorno, por toda a forma de onda. A Figura 21 ilustra o formato de onda, obtido pelo Pulso Ultrassônico e a sua respectiva envoltória.

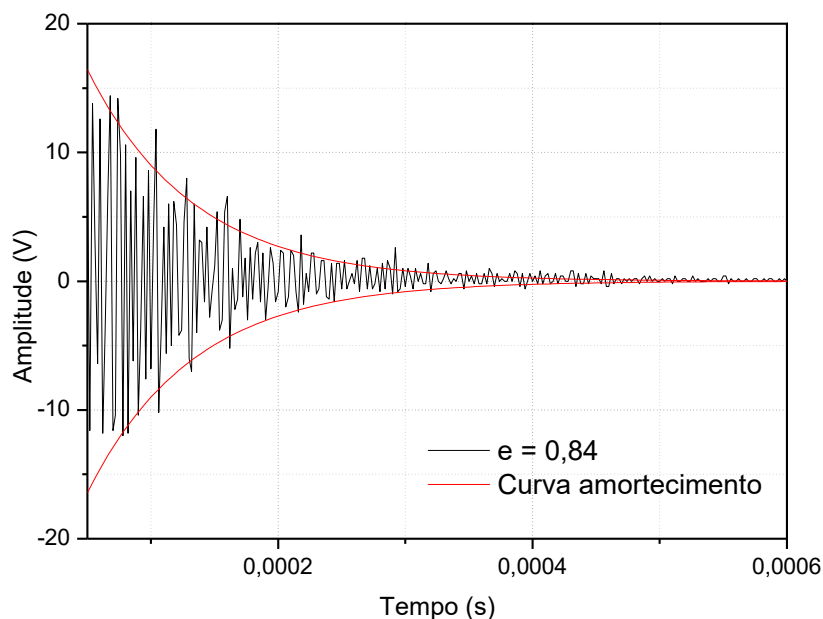


Figura 21: Formato de Onda e sua Envoltória para um Solo Granular Saturado, com Índice de Vazios (e) de 0,84.

Para a análise do formato de onda, no domínio da frequência, o processamento dos sinais foi possível, por meio de algoritmo em MatLab®, baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT), que converte o sinal, no domínio do tempo, exibido pelo Osciloscópio, em um espectro, no domínio da frequência.

Para o cálculo da velocidade de Pulso Ultrassônico, utilizou-se a Equação 24.

$$UPV = \Delta S / \Delta t \quad (24)$$

Para a Técnica do Pulso Eco, Δt representa a distância entre os picos do pulso e do primeiro eco; e, ΔS é o dobro do tamanho da amostra. Se calculada pela Técnica da Transparência, Δt representa a distância a saída do Pulso, pelo transdutor, até o início do registro do sinal ultrassônico; e ΔS é o tamanho da amostra.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Características Geotécnicas dos Materiais.

4.1.1. Materiais Granulares - Areias

A Figura 22 apresenta o tamanho e o formato do grão, visto no Microscópio Eletrônico de Varredura, para as areias, com granulometria uniforme $D_{50} = 1,15\text{mm}$. Nota-se que a forma da partícula, referente à sua rugosidade, está variando entre sub-redonda e redonda. Essas mesmas características foram observadas para as demais areias utilizadas.

A Figura 23 apresenta a Curva Granulométrica das Areias utilizadas. Têm-se, então, três tipos diferentes de areia: areia média; a fina, com grãos, variando, entre 0,59 mm a 0,074mm e diâmetro representativo (D_{50}) igual a 0,48 mm; areia grossa, com grãos, entre 2,0mm a 0,6mm e $D_{50} = 1\text{mm}$; e, areia grossa uniforme, com grãos entre 1,18mm e 0,6mm e $D_{50} = 1,15\text{mm}$.

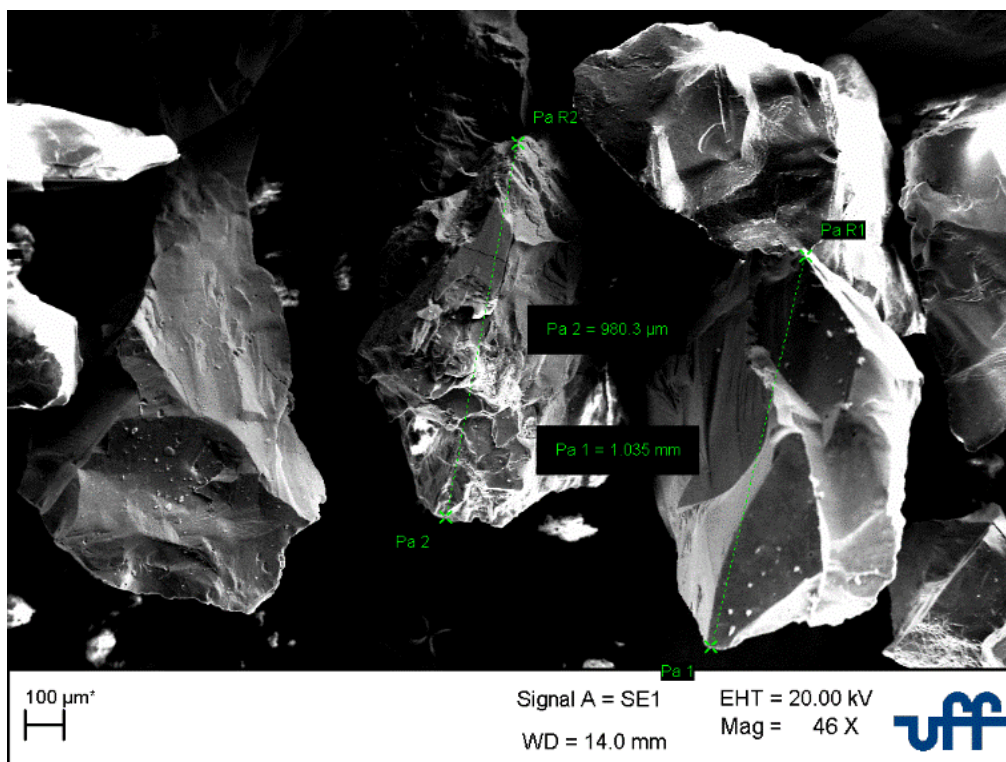


Figura 22: Imagem, no MEV, da Areia. Medidas e Formato Arredondado.

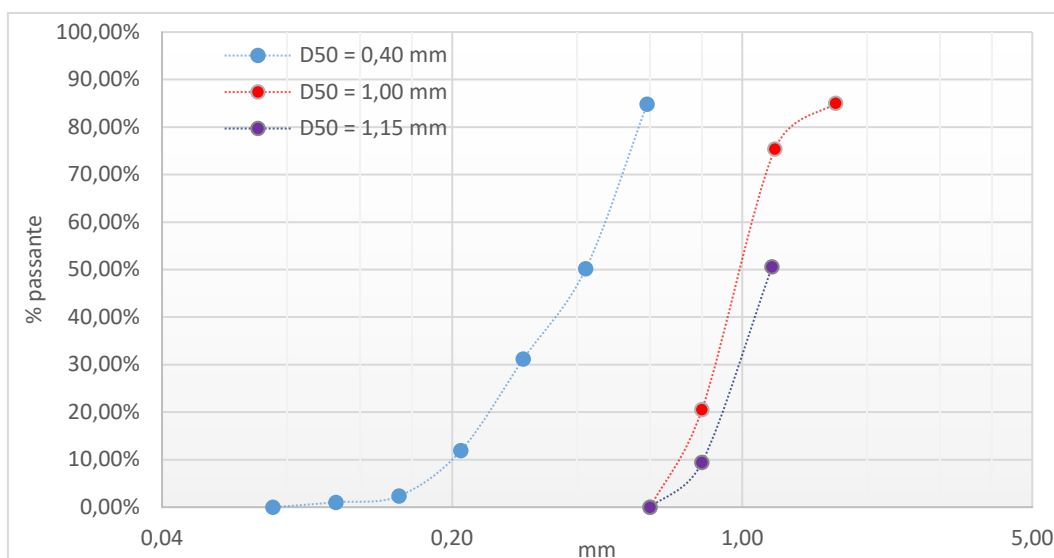


Figura 23: Curva Granulométrica das Areias, utilizada, neste Trabalho.

4.1.2. *Materiais Finos*

A Figura 24 apresenta o tamanho e o formato do grão, visto no Microscópio Eletrônico de Varredura, para o solo de baixa e alta plasticidade. Trata-se de um material, com granulometria menor que 0,075mm; sendo, portanto, um material fino. A Figura 25 apresenta o resultado do Ensaio de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), para o material de baixa plasticidade; e, junto aos demais resultados geotécnicos, nota-se que esse material pertence ao grupo das Caulinitas. O material de Alta Plasticidade, conforme citado no Capítulo Materiais e Métodos, é uma Bentonita e, portanto, pertencente ao grupo das Montmorilonitas.

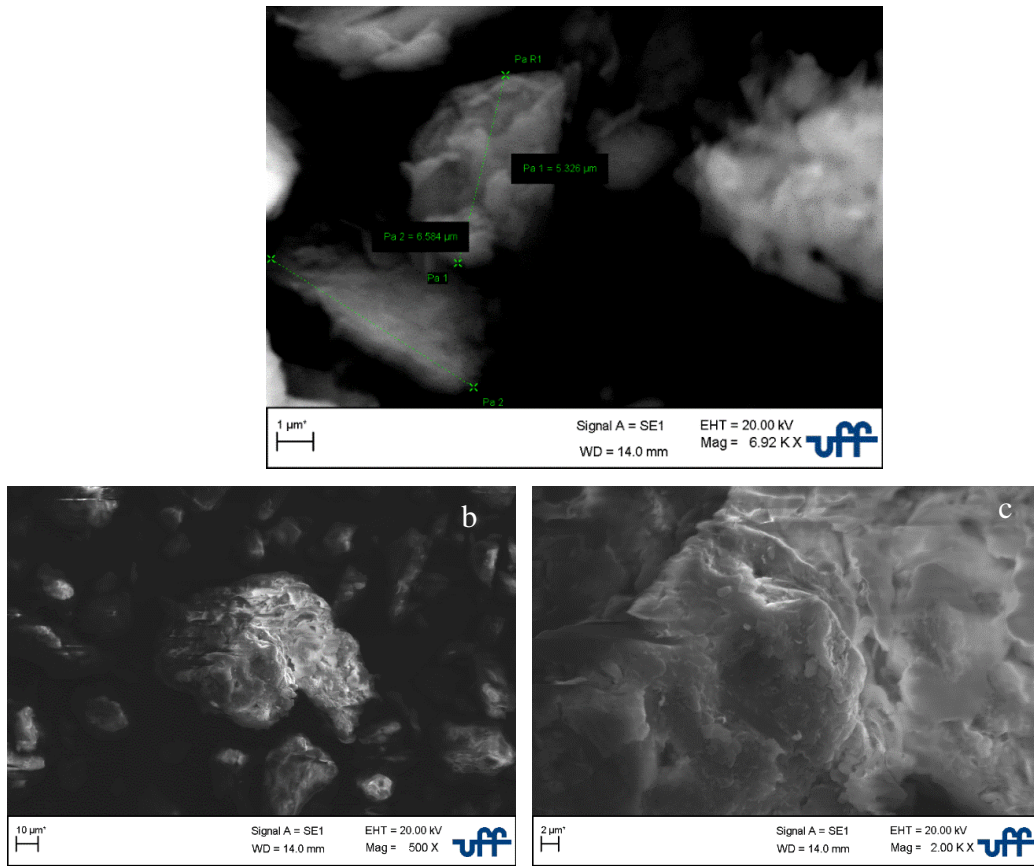


Figura 24: Imagem, no MEV, dos Materiais de Granulometria Fina. Em (a) de Baixa Plasticidade; e, em (b) e (c) Alta Plasticidade.

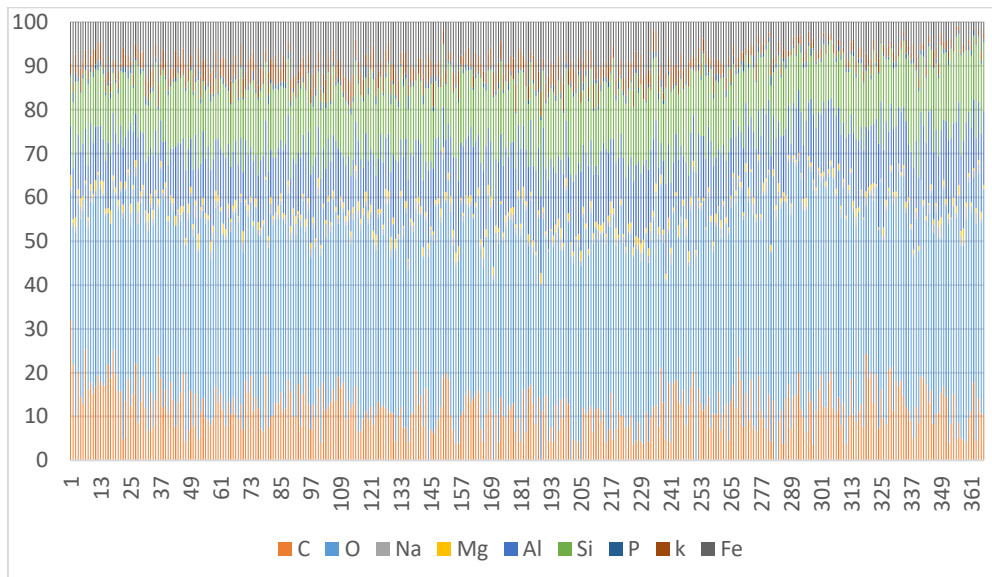


Figura 25: EDS Material de Baixa Plasticidade.

A Figura 26 apresenta a Curva de Liquidez, dos materiais de granulometria fina, utilizados neste Trabalho.

Realizaram-se 10 Ensaio de Limite de Liquidez; e, desconsiderou-se o maior e o menor valor de umidade. Assim, o Limite de Liquidez foi determinado, com 47% de umidade, para o solo de baixa plasticidade; e, 37,5%, para o solo de alta plasticidade.

O Ensaio de Plasticidade foi realizado, 10 vezes; e, o maior e o menor valor da umidade foram desconsiderados. Assim, a média aritmética das umidades do Ensaio de Plasticidade foi 33%, para os solos de baixa plasticidade; e, 57%, para os solos de alta plasticidade.

A Figura 27 apresenta a Curva de Compactação do solo fino, de baixa plasticidade. Observa-se que a umidade ótima igual a 24,5%; e, o peso específico seco máximo igual a 1,58 g/cm³. O mesmo Ensaio foi realizado, para o solo de alta plasticidade e a umidade ótima e o peso específico seco máximo foram, respectivamente, 77,5% e 1,72 g/cm³.

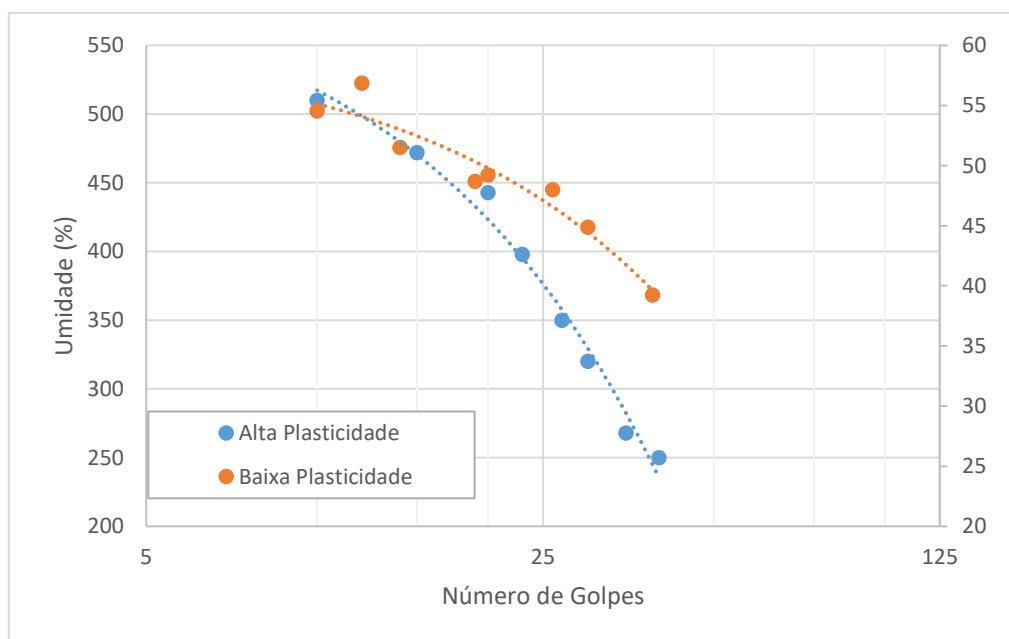


Figura 26: Curva de Limite de Liquidez para o Solo de Baixa e Alta Plasticidade.

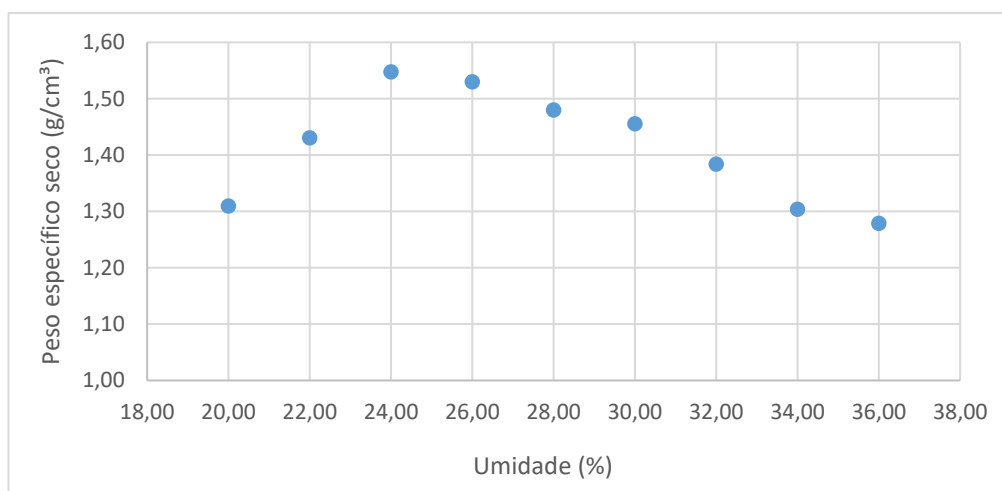


Figura 27: Curva de Compactação do Solo Fino de Baixa Plasticidade.

A permeabilidade do material foi determinada, pelo permeômetro de carga variável; e, considerou-se a média de 10 leituras realizadas; sendo: $5,3 \times 10^{-7}$ cm/s e 10^{-12} cm/s, para os solos de baixa e alta plasticidade, respectivamente. A Tabela 4 resume as características geotécnicas dos solos finos de alta e baixa plasticidade, utilizados neste Trabalho.

Tabela 4: Características Geotécnicas dos Solos de Baixa e Alta Plasticidade, utilizados neste Trabalho.

Características Geotécnicas	Baixa Plasticidade	Alta Plasticidade
Limite de Liquidez (%)	47	375
Limite Plasticidade (%)	33	57
Umidade Ótima Compactação (%)	24,5	77,5
Peso Específico Seco Máximo (g/cm³)	1,58	1,72
Permeabilidade (cm/s)	10^{-7}	10^{-12}

4.1.3. Misturas de Areias e Finos

A Figura 28 representa a Microscopia, realizada para as amostras, com solo compactados, com 10, 30, 50, 80 e 100% de finos, com energia de compactação normal.

A Figura 28a representa as amostras, com 10% de finos. Observa-se, principalmente, o contato entre os grãos de areia. Na Figura 28b, com 30% de finos, observa-se o aumento das partículas finas, entre os grãos de areia. Com 50% de finos (Figura 28c), nota-se que as partículas finas começam a envolver todo o grão de areia; sendo este aparecendo, menos expressivamente, na imagem. Com 80% de finos,

conforme demonstrado, na Figura 28d, observam-se, apenas, pequenas arestas dos grãos de areia; ficando esses grãos separados uns dos outros, por meio da partícula do material fino. Na Figura 28e, observa-se 100% de finos e a ausência do grão de areia; e, na Figura 28f, observa-se a presença de água, pela alteração da coloração da amostra.

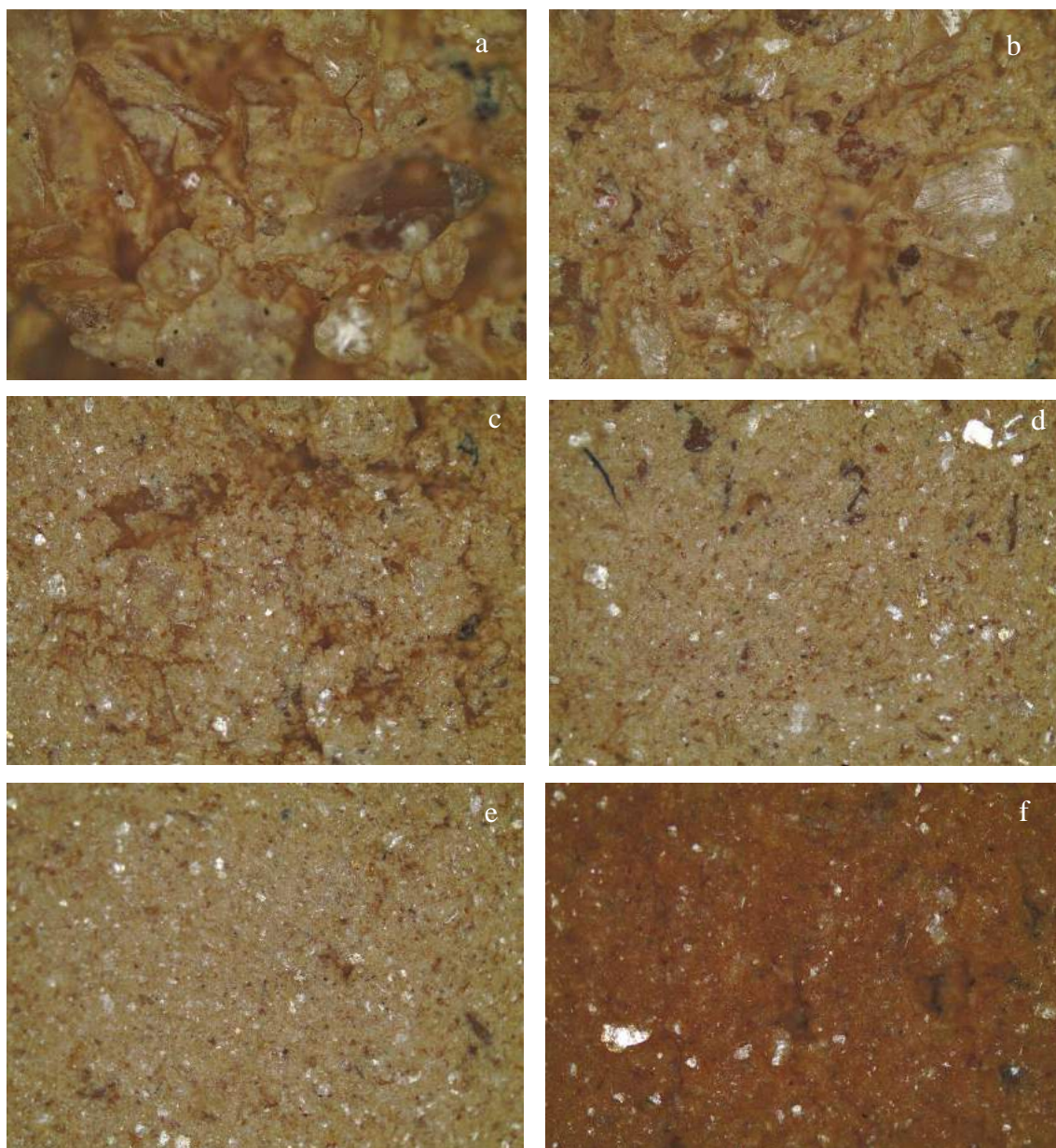


Figura 28: Microscopia Ótica (50x) para as Amostras, com 10% (a), 30% (b), 50% (c), 80% (d) e 100% (e) de Finos. Em (f), Amostra, com 100% de Finos, com Amostra Úmida, no dia da Compactação. Energia de Compactação Normal.

A permeabilidade foi medida com o permeâmetro de carga variável; e, a Tabela 5 apresenta os resultados. Esses resultados vão ao encontro com o visualizado, no Ensaio

de Microscopia. Nas amostras, com maiores quantidades de areia, conforme o esperado, tem-se um alto coeficiente de permeabilidade; e, as amostras, com 100% de finos, o menor coeficiente de permeabilidade.

Tabela 5: Valores do Coeficiente de Permeabilidade para as Misturas de Solo, utilizadas neste Trabalho.

% Finos	K_s (m/s)
10	2,35E-02
30	3,86E-05
50	9,27E-05
80	1,01E-06
100	5,30E-07

A Tabela 6 apresenta a Umidade Ótima (w_{otm}) e o peso específico seco máximo ($\gamma_{seco\ max}$), para cada energia de compactação; e, porcentagens de Finos, utilizados, neste Trabalho. Informa, também, os Índices de Vazios (e), estimados para cada amostra.

Como era esperado, e, amplamente, citado na literatura, o aumento da energia de compactação diminui a Umidade Ótima; e, aumenta o peso específico seco máximo. A Figura 29 ilustra bem a diferença do resultado de compactação, com o aumento de energia. Logo, há diminuição do Índice de Vazios.

Tabela 6: Valores Referentes ao Peso Específico Seco Máximo, Umidade Ótima e Índice de Vazios, para as Energias com Compactação, utilizadas neste Trabalho.

% Finos	Energia Normal			Energia Intermediária			Energia Modificada		
	$\gamma_{seco\ max}$ (g/cm ³)	w_{otm} (%)	e	$\gamma_{seco\ max}$ (g/cm ³)	w_{otm} (%)	e	$\gamma_{seco\ max}$ (g/cm ³)	w_{otm} (%)	e
10	1,82	11,60	0,47	1,86	10,60	0,44	1,89	10,00	0,41
30	1,89	11,80	0,44	1,92	10,90	0,42	1,99	9,80	0,37
50	1,91	13,00	0,39	1,94	12,40	0,37	1,97	11,80	0,35
80	1,61	21,40	0,62	1,64	20,10	0,59	1,67	19,30	0,56
100	1,58	24,50	0,66	1,61	22,00	0,63	1,64	21,00	0,60

Com os resultados da Tabela 6, observa-se um menor Índice de Vazios, para a configuração da Matriz de Solo, com 50% de Finos. Esse resultado se deve ao fato de as partículas finas ocuparem os vazios dos grãos de areia; e, portanto, diminuindo o Índice

de Vazios. No entanto, para as amostras com porcentagens de finos acima de 50%, nota-se aumento do Índice de Vazios.

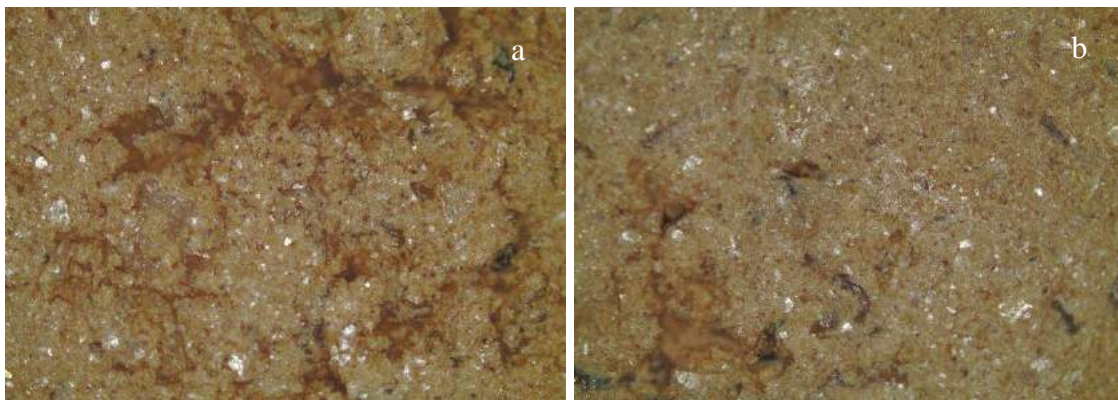


Figura 29: Comparação entre Mistura, com 50% de Finos Compactados com Energia Normal (a) e Energia Modificada (b).

Além da alteração dos Índice de vazios em função da porcentagem de finos, houve, também, significativa alteração, no Ensaio de Resistência; a compressão simples (Figura 30 e Figura 31); realizado para as amostras compactadas com energia normal. As amostras, com 50% de Finos, obtiveram a maior resistência. Segundo Pinto (2006), alguns fatores influenciam na resistência dos solos, como a distribuição granulométrica, o ângulo de atrito, o entrosamento das partículas e o tamanho dos grãos.

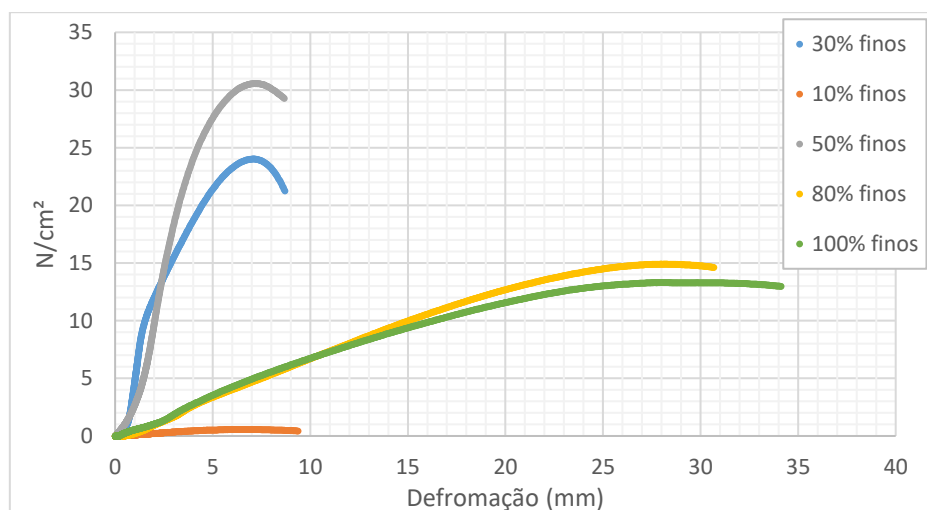


Figura 30: Ensaio de Compressão Simples para Misturas de Areia e Finos, Compactados em Energia Normal.

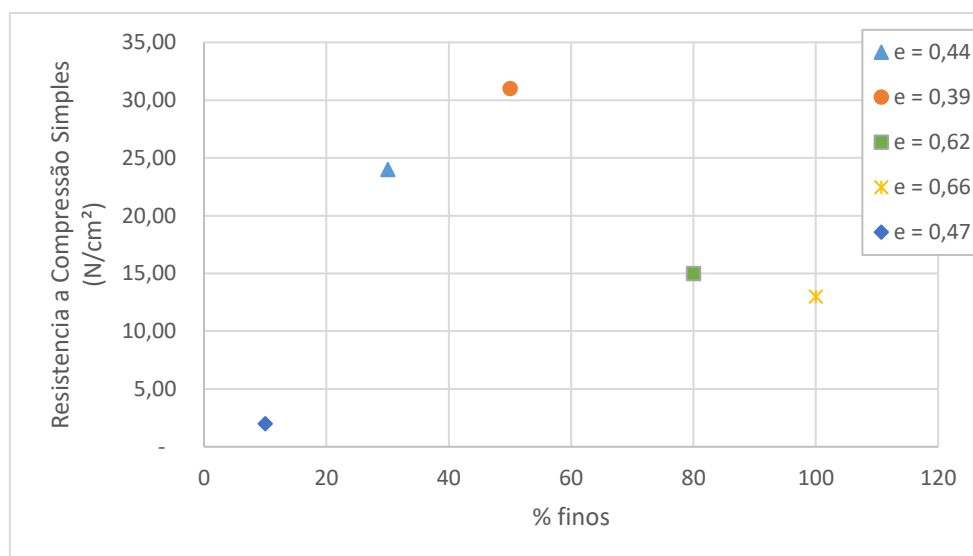


Figura 31: Correlação entre a Resistência à Compressão Simples e à % de Finos para Misturas de Areia e Finos.

Junior (2019) ressalta que a transmissão das forças, na argila, dá-se, pela dupla camada de água (água adsorvida). O grande número de partículas causa a dispersão das forças aplicadas; reduzindo-a. Já, nas areias, esse contato é dado, efetivamente, pelos grãos.

4.2. Ultrassom em Materiais Granulares Saturados

A Figura 32 e o Anexo A demonstram o formato de onda e a envoltória (Curva de Amortecimento) para as amostras de solo granular saturado, com $D_{50} = 0,40$ mm; considerando diferentes Índices de Vazios. Comportamento semelhante foi observado para as demais areias, com $D_{50} = 1,00$ mm e $D_{50} = 1,15$ mm.

Nota-se que houve variação do formato de onda em todas as amostras analisadas. Na Figura 32a ($e = 0,56$), houve o maior valor para a amplitude e o menor tempo, quando comparado às demais amostras. Com o aumento do Índice de Vazios (Figura 32b), observa-se o espalhamento do sinal, o aumento do tempo de propagação da onda e da amplitude. Para as amostras, com Índice de Vazios de 0,74 (Figura 32c), observa-se o espalhamento, o aumento do tempo de propagação da onda e a diminuição da amplitude. Na Figura 32d ($e = 0,84$) e na Figura 32e ($e = 0,92$), observa-se o maior espalhamento, o aumento significativo do tempo de propagação da onda e da amplitude.

Ferronato (2016) atribui a presença de vazios ou a forma arredondada dos grãos de areia a um aumento do espalhamento, no sinal ultrassônico, para materiais cerâmicos cimentícios. Segundo Pessoa (2013), em um meio heterogêneo, pequenas porções da Onda Ultrassônica tendem a se desviarem do pulso principal, devido ao fato de descontinuidades, presentes no material; como o contorno de grãos, entre outros.

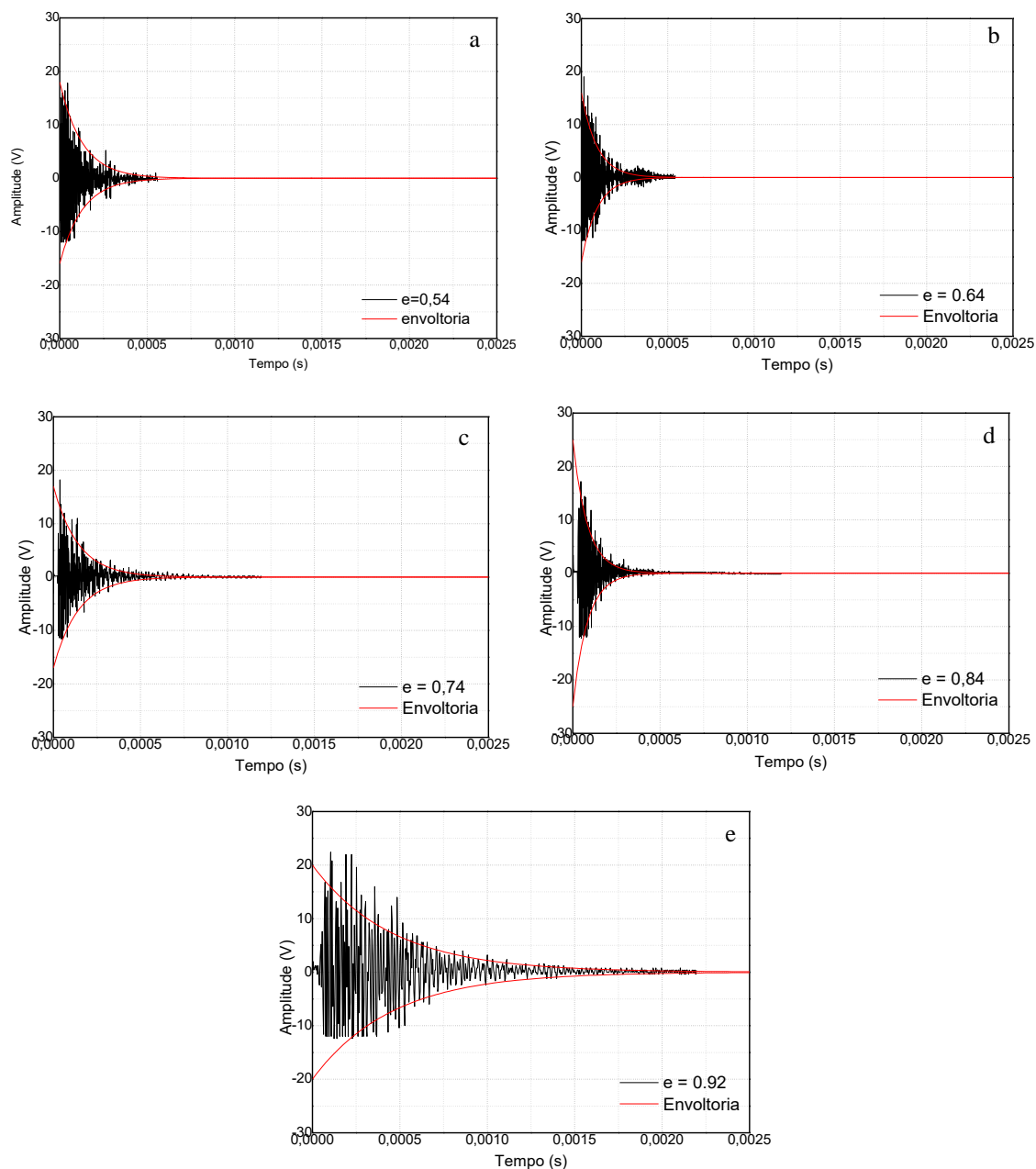


Figura 32: Formato de Onda no Domínio do Tempo. Método da Transparência para Areias Saturadas, com $D_{50} = 0,40\text{mm}$. Em (a) $e = 0,56$; (b) $e = 0,64$; (c) $e = 0,74$; (d) $e = 0,84$; (e) $e = 0,92$.

Quiviger *et al.* (2012), Pessoa (2013) e Carelli (2014) apresentam resultados semelhantes de espalhamento de ondas, para material cerâmico cimentícios; e, concluem

que a forma de onda, apresentando picos e vales mais espaçados, tamanhos aleatórios e com a energia reduzida, explica-se, uma vez que as ondas ricocheteiam, por entre os grãos; ocorrendo o efeito espalhamento.

Analisou-se, estatisticamente, a variação de cada característica do Pulso Ultrassônico, por faixas de Índices de Vazios, conforme exemplificado, na Tabela 7. Assim, definiram-se os valores representativos, para cada faixa de Índice de Vazios (Tabela 8); possibilitando uma melhor análise dos resultados, para cada tipo de areia; bem como, a comparação entre as areias estudadas. Esses resultados são apresentados, nas Seções 4.2.1 a 4.2.4.

Tabela 7: Variação Média do Coeficiente de Amortecimento e Índice de Vazios para as Areias, com $D_{50} = 1.15\text{mm}$.

Faixa Índice de Vazios	Variação Índice de Vazios (%)	Variação Média Coeficiente de Amortecimento (%)	Média Coeficiente de Amortecimento
0,53 - 0,58	7,76%	8,63%	1,3304182
0,60 - 0,65	5,47%	2,07%	1,4347825
0,73 - 0,78	5,24%	7,88%	1,5764968
0,83 - 0,87	3,92%	3,03%	1,6346784
0,91 - 1,11	18,02%	7,95%	1,6762169

Tabela 8: Valores Referentes do Índice de Vazios e Média do Coeficiente de Amortecimento; incluindo o Desvio Padrão (DP) para as Areias, estudadas neste Trabalho.

Índice de Vazios	Média Coeficiente de Amortecimento					
	$D_{50} = 1,15\text{mm}$	DP	$D_{50} = 0,40\text{mm}$	DP	$D_{50} = 1,0\text{mm}$	DP
0,55	0,01330	0,00052	0,00600	0,00028	0,00754	0,00054
0,65	0,01435	0,00018	0,00756	0,00027	0,00963	0,00028
0,75	0,01576	0,00044	0,01002	0,00001	0,01210	0,00076
0,85	0,01635	0,00027	0,01116	0,00058	0,01020	0,00092
0,95	0,01601	0,00063	0,00990	0,00032	0,00889	0,00008

4.2.1. Coeficiente de Amortecimento

As amostras, estudadas neste Trabalho, apresentaram uma boa correlação entre a média do Coeficiente de Amortecimento e o Índice de Vazios, conforme demonstrado, na Figura 33. Nota-se que, quanto menor o Índice de Vazios, menor o Coeficiente de Amortecimento. O acréscimo de água, no meio, é detectado, pela Onda Ultrassônica, por meio de sua atenuação; aumentando o Coeficiente de Amortecimento.

Para as areias $D_{50} = 1,0$ mm, após o Índice de Vazios de 0,75, há uma redução do Coeficiente de Amortecimento. Para as areias $D_{50} = 0,40$ mm e $D_{50} = 1,15$ mm, esse fato ocorre para o Índice de Vazios, acima de 0,85. Assim, identifica-se uma mudança de meio dominante, na Matriz de Solo; passando, agora, a água ser o meio dominante.

Para o Índice de Vazios, acima de 0,75, observa-se uma menor variação da média do Coeficiente de Amortecimento; sugerindo que o acréscimo de água não influencia na mudança da estrutura da Matriz de Solo, que altere, significativamente, o seu comportamento.

A partir da Figura 33, é possível observar que maiores valores de Coeficiente de Amortecimento são obtidos para amostras com diâmetro representativo maior. As areias $D_{50} = 1,15$ mm, que possuem grãos mais uniformes, obtiveram os maiores Coeficientes de Amortecimento, com uma diferença significativa de, aproximadamente, 70% dessa areia, para as outras.

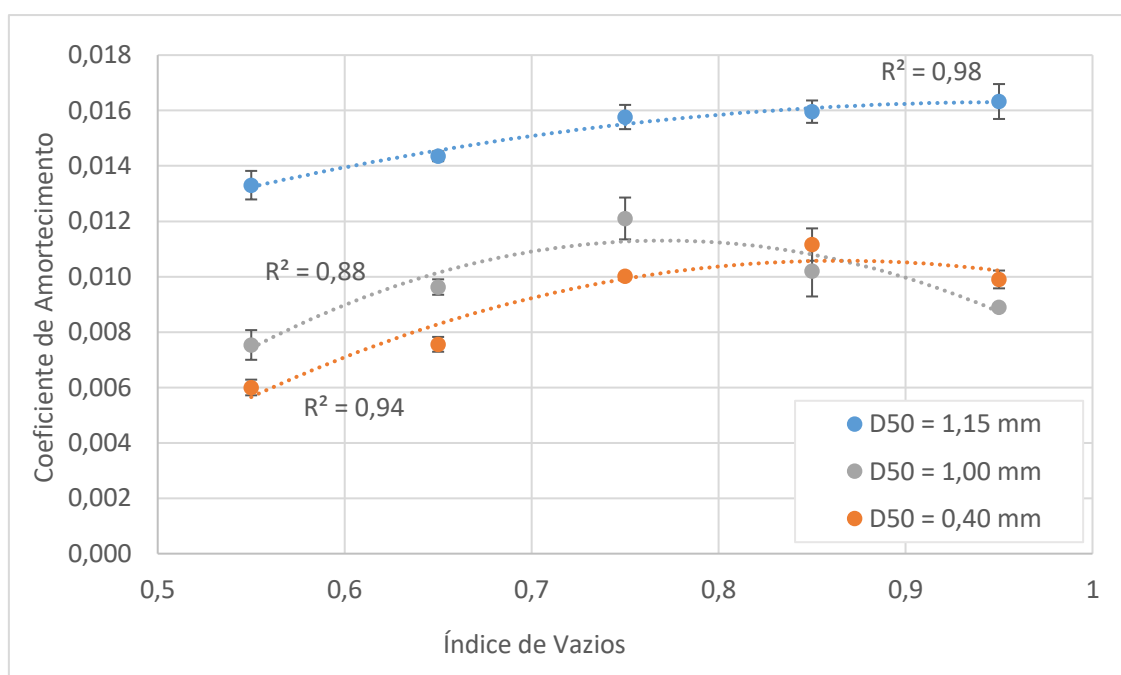


Figura 33: Relação entre Índice de Vazios e Coeficiente de Amortecimento.

4.2.2. Amplitude

A média da Amplitude máxima para os três tipos de areia é apresentada, na Tabela 9; e, a correlação com o Índice de Vazios, apresentada, na Figura 34. Segundo Gheibi e Hedayat (2018), a média da Amplitude máxima diminui, com o aumento dos Índices de Vazios.

Resultados semelhantes foram obtidos para as amostras, com o Índice de Vazios, até 0,75; assim, a Amplitude máxima diminui, com a aumento do Índice de Vazios. Para as amostras, com o Índice de Vazios, maior que 0,75, há aumento da média da Amplitude máxima.

Tabela 9: Variação da Média da Amplitude Máxima com o Índice de Vazios

Índice de Vazios	Média Amplitude máxima (V)					
	D50 = 1.15 mm	DP media	D50 = 0.40 mm	DP	D50 = 1.00 mm	DP
0,55	15,3	0,8	18,88	1,1	16,5	1,1
0,65	12,775	0,2	18,07	0,5	14,5	0,15
0,75	7,8	0,15	17,05	0	12,35	0,3
0,85	12,1	0,4	20,13	0,5	19,15	0,25
0,95	13	0,5	20,93	1,4	18,05	0,85
Água	26,6					

Essa alteração do comportamento da Amplitude máxima indica uma mudança significativa da Matriz do Solo; sugerindo a existência de zonas de transição do material dominante do meio, entre o Índice de Vazios, entre 0,75 e 0,85. Gheibi e Hedayat (2018) citam que mudanças na Amplitude máxima, transmitida em materiais granulares, são dependentes da área de contato e do tamanho dos poros entre as partículas. Portanto, para as amostras, com alto Índice de Vazios (acima de 0,75), a água exerce maior influência no meio; levando ao aumento da Amplitude.

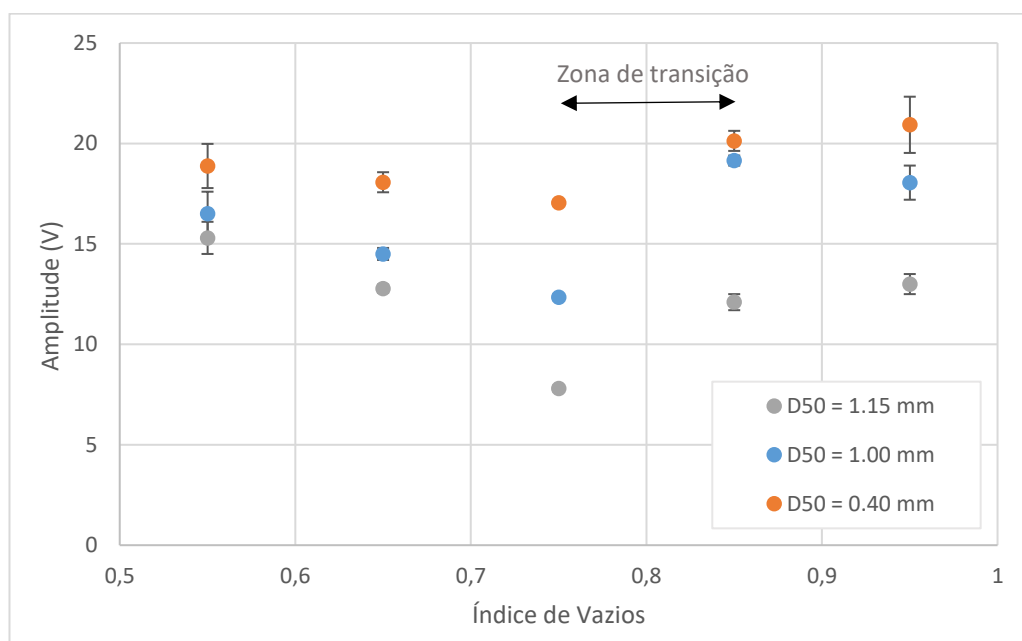


Figura 34: Relação entre Índice de Vazios e Amplitude para Solos Arenosos.

Nota-se, também, na Figura 34, que as amostras, com menor diâmetro representativo, possuem maior Amplitude máxima. Esses resultados corroboram com os resultados de Gheibi e Hedayat (2018), para Ondas de Compressão; e, (Dutta *et al.* (2019), para Ondas Cisalhantes.

Assim, além da existência de uma boa correlação entre Índice de Vazios, Coeficiente de Amortecimento e Amplitude, demonstra-se a identificação das mesmas zonas de transição, apontadas pela análise da Amplitude máxima e do Coeficiente de Amortecimento.

4.2.3. Frequência Dominante

Dutta *et al.* (2019) demonstraram que a variação, na razão das Transformadas Rápidas de Fourier, do sinal recebido, para o sinal transmitido, para diferentes valores de D_{50} , a uma determinada frequência, reduz-se, com o aumento de D_{50} . A Figura 35 apresenta uma variação da Frequência Dominante (aproximadamente 8%), na zona de domínio da partícula, indicando que a Frequência Dominante tende a diminuir, com o aumento do D_{50} .

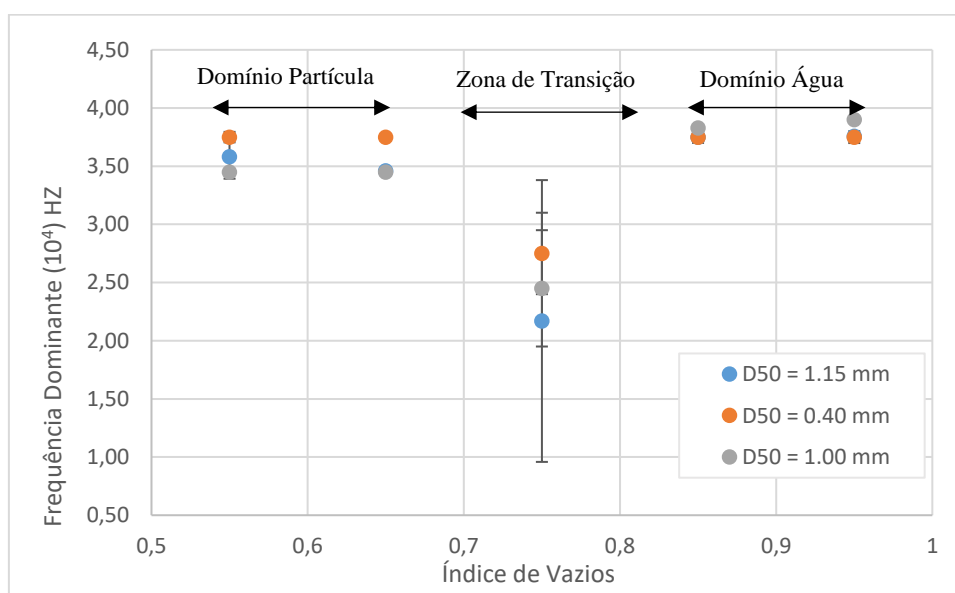


Figura 35: Variação entre a Média da Frequência Dominante e o Índice de Vazios.

A Figura 35 apresenta, também, uma zona de transição, determinada por uma variação, com alto desvio padrão da Frequência Dominante; e, após a zona de transição

de domínio da Matriz de Solo, obteve-se, independentemente, do tamanho do grão, a mesma frequência dominante; indicando a predominância da água, no meio.

Por fim, por meio das análises da Amplitude máxima, do Coeficiente de Amortecimento e da Frequência Dominante, foi possível identificar faixas de vazios, com alterações significativas dos sinais ultrassônicos; sendo, portanto, possível identificar zonas de transição, pelas características da Onda Ultrassônica, no domínio do tempo e frequência, para os solos granulares arenosos.

4.2.4. Velocidade do Pulso Ultrassônico

Zimmer (2004), Xu *et al.* (2013), Gheibi e Hedayat (2018) e Dutta *et al.* (2019) demonstraram que a velocidade do Pulso Ultrassônico diminui, com o aumento do Índice de Vazios. Resultados semelhantes são apresentados, na Tabela 10 e na Figura 36. Pode-se observar uma diminuição da velocidade do Pulso Ultrassônico, com o aumento dos Índices de Vazios, até 0,75; após esse valor, há aumento da velocidade. Conforme citado por Makse *et al.* (2004) e Zimmer (2004), a velocidade da Onda Ultrassônica depende, não somente, das partículas sólidas; mas, também, do arranjo e dos contatos. Assim, o aumento da velocidade representa o momento em que a água passa a ser o meio dominante; e, portanto, a velocidade aumenta, aproximando-se da velocidade representativa da água; 1.480 m/s, conforme a literatura.

Analisando, ainda, os resultados apresentados, na Tabela 10 e na Figura 37, onde se compara a VPU em função da compacidade relativa das areias, é possível observar que há baixa variação da velocidade, em função do tamanho do diâmetro representativo; podendo ser afirmado que a velocidade do Pulso Ultrassônico não depende do D_{50} .

Tabela 10: Valores da Velocidade do Pulso Ultrassônico com a Variação do Diâmetro Representativo e Índice de Vazios.

Índice de Vazios	VPU (m/s)					
	D50 = 1,15 mm		D50 = 0,40 mm		D50 = 1,00 mm	
	DP	DP	DP	DP	DP	DP
0,55	999,22	14,52	954,55	44,44	1043,56	13,30
0,65	889,68	5,69	839,20	0,00	909,93	5,26
0,75	890,00	10,80	822,07	11,26	794,74	9,07
0,85	940,00	9,35	945,41	5,87	1025,72	8,77
0,95	1230,00	32,00	1155,56	45,45	1263,30	27,57

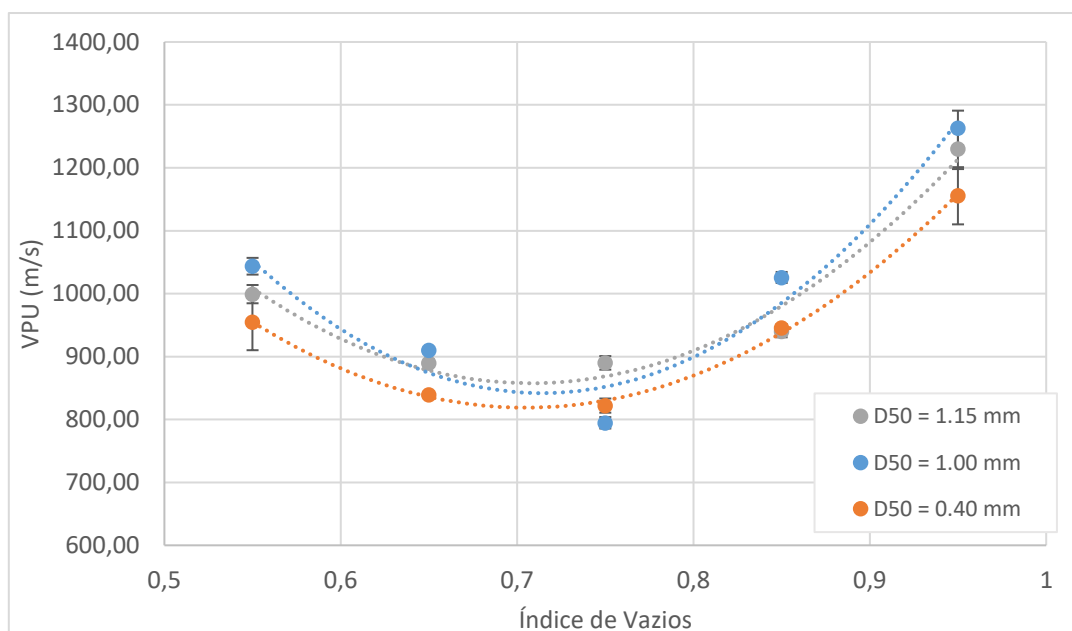


Figura 36: Variação do Índice de Vazios e a Média da Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU).

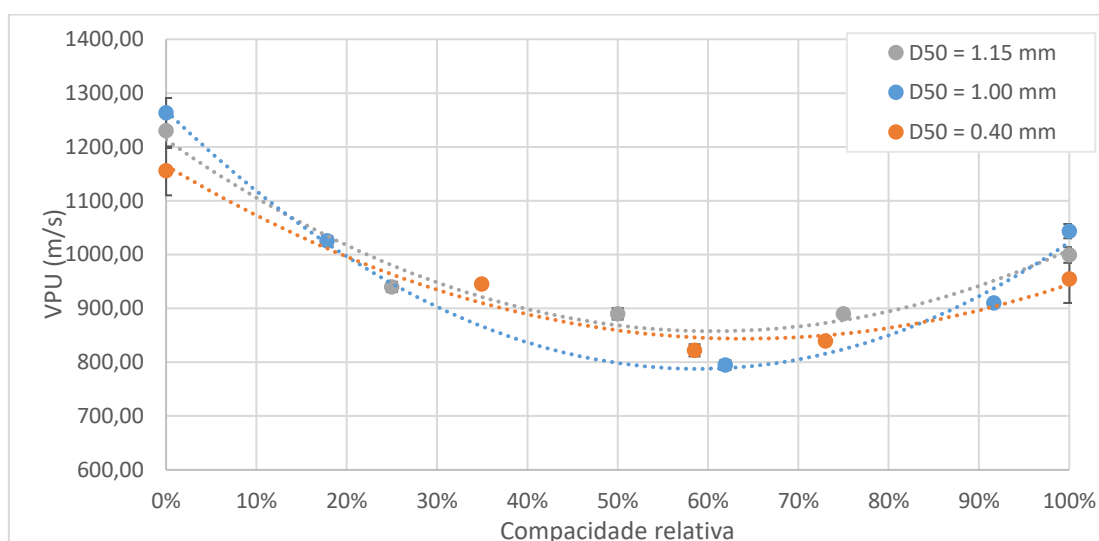


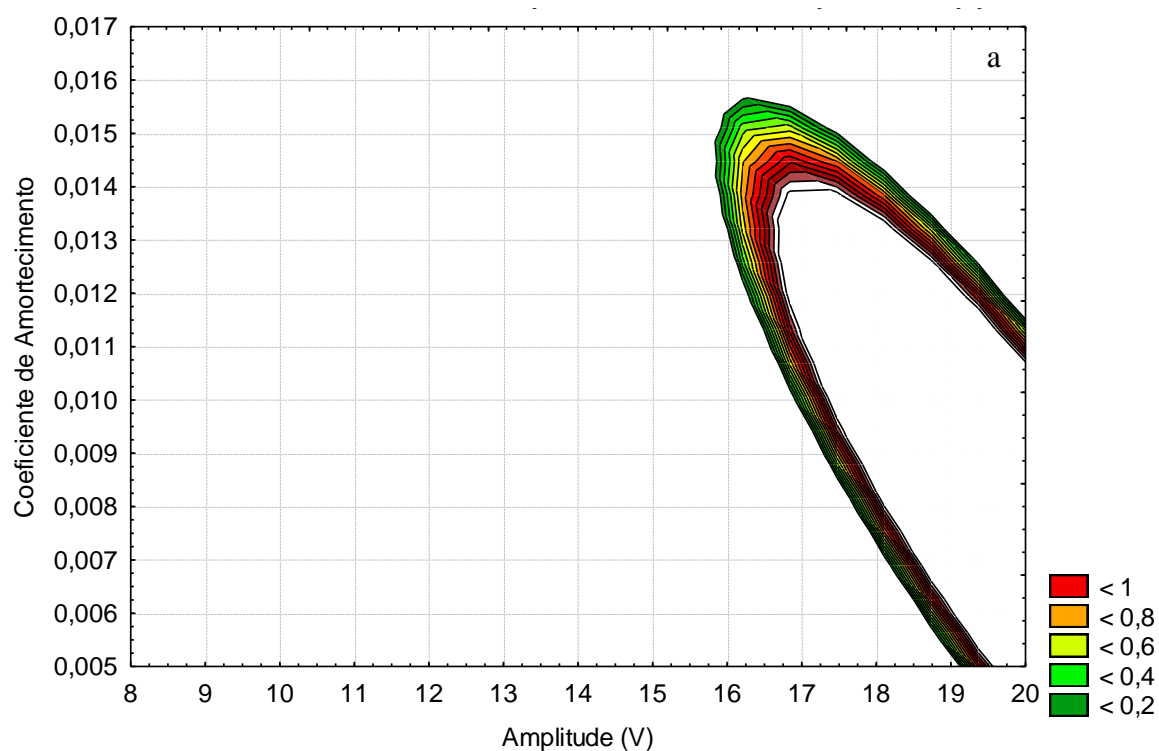
Figura 37: Variação da Compacidade Relativa (Cr) e a Média da Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU).

Esse resultado corrobora com os resultados, apresentados por Dutta *et al.* (2019), em que apontaram que a velocidade do Pulso Ultrassônico é independente do diâmetro representativo do grão.

A Figura 38 apresenta uma correlação estatística, entre a Compacidade Relativa (Cr), o Coeficiente de Amortecimento e a Amplitude, para as areias estudadas.

Chian, Tan e Sarma (2017) descreveram que, quando $Cr = 100\%$ implica que os grãos de areia estão dispostos, de modo que o volume de vazios, dentro dos grãos, seja o mínimo; e, um $Cr = 0\%$, significa que os grãos de areia estão dispostos, de modo que o

volume total de vazios é o máximo. Assim, como observado, na Figura 38, há influência do tamanho dos grãos e da densidade relativa, sobre as Propriedades Ultrassônicas; também, é possível observar o mesmo comportamento de Propriedades Ultrassônicas: aumentar a Amplitude máxima e diminuir o Coeficiente de Amortecimento significa aumentar o Cr. A Figura 38 (c) ($D_{50} = 1,15$ mm) apresenta uma pequena variação de Amplitude máxima e maiores valores de Coeficiente de Amortecimento, devido à influência do tamanho uniforme dos grãos. Portanto, além de uma boa existência de correlação entre a proporção de vazios, o Coeficiente de Amortecimento e a Amplitude, é possível identificar zonas de transição.



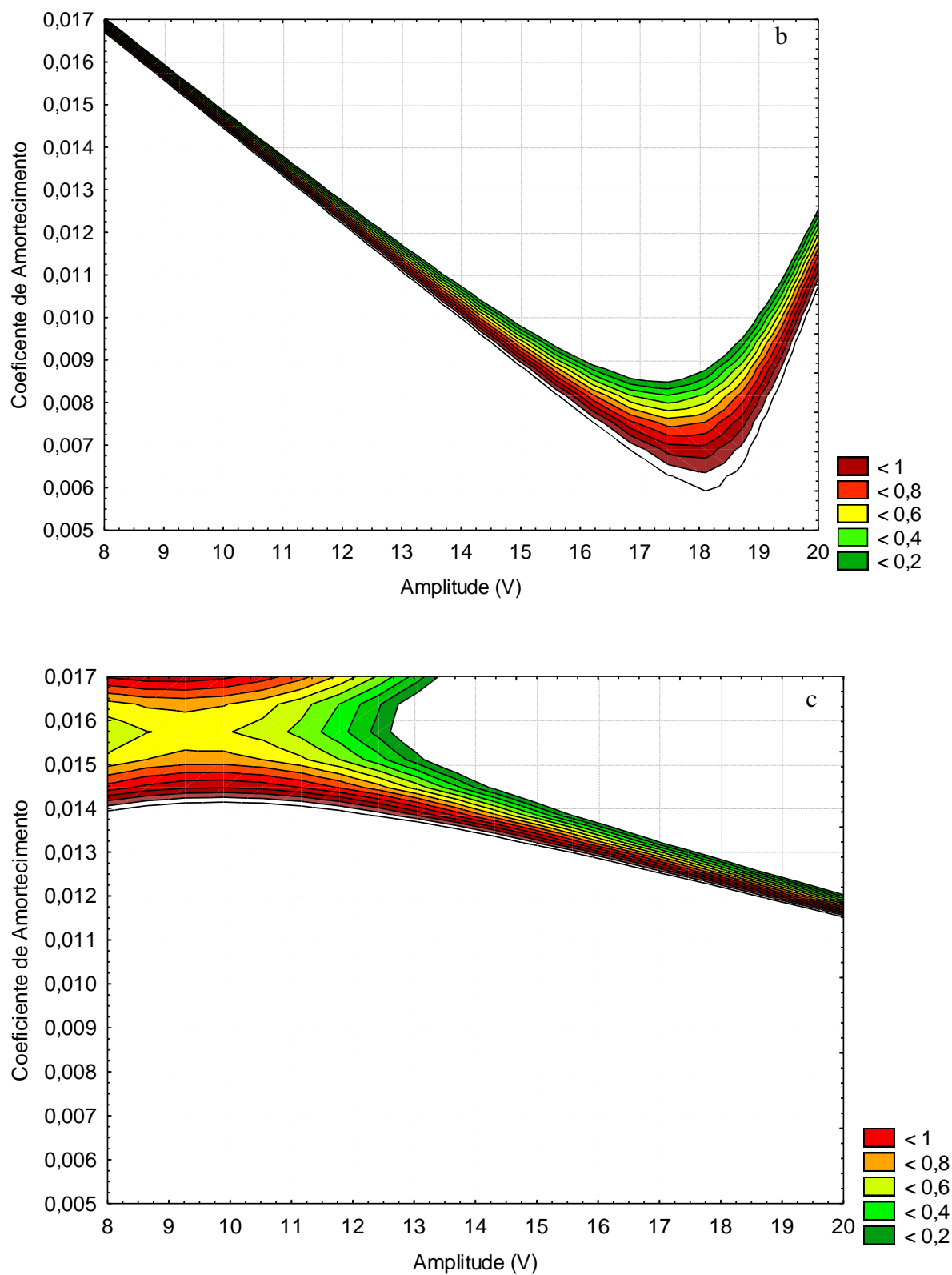


Figura 38: Correlação Estatística entre Coeficiente de Amortecimento, Amplitude e Compacidade Relativa. Em (a) $D_{50} = 0,4$ mm, em (b) $D_{50} = 1,00$ mm e em (c) $D_{50} = 1,15$ mm.

Por fim, o estudo experimental sobre as principais características ultrassônicas do Pulso Ultrassônico, para areias saturadas, pode-se destacar que:

1 – A média do Coeficiente de Amortecimento decresce, com a redução do D_{50} . A média do Coeficiente de Amortecimento aumenta, com o aumento do Índice de Vazios, até 0,75. Após esse valor, há uma diminuição, justificada pela mudança de domínio da Matriz de Solo.

2 – A média da Amplitude máxima diminui, com o aumento do D_{50} , conforme Figura 32. A média da Amplitude máxima diminui, com o aumento do Índice de Vazios, para um mesmo meio dominante. Após esse valor, há um aumento, justificado pelo acréscimo de água; passando, agora, a ser o meio dominante da Matriz.

3 – A média da Frequência Dominante decai 2%; sugerindo a existência de uma frequência característica, para determinadas faixas de Índice de Vazios. A grande variação da frequência, para os Índices de Vazios, de 0,75, sugere uma existência de uma zona de transição. Menores valores de D_{50} representaram maiores Frequências Dominantes.

4 – A velocidade do Pulso Ultrassônico diminui, com o aumento do Índice de Vazios, para um mesmo meio dominante. A velocidade de compressão do Pulso Ultrassônico independe de D_{50} .

5 - As análises da Amplitude máxima, do Coeficiente de Amortecimento e da Frequência Dominante apontaram faixas de Índice de Vazios, com alterações significativas dos sinais ultrassônicos; sendo, portanto, possível identificar zonas de transição, por meio das características da Onda Ultrassônica, no domínio do tempo e da frequência, para os solos arenosos.

4.3. Ultrassom em Materiais Finos

A Figura 39 e o Anexo B apresentam o formato de onda e a curva de amortecimento, no domínio do tempo, por meio da Técnica da Transparência, para as amostras do solo fino, de baixa plasticidade, com um dia de compactação. Comportamento semelhante foi obtido para as amostras de solo, com alta plasticidade.

Observa-se que, para a amostra, compactada na umidade ótima (Figura 39b), o formato de onda apresenta o menor espalhamento. À medida que se aumenta a umidade, aumenta-se, também, o espalhamento; sendo o maior identificado, pela amostra, com 40% de umidade (Figura 39f). Quiviger *et al.* (2012), Pessoa (2013) e Carelli (2014)

apresentam resultados semelhantes de espalhamento de ondas, para material cerâmico cimentícios; e, concluem que a forma de onda, apresentando picos e vales mais espaçados, tamanhos aleatórios e com a energia reduzida, explica-se, uma vez que as ondas ricocheteiam, por entre os grãos; ocorrendo o efeito espalhamento.

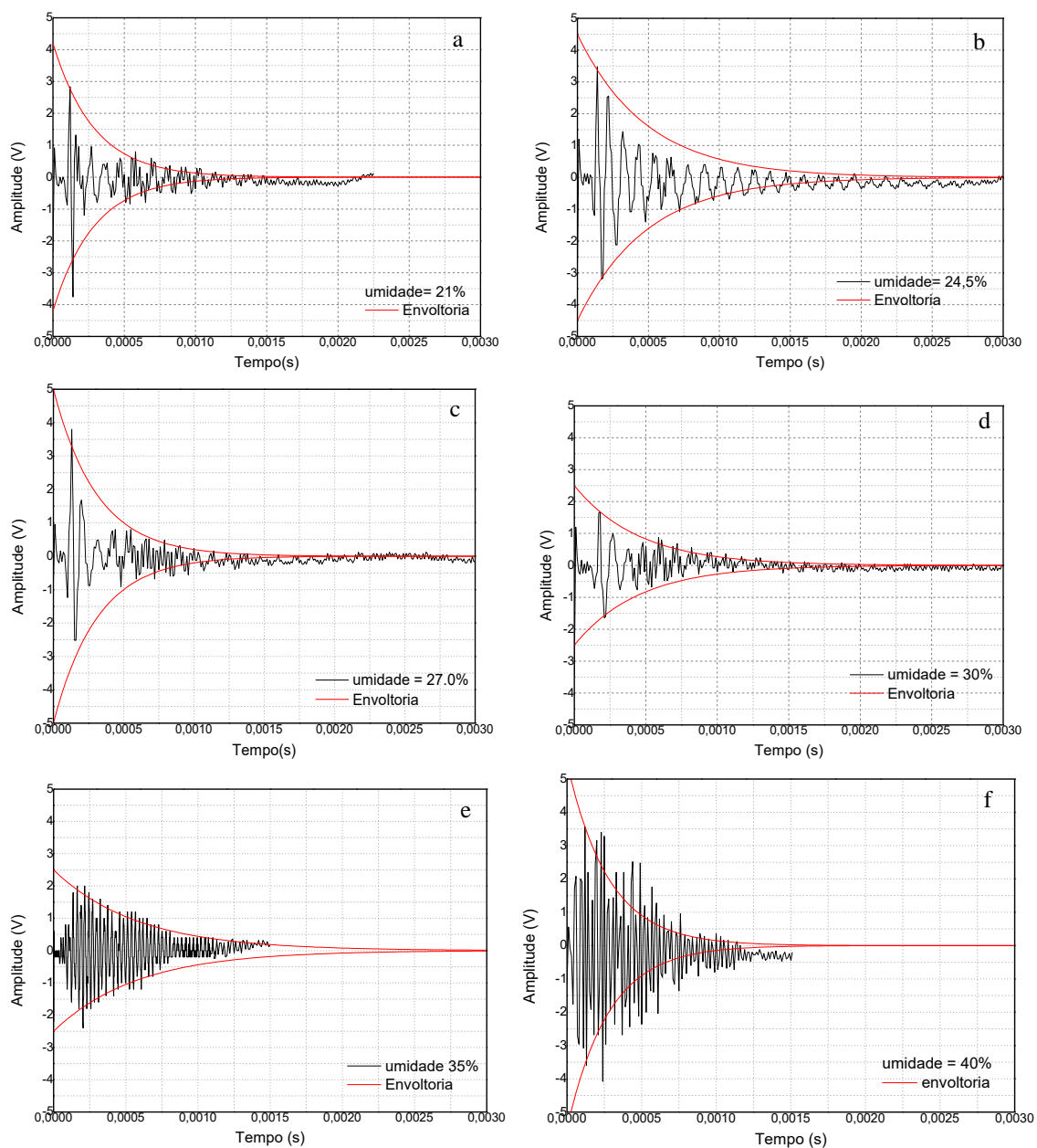


Figura 39: Formato de Onda, no Domínio do Tempo, para Solo Fino, de Baixa Plasticidade. Método da Transparência. Um dia de Compactação. Em (a) $w = 21\%$; (b) $w = 24,5\%$ (umidade ótima); (c) $w = 27\%$; (d) $w = 30\%$; (e) $w = 35\%$; (f) $w = 40\%$.

Conforme citado por Liu *et al.* (2018), a Atenuação Ultrassônica é definida, como o decaimento da amplitude das ondas, à medida que o pulso ultrassônico se propaga pelo

material. Nota-se, então, na Figura 39, a alteração da amplitude, em função da variação da umidade. Assim, identificando a alteração do formato de onda, em função da umidade e do Índice de Vazios, nos tópicos 4.3.1 a 4.3.7, as características dos formatos das Ondas Ultrassônicas serão, detalhadamente, discutidas.

4.3.1. Amplitude e Umidade

A Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam os valores da média da Amplitude máxima, em função da umidade, para as duas Técnicas empregadas.

Tabela 11: Variação da Média da Amplitude Máxima em Função da Umidade para o Solo de Baixa Plasticidade.

Umidade (%)	Transparência		Pulso Eco	
	Amplitude (V)	Desvio Padrão	Amplitude (V)	Desvio Padrão
21,00	2,77	0,17	12,40	0,23
24,50	3,71	0,06	13,32	0,23
27,00	3,65	0,01	13,09	0,70
30,00	2,08	0,36	11,72	0,21
35,00	2,57	0,17	14,77	0,05
40,00	3,46	0,25	15,98	0,28

Tabela 12: Variação da Média da Amplitude Máxima em Função da Umidade para Solo de Alta Plasticidade.

Umidade (%)	Transparência		Pulso Eco	
	Amplitude (V)	Desvio Padrão	Amplitude (V)	Desvio Padrão
40,00	7,40	0,00	34,87	0,25
77,50	10,27	0,60	35,80	0,71
115,00	5,93	0,20	34,67	0,38
152,50	3,70	0,50	32,40	0,86
190,00	4,33	0,30	34,00	1,82
227,50	4,07	0,30	34,80	0,80

A amostra, compactada na umidade ótima, apresentou a maior Amplitude; indicando que possui o melhor arranjo estrutural, para a propagação do Pulso Ultrassônico. Na Tabela 11, foi possível observar que a Amplitude aumenta até 24,5% de umidade; e, após, esse valor diminui até 30% de umidade (menor valor de Amplitude). Com 35% e 40% de umidade, o valor da Amplitude aumenta, novamente. Sabendo que o Limite de Liquidez é 47% de umidade, a alteração do comportamento da Amplitude (de

30% para 35% de umidade) indica uma mudança significativa da Matriz do Solo. Assim, a partir de 35% de umidade, tal quantidade de água facilita a passagem do Pulso Ultrassônico e a Amplitude volta a aumentar.

O mesmo comportamento foi observado para os solos de alta plasticidade (Tabela 12). A maior Amplitude foi obtida, para as amostras, compactadas na umidade ótima; e, decai até a umidade igual a 190%. Após esse valor, a Amplitude volta a aumentar. Logo, com análise da Amplitude, é possível estimar a umidade ótima e as zonas de transição do material dominante do meio.

4.3.2. Amplitude e Índice de Vazios

A Figura 40 e a Figura 41 correlacionam os Índices de Vazios com a média da Amplitude máxima, obtida para os solos de alta e baixa plasticidade, para as duas Técnicas aplicadas.

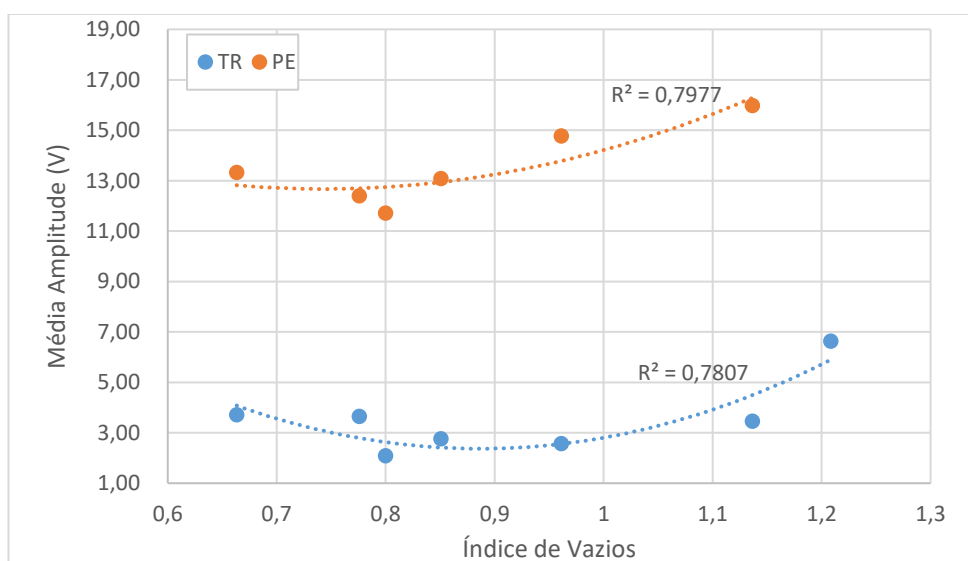


Figura 40: Correlação entre a Média da Amplitude e a Umidade para Solos de Baixa Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e da Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação.

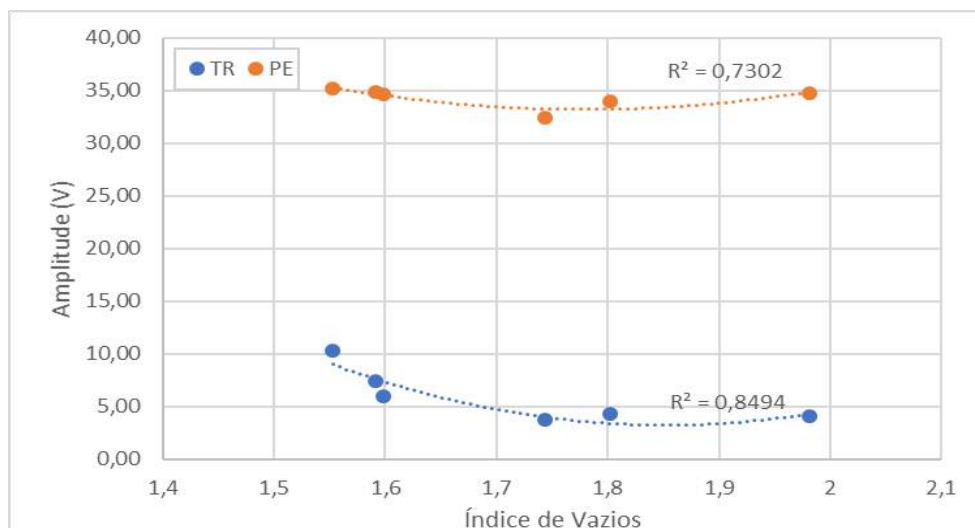


Figura 41: Correlação entre a Média da Amplitude e a Umidade para Solos de Alta Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação.

Na Figura 40 e na Figura 41, foi possível observar que, independentemente, da Técnica utilizada, a correlação entre Amplitude máxima e Índice de Vazios é semelhante; alterando, significativamente, apenas, a intensidade da Amplitude, em função do transdutor, utilizado para cada Técnica.

Nota-se que, para os solos de baixa plasticidade, com Índice de Vazios menor que 0,9, quanto maior o Índice de Vazios, menor a Amplitude. Considerando os solos de alta plasticidade, esse fenômeno acontece, para o Índice de Vazios, menor que 1,9.

A retomada do crescimento da Amplitude, com alto Índice de Vazios (acima de 0,90, em solos de baixa plasticidade; e, 1,9, em solos de alta plasticidade) sugere-se que a água possui uma maior influência no meio; levando ao aumento da Amplitude. Possível observar, então, a alteração do meio dominante da Matriz do Solo. Logo, o comportamento da Amplitude máxima indica uma mudança significativa da Matriz do Solo; possibilitando a identificação de zonas de transição do meio dominante, pelo Ultrassom.

Segundo Gheibi e Hedayat (2018), mudanças na Amplitude máxima, em materiais granulares, são dependentes da área de contato e do tamanho dos poros, entre as partículas. Portanto, a interpretação de que, quanto maior o Índice de Vazios, menor a Amplitude, é válida, apenas, para o mesmo meio dominante.

4.3.3. Coeficiente de Amortecimento e Umidade

As amostras, estudadas neste Trabalho, apresentaram uma boa correlação entre a média do Coeficiente de Amortecimento (Equação 2) com a umidade (Figura 42 e Figura 43), para solos de baixa e alta plasticidade. É possível observar que, na Umidade Ótima, onde o material compactado apresenta a maior resistência e estabilidade, obteve-se o menor Coeficiente de Amortecimento. Com o aumento da quantidade de água, no meio, o material perde a sua resistência; fato percebido, devido à atenuação da Onda Ultrassônica; o que corresponde ao aumento do Coeficiente de Amortecimento.

Foi possível observar, na Figura 42, que a variação do Coeficiente de Amortecimento, entre as duas Técnicas estudadas, foi representativa, apenas, para as amostras, com umidade abaixo da Umidade Ótima. Esse resultado se deve ao fato de o material de baixa plasticidade apresentar três fases (ar, grãos e água) mais bem definidas; e, além disso, o tamanho do transdutor, na Técnica Pulso Eco, é menor que o diâmetro da amostra; sofrendo, portanto, influência, apenas, dos locais, os quais foram efetuadas as medições; ou seja, dependentes da área de contato e do tamanho dos poros, entre as partículas. Observa-se o mesmo comportamento, para as medições, realizadas pela Técnica da Transparência e do Pulso Eco, para a menor umidade das amostras, com material de alta plasticidade (Figura 43).

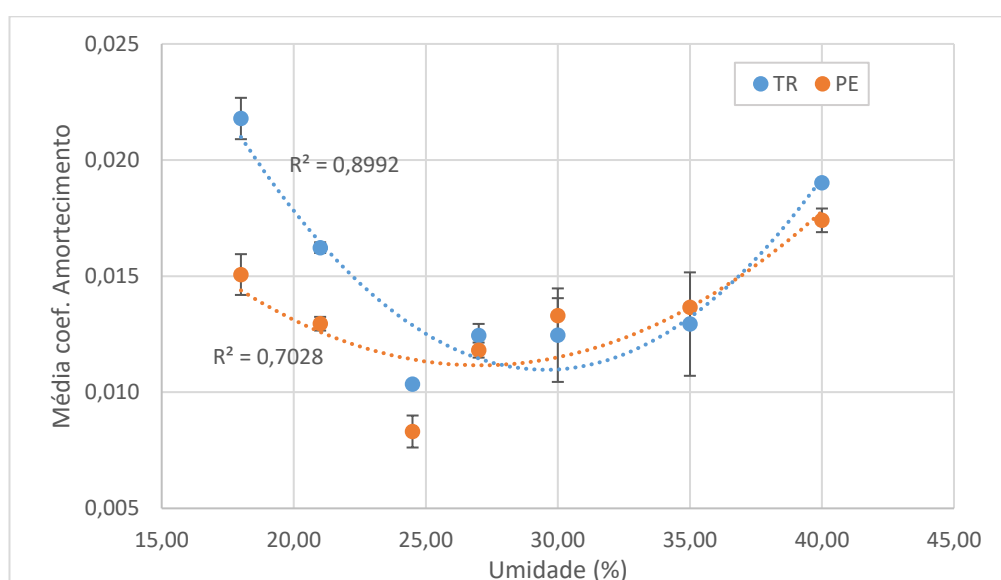


Figura 42: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento e a Umidade para Solos de Baixa Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação.

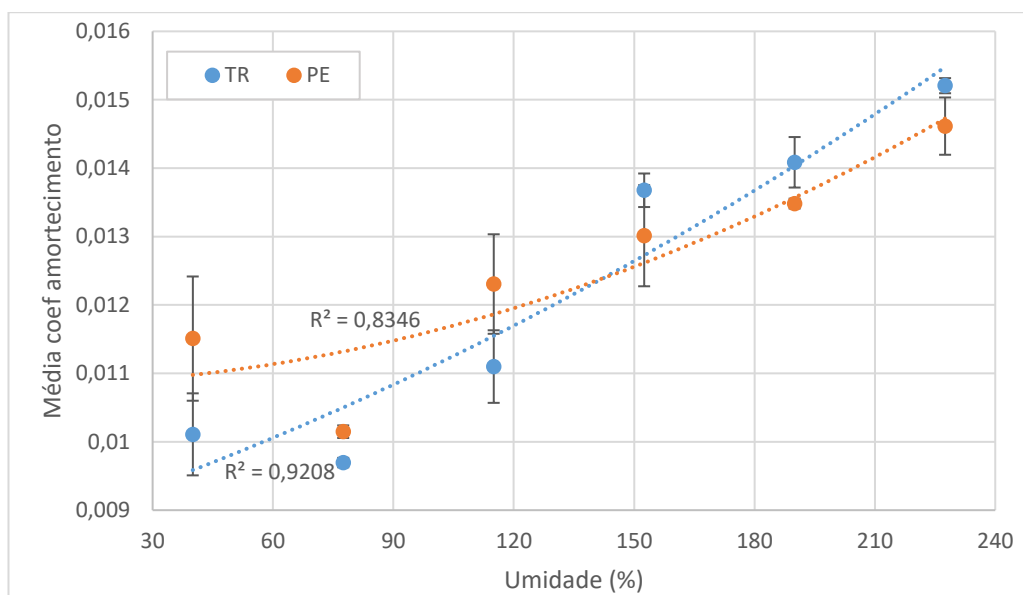


Figura 43: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento e a Umidade para Solos de Alta Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE).

A principal avaliação sobre esses resultados está no fato de que, para as amostras, com umidade, acima de 24,50% (Figura 42); e, 77,50% (Figura 43), há pouca variação entre o valor da média do Coeficiente de Amortecimento, para as Técnicas Pulso Eco e Transparência; sugerindo que esse parâmetro seja representativo do material, independentemente, da Técnica utilizada.

4.3.4. Coeficiente de Amortecimento e Índice de Vazios

A Figura 44 e a Figura 45 apresentam a correlação entre a média do Coeficiente de Amortecimento e o Índice de Vazios, para solos de baixa e alta plasticidade; utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medições realizadas, no dia da compactação das amostras.

Na Figura 44 e na Figura 45, foi possível observar que a correlação entre média do Coeficiente de Amortecimento e o Índice de Vazios, para ambos os solos, foi semelhante para as duas Técnicas empregadas. Observa-se, também, que, quanto menor o Índice de Vazios, menor o valor da média do Coeficiente de Amortecimento. Esse importante resultado sugere a existência de um formato de onda, característico e representativo, para cada material; além disso, a possibilidade de estimar o Índice de Vazios, por meio do

Coeficiente de Amortecimento; e, ainda, a possibilidade de utilizar o Ultrassom, para a análise da compactação (Técnica do Pulso e Eco), em campo e em laboratório (Técnica da Transparência).

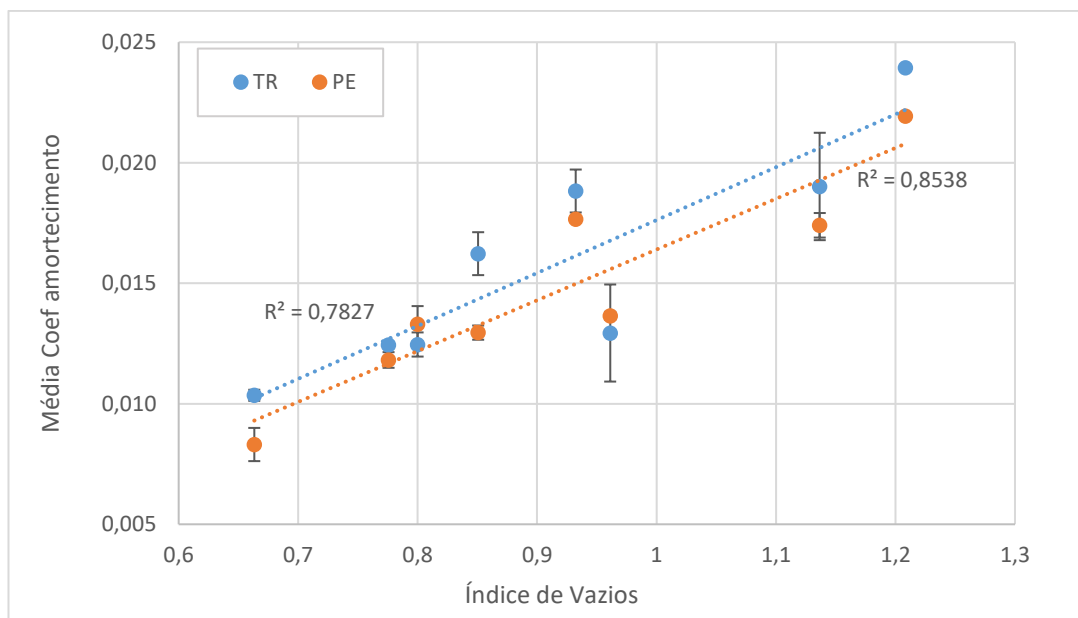


Figura 44: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento e o Índice de Vazios para Solos de Baixa Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação.

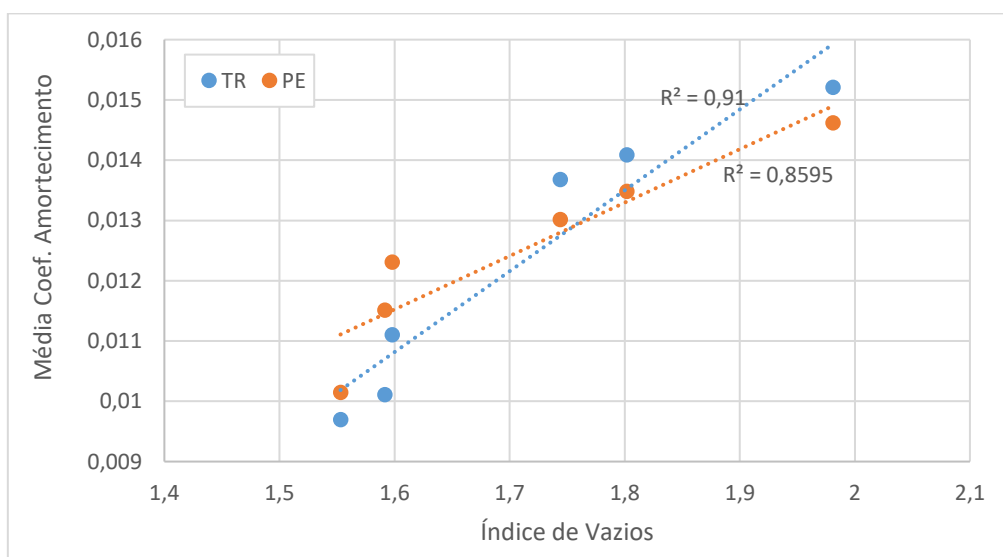


Figura 45: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento e o Índice de Vazios para Solos de Alta Plasticidade, Utilizando a Técnica da Transparência (TR) e do Pulso Eco (PE). Medição no Dia da Compactação.

A Figura 46 e a Figura 47 apresentam as correlações estatísticas, para a obtenção do Índice de Vazios, baseando-se no Coeficiente de Amortecimento e na Umidade.

Na Figura 46, observa-se, para solos de baixa plasticidade, que a Umidade, abaixo da Umidade Ótima, para Coeficiente de Amortecimento variando entre 0,012 e 0,024, resultará em Índice de Vazios, em torno de 0,9. Entre 30% e 40% de Umidade, nota-se que, menores valores do Coeficiente de Amortecimento representarão menores valores de Índice de Vazios. Umidades acima de 40%, próximos ao Limite de Liquidez, apresentam altos valores de Índice de Vazios, independentemente do valor do Coeficiente de Amortecimento, indicando o domínio da água na matriz. Na Figura 47, para solos de alta plasticidade, foi possível observar que o aumento do valor de umidade (representando o aumento do Índice de Vazios) aumenta o Coeficiente de Amortecimento.

Portanto, é possível afirmar que há a possibilidade de utilização do Ultrassom, não somente, para a estimativa do Índice de Vazios; mas, também, para estimar os valores de umidade, para a mudança de meio dominante da Matriz de Solo.

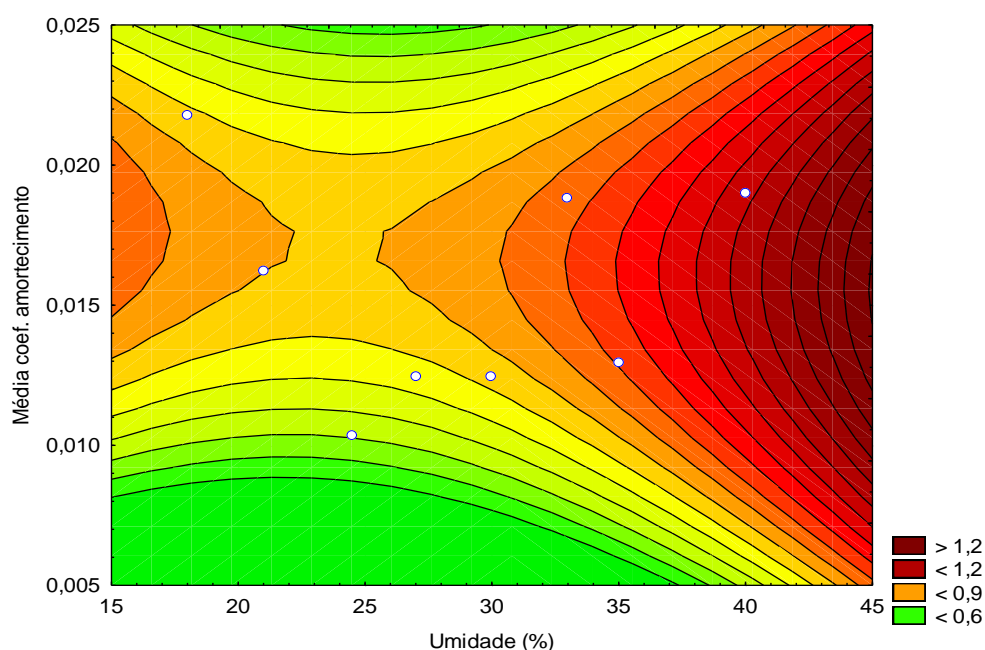


Figura 46: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento, Umidade e Índice de Vazios para Solos de Baixa Plasticidade. Método da Transparência.

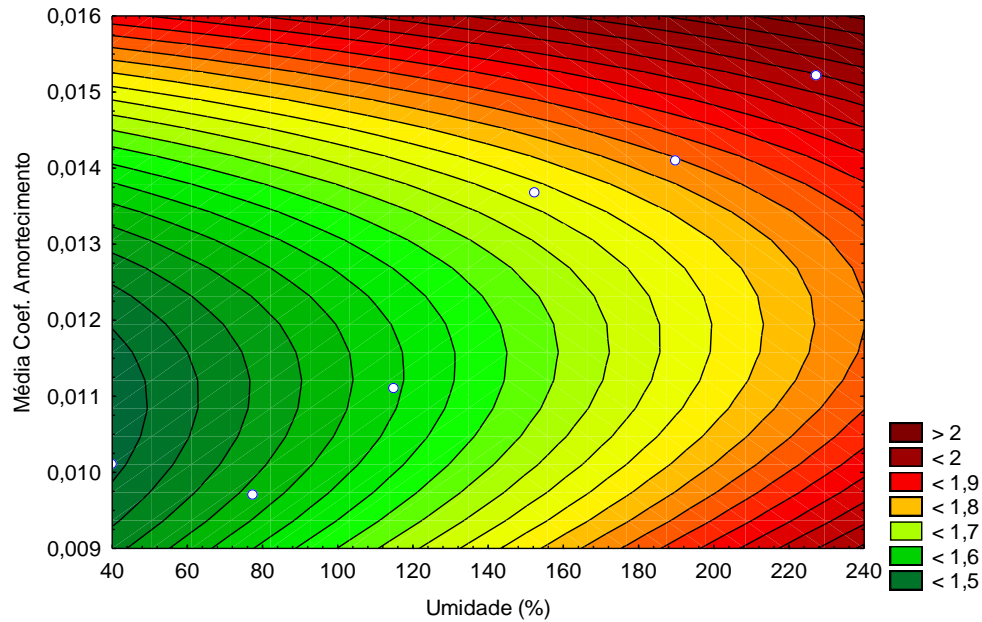


Figura 47: Correlação entre a Média do Coeficiente de Amortecimento, Umidade e Índice de Vazios para Solos de Alta Plasticidade. Método da Transparência.

4.3.5. Frequência Dominante, Umidade e Índice de Vazios

A Figura 48, a Figura 49, a Figura 50 e a Figura 51 correlacionam a Frequência Dominante e a Umidade, para solos finos, de baixa e alta plasticidade, pelo Método da Transparência; e, apresentam, também, a correlação entre a Frequência Dominante e o Índice de Vazios, para solos finos, de baixa plasticidade, pela Técnica da Transparência.

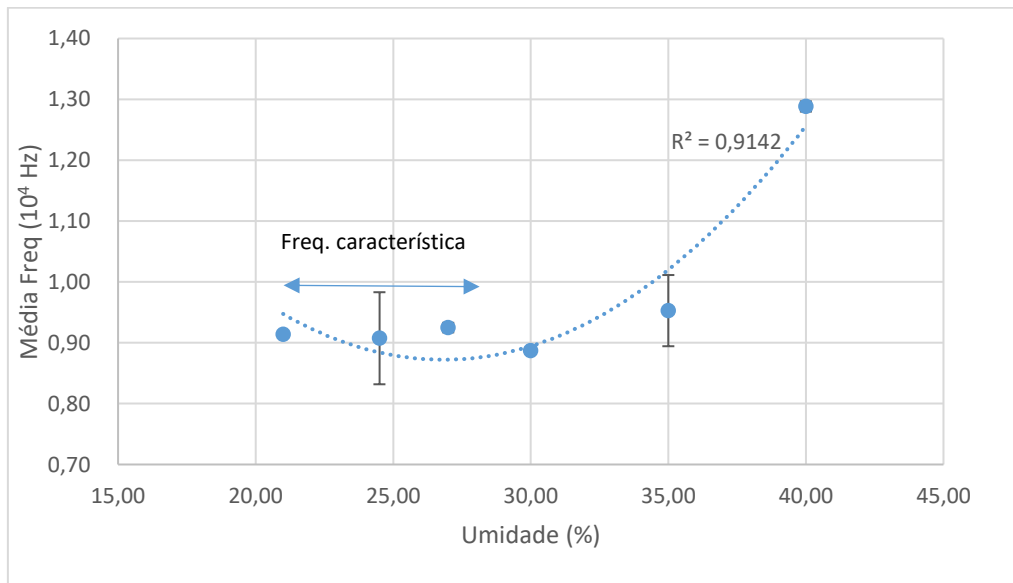


Figura 48: Relação entre Frequência Dominante e Umidade para Solos Finos de Baixa Plasticidade. Técnica da Transparência.

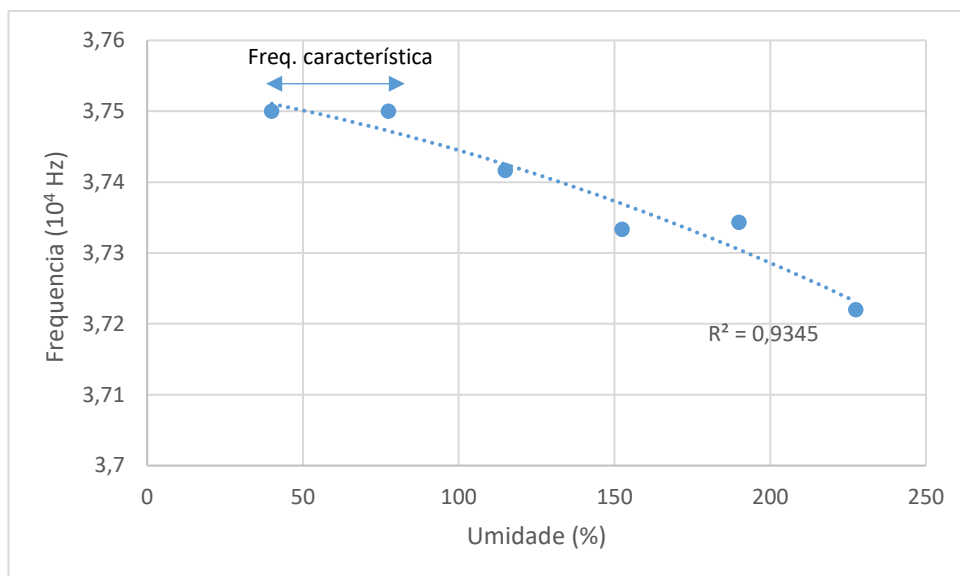


Figura 49: Relação entre Frequência Dominante e Umidade para Solos Finos de Alta Plasticidade. Técnica da Transparência.

Foi possível observar, em todas as Figuras, a existência de uma boa correlação entre a média da Frequência Dominante, a Umidade e o Índice de Vazios, para os solos, de alta e baixa plasticidade.

Na Figura 48, foi possível observar que, para o solo, de baixa plasticidade, com umidades, entre 21 e 27%, a Frequência Dominante varia, apenas, 1%. A baixa variação da Frequência Dominante aponta a existência de uma frequência característica, para o material, com essas umidades. Com o acréscimo de água ao material, a tendência é de aumento da frequência, pois a Frequência Dominante da água é, aproximadamente, $3,66 \times 10^4$ KHz, para a Técnica TR.

Nos solos de alta plasticidade, o comportamento da Frequência Dominante, em função da umidade, observado, na Figura 49, foi semelhante aos solos de baixa plasticidade. Há a identificação de Frequências Dominantes características e, com o aumento da umidade, a alteração, no valor da frequência. Nesse caso, há uma diminuição do valor de frequência, pois o valor da Frequência Dominante, para o solo, de alta plasticidade, é maior do que o valor de Frequência Dominante da água.

A Figura 50 demonstra a correlação entre a média da Frequência Dominante e os Índices Físicos, para os solos, de baixa plasticidade.

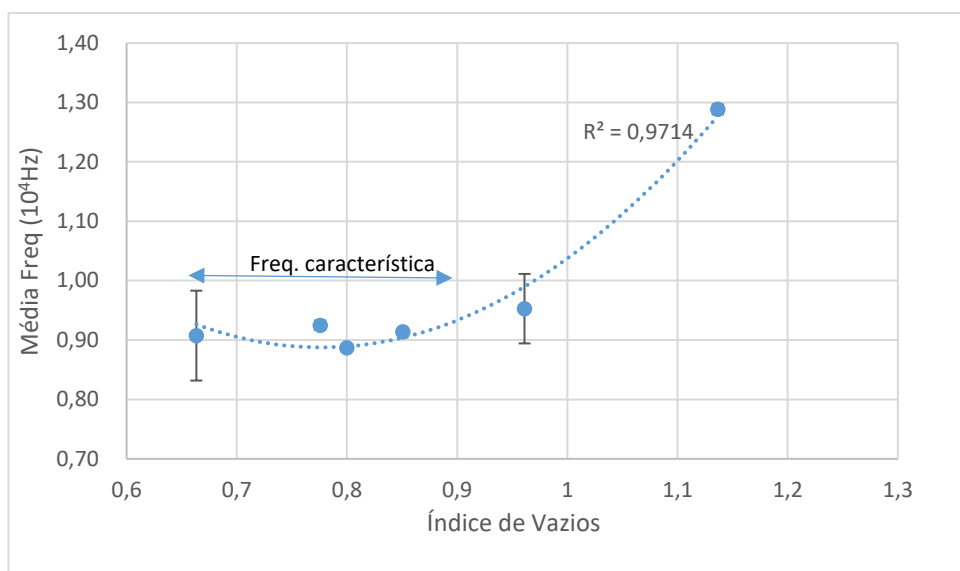


Figura 50: Relação entre Frequência Dominante e Índice de Vazios para Solos Finos de Baixa Plasticidade pela Técnica da Transparência.

Na Figura 50, foi possível observar que, para os Índices de Vazios, de 0,66 a 0,85, a média da Frequência Dominante possui uma diferença de até 5%. Para os Índices de Vazios, acima de 0,85, nota-se o aumento da Frequência Dominante; identificando a alteração, na Matriz do Solo; passando, então, o Ultrassom a informar a frequência característica, correspondente ao meio dominante.

A Figura 51 apresenta a relação entre Frequência Dominante e Índice de Vazios, para solos finos, de alta plasticidade, utilizando a Técnica da Transparência; em que foi possível observar que há uma queda, no valor da Frequência Dominante; uma vez que esse valor, para a água, é menor. Indo ao encontro com a afirmação anterior, Yang et al. (2013) e Gheibi e Hedayat (2018) apresentam resultados, nos quais a frequência dos materiais estudados decai, com o aumento do Índice de Vazios.

Os resultados deste Trabalho apontam que a variação da Frequência Dominante demonstra alteração, na estrutura do solo; e, que o seu aumento ou o seu decaimento dependerá do meio dominante. Assim, há a possibilidade de identificação de meios dominantes, no solo coesivo, pela análise da Frequência Dominante; ou seja, a possibilidade de identificar alterações, na estrutura do solo coesivo, por meio do Ultrassom.

As análises da média da Amplitude máxima, da média do Coeficiente de Amortecimento e da média da Frequência Dominante, para solos finos compactados, de alta e baixa plasticidade, apontaram alterações significativas, dos sinais ultrassônicos;

sendo possível identificar as regiões de melhor estabilidade e resistência; e, ainda, identificar zonas de transição do meio dominante, por meio das características do espectro ultrassônico, no domínio do tempo e da frequência. Os resultados, obtidos pelo Ultrassom, nessa zona de transição, ora sugerem apresentar as características da Matriz de Finos, como meio dominante; e, ora sugerem que o meio dominante é a água; o que justificam as alterações das características do espectro ultrassônico.

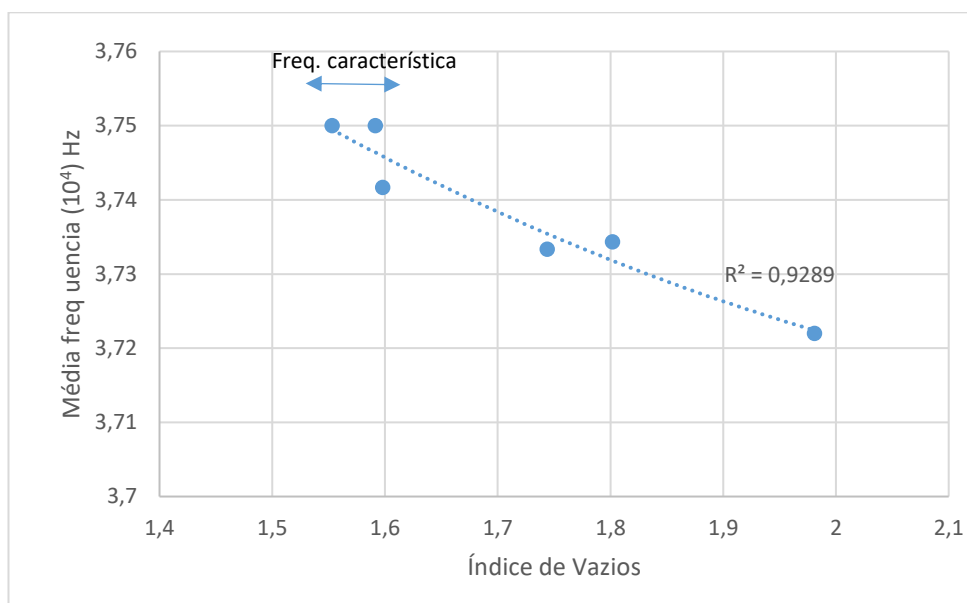


Figura 51: Relação entre Frequência Dominante e Índice de Vazios para Solos Finos de Alta Plasticidade pela Técnica da Transparência.

4.3.6. Velocidade do Pulso Ultrassônico e Umidade

A Velocidade do Pulso Ultrassônico foi medida, no dia da compactação; e, após completa secagem das amostras. A Figura 52 e a Figura 53 correlacionam a média da Velocidade com a Umidade, para os solos, de baixa e alta plasticidade.

Utilizando as medições realizadas, no dia da compactação, observa-se que a umidade até 30%, conforme Figura 52; e, 115%, conforme Figura 53, há uma correlação parabólica, semelhante à forma do Gráfico de Compactação, com a maior velocidade, obtida, na Umidade Ótima. Resultado semelhante foi obtido, por Yesiller (2000); e, segundo Tisato e Marelli (2013), o teor de água, em particular, tem um maior impacto, no comportamento das propriedades elásticas da Bentonita; e, portanto, alterando a Velocidade do Pulso Ultrassônico. Após a Umidade Ótima, há uma tendência de

crescimento da Velocidade. O aumento da umidade faz com que os valores de Velocidade passem a ser representativos da água; agora, portanto, o meio dominante.

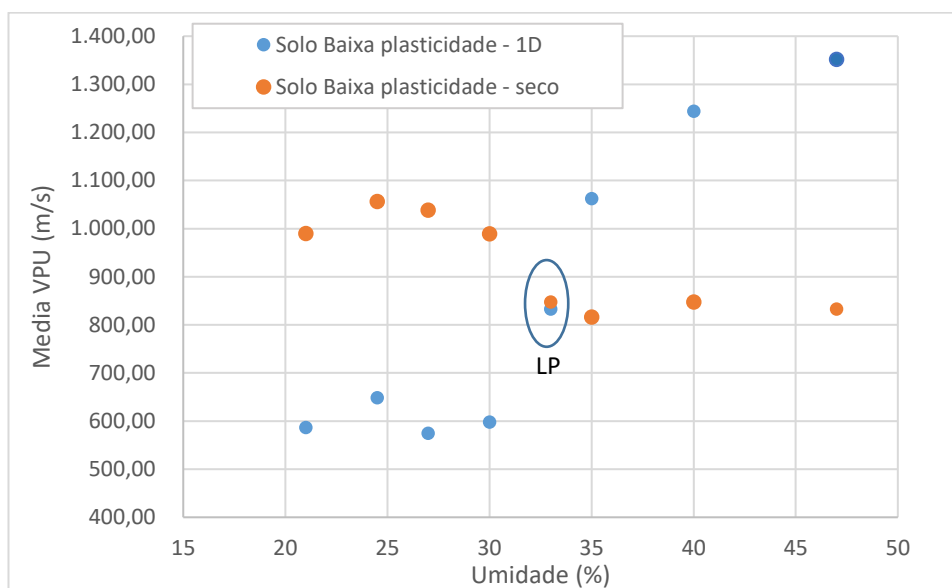


Figura 52: Variação da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função da Umidade para Solo de Baixa Plasticidade. Ensaio Realizado, no Dia da Compactação (1D); e, Após Secagem Completa (Seco). Técnica da Transparência.

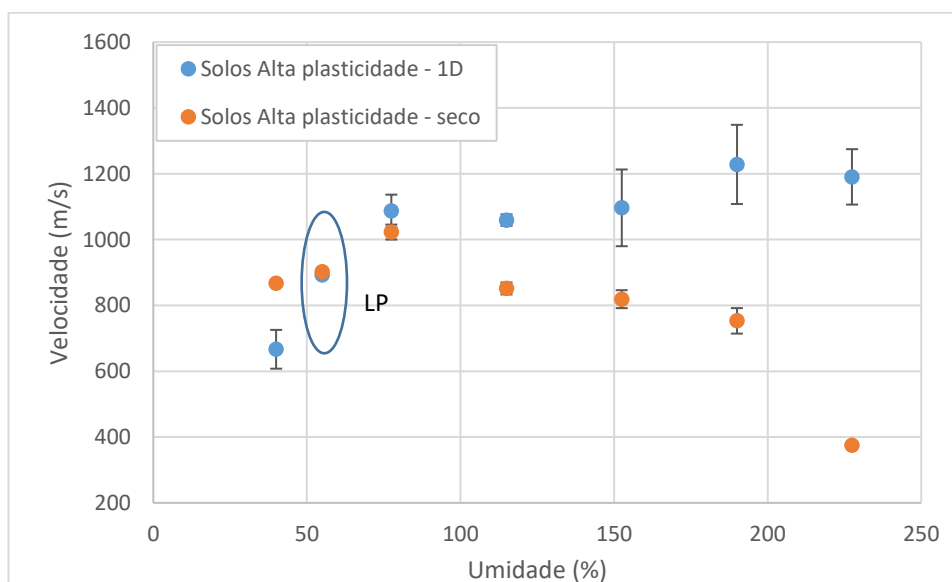


Figura 53: Variação da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função da Umidade para Solo com Alta Plasticidade, no Dia da Compactação (1D); e, após Secagem Completa (Seco). Técnica da Transparência.

A secagem completa das amostras do solo, de baixa plasticidade, compactadas até 30% de umidade, resulta em um aumento de, aproximadamente, 60% na Velocidade

(Figura 52); mantendo a mesma configuração parabólica, com a maior Velocidade, para a amostra compactada, na Umidade Ótima. No entanto, houve redução da Velocidade, após o limite de plasticidade; e, as amostras, compactadas no limite de plasticidade (LP), não apresentaram variação significativa da Velocidade, após secagem completa. Resultado semelhante foi obtido, para as amostras, com solo de alta plasticidade (Figura 53).

4.3.7. Velocidade do Pulso Ultrassônico e Índice de Vazios

A Figura 54 e a Figura 55 apresentam a média da Velocidade, em função do Índice de Vazios, para amostras, com baixa e alta plasticidade.

Segundo Gheibi e Hedayat (2018) e Zimmer (2004), Xu *et al.* (2013), em seu Trabalho, utilizando Ondas Cisalhantes, em solos granulares, apontam que a VPU, também, decai, com o aumento do Índice de Vazios.

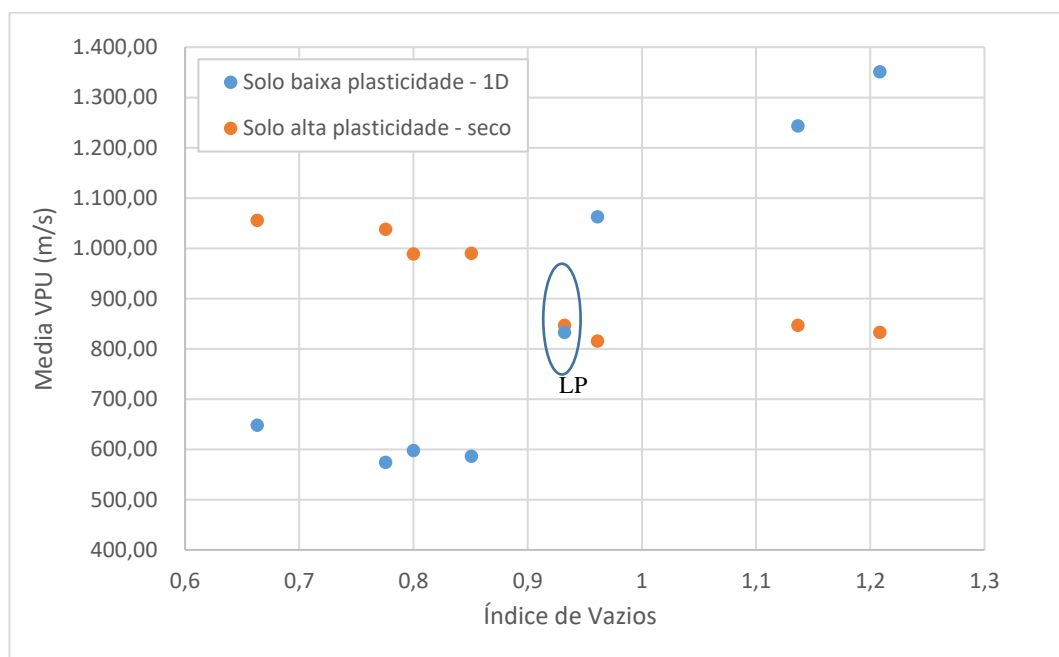


Figura 54: Variação da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função do Índice de Vazios para as Amostras de Baixa Plasticidade. Ensaio Realizado, no Dia da Compactação (1D) e Após Secagem Completa (Amostras Secas). Técnica da Transparência.

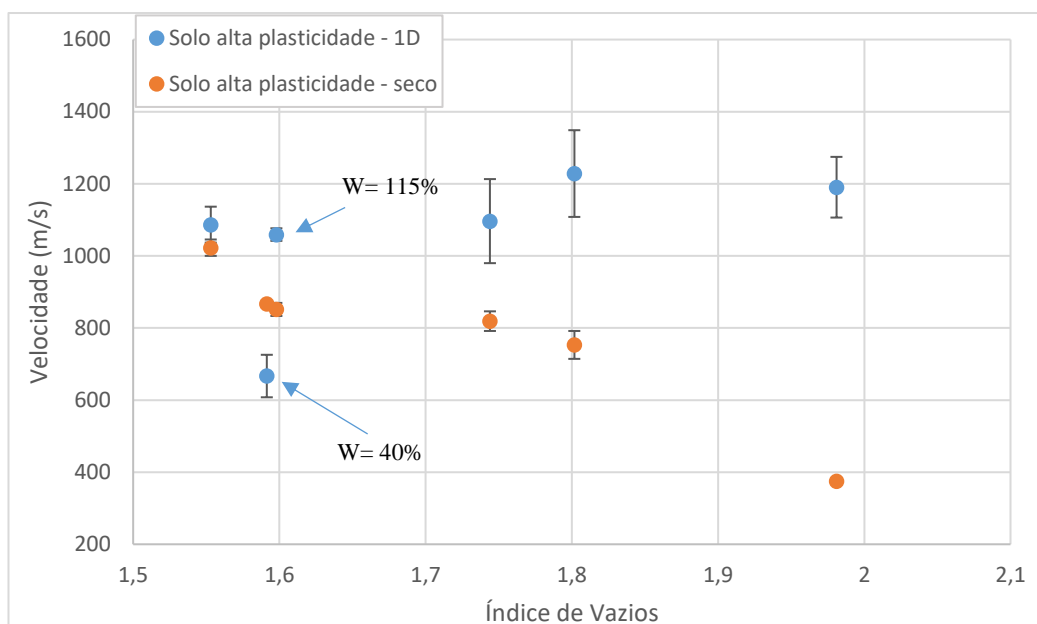


Figura 55: Variação da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função do Índice de Vazios para as Amostras de Alta Plasticidade. Ensaio Realizado, no Dia da Compactação (1D) e Após Secagem Completa (Seco). Técnica da Transparência.

Na Figura 54 e na Figura 55, esse resultado se confirma, para as amostras secas e para as amostras úmidas, compactadas até, aproximadamente, o limite de plasticidade; e, apesar de uma tendência de decaimento da VPU, com o aumento do Índice de Vazios, não se pode afirmar que a VPU se dá, de forma linear.

Após o limite de plasticidade, a Velocidade aumenta, significativamente; indicando alteração do meio dominante. Logo, nota-se que a afirmação de que, quanto menor o Índice de Vazios, maior a Velocidade, é válida, apenas, para o mesmo meio dominante.

Após a secagem completa das amostras, para o Índice de Vazios, acima do limite de plasticidade, a Velocidade do Ultrassom variou, menos de 3%; indicando que o arranjo estrutural esteve, praticamente, constante.

Na Figura 56 e na Figura 57, obtêm-se as correlações entre a Velocidade do Pulso Ultrassônico, o Coeficiente de Amortecimento, a fim de estimar o Índice de Vazios. A grande diferença, quanto aos valores, observados na Figura 56 e na Figura 57, deve-se, em função do material, que preenche o vazio do solo. Os resultados da Figura 56 demonstram que o material observado é a água, uma vez que, há aumento da velocidade com o aumento do Índice de Vazios. Assim, é possível afirmar que, quanto maior o Índice de Vazios, maior a quantidade de água; e, portanto, maior a Velocidade do Pulso Ultrassônico.

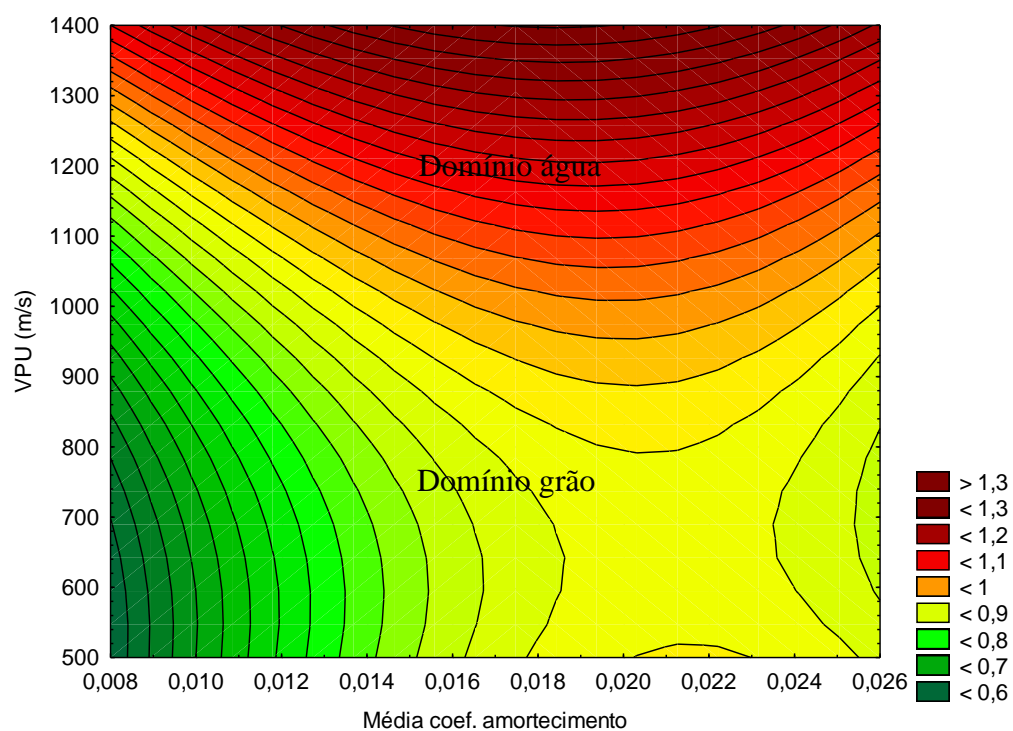


Figura 56: Correlação entre Média do Coeficiente de Amortecimento, VPU (m/s) e Índice de Vazios para Solos de Baixa Plasticidade. Técnica TR.

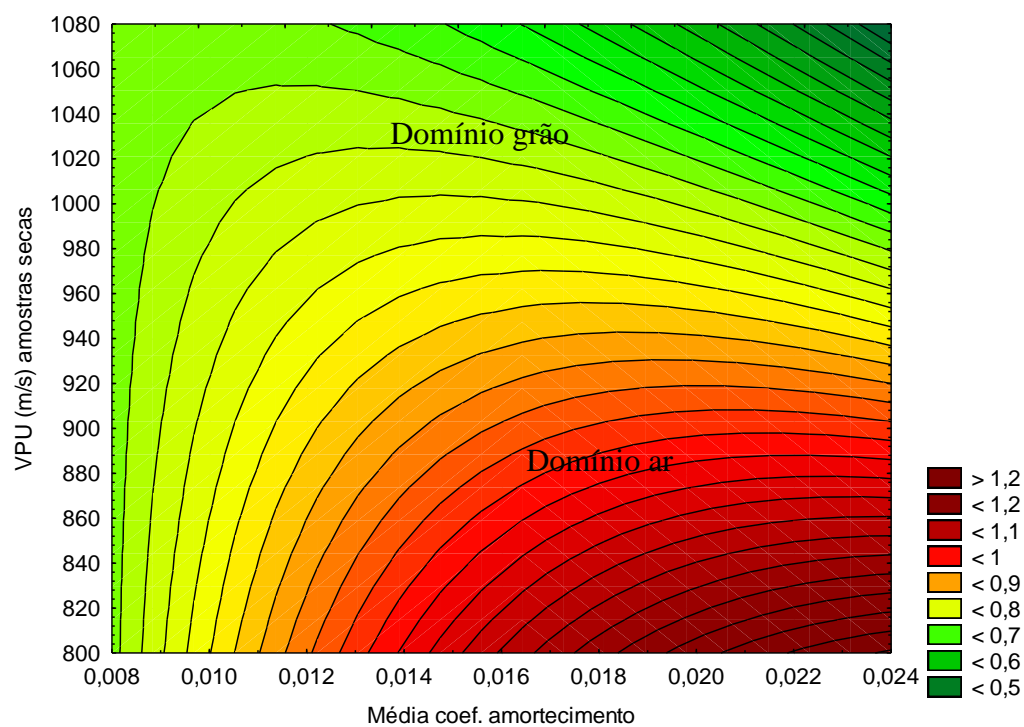


Figura 57: Correlação entre Média do Coeficiente de Amortecimento, VPU (m/s) para as Amostras Secas e Índice de Vazios para Solos de Baixa Plasticidade. Técnica TR.

Resultado semelhante foi encontrado, por Kimura *et al.* (2018), que demonstraram que as velocidades das Ondas Longitudinais e de Cisalhamento aumentam, com o aumento de um grau de saturação para as Bentonitas. A Velocidade Longitudinal, para condições das Bentonitas, totalmente, saturadas, é muito próxima da velocidade, na água, de 1.480 m/s. A Figura 56, também, ilustra a alteração do domínio da Matriz. Nota-se que, no domínio da Matriz, pela água, a Velocidade do Pulso Ultrassônico é alta (acima de 1000 m/s); possui alto Índice de Vazios e Coeficiente de Amortecimento. Esse resultado se confirma, também, para os solos de alta plasticidade. No caso da Matriz, no domínio do grão, o aumento do Índice de Vazios aumenta o Coeficiente de Amortecimento, conforme discutido, anteriormente.

A Figura 57 indica que o aumento do Índice de Vazios significa aumento de ar, na Matriz de Solo; diminuindo a Velocidade do Pulso. Assim, a identificação do meio dominante é determinante, para o entendimento dos Ensaio Ultrassônicos, realizados em solos, de alta e baixa plasticidade. Segundo Weidinger *et al.* (2019), a Velocidade do Pulso Ultrassônico varia, com a densidade, o teor de umidade e saturação. Portanto, a Velocidade do Pulso Ultrassônico se torna uma ferramenta alternativa, a fim de avaliar as características do solo e as informações sobre a estabilidade de solos compactados, parcialmente, saturados.

Assim, podem-se destacar, na análise experimental, sobre as principais características ultrassônicas; incluindo a Amplitude Máxima, o Coeficiente de Amortecimento, a Frequência Dominante e a Velocidade do Pulso Ultrassônico, para solos finos, de alta e baixa plasticidade; utilizando duas Técnicas diferentes:

1 – Devido aos resultados, apresentados na Figura 40 e na Figura 41, é possível afirmar que, quanto menor o Índice de Vazios, maior a Amplitude Máxima, para um mesmo meio dominante. Na Tabela 11 e na Tabela 12, observa-se que a variação da média da Amplitude Máxima e a Umidade e o Índice de Vazios permite identificar a Umidade Ótima (maior amplitude), para um mesmo meio dominante. Zonas de transição do meio dominante da Matriz do Solo, também, podem ser identificadas (retorno do crescimento da amplitude). O comportamento dessa característica do sinal ultrassônico foi o mesmo; seja, para solos de baixa ou alta plasticidade, ou, para o Método utilizado.

2 – Observando os resultados, apresentados na Figura 42 e na Figura 45, pode-se afirmar que, com a média do Coeficiente de Amortecimento, foi possível identificar o

ponto de Umidade Ótima. Independentemente, do Método utilizado, o Coeficiente de Amortecimento varia, de forma irrisória; indicando que o material possui um formato de onda padrão; sendo, então, uma característica estável. Foi possível estimar o Índice de Vazios, com a média do Coeficiente de Amortecimento.

3 – Utilizando os resultados, apresentados na Figura 48 e na Figura 51, é possível afirmar que a análise da Frequência Máxima apresentou zonas de frequência características; facilitando a análise de meios dominantes e de zonas de transição.

4 – Pelos resultados, apresentados na Figura 52 e na Figura 57, é possível afirmar que a Velocidade do Pulso Ultrassônico diminui, com o aumento do Índice de Vazios; e, apontou a possibilidade de identificação da Umidade e do Índice de Vazios, para a obtenção da melhor resistência e estabilidade.

4.4. Ultrassom em Misturas de Areia e Finos

A Figura 58 e o Anexo C apresentam um exemplo de alterações do formato de onda no domínio do tempo, para amostras úmidas; variando a porcentagens de finos em 10, 50 e 100% e compactadas na Energia Normal.

As Medidas Ultrassônicas foram realizadas, com a mesma configuração do Equipamento de Ultrassom. Nota-se que, para as amostras com 10% de finos, há uma perda significativa do valor da Amplitude; que aumenta, com o aumento da porcentagem de finos até 50%; e, depois, altera, com menor variação. Assim, nos tópicos seguintes, as características dos formatos de ondas serão detalhadamente discutidas. Conforme citado no Capítulo de Materiais e Métodos, consideraram-se as amostras com diferentes porcentagens de finos, compactadas com Energia Normal, Intermediária e Modificada. Analisaram-se então, as características do Pulso Ultrassônico para as amostras úmidas e secas.

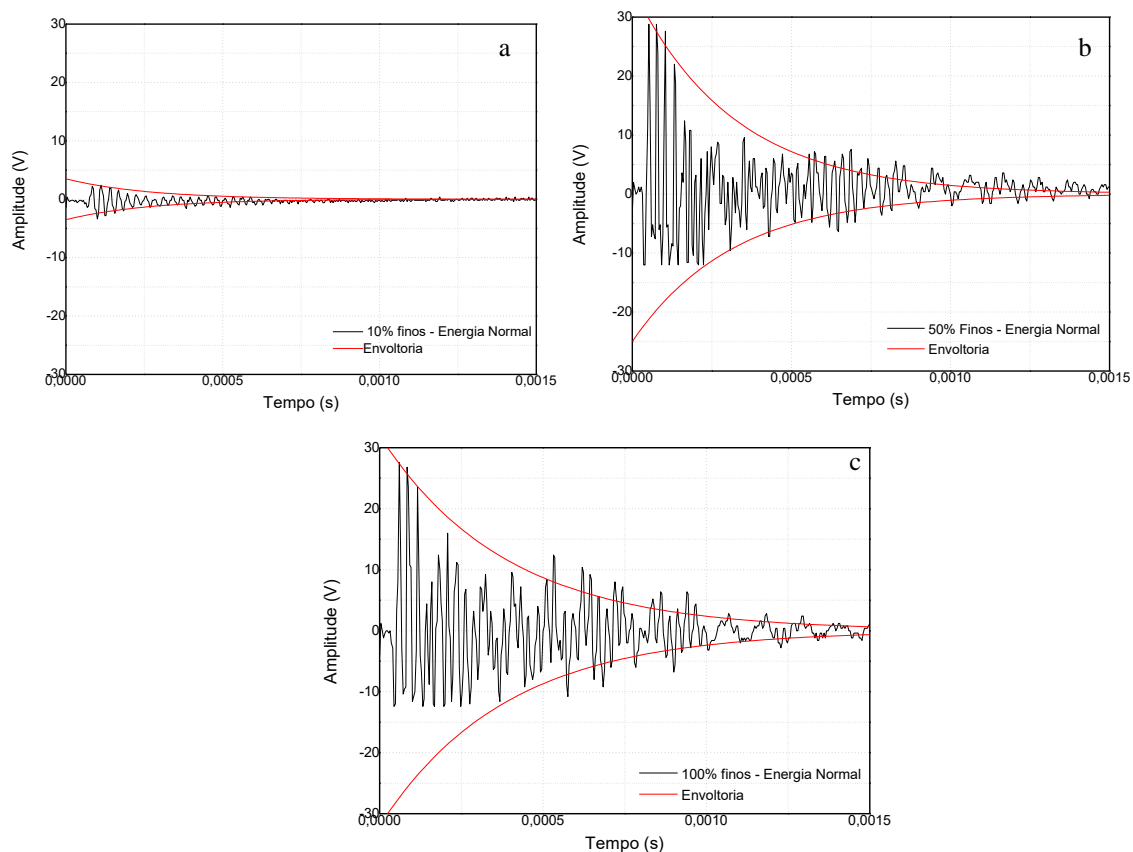


Figura 58: Formato de Onda no Domínio do Tempo e Envoltória da Curva de Amortecimento para Misturas com (a) 10% de Finos, (b) 50% Finos e (c) 100% Finos. Técnica da Transparência. Amostras Úmidas.

4.4.1. Coeficiente de Amortecimento e Porcentagem de Finos.

O Coeficiente de Amortecimento foi calculado, a partir das leituras do Ensaio de Ultrassom; utilizando as Técnicas da Transparência e do Pulso Eco, para as amostras úmidas; considerando as Energias Normal, Intermediária e Modificada. Assim sendo, a Figura 59 apresenta os resultados dos valores médios dos Coeficientes de Amortecimento, com a variação da porcentagem de finos.

Semelhante ao apresentado, na Figura 44 e Figura 45, também, foi possível observar, na Figura 59, que a correlação entre a média do Coeficiente de Amortecimento e a porcentagem de Finos apresentou baixa variação, para as duas Técnicas empregadas. Além disso, observa-se o mesmo valor de Coeficiente de Amortecimento, para as amostras, com 100% de Finos, na Umidade Ótima, obtidos, conforme Figura 42, mesmo utilizando configurações diferentes do ultrassom. Esse importante resultado sugere a existência de um formato de onda característico, independentemente, da Técnica e das

configurações do Equipamento; e, portanto, a possibilidade de utilizar o Ultrassom, para análise da compactação (Técnica do Pulso e Eco), em campo e em laboratório (Técnica da Transparência).

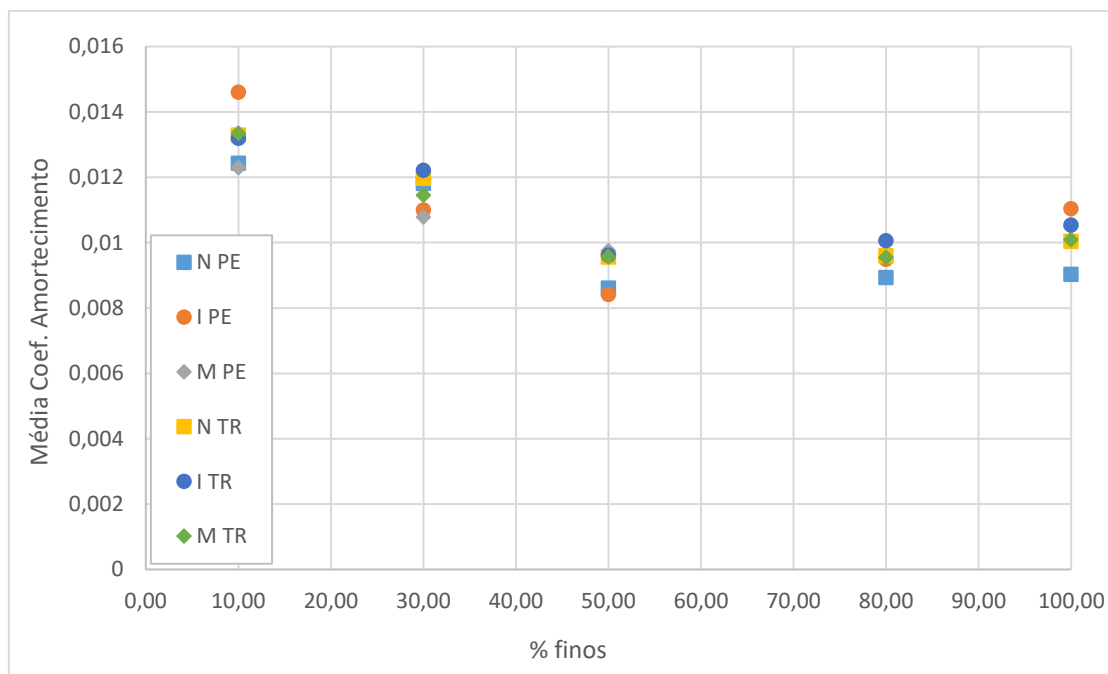


Figura 59: Variação da Média do Coeficiente de Amortecimento com a porcentagem de Finos Utilizando as Técnicas de Pulso Eco (PE) e Transparência (TR) para Amostras Úmidas Compactadas com Energia Normal (N), Intermediária (I) e Modificada (M).

A Tabela 13 e a Tabela 14 apresentam os valores da média do Coeficiente de Amortecimento, para os solos, com Finos; variando entre 10, 30, 50, 80 e 100%. Os Ensaios foram realizados 3 dias após a compactação; e, após as amostras, completamente, secas.

Tabela 13 : Variação da Média do Coeficiente de Amortecimento em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação. Ensaio Realizado 3 Dias Após a Compactação.

% Finos	Média coeficiente de amortecimento					
	Energia Normal	Desvio Padrão	Energia Intermediária	Desvio Padrão	Energia Modificada	Desvio Padrão
10	0,0132986	0,001226216	0,0132006	0,001037	0,0133514	0,00018343
30	0,0119678	0,001089483	0,0122198	0,000642	0,0114518	0,00065689
50	0,0095626	0,00069236	0,0096264	0,000975	0,0095742	0,00099125
80	0,0095993	0,00076938	0,0100649	0,0000692	0,0095526	0,00065599
100	0,0100453	0,000699234	0,0105450	0,000699	0,0100900	0,00069923

Tabela 14: Variação da Média do Coeficiente de Amortecimento em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação. Ensaio Realizado Após Amostras Secas.

% Finos	Média coeficiente de amortecimento					
	Energia Normal	Desvio Padrão	Energia Intermediária	Desvio Padrão	Energia Modificada	Desvio Padrão
10	0,0126237	0,000772165	0,0126073	0,0004489	0,0125408	0,000017204
30	0,0114226	0,001674745	0,0118331	0,0007817	0,0118981	0,000684768
50	0,0111887	0,0000557327	0,0097423	0,0002036	0,0081034	0,000202146
80	0,0114430	0,0000326659	0,0095813	0,0017807	0,0105245	0,000833474
100	0,0118424	0,000393548	0,0091834	0,0003935	0,0119205	0,000393548

A Figura 60 apresenta a correlação entre a média do Coeficiente de Amortecimento e a porcentagem de Finos; considerando os três tipos de Energia, para as amostras secas e úmidas.

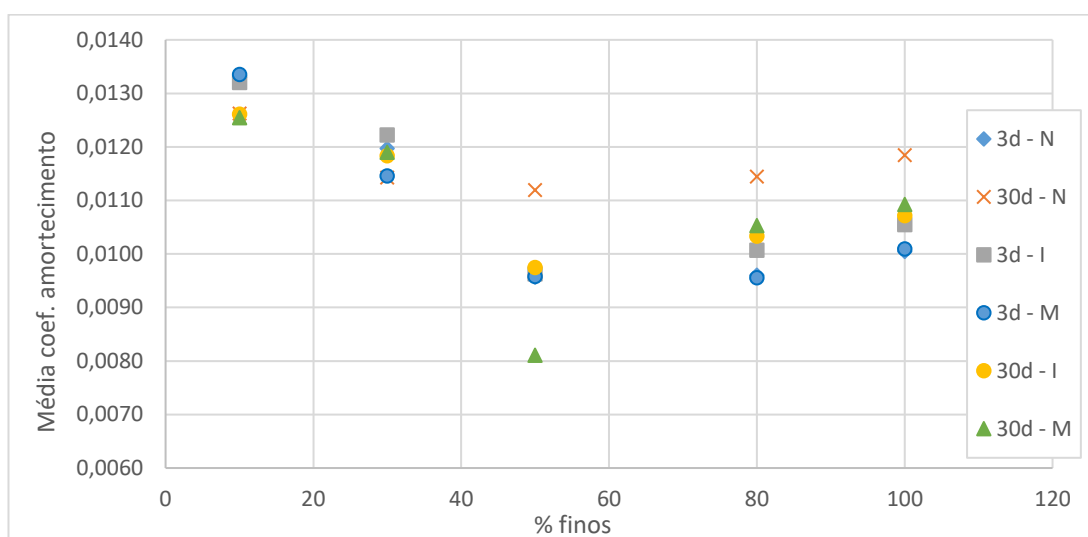


Figura 60: Variação da Média do Coeficiente de Amortecimento em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação, para as Amostras, em 3 dias Compactadas (3d) e após Secagem Completa (30d). N – Energia de Compactação Normal, I – Energia de Compactação Intermediária e M – Energia de Compactação Modificada. Técnica Transparência.

Nota-se que as amostras, com 10% de Finos, obtiveram os maiores Coeficientes de Amortecimento. As amostras secas, com 10% de Finos, obtiveram Coeficiente de Amortecimento, aproximadamente, 10% menor que as amostras úmidas, com a mesma porcentagem de Finos. A análise das amostras, com 10% de Finos, secas e úmidas, aponta que a variação da Energia de Compactação não influenciou a média do Coeficiente de Amortecimento.

Resultado semelhante foi obtido para as amostras, com 30% Finos, as quais não apresentaram variação significativa do Coeficiente de Amortecimento, com o aumento da

Energia de Compactação; sendo a maior variação de, aproximadamente, 7%. Observa-se, então, que uma porcentagem de Finos, abaixo de 30%, onde há baixa coesão entre os grãos, há um alto Coeficiente de Amortecimento.

A Figura 60, também, permite observar que a média do Coeficiente de Amortecimento diminui, até 50% de Finos; sendo que essas amostras apresentam os menores valores desse parâmetro. Acima de 50% de Finos, há aumento da média do Coeficiente de Amortecimento.

Para as amostras, moldadas com 50% de Finos, após completa secagem, houve uma diminuição de, aproximadamente, 40% do Coeficiente de Amortecimento, quando se comparam as amostras, moldadas, com Energia Modificada, e, com a Energia Normal. Para as amostras úmidas, o valor do Coeficiente de Amortecimento se apresenta, independentemente, da Energia de Compactação. Ainda, na Figura 60, após as amostras, completamente, secas, compactadas na Energia Normal, com porcentagem de Finos, acima de 50%, obtiveram um aumento significativo de 20% do Coeficiente de Amortecimento das amostras úmidas. Por fim, pode-se concluir, a partir da Figura 60, que o aumento da Energia de Compactação para o solo granular (% de finos menor de 35%) pouco influencia no Coeficiente de Amortecimento. Entretanto, para os solos, com alta porcentagem de Finos, acima de 35%, há um considerável aumento do Coeficiente de Amortecimento, após secagem, para as amostras, compactadas com Energia Normal.

A Figura 61 apresenta a análise estatística, entre o Coeficiente de Amortecimento e a porcentagem de Finos; resultando na resistência à compressão simples. Os resultados vão ao encontro ao obtido, por meio do Ensaio de Compressão Simples (Figura 31), onde para as amostra com 50% de finos obteve-se a maior resistência e para as amostras com 10% de finos, a resistência foi a menor.

Nota-se, na Figura 61 que elevados Coeficientes de Amortecimento e baixa % de Finos resulta em baixa resistência a compressão. O aumento da porcentagem de Finos diminui o Coeficiente de Amortecimento; e, aumenta a resistência à compressão. No entanto, para a porcentagem de Finos, maiores que 80%, observa-se uma queda na resistência à compressão. Esse fenômeno pode ser explicado, conforme Júnior (2019), em que a transmissão das forças, na argila, dá-se, por meio da dupla camada de água (água adsorvida). Assim, grande número de partículas causa a dispersão das forças aplicadas. Já, nas Areias, esse contato é dado, efetivamente, pelos grãos. Em misturas de Areias e

Finos, a porcentagem de partículas de Finos pode anular a interação entre os grãos de areia; diminuindo, assim, a sua rigidez.

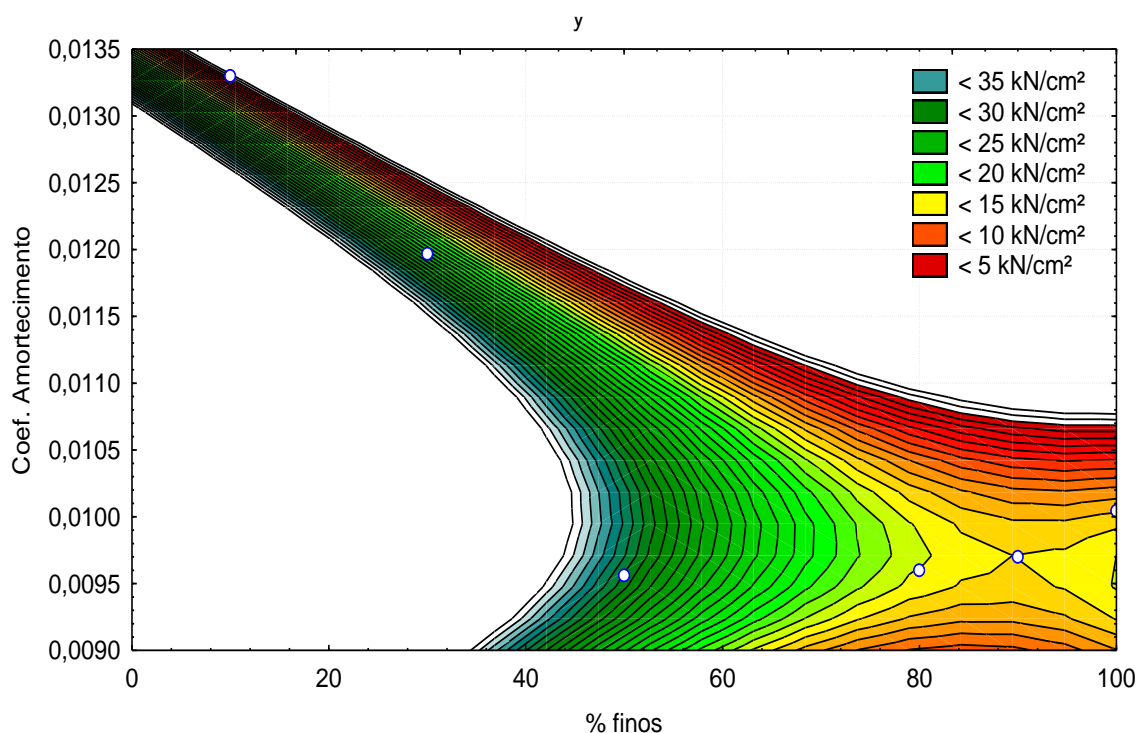


Figura 61: Correlação entre Coeficiente de Amortecimento, Porcentagem de Finos e Resistência à Compressão Simples (kN/cm²) para as Amostras Compactadas com Energia Normal.

4.4.2. Coeficiente de Amortecimento e Índice de Vazios

Conforme, amplamente citado na literatura, o aumento da Energia de Compactação tende a diminuir o Índice de Vazios. A Tabela 15 apresenta a variação do Índice de Vazios, com a variação da Energia de Compactação. Nota-se, conforme o esperado, a diminuição do Índice de Vazios, com o aumento da Energia de Compactação.

A Figura 62 e o Anexo D apresentam uma simulação estatística sobre a variação do Índice de Vazios, em função da média do Coeficiente de Amortecimento, e, a porcentagem de Finos, para as Energias de Compactação Normal, Intermediária e Modificada. Na Figura 62a, na Figura 62b e na Figura 62c, têm-se os resultados para as amostras com 3 dias de compactação. Pode-se observar que o aumento da Energia de Compactação desloca a curva para baixo; que diminui o Índice de Vazios; o que

representa a diminuição do Coeficiente de Amortecimento; significando um aumento da rigidez do solo.

Tabela 15: Variação do Índice de Vazios em Função da Energia de Compactação.

%	Índice de Vazios		
	Energia Normal	Energia Intermediária.	Energia Modificada
10	0,47094	0,43615	0,41335
30	0,44369	0,41737	0,36751
50	0,39038	0,36745	0,34662
80	0,62386	0,58921	0,56066
100	0,66365	0,63265	0,60279

Após a secagem completa das amostras, conforme Figura 62d, Figura 62e e Figura 62f, os valores do coeficiente de amortecimento apresentaram significativas alterações; demonstrando grandes diferenças de comportamento do material em função da Energia de Compactação. O aumento do Coeficiente de Amortecimento, na Figura 62d, para as amostras com porcentagem de Finos, acima de 35% (amostras secas, compactadas com Energia Normal), representa uma perda, na rigidez inicial deste material. Deve-se observar que o valor do Índice de Vazios permanece o mesmo, para as amostras secas e úmidas; havendo variação entre ar e água. Assim, com a secagem, a água, antes, participante do processo de coesão das partículas, dá lugar ao ar; sendo este identificado, pelo Ultrassom; e, apresentado, como perda da rigidez; e, portanto, aumentando o Coeficiente de Amortecimento.

Com o aumento da Energia de Compactação (Figura 62e e Figura 62f), e, conseqüentemente, a diminuição do Índice de Vazios; ou seja, um menor espaçamento entre as partículas, o processo de coesão é mais representativo; uma vez que há maior proximidade entre as partículas. Logo, mesmo após a secagem, há uma variação menor do Coeficiente de Amortecimento, quando comparado com a alteração do Coeficiente de Amortecimento, resultante das amostras, compactadas com Energia Normal.

Para a amostra, com 50% de Finos, observa-se um caso particular, onde houve um decréscimo do Coeficiente de Amortecimento, para a amostra seca, compactada com Energia Modificada. Uma possível explicação se deve ao fato de a configuração da Matriz de Solo manter sua rigidez, não somente, em função da coesão das partículas do solo fino;

mas, também, em função da partícula de areia, conforme discutido, anteriormente, no item 4.4.1.

Assim, pelo Ensaio Ultrassônico, utilizando o Coeficiente de Amortecimento, é possível estimar a porcentagem de Finos e o Índice de Vazios, para uma melhor rigidez; e, avaliar, ainda, se o aumento da Energia de Compactação altera, significativamente, a rigidez do solo.

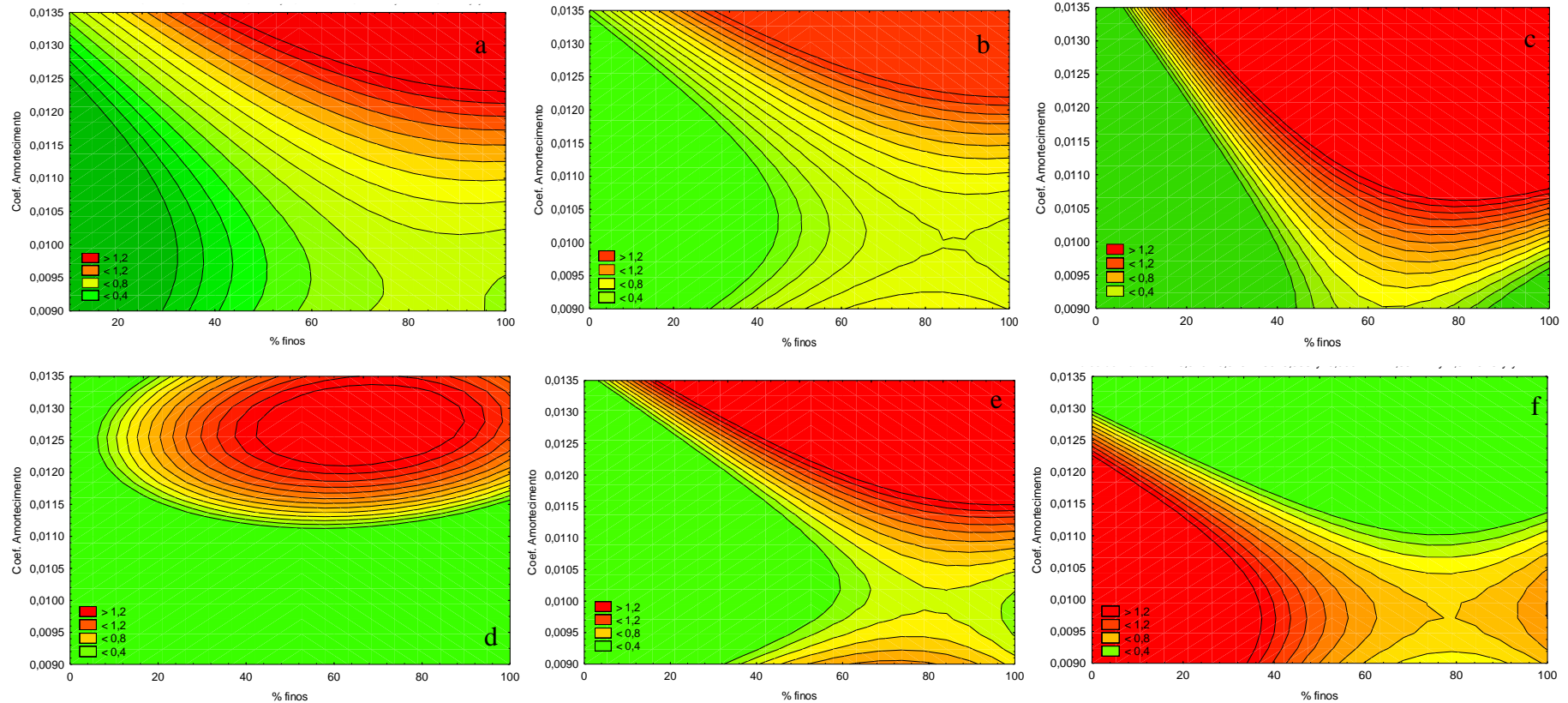


Figura 62: Correlação Estatística entre a Média do Coeficiente de Amortecimento, a Porcentagem de Finos e o Índice de Vazios, em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação do Índice de Vazios para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal; (e) Energia Intermediária; e, (f) Modificada. Medição após Amostras Secas.

4.4.3. Amplitude Máxima, Porcentagem de Finos e Índice de vazios.

A variação da Amplitude Máxima, com a porcentagem de Finos é apresentada na Figura 63. Pode-se observar que as amostras, com 10% de Finos, apresentaram as menores Amplitudes Máximas; sendo que as amostras, compactadas com Energia Normal, foram, aproximadamente, 3 vezes menores, que as demais; considerando o mesmo material.

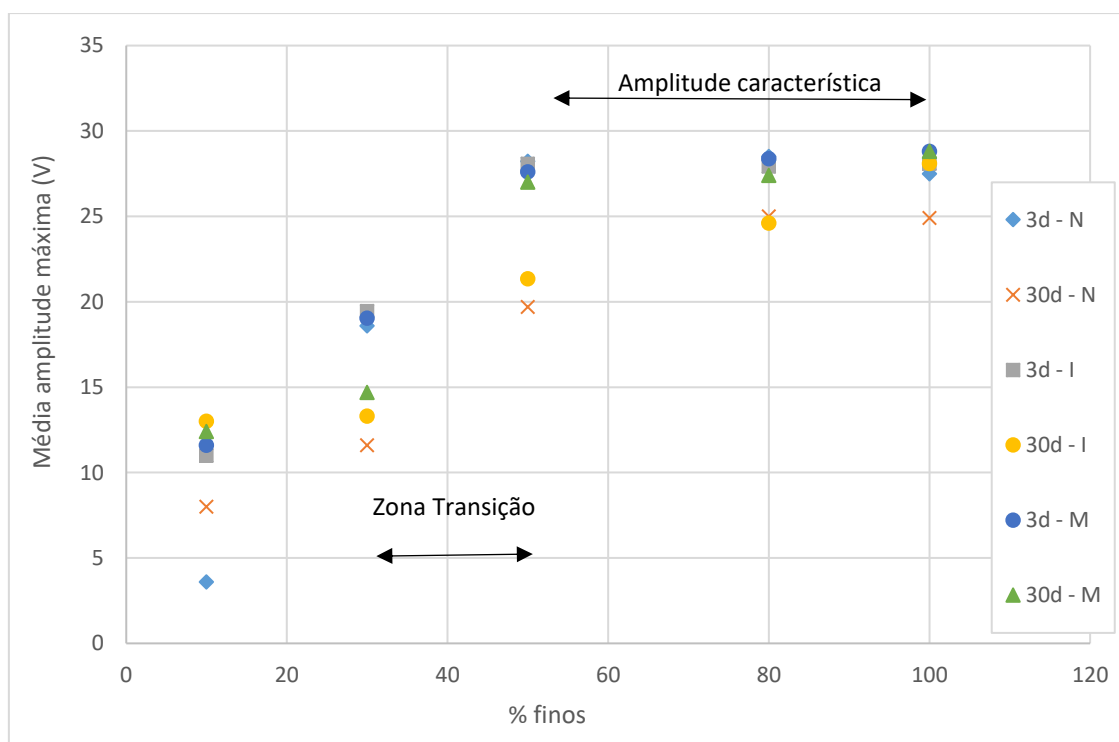


Figura 63: Variação da Média da Amplitude Máxima em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação, para as Amostras, com 3 Dias de Compactação; e, após Secagem Completa (30d). N – Energia de Compactação Normal, I – Energia de Compactação Intermediária e M – Energia de Compactação Modificada. Técnica Transparência.

Com exceção da amostra, com 10% de Finos, a variação da Energia de Compactação, para as amostras úmidas, não influenciou, significativamente, a média da Amplitude Máxima, conforme observado, na Figura 63. O mesmo resultado foi obtido para as medições realizadas, com as amostras secas. Nota-se, também, que as amostras secas, compactadas com Energia Normal e Intermediária, apresentaram as menores médias de Amplitude Máxima. Ainda, na Figura 63, é possível concluir que a Amplitude Máxima diminui com o aumento do diâmetro das partículas. Resultados semelhantes

foram encontrados, por Gheibi e Hedayat (2018) e Dutta *et al.* (2019). Após 50% de Finos, observa-se que houve uma constância do valor da Amplitude; o que indica que, possivelmente, há o mesmo meio dominante, para essas amostras. Esse resultado corrobora com Zhang e Li (2010) e com o que foi, amplamente, demonstrado, no item 2.3, sobre Misturas de Areias e Finos; quando a mistura de solo apresentar valores maiores que 70% de material arenoso, as características predominantes do solo serão regidas, pela Matriz Granular; caso contrário, será regido, pela Matriz de Finos.

A Figura 64 e o Anexo E apresentam uma simulação estatística sobre a variação do Índice de Vazios, em função da média da Amplitude Máxima, e, a porcentagem de Finos, para as Energias de Compactação Normal, Intermediária e Modificada. Na Figura 64a, na Figura 64b e na Figura 64c, têm-se os resultados, para as amostras, com 3 dias de compactação. Pode-se observar que o aumento da Energia de Compactação aumenta a Amplitude Máxima, para os solos, com baixa porcentagem de Finos. Para os solos, com porcentagem, de finos acima de 35%, não houve alteração significativa da Amplitude Máxima.

Após a secagem completa das amostras, apresentadas, na Figura 64d, na Figura 64e e na Figura 64f, nota-se que houve uma alteração significativa. Com exceção da amostra, com 10% de Finos, as amostras compactadas, com Energia Normal e Intermediária, obtiveram uma redução na sua Amplitude Máxima. Para as amostras compactadas, com Energia Modificada, houve um aumento da Amplitude Máxima, para as amostras, com 10% de Finos. Não houve diferença significativa, para as demais amostras.

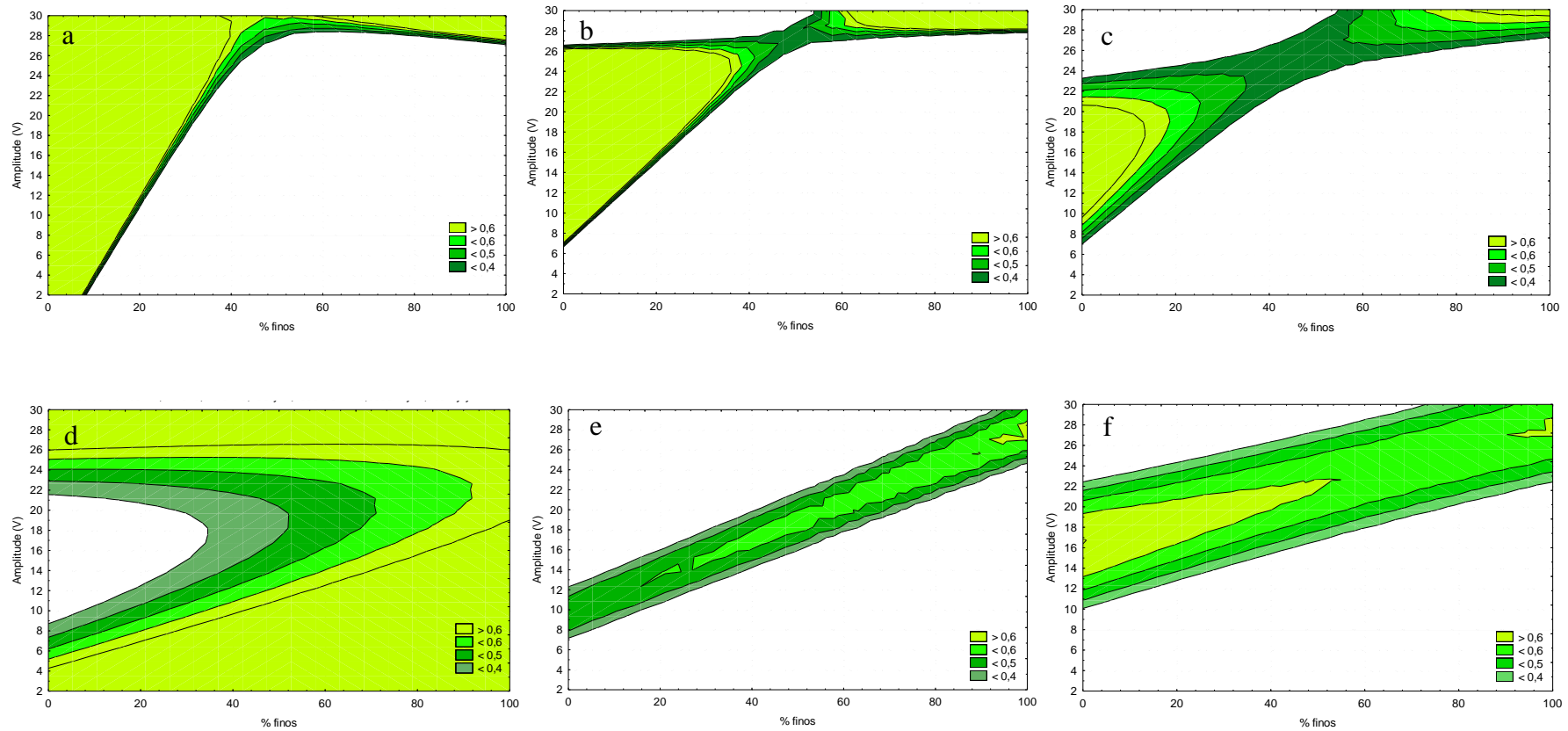


Figura 64: Correlação entre Índice de Vazios, Média da Amplitude Máxima e Porcentagem de Finos em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação do Índice de Vazios, para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 Dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal, (e) Energia Intermediária e (f) Modificada. Medição após Amostras Secas.

Assim, foi possível, pela média da Amplitude Máxima, identificar o material dominante, na Matriz de Solo e estimar o Índice de Vazios. Além disso, demonstrou-se que a Energia de Compactação pouco influencia a Amplitude Máxima, para as amostras, com porcentagem de Finos, maior que 50%; sugerindo a existência de Amplitude Máxima, característica ao meio.

4.4.4. Frequência dominante e Porcentagem de finos

A análise da média da Frequência Dominante (Figura 65) sugere a existência de uma frequência característica, para as amostras com Finos acima de 50%. Observa-se, também, para essas amostras, baixíssima alteração da frequência (menor que 3%), em função da Energia de Compactação.

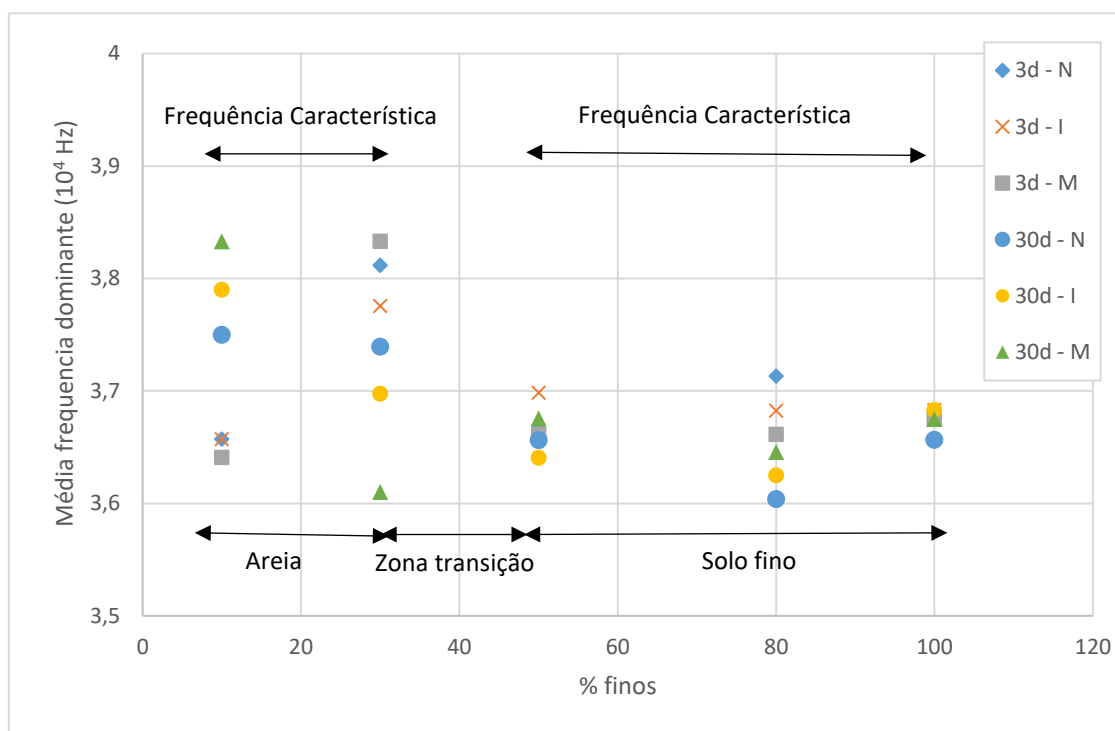


Figura 65: Variação da Média da Frequência Dominante em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação, para as Amostras, com 3 dias de Compactação (3d) e após Secagem Completa (30d). N – Energia de Compactação Normal, I – Energia de Compactação Intermediária e M – Energia de Compactação Modificada. Técnica Transparência.

Para as amostras, com alto teor de areia, nota-se que a frequência sofre maior influência da Energia de Compactação; no entanto, essa variação não passa de 6,5%. Assim, pode-se concluir que, para as amostras, com alto índice de areia, há, também, uma média de Frequência Dominante característica.

A análise das características da Onda Ultrassônica, aponta que, até 30% de Finos, a influência da areia, no comportamento da matriz é maior do que a influência do Fino. Essa determinação foi possível, através análise da Amplitude Máxima e Frequência Dominante. Assim sendo, é possível então, a utilização do Ultrassom no auxílio da identificação de meios dominantes e de zonas de transição.

4.4.5. Velocidade do Pulso Ultrassônico, Porcentagem de Finos e Índice de Vazios.

A Figura 66 apresenta a variação da Velocidade do Pulso, com a porcentagem de Finos; variando a Energia de Compactação, na Umidade Ótima; e, ainda, incluindo as amostras úmidas, com 3 dias de compactação e as amostras secas (30d).

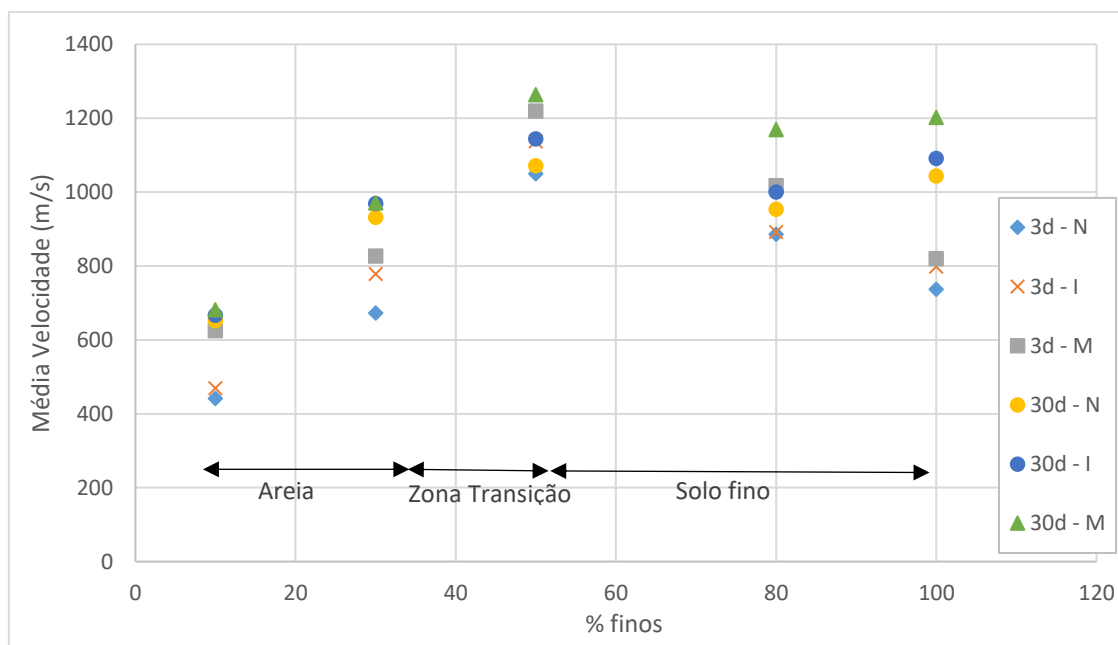


Figura 66: Variação da Média da Velocidade do Pulso Ultrassônico em Função da Porcentagem de Finos e Energia de Compactação, para as Amostras, com 3 Dias de Compactação (3d) e após Secagem Completa (30d). N – Energia de Compactação Normal, I – Energia de Compactação Intermediária e M – Energia de Compactação Modificada. Técnica Transparência.

Para as amostras úmidas, com 10% de Finos, compactadas com Energia Normal e Intermediária, observa-se, na Figura 66, pouca variação da média da Velocidade do Pulso Ultrassônico; e, essas amostras representam as menores velocidades. As amostras secas e as amostras, parcialmente, saturadas, compactadas com Energia Modificada, apresentaram baixa variação da média da Velocidade do Pulso Ultrassônico.

Para 30% de Finos, observa-se que não há alteração da VPU, para as amostras secas; ou seja, a VPU independe da Energia de Compactação. No entanto, para as amostras úmidas, as amostras compactadas com Energia Normal, obtiveram os menores valores de VPU; sendo essas velocidades, aproximadamente, 20% menor, quando comparadas às amostras compactadas com Energia Intermediária e Modificada. As amostras compactadas com Energia Intermediária e Modificada não obtiveram significativa variação de valor da VPU entre si.

As amostras, com 50% de Finos, obtiveram a maior Velocidade do Pulso Ultrassônico, independentemente, da Energia de Compactação aplicada. Demonstrando, assim, conforme apresentado, pelo Coeficiente de Amortecimento e a Amplitude Máxima, que essa composição possui o melhor arranjo estrutural, para a passagem do Pulso Ultrassônico. Observa-se, também, que não há variação da VPU, para as amostras secas e úmidas; existindo, apenas, a variação da VPU, relacionada à Energia de Compactação.

As amostras, parcialmente, saturadas, com 80% de Finos, apresentaram uma velocidade 21% maior, que as amostras, com 100% de Finos. No entanto, após secagem completa das amostras, elas apresentaram a mesma velocidade; e, apenas, 8% menor, que a velocidade das amostras, com 50% de Finos. Esse resultado confirma os resultados, apresentados pelo Coeficiente de Amortecimento e pela Amplitude Máxima, onde, com a porcentagem de Finos, acima de 50%, a Matriz de Solo é dominada, pela partícula fina.

Nota-se, na Figura 66, que, após a secagem completa das amostras, a média da Velocidade do Pulso Ultrassônico aumentou. Esse aumento da Velocidade, após as amostras secas, também, foi observado para a análise de Velocidade, para solos finos; compactados, na Umidade Ótima, com baixa e alta plasticidade, segundo o item 4.3.7, página 88. Conforme Weidinger et al. (2019), a Velocidade do Pulso Ultrassônico tende a variar, com a densidade, o teor de umidade e a saturação. Logo, observa-se, na Figura 66, que a menor velocidade obtida foi referente às amostras compactadas com Energia

Normal, e, com 3 dias de compactação; e, a maior foi obtida, pelas amostras secas compactadas com Energia Modificada.

A Figura 67 e o Anexo F apresentam a correlação estatística entre a VPU, o Índice de Vazios e a porcentagem de Finos.

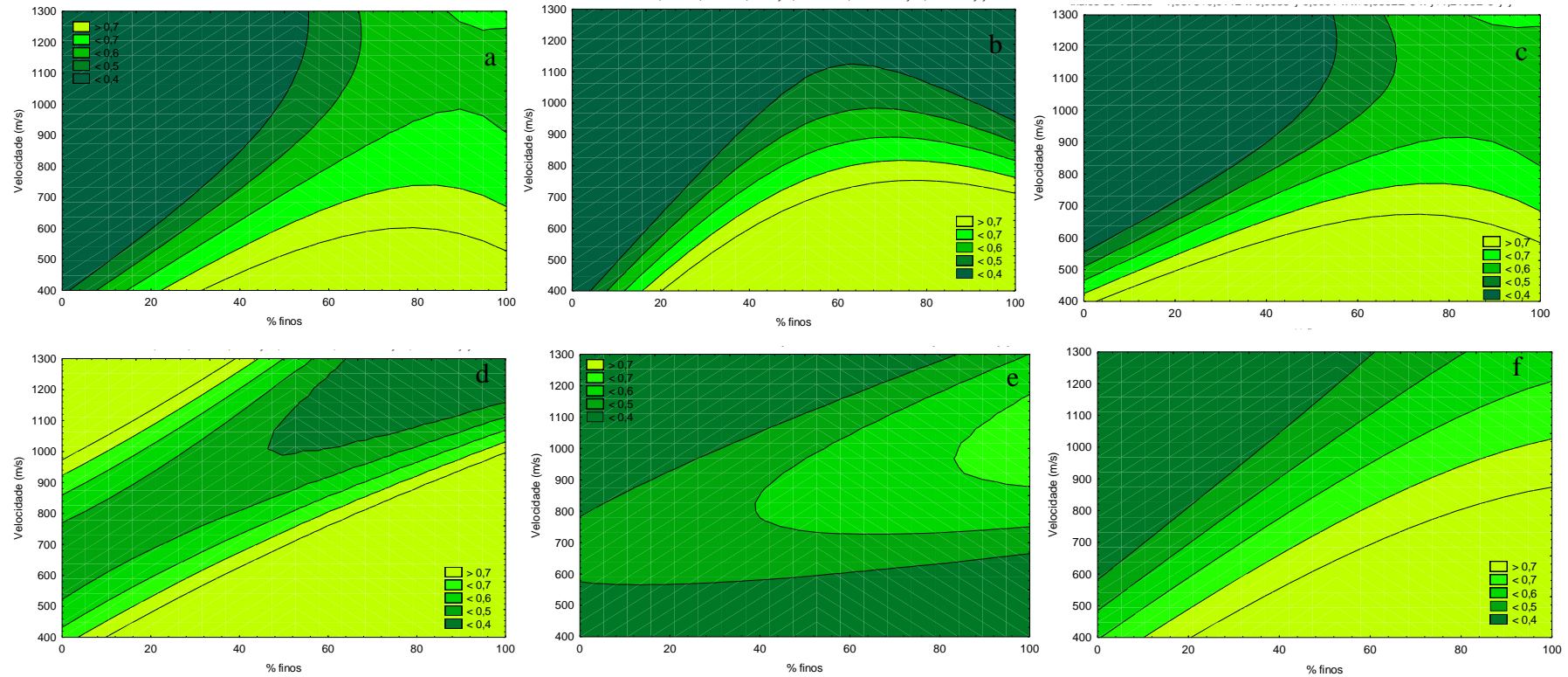


Figura 67: Correlação entre Índice de Vazios, Velocidade do Pulso Ultrassônico e Porcentagem de Finos, em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação do Índice de Vazios para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 Dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal, (e) Energia Intermediária e (f) Modificada. Medição após Amostras Secas.

A Figura 67a, a Figura 67b e a Figura 67c apresentam os resultados para as amostras, com 3 dias de compactação. Pode-se observar que o aumento da Energia de Compactação, aumenta a VPU; e, isso representa uma diminuição dos Índices de Vazios. Esse resultado foi mais expressivo, para as amostras, com baixa porcentagem de Finos (<35%). Para a Figura 67d, a Figura 67e e a Figura 67f, nota-se que o aumento da Energia de Compactação resulta em um aumento da VPU; considerando a mesma porcentagem de Finos e o mesmo Índice de Vazios. Esses resultados vão ao encontro dos resultados de Gheibi e Hedayat (2018), Zimmer (2004) e Xu et al. (2013), os quais citam, em seus Trabalhos, utilizando Ondas Cisalhantes, em solos granulares, que a VPU decai, com o aumento do Índice de Vazios.

Portanto, pode-se destacar, no estudo experimental sobre as principais características ultrassônicas; incluindo a Amplitude Máxima, o Coeficiente de Amortecimento, a Frequência Dominante e a Velocidade do Pulso Ultrassônico, para Misturas de Areia e Finos, que:

1 – A média do Coeficiente de Amortecimento independe da Técnica e das configurações do Equipamento. Esse resultado sugere a existência de um formato de onda, característico; e, portanto, há a possibilidade de utilizar o Ultrassom, para a análise da compactação (Técnica do Pulso e Eco), em campo e em laboratório (Técnica da Transparência).

2 – Pode-se concluir, a partir da Figura 60, que o aumento da Energia de Compactação, para o solo granular (porcentagem de Finos, menor de 35%), pouco influencia no Coeficiente de Amortecimento. Entretanto, para os solos, com alta % de Finos, acima de 35%, há um considerável aumento do Coeficiente de Amortecimento, após secagem, para as amostras compactadas com Energia Normal na Umidade Ótima.

3 – Pelo Ensaio Ultrassônico, utilizando o Coeficiente de Amortecimento, é possível estimar % finos e Índice de Vazios para se obter uma melhor rigidez e avaliar ainda, se o aumento da Energia de Compactação altera significativamente o Coeficiente de Amortecimento.

4 – Foi possível, por meio da média da Amplitude Máxima, identificar o material dominante, na Matriz de Solo; e, estimar o Índice de Vazios. Além disso, demonstrou-se que a Energia de Compactação pouco influencia a Amplitude Máxima, para as amostras, com porcentagem de Finos, maior que 50%; sugerindo a existência de Amplitude Máxima, característica ao meio.

5 – A análise da média da Frequência Dominante (Figura 65) sugere a existência de uma Frequência característica para as amostras com Finos acima de 50%. Observa-se, também, para essas amostras, baixíssima alteração da frequência (menor que 3%) em função da energia de compactação.

6 – VPU decai, com o aumento do Índice de Vazios, para um mesmo meio dominante. Nota-se, também, que, após a secagem completa das amostras, a média da Velocidade do Pulso Ultrassônico aumentou. Pode-se observar, ainda, que o aumento da Energia de Compactação aumenta a VPU; e, isso representa uma diminuição dos Índices de Vazios. Esse resultado foi mais expressivo, para as amostras, com baixa porcentagem de Finos (<35%).

5. CONCLUSÃO

Este Trabalho analisou, experimentalmente, a Amplitude Máxima, o Coeficiente de Amortecimento, a Frequência Dominante e a Velocidade do Pulso Ultrassônico. Essas características foram correlacionadas às propriedades físicas das areias saturadas, com diferentes Índices de Vazios; Materiais de Granulometria Fina, de baixa e alta plasticidade, compactados, com diferentes umidades; e, Misturas de Areia e Finos, compactadas com Energia Normal, Intermediária e Modificada. Conclui-se que, para os Materiais estudados:

- I. O Coeficiente de Amortecimento é um parâmetro, representativo da forma de onda; e, independe da Técnica Ultrassônica utilizada.
- II. O aumento da Amplitude representou a diminuição dos Índices de Vazios.
- III. Demonstrou-se a consistência nas correlações entre a Amplitude, o Coeficiente de Amortecimento e a Umidade Ótima de Compactação.
- IV. A variação significativa da Frequência Dominante possibilita a identificação de zonas de transição, com maior facilidade.
- V. A Velocidade do Pulso Ultrassônico, para ondas de compressão, não varia, com diâmetro, representativo do solo não coesivo (D_{50}). A diminuição da VPU representa um aumento do Índice de Vazios; independentemente, do Material Granular analisado.

Por fim, este Trabalho apresentou o desenvolvimento de uma Técnica viável, para investigar os Índices de Vazios, o Diâmetro Efetivo dos Grãos, a Compactação e a possibilidade e a análise de Meios Dominantes e Zonas de Transição de Materiais Granulares, com diferentes características; usando medições diretas das características das Ondas Ultrassônicas. Sugere-se, então, que essa Técnica seja utilizada, em Laboratório, por meio da Técnica da Transparência, para a identificação de valores correlatos, entre as características dos Materiais Granulares e as Propriedades do Pulso Ultrassônico. Com os dados de Laboratório, é possível, por meio da Técnica de Pulso Eco, a conferência e o acompanhamento, em campo, da qualidade de estruturas, que dependam do processo de compactação, de forma não destrutiva e rápida; e, a identificação da variação dos Índices de Vazios.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, como, Trabalhos futuros:

- a. A aplicação da Técnica, em controles de compactação, na construção de estradas.
- b. A aplicação da Técnica, com medições de encostas e a captação de variação dos Pulsos Ultrassônicos, como tentativa de identificar possíveis alterações de meios dominantes.
- c. O desenvolvimento de Modelo Computacional, pelo Método de Elementos Discretos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 12004 - Solo - Determinação do Índice de Vazios Máximo de Solos Não Coesivos - Método de Ensaio.** . [S.l.], Associação Brasileira de Normas Técnicas. , 1990a

ABNT. **NBR 12051 - Solo - Determinação do Índice de Vazios Mínimo de Solos Não Coesivos - Método de Ensaio.** . [S.l.], Associação Brasileira de Normas Técnicas. , 1990b

ABNT. "NBR 5734 - Peneira para Ensaio com Telas de Tecido Metálico", **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1989.

ABNT. **NBR 6459 - Determinação do Limite de Liquidez.** . [S.l: s.n.]. , 2016a

ABNT. "NBR 6502 - Rochas e Solos", **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 18, 1995. .

ABNT. **NBR 7180 - Determinação do Limite de Plasticidade.** . [S.l.], Associação Brasileira de Normas Técnicas. , 2016b

ABNT. **NBR 7181 - Solos - Análise Granulométrica.** . [S.l.], Associação Brasileira de Normas Técnicas. , 2016c

ABNT. "NBR 7182 - Solos - Ensaio de Compactação", **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2016d. .

ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom.** . [S.l: s.n.]. , 2014

ARACNE-RUDDLE, C. M., B. P., BONNER, C. N., TROMBINO, E. D., *et al.* "*Ultrasonic Velocities in Unconsolidated Sand/Clay Mixtures at Low Pressures*", **Technical Report**, v. No. UCRL-J, 1999. .

ARAÚJO, P. . **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SOLO COMPACTADO UTILIZADO NA CAMADA DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO.** 2017. 138 f. Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

ASNT. ***Ultrasonic Testing - Classroom Training Book.*** . [S.l.], Columbus: The ASNT PERSONAL TRAINING PUBLICATIONS. , 2006

BARONI, D., BITTENCOURT, M., PEREIRA, C. "Caracterização de Materiais Cerâmicos Utilizando Técnicas Ultrassônicas no Domínio da Frequência de Redes Neurais Artificiais.". 2008. **Anais [...]** Porto de Galinhas, PE, Brasil., [s.n.], 2008.

BASTIDAS, A. M. . ***Ottawa F-65 sand characterization.*** 2016. Davis, CA: University of California, 2016.

BERUTTI, F. **Aplicação de Métodos de Ultrassom para Avaliação e Caracterização da Microestrutura de Materiais Cerâmicos à Base de Alumina e sua Associação com Propriedades Mecânicas.** 2004a. Univesidade Federal do Rio Grande do Sul., 2004.

BERUTTI, F. A. **Aplicação de Métodos de Ultrassom para Avaliação e Caracterização da Microestrutura de Materiais Cerâmicos à Base de Alumina e sua Associação com Propriedades Mecânicas.** 2004b. 167 f. Universidade Federal do Rio

Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

BICALHO, K V., CAVASSANI, M. R. P. E CASTELLO, R. R. "Características de Compressibilidade de Argilas Arenosas Moles.". 2002. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 2002. p. 3003–312.

BICALHO, K.V. **Notas de Aula: Mecânica dos Solos II**. . Vitória, ES, Universidade Federal do Espírito Santos. , 2008

BICALHO, Kátia Vanessa, GONÇALVES, F. "*Important factors in the prediction of the soil-water retention curves of different unsaturated soils*", **ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 2017-Septe, p. 1125–1128, 2017. .

BOUTIN, C., KACPRZAK, G., THIEP, D. "*Compressibility and permeability of sand–kaolin mixtures. Experiments versus non-linear homogenization schemes Claude*", **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 35, p. 21–52, 2011. DOI: 10.1002/nag.891. Disponível em: doi: 10.1002/nag.891.

BURTON, GLEN J.; SHENG, D. . A. D. "*Critical state behaviour of an unsaturated high plasticity clay*", **Geotechnique**, 2019. DOI: 10.1680/jgeot.18.p.178. .

CAPUTO, H. P., CAPUTO, A. N. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 7. ed. São Paulo, Brasil., LTC, 2015.

CARDOSO, F. A. **Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico**. 2009. 158 f. Universidade de São Paulo - Escola Politécnica., 2009.

CARELLI, J. M. **Análise do Comportamento de Ondas Ultrassônicas em Elementos Fissurados de Concreto e Argamassa**. 2014. 205 f. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC., 2014.

CAREY, T.J; STONE, N. KUTTER, B. . **Grain size analysis and maximum and minimum dry density of Ottawa F-65 sand for LEAP-UCD-2017. Model tests and numerical simulations of liquefaction and lateral spreading: LEAP-UCD-2017**. New York: Springer, [s.n.]. , 2019

CHOOBBASTI, A. J., SAMAKOOSH, M. A., KUTANAELI, S. S. "*Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers*", **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 1094–1104, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.306. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.306>.

CHRISTENSEN, D. A. **Ultrasonic Bioinstrumentation**. John Wiley ed. New York, [s.n.], 1988.

CHUNG-SHIN. **The interactions of ultrasonic Rayleigh waves with surface discontinuities in steel**. 1984. 251 f. Iowa State University, 1984.

CORREIA, V. F. **VIBRAÇÕES MECÂNICAS: Textos de apoio**. . Portugal, Escola Superior Náutica Infante D. Henrique. , 2015

DACIUK, R. J. **ESTUDO DE PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS**. 2008. 90 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.

DAS, B. M., SOBHAN, K. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Cengage Le ed. São Paulo, [s.n.], 2014.

DUTTA, T. T., OTSUBO, M., KUWANO, R., *et al.* "Stress wave velocity in soils: Apparent grain-size effect and optimum input frequencies", ***Geotechnique Letters***, v. 9, n. 4, p. 340–347, 2019. DOI: 10.1680/jgele.18.00219. .

EL GHORAIBY, M., PARK, H., MANZARI, M. T. "Physical and Mechanical Properties of Ottawa F65 Sand", 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-22818-7. .

FENER, M., KAHRAMAN, S., BAY, Y., *et al.* "Correlations between P-Wave Velocity and Atterberg Limits of Cohesive Soils.", ***Canadian Geotechnical Journal***, v. 42, p. 673–677, 2005. DOI: doi:10.1139/t04-102. .

FERREIRA, G., SARRO, W., HOFFMAN, M., *et al.* "Influência das Camadas de Compactação em Inspeções de Painéis Monolíticos de Solo-cimento por Ultrassom.No Title". 2014. **Anais [...]** São Paulo, Brasil., [s.n.], 2014. p. 1–10.

FERRONATTO, D., N., L. **Determinação do Fator de Amortecimento de Materiais Cerâmicos por Ultrassom**. 2016. 123 f. Universidade Federal Fluminense, 2016.

FOURIE, A. B., PAPAGEORGIOU, G. "Defining an appropriate steady state line for Merriespruit gold tailings", ***Can. Geotech. J.***, v. 706, n. February 1994, p. 695–706, 2001. DOI: 10.1139/cgj-38-4-695. .

GEORGIANNOU, V. N., BURLAND, J. B., HIGHT, D. W. "The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension.", ***Geotechnique***, v. 40, n. 3, p. 431–449, 1990. .

GHEIBI, A., HEDAYAT, A. "Ultrasonic investigation of granular materials subjected to compression and crushing", ***Ultrasonics***, v. 87, n. February, p. 112–125, 2018. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.02.006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.02.006>.

GUERRA, R. S. **Processamento de Sinais de Ultrassom para Análise de Textura (Direção Laminação) em Materiais Metálicos**. 2014. 90 f. 2014.

HEMMATI NOURANI, M., TAHERI MOGHADDER, M., SAFARI, M. "Classification and assessment of rock mass parameters in Choghart iron mine using P-wave velocity", ***Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering***, v. 9, n. 2, p. 318–328, 2017. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.11.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.006>.

IHARA, I., "Ultrasonic Sensing: Fundamentals and Its Applications to Nondestructive Evaluation (a draft)". ***Lecture Notes Electrical Engineering***, [S.l: s.n.], 2008. p. 287–307. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69033-7_14.

KIMURA, S., KITAYAMA, K., TAKAHASHI, H., *et al.* "Longitudinal and Shear Wave Velocities Measurement in Compacted Bentonite for Water Content", ***E3S Web of Conferences***, v. 43, p. 4–9, 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184301016. .

KNUTH, M. W., TOBIN, H. J., MARONE, C. "Evolution of ultrasonic velocity and dynamic elastic moduli with shear strain in granular layers", ***Granular Matter***, v. 15, n. 5, p. 499–515, 2013. DOI: 10.1007/s10035-013-0420-1. .

KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H. *Ultrasonic Testing by Determination of Material Properties*. In: *Ultrasonic Testing of Materials*. [S.l.], Springer, Berlin, Heidelberg, 1990.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R. V. *Soil Mechanics*. John Wiley ed. New York, John Wiley and Sons., 1969.

LAURA J. PYRAK-NOLT, NOLTE, D. D. "Frequency Dependence of Fracture Stiffness", *Geophysical Research Letters*, v. 19, p. 325–328, 1992. .

LEONG, E.-C., YEO, S.-H., RAHARDJO, H. "Measurement of Wave Velocities and Attenuation Using an Ultrasonic Test System", *Canadian Geotechnical Journal*, v. 45, p. 844–860, 2004. DOI: doi:10.1139/t04-041. .

LIU, Z., ZHOU, C. Y., LI, B. T., *et al.* "Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering A dissolution-diffusion sliding model for soft rock grains with hydro-mechanical effect", v. 10, 2018. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.003. .

LORENZI, A., CAETANO, L. F., MAURÍCIO, T. D., *et al.* "Utilização de Ultrassom para o Monitoramento de Estruturas de Concreto". 2003. *Anais [...]* Rio de Janeiro - RJ, [s.n.], 2003.

LOSS, C., SANTOS, D. O. S. "UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO PLASTICIDADE DE MISTURAS DE ARGILA E AREIA", 2012. .

MAKSE, H. A., GLAND, N., JOHNSON, D. L., *et al.* "Attenuation mechanisms in sands: laboratory versus theoretical (Biot) data", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2015. DOI: 10.1002/nag. Disponível em: doi: 10.1002/nag.938.

MAKSE, H. A., GLAND, N., JOHNSON, D. L., *et al.* "Granular packings: Nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics", *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, v. 70, n. 6, p. 19, 2004. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.061302. .

MANDAL, T., TINJUM, J. M., EDIL, T. B. "Non-destructive testing of cementitiously stabilized materials using ultrasonic pulse velocity test", *Transportation Geotechnics*, v. 6, p. 97–107, 2016. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.09.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.09.003>.

MEDEIROS, A. "APLICAÇÃO DO ULTRASSOM NA ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE FENDAS SUPERFICIAIS E NA AVALIAÇÃO", 2007. .

MILANI, A. *Avaliação Física, Mecânica e Térmica do Material Solo Cimento Cinza Casca de Arroz e seu Desempenho como Parede Monolítica*. 2008. Universidade Estadual de Campinas - Campinas, SP, 2008.

MITCHELL, J. K., ET, A. *Fundamentals of Soil Behavior*. [S.l.: s.n.], 2005.

MONKUL, M. ., OZDEN, G. "Compressional Behavior of Clayey sand and transition fines content.", *Engineering geology*, v. 89, p. 195–205, 2007. .

NAGARAJ, H. B., REESHA, B., SRAVAN, M. V., *et al.* "Correlation of compaction characteristics of natural soils with modified plastic limit", *Transportation Geotechnics*, v. 2, p. 65–77, 2015. DOI: 10.1016/j.trgeo.2014.09.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.002>.

NAZLI YESILLER, G. and C. J. M. "*Ultrasonic Testing for Compacted Clayey Soils*", **Advances in Unsaturated Geotechnics**, p. 54–68, 2000. .

NEVES, C. E. V. **Comportamento de Materiais Granulares Usando o Método dos Elementos Discretos**. 2009. 166 f. Universidade de Brasília, 2009.

OLMEZ, M. S. ***Shear Strength Behavior of Sand - Clay Mixtures***. 2008. Middle East Technical University, Turkey, 2008.

PANZERA, T. H., CHRISTOFORO, A. L., COTA, F. P., *et al.*, "*Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials*". **Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials** *Advances in Composite Materials*, [S.l.], InTech, 2011. p. 411–436.

PESSOA, D. B. **Estudo dos Efeitos da Microestrutura do Material e da Frequência do Sinal Ultrassônico na Análise de Flutuações**. 2013. 106 f. Universidade Federal do Ceará., 2013.

PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos. Oficina de Texto**. São Paulo, Oficina de Texto, 2006.

PITMAN, T. D., ROBERTSON, P. K., SEGO, D. C. "*Influence of Fines on the Collapse of Loose Sands*.", **Can. Geotech**, v. 31, p. 728–739, 1994. .

PRASAD, M., MEISSNER, R. "Attenuation mechanisms in sands: laboratory versus theoretical (Biot) data", **Geophysics**, v. 57, n. 5, p. 710–719, 1992. DOI: 10.1190/1.1443284. .

PU, S., HONG, B., LIU, X., *et al.* "*Detection Technology of Foamed Mixture Lightweight Soil Embankment Based on Ultrasonic Wave Transmission Method*", **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, 2019. DOI: 10.1155/2019/9654819. .

QUIVIGER, A., PAYAN, C., CHAIX, J., *et al.* "*Proceedings of Meetings on Acoustics Session*", **Acoustical Society of America**, v. 16, p. 1–16, 2012. DOI: 10.1121/1.4764488. .

RIOS, S., CRISTELO, N., FONSECA, V. A. da, *et al.* "Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains.", **International Journal of Geomechanics**, v. 17, n. (3): 04016087., 2017. DOI: doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000783. .

ROCCHI, I., COOP, M. "*Experimental Accuracy of the Initial Specific Volume*", **Geotechnical Testing Journal**, v. 37, n. 1, p. 169–175, 2014. .

ROCHA, B. P., SANTOS, R. A. dos, NOLA, I. T. de S., *et al.* "*Models for estimating the optimum moisture and maximum dry density for fine soils*", **REEC**, v. 15, n. 1, p. 183–193, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v15i1.50204>.

SARRO, W. . **ELASTIC CONSTANTS OF SOIL COMPACTED FROM THE ULTRASOUND TEST**. 2017. Universidade Estadual de Campinas, 2017.

SELCUK, L., SEKER, V. "*Predicting California Bearing Ratio of Foundation Soil Using Ultrasonic Pulse Velocity*.", **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering**, v. 112, p. 320–330, 2018. DOI: doi:10.1680/jgeen.18.00053.

SILVA, C. W. *Vibraton Damping, Control, and Desing*. 1. ed. [S.l.], Boca Raton: CRC Press, 2007.

SKEMPTON, A. W. "Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory", **Geotechnique**, v. 35, n. 1, p. 3–18, 1985. .

SKRIPKUNAS, G., GRINYS, A. M. K. "Damping proprieties of concrete with rubber waste additivies.", **Materials Science**, v. 15, n. 3, 2009. .

SOWERS, G. F. *Introductory Soil Mechanics and Foundations*. 4 th editi ed. [S.l.], Macmillan, 1979.

TEIXEIRA, I., SARRO, W. S., CARDOSO, S. M., *et al.* "Influência da granulometria e umidade nas propriedades de solos a partir da ensaios destrutivos e não destrutivos.". 2015. **Anais [...]** Ouro Preto, MG, ANPET, 2015. p. 196–207.

THEVANAYAGAM, S. "Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands.", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, n. 6, p. 479–491, 2000. .

TISATO, N., MARELLI, S. "Laboratory measurements of the longitudinal and transverse wave velocities of compacted bentonite as a function of water content, temperature, and confining pressure", **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 118, n. 7, p. 3380–3393, 2013. DOI: 10.1002/jgrb.50252. .

VOIGT, T. *The application of an Ultrasonic Shear Wave Reflection Method for Nondestructive Testing of Cement-Based Materials at Early Ages*. 2004. 241 f. Universität Leipzig. Leipzig, 2004.

WANG, X., YU, Z., ZHANG, J., *et al.* "Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Numerical simulation of the behaviors of test square for prehistoric earthen sites during archaeological excavation", **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 567–578, 2018. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.12.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.005>.

WEIDINGER, D., GE, L., STEPHENSON, R. "ULTRASONIC PULSE VELOCITY TESTS ON COMPACTED SOIL", **GeoHunan International Conference**, p. 150–155, 2009. .

WEIDINGER, D. M., ZHAO, H., KWOK, A. O. L., *et al.* "Small strain moduli of compacted silt by ultrasonic pulse velocity measurements", **Marine Georesources and Geotechnology**, v. 0, n. 0, p. 1–8, 2019. DOI: 10.1080/1064119X.2019.1657209. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1657209>.

WIGGENHAUSER, H., SAMOKRUTOV, A., MAYER, K., *et al.* "Large aperture ultrasonic system for testing thick concrete structures", **Journal of Infrastructure Systems**, v. 23, n. 1, p. 1–9, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000314. .

WORKMAN, G. L., KISHONI, D. K. *Nondestructive Testing Handbook - Ultrasonic Testing*. 7. ed. [S.l.], Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2007.

XU, X., CHENG, Y., LING, D. "The influence of void ratio on small strain shear modulus of granular materials: A micromechanical perspective", **AIP Conference**

Proceedings, v. 1542, p. 201–204, 2013. DOI: 10.1063/1.4811902. .

YANG, J., GU, X. Q. "*Shear stiffness of granular material at small strains: Does it depend on grain size?*", **Geotechnique**, v. 63, n. 2, p. 165–179, 2013. DOI: 10.1680/geot.11.P.083. .

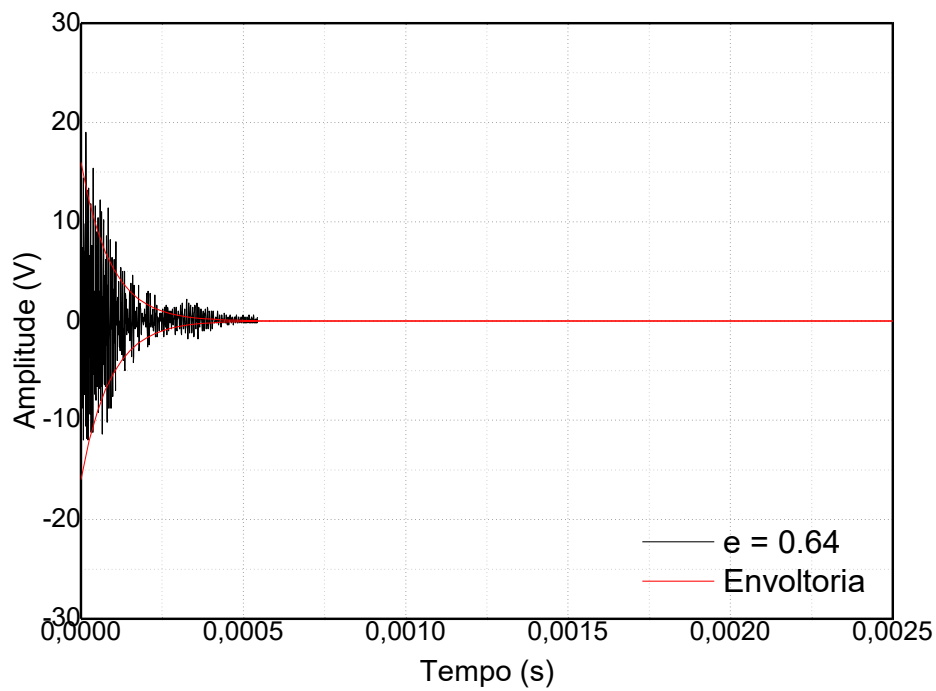
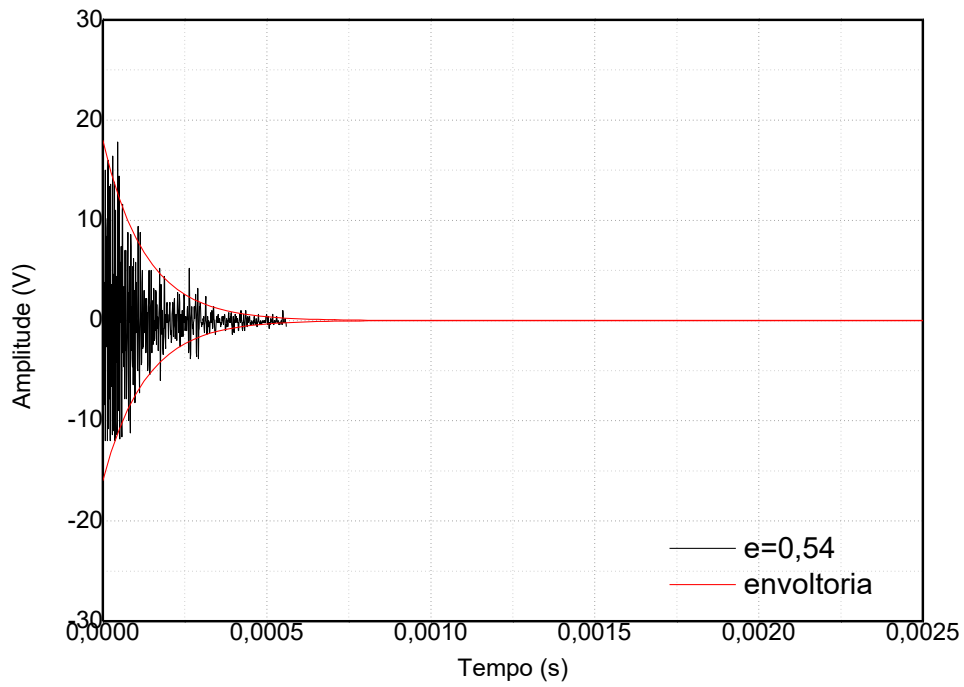
YESILLER, N., HANSON, J. L., RENER, A. T., *et al.* "*Ultrasonic testing for evaluation of stabilized mixtures*", **Transportation Research Record**, n. 1757, p. 32–39, 2001. DOI: 10.3141/1757-04. .

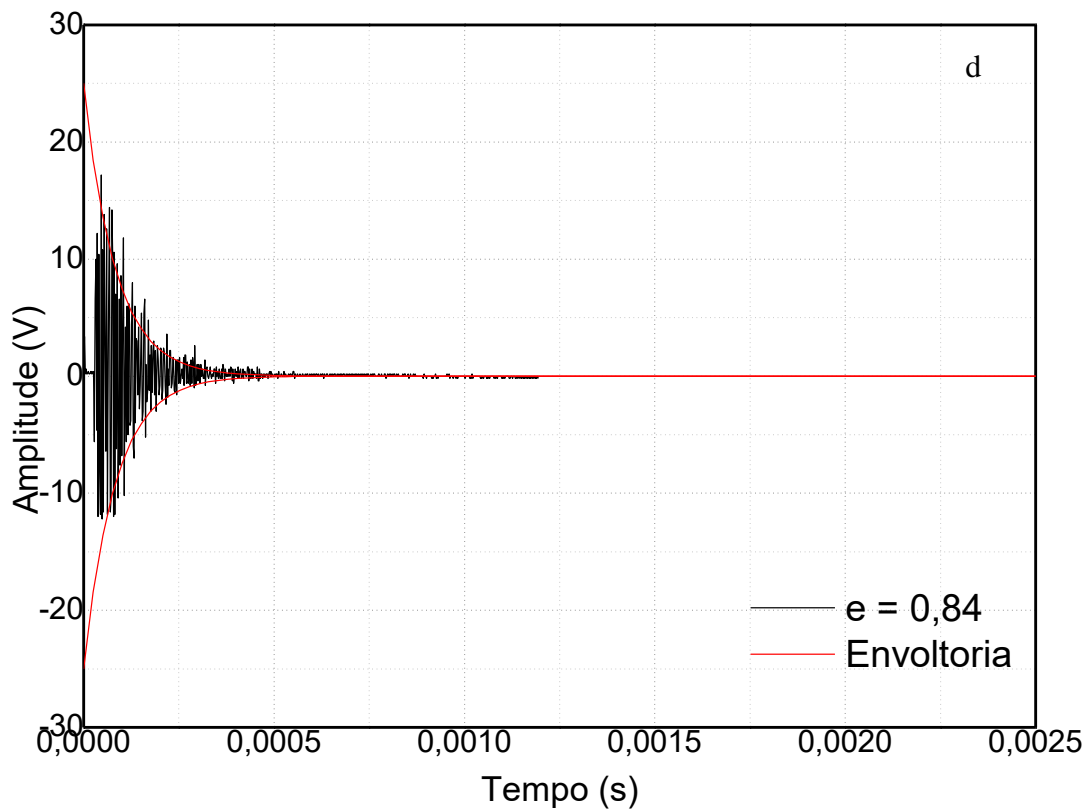
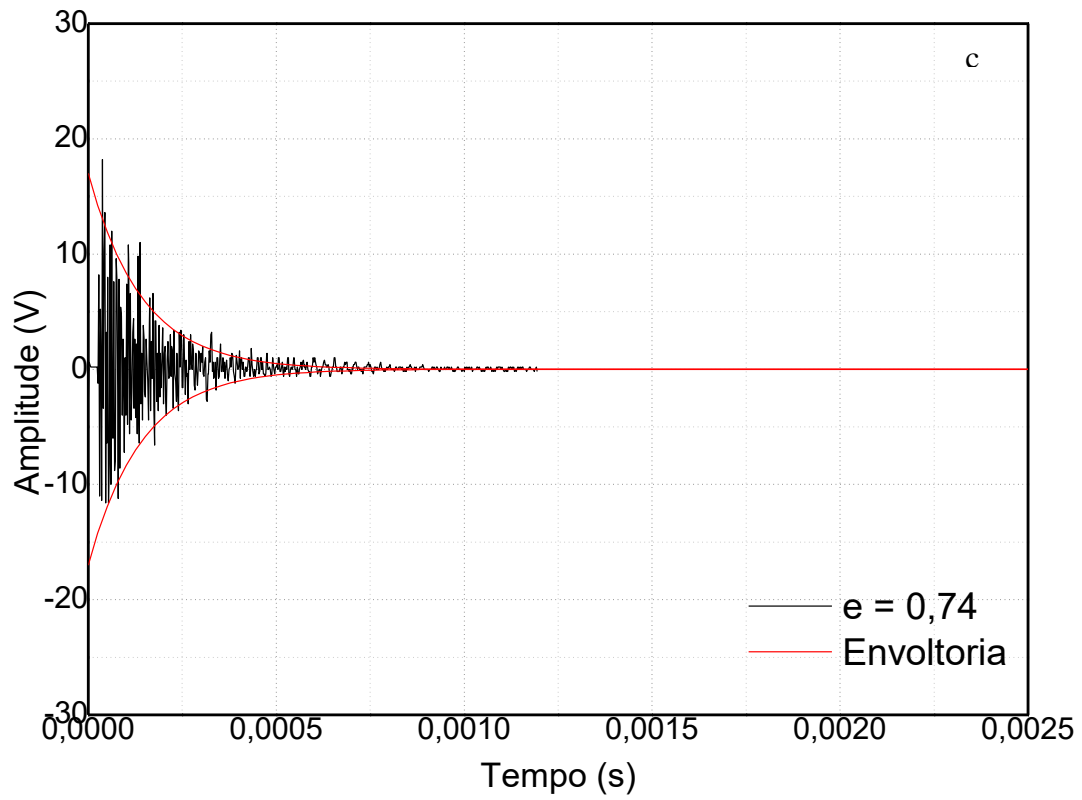
ZHANG, L. M., ASCE, M., LI, X. "*Microporosity Structure of Coarse Granular Soils*", **JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING**, p. 1425–1436, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000348.

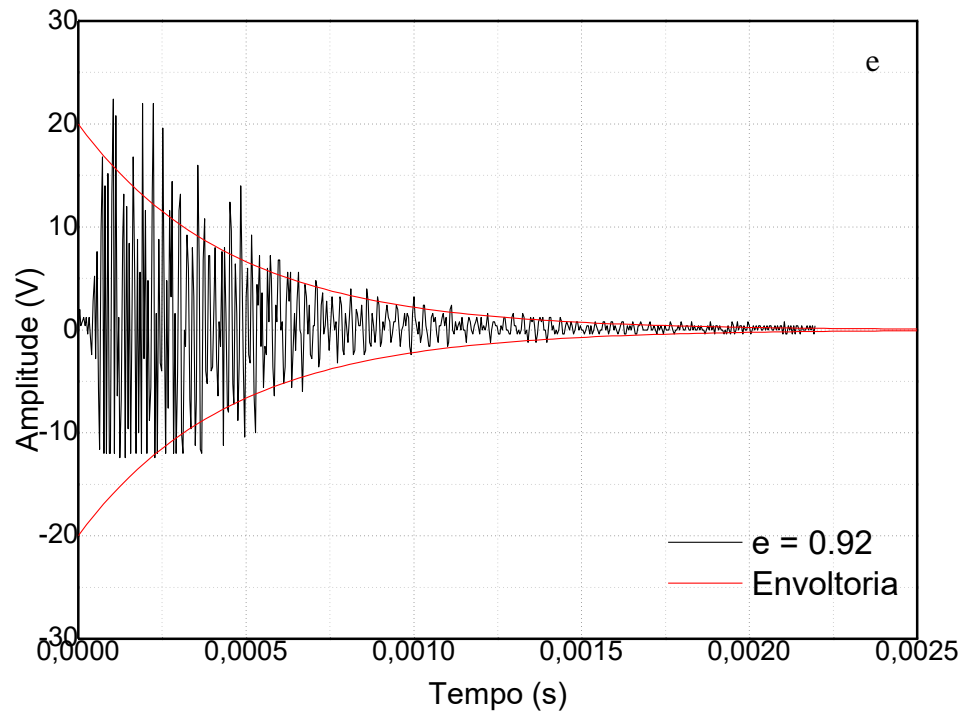
ZIMMER, M. A. "*Seismic velocities in unconsolidated sands: Measurements of pressure, sorting, and compaction effects*", n. November, p. 204, 2004. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004PhDT.....417Z>.

ANEXO A

Figura 32: Formato de Onda no Domínio do Tempo. Método da Transparência para Areias Saturadas com $D_{50} = 1.15\text{mm}$. Em (a) $e = 0,56$; (b) $e = 0,64$; (c) $e = 0,74$; (d) $e = 0,84$; (e) $e = 0,92$.

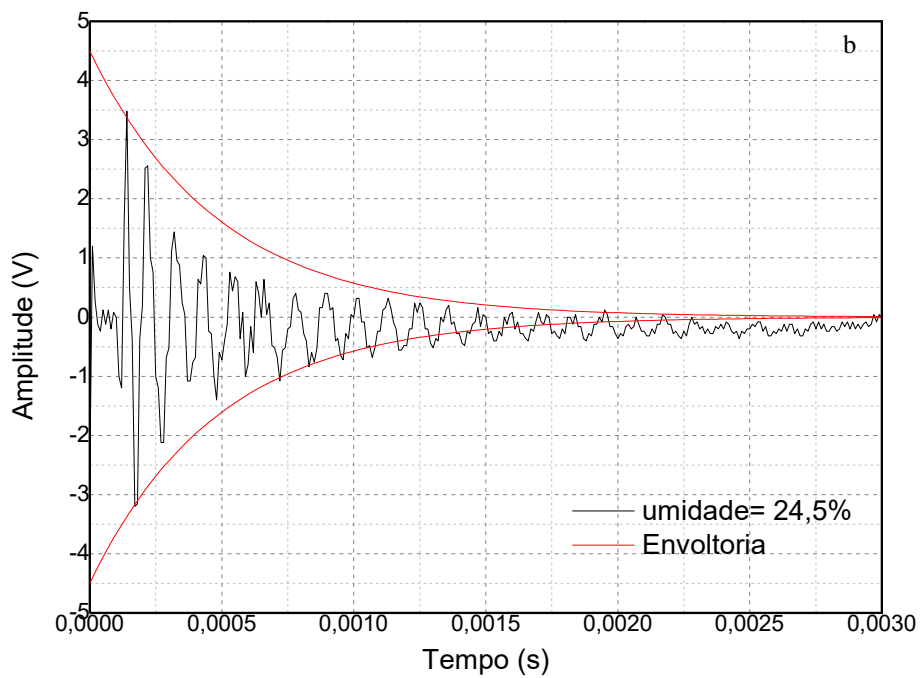
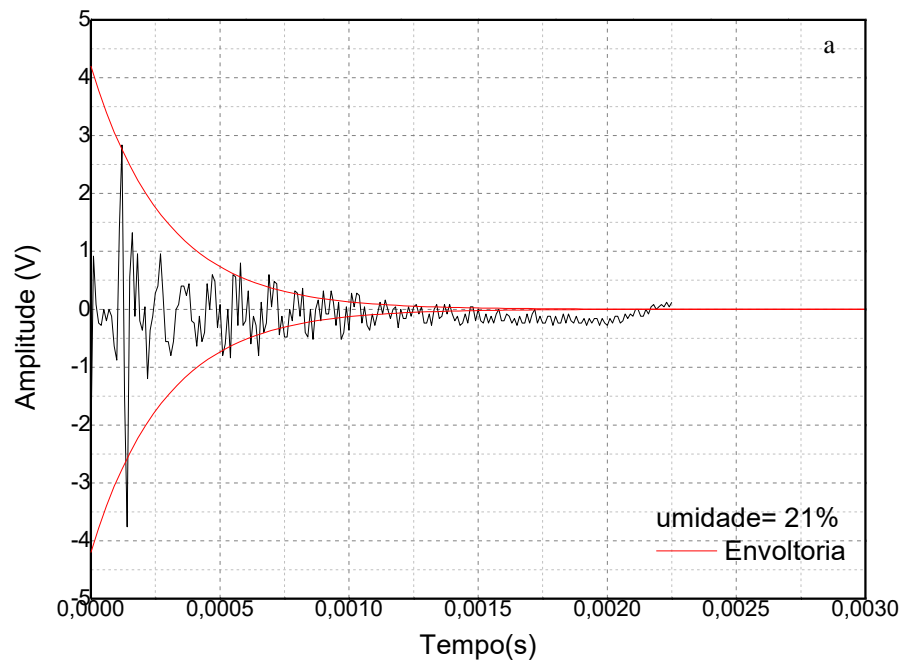


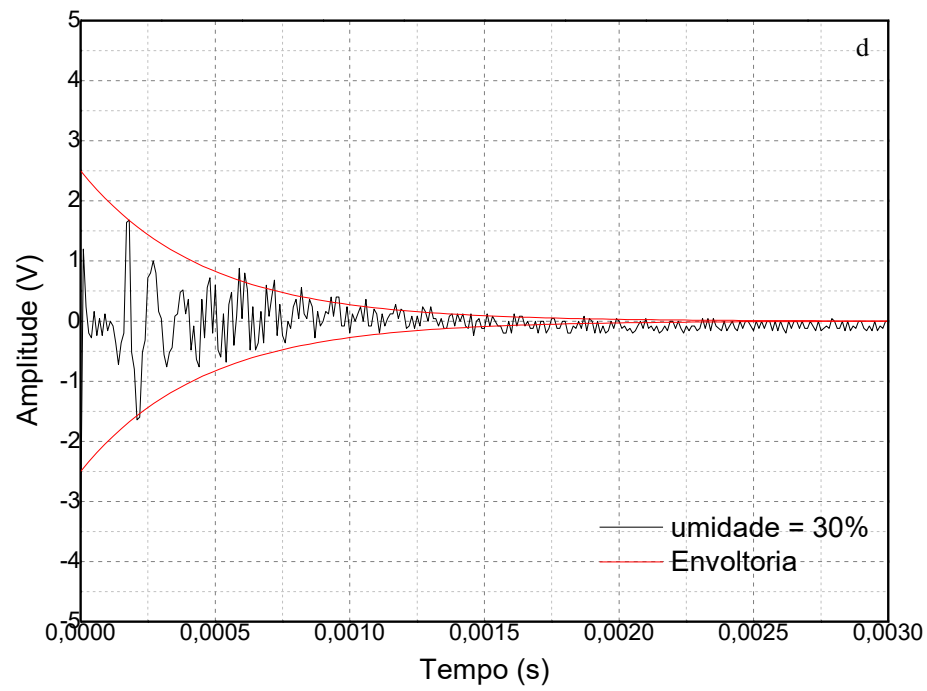
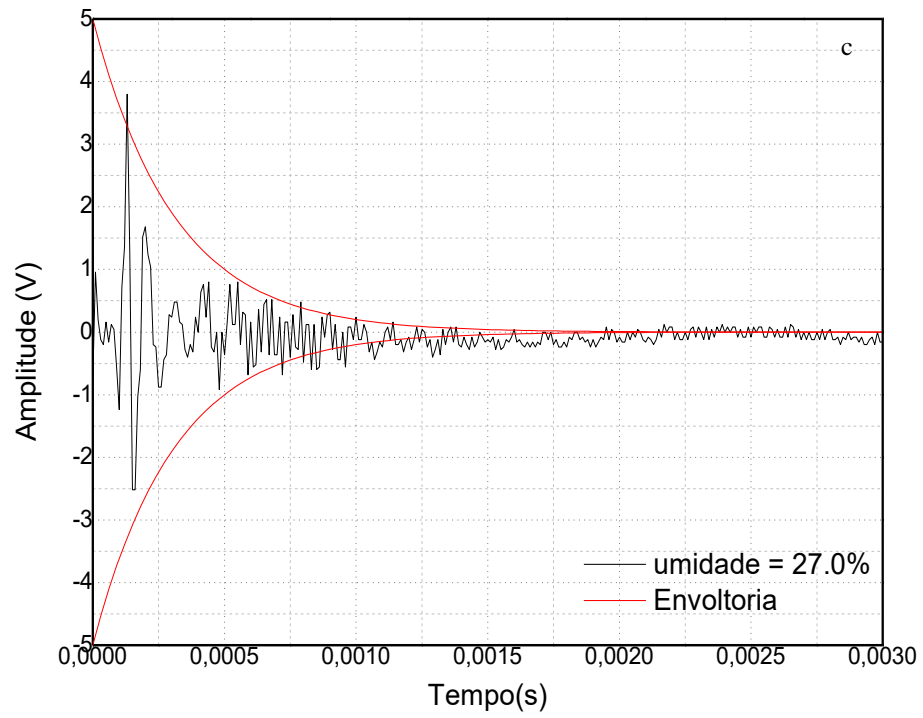


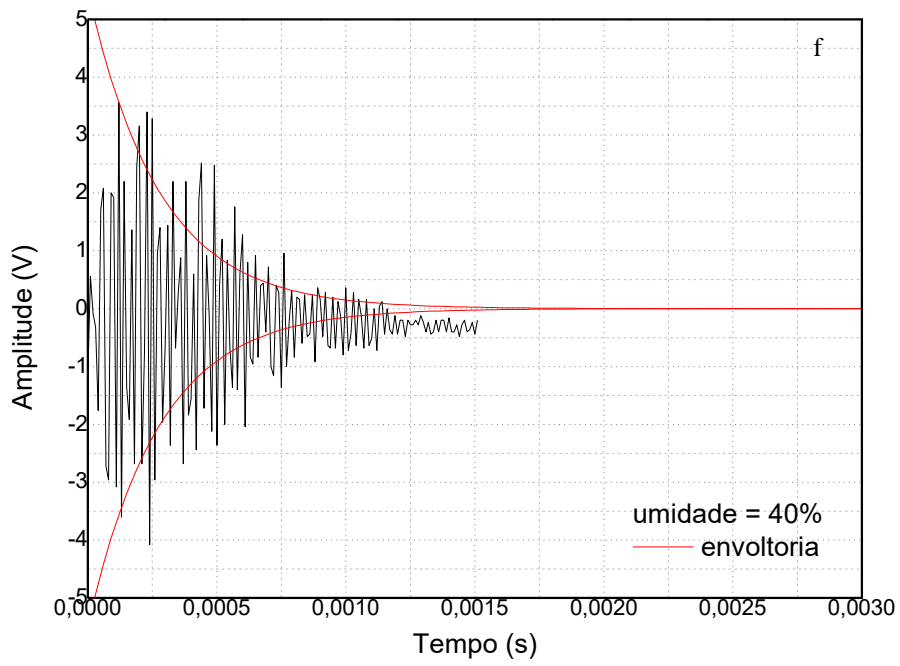
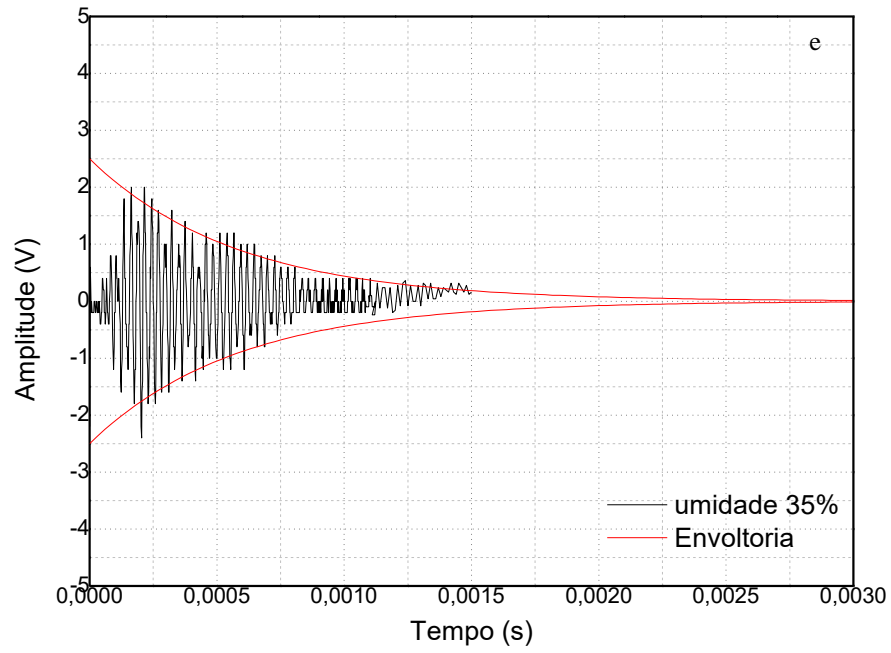


ANEXO B

Figura 39: Formato de Onda, no Domínio do Tempo, para Solo Fino, de Baixa Plasticidade. Método da Transparência. Um dia de Compactação. Em (a) $w = 21\%$; (b) $w = 24,5\%$ (umidade ótima); (c) $w = 27\%$; (d) $w = 30\%$; (e) $w = 35\%$; (f) $w = 40\%$.

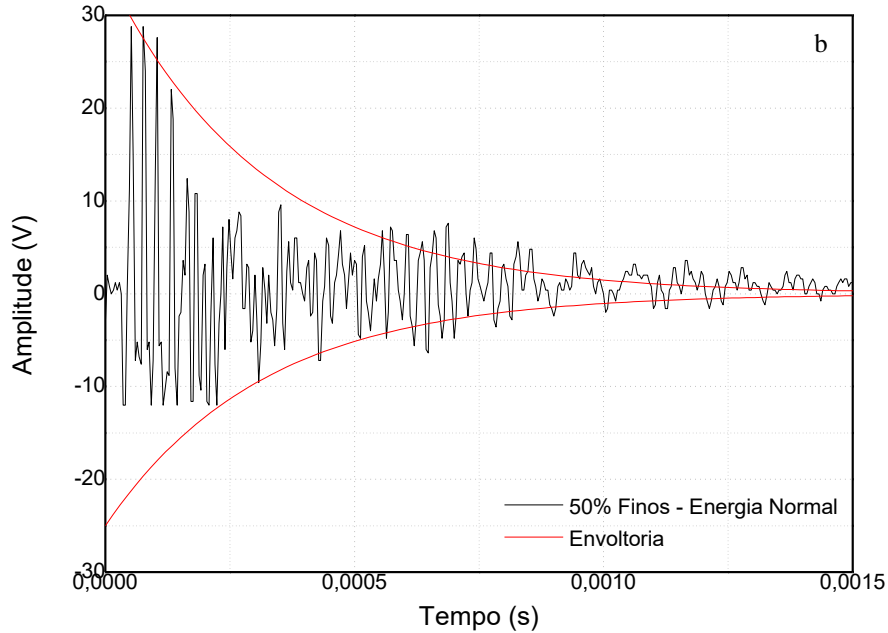
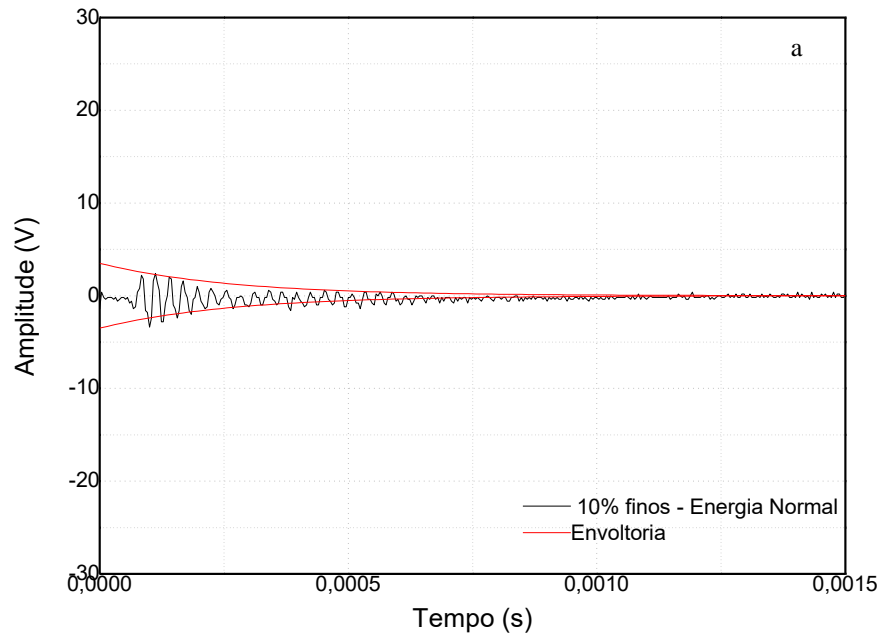


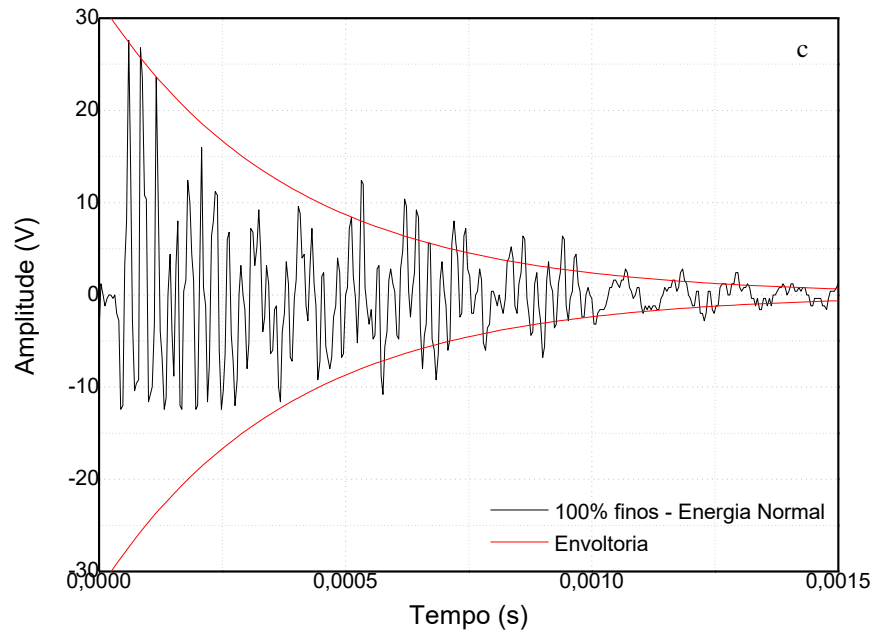




ANEXO C

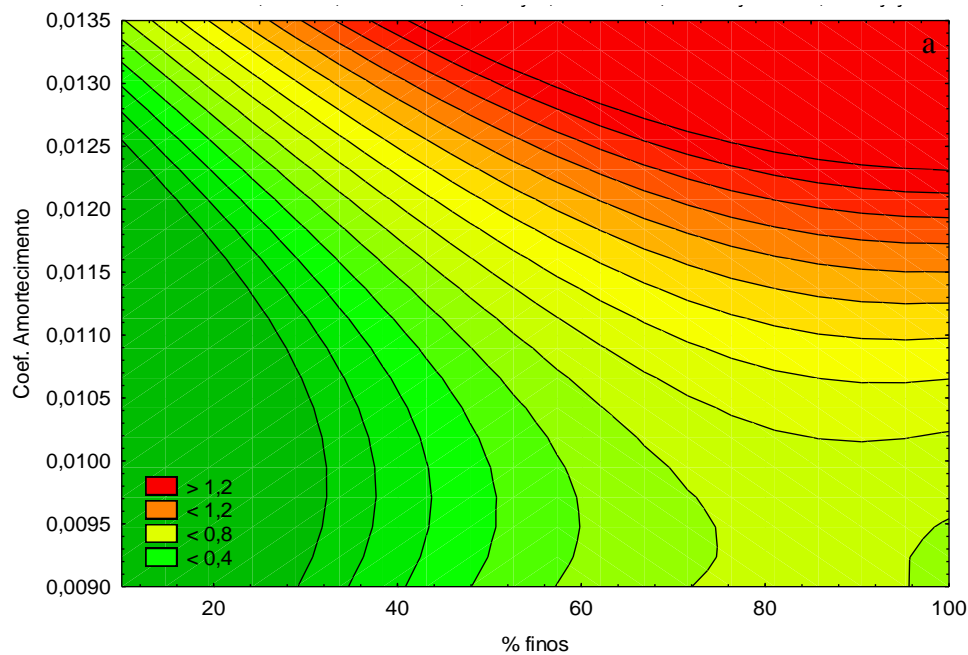
Figura 58: Formato de Onda no Domínio do Tempo e Envoltória da Curva de Amortecimento para Misturas com (a) 10% de Finos, (b) 50% Finos e (c) 100% Finos. Técnica da Transparência. Amostras Úmidas.

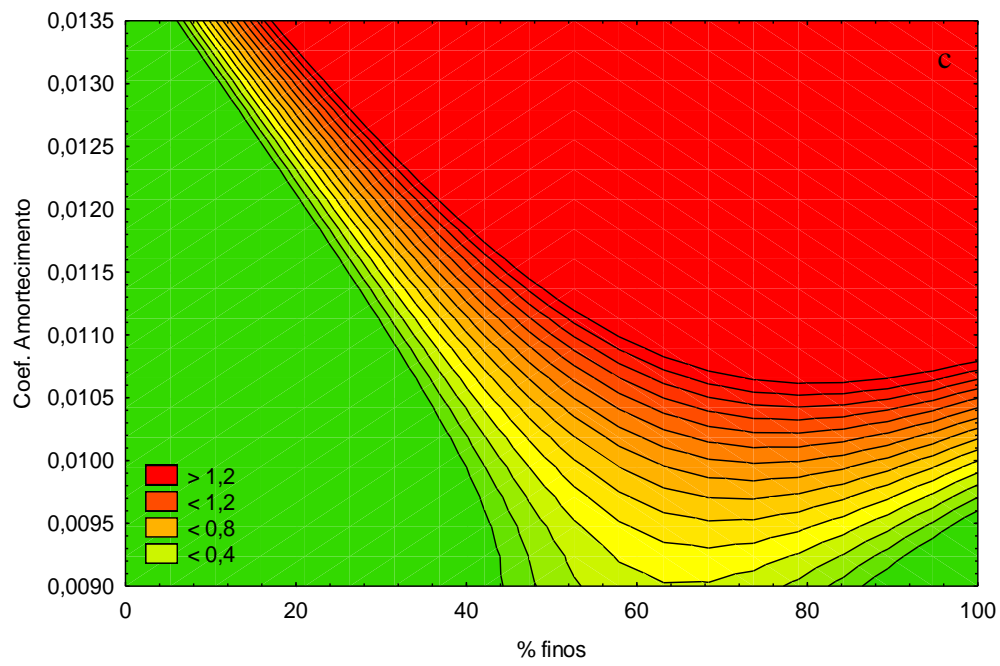
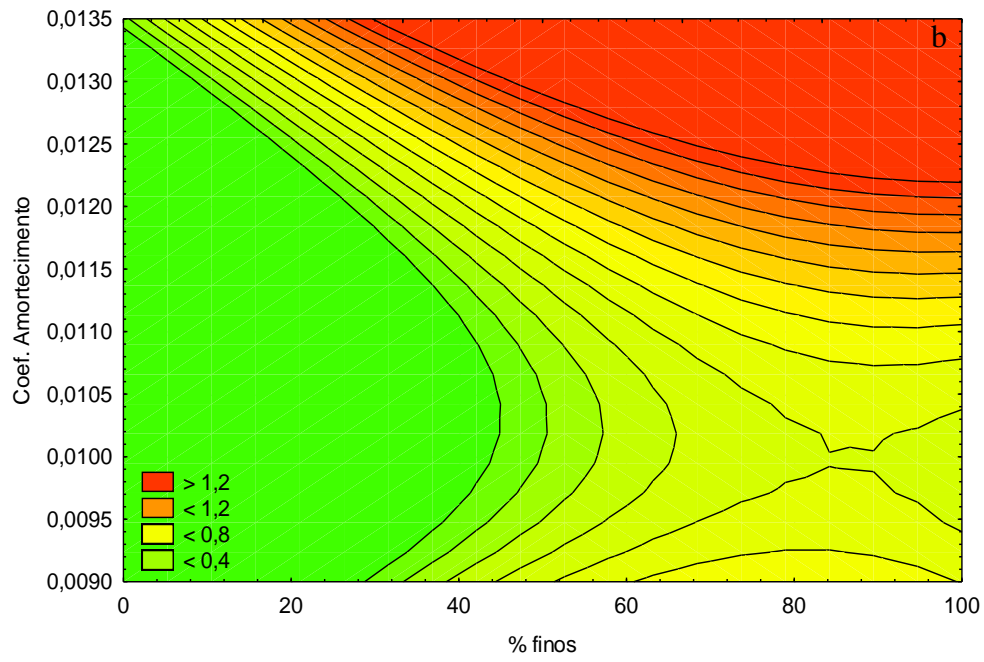


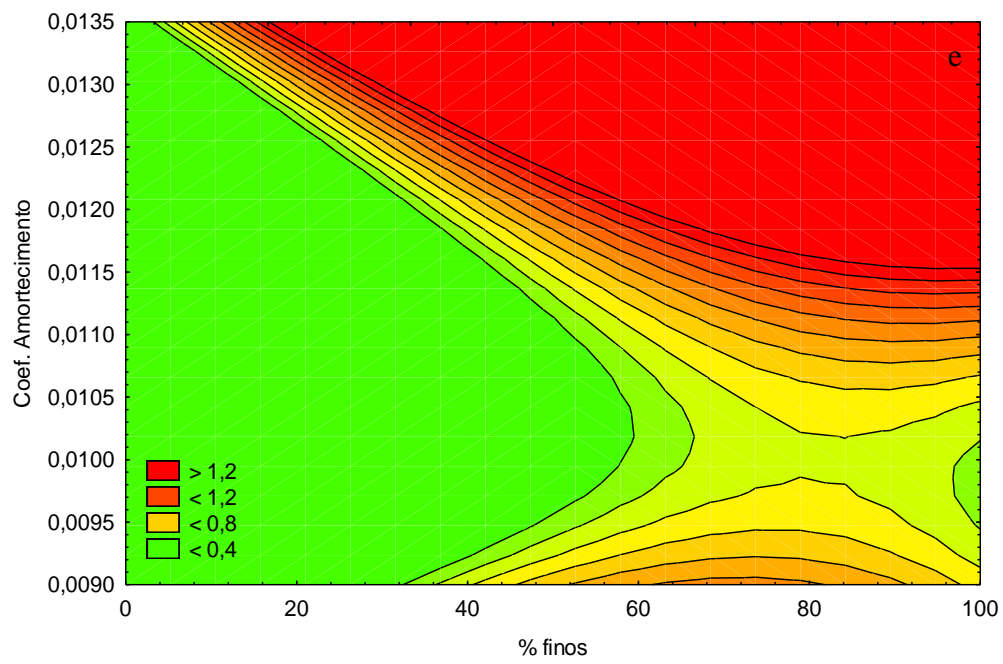
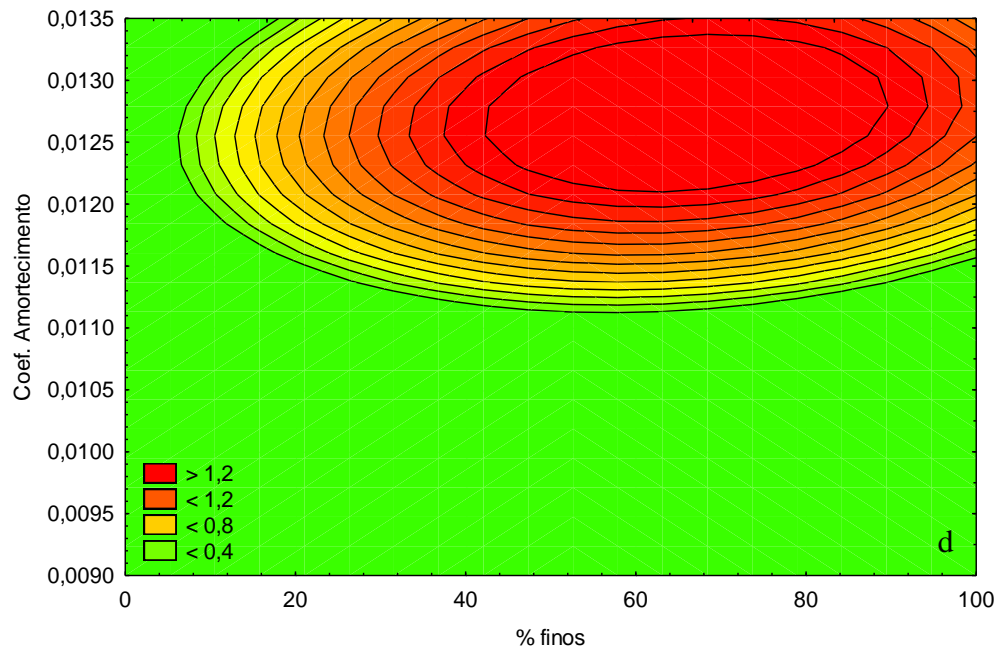


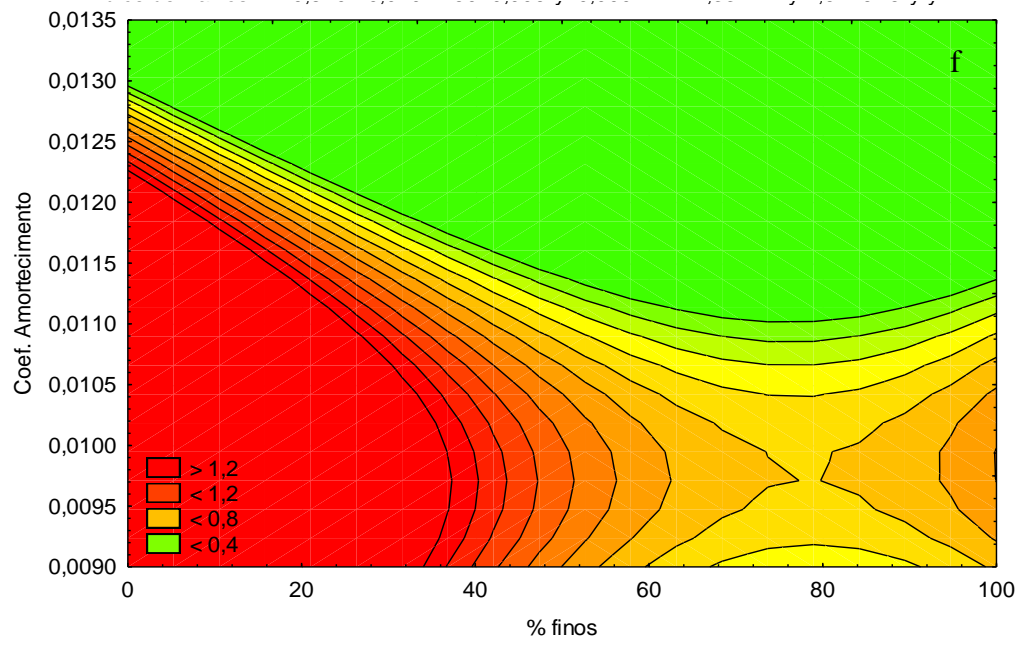
ANEXO D

Figura 62: Correlação Estatística entre a Média do Coeficiente de Amortecimento, a Porcentagem de Finos e o Índice de Vazios, em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação do Índice de Vazios para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal; (e) Energia Intermediária; e, (f) Modificada. Medição após Amostras Secas.



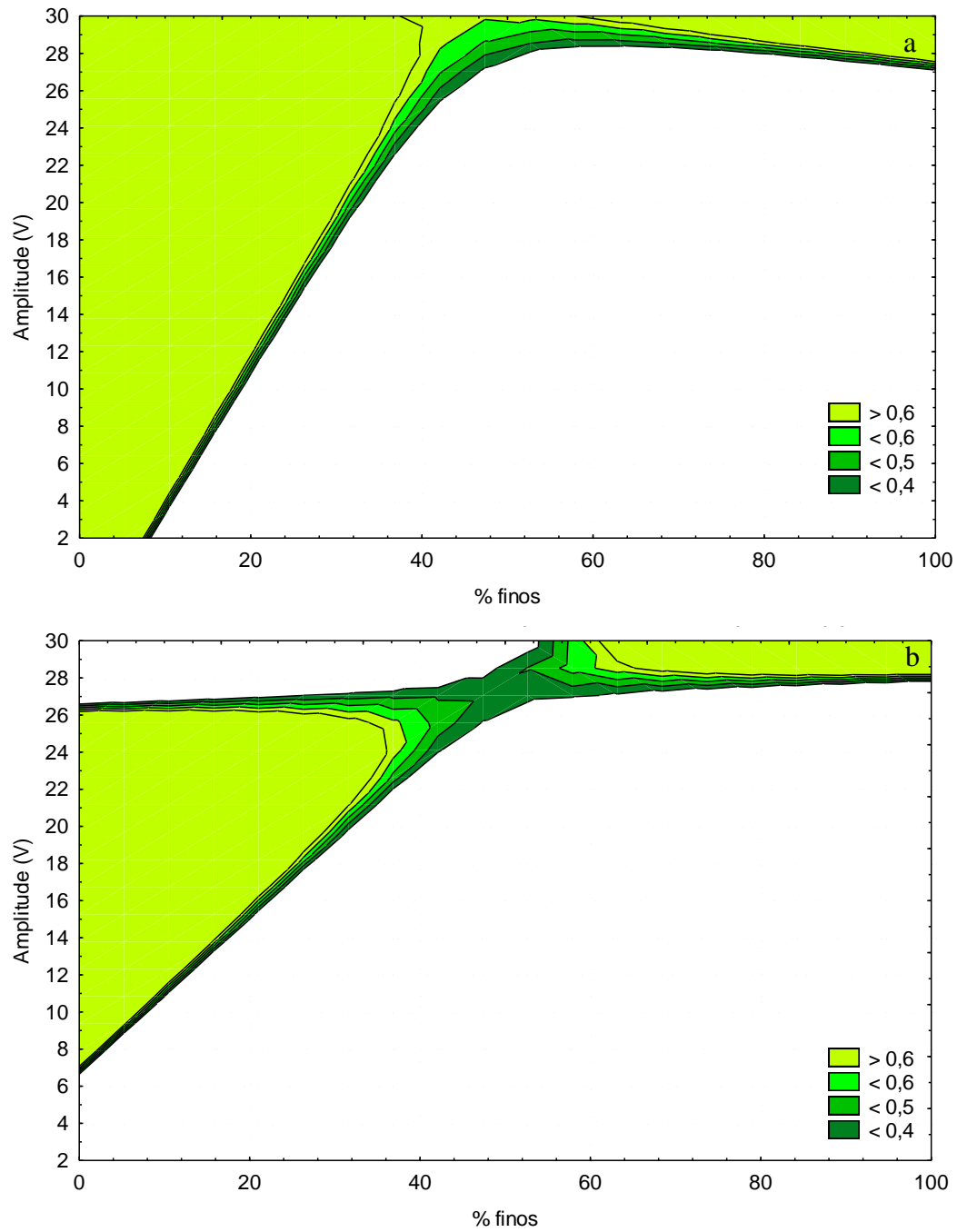


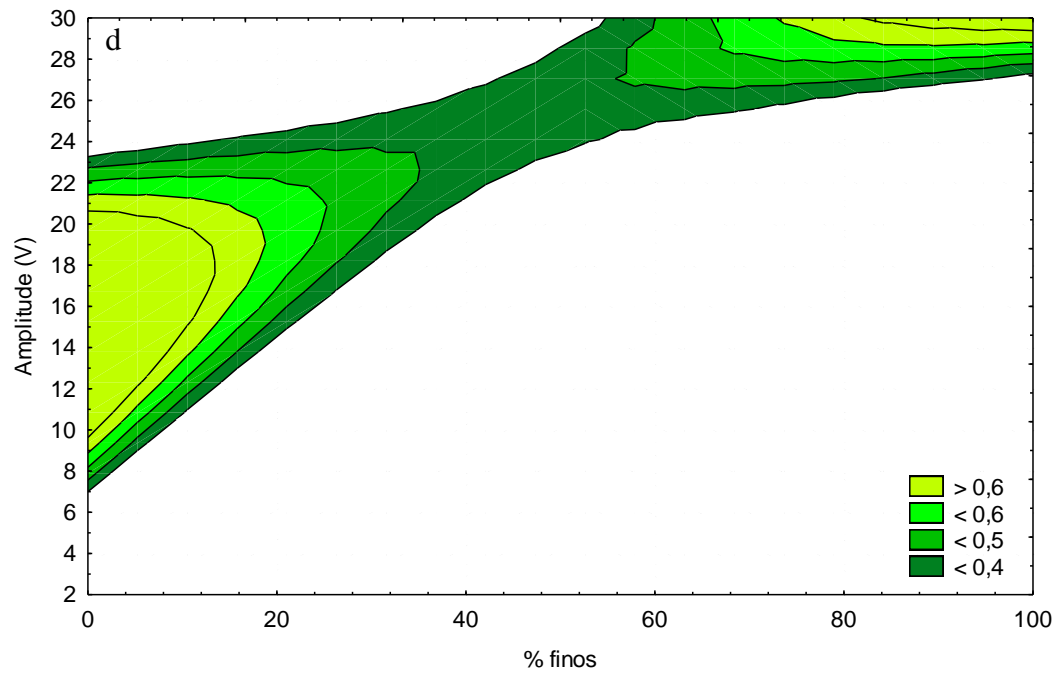
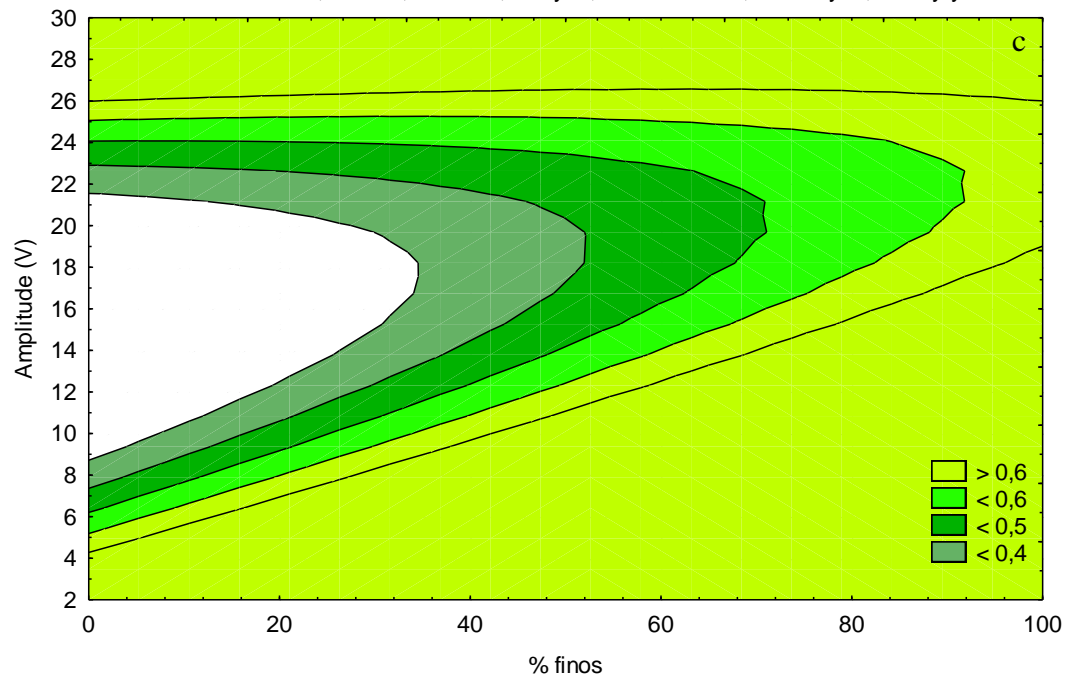


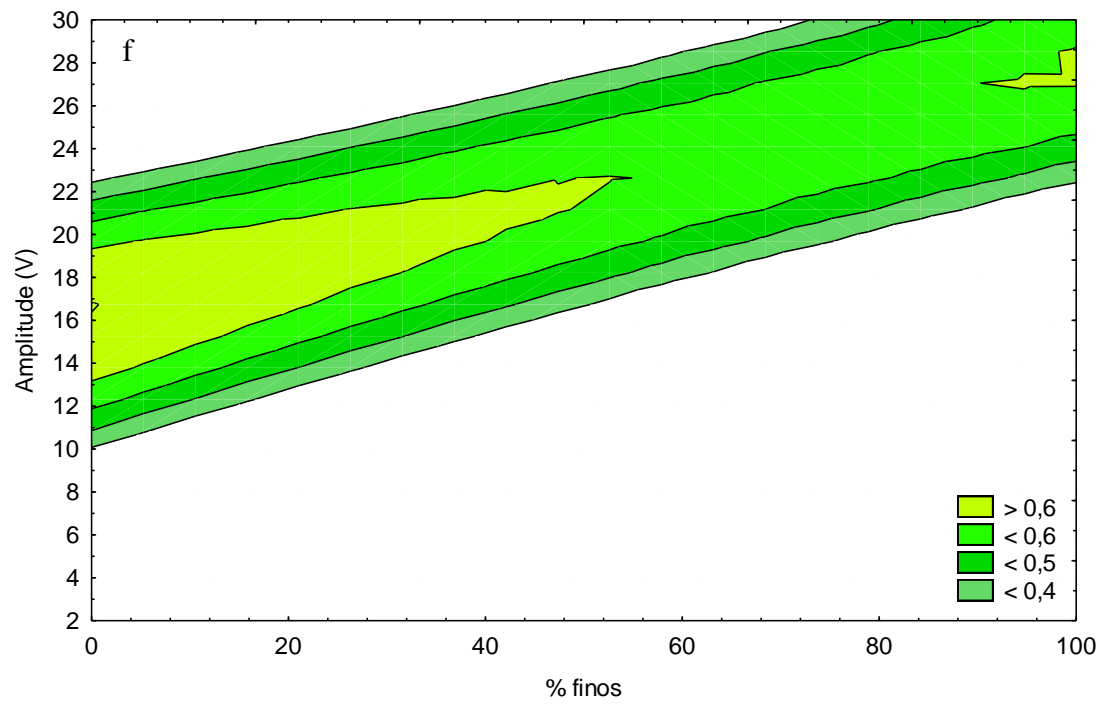
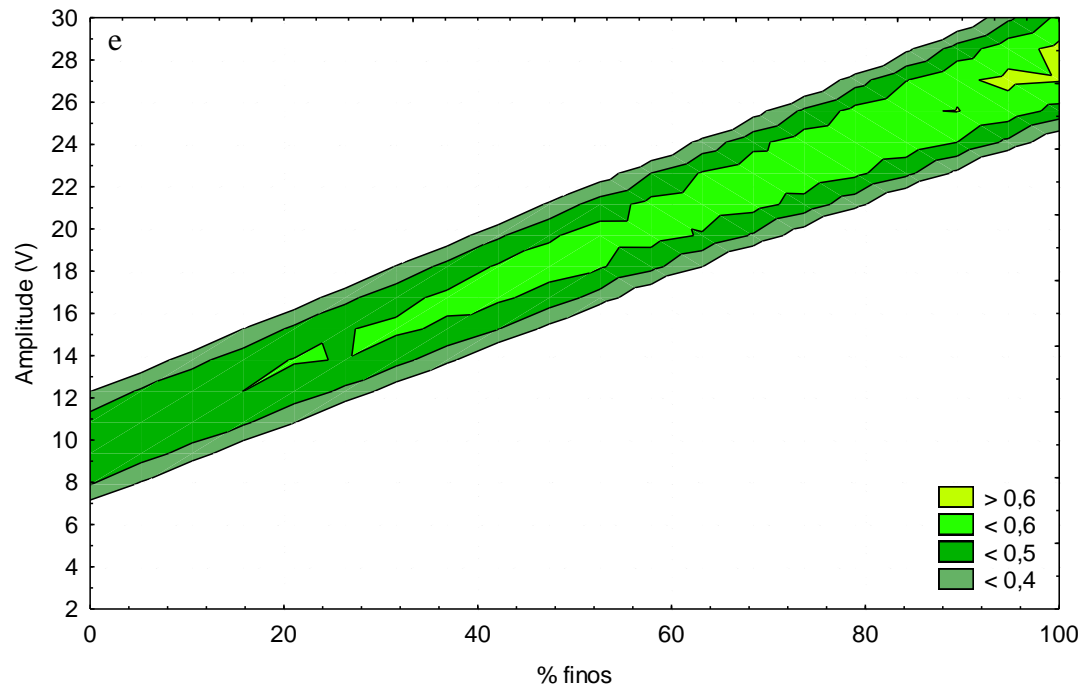


ANEXO E

Figura 64: Correlação entre Índice de Vazios, Média da Amplitude Máxima e Porcentagem de Finos em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação do Índice de Vazios, para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 Dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal, (e) Energia Intermediária e (f) Modificada. Medição após Amostras Secas.







ANEXO F

Figura 67: Correlação entre Índice de Vazios, Velocidade do Pulso Ultrassônico e Porcentagem de Finos, em Função da Variação da Energia de Compactação. Em (a) Variação do Índice de Vazios para Solos Compactados com Energia Normal; (b) Energia Intermediária; e, (c) Modificada. Medições Ultrassônicas, após 3 Dias da Compactação. (d) Variação do Índice de Vazios para as Amostras Compactadas com Energia Normal, (e) Energia Intermediária e (f) Modificada. Medição após Amostras Secas.

