

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE BELAS ARTES

Maria Virgínia Simão Peixoto

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE MECÂNICA EM PAREDES DE TAIPA DE PILÃO
Utilizando a Técnica do Ultrassom

Belo Horizonte

2017

Maria Virgínia Simão Peixoto

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE MECÂNICA EM PAREDES DE TAIPA DE PILÃO
Utilizando a Técnica do Ultrassom

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Artes da Escola de Belas Artes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Artes.

Área de concentração: Arte e Tecnologia da Imagem

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Cruz Souza

Belo Horizonte
Escola de Belas Artes da UFMG
2017

Ficha catalográfica
(Biblioteca da Escola de Belas Artes da UFMG)

Peixoto, Maria Virgínia Simão, 1976-

Avaliação da integridade mecânica em paredes de taipa de pilão utilizando a técnica do ultrassom [manuscrito] / Maria Virgínia Simão Peixoto. – 2017.

220 f. : il.

Orientador: Luiz Antônio Cruz Souza.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Belas Artes, 2016.

1. Arquitetura – Conservação e restauração – Teses. 2. Ruína de estruturas – Teses. 3. Edifícios – Trinca – Teses. 4. Mecânica de solo – Teses. 5. Ultra-sonografia – Teses. 6. Arte e tecnologia – Teses. 7. Arquitetura colonial – Brasil – Teses. 8. Arte – Conservação e restauração – Teses. I. Souza, Luiz Antônio Cruz, 1962- II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Belas Artes. III. Título.

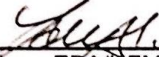
CDD 720.288

Assinatura da Banca Examinadora na Defesa de tese da aluna MARIA VIRGINIA SIMÃO PEIXOTO Número de Registro 2012732709.

Título: "Avaliação da Integridade Mecânica em Paredes de Taipa de Pilão"



Prof. Dr. Luiz Antonio Cruz Souza – Orientador - EBA/UFMG

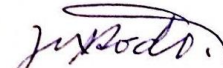


Profa. Dra. Yacy-Ara Froner Gonçalves - Titular – EBA/UFMG



Prof. Dr. Marco Antonio Penido de Rezende - Titular – EA/UFMG

Profa. Dra. Judy Norka Rodo de Mantilla- Titular – FUMEC



Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco - Titular – EA/UFMG



Belo Horizonte, 27 de outubro de 2016

Dedico este trabalho à memória de meu pai e à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à Nossa Senhora, minha mãe protetora, todas as bênçãos recebidas ao longo dessa caminhada.

Aos meus amados pais, José Carlos da Silva Peixoto (*in memoriam*), e Lídia Simão Peixoto, que sempre me incentivaram ao longo da vida, nas minhas escolhas, entre elas, em minha profissão. Pai, agradeço a sua presença constante ao longo desta pesquisa, companheiro das primeiras viagens em busca das construções em taipa de pilão em Minas Gerais. Com seu olhar apurado de construtor e atenção carinhosa de pai, contribuiu e enriqueceu esta pesquisa com importantes observações sobre as edificações em taipa de pilão visitadas ainda em sua companhia. Mesmo depois de sua partida, sua presença forte e amável é constantemente sentida. Mãe, agradeço por todo amor e apoio incondicional ao longo desta pesquisa. Seus cuidados e carinho foram essenciais para tornar esta caminhada mais suave. Seu apoio, na reta final desta pesquisa, foi essencial para eu conseguir completar mais este desafio profissional.

À minha querida Tetê, Sra. Tereza Aparecida Campos, agradeço todos os cuidados ao longo da minha vida.

À UFMG e ao Programa de Pós-graduação em Artes da Escola de Belas Artes, por esta oportunidade de estudo.

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais, pelo financiamento do projeto de pesquisa, no qual esse trabalho se insere.

Ao professor Luiz Souza, orientador desta pesquisa, agradeço toda a confiança e as orientações, essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Marco Antônio Penido de Rezende, que foi meu orientador na especialização e no mestrado e coordenador do projeto de pesquisa, onde este trabalho se insere. Agradeço toda a confiança depositada em mim e todas as oportunidades de trabalho oferecidas e que foram essenciais para meu crescimento na carreira acadêmica. Agradeço também a amizade e a força nos momentos difíceis desta caminhada. Seu apoio foi muito importante para o desenvolvimento desta pesquisa.

À professora Dra. Judy Norka Rodo de Mantilla, pela presença na bancas de qualificação e final e pelas importantes contribuições dadas a este trabalho durante a fase de campo – execução da miniparede.

Ao professor Dr. Abdias Magalhães Gomes, agradeço pelas orientações para os ensaios da fase experimental e pela disponibilização do laboratório para a realização dos ensaios necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Dr. Willi de Barros Gonçalves, presente na banca de qualificação e aos professores Dra. Yacy-Ara Froner Gonçalves e Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco presentes na banca final, agradeço todas as contribuições oferecidas a esse trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Artes e aos funcionários da Escola de Belas Artes da UFMG.

À equipe da biblioteca do IEPHA (Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico) e à equipe da biblioteca do IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional), pela ajuda e disponibilidade para separar o material de pesquisa sobre as edificações erguidas em taipa de pilão no estado de Minas Gerais.

Ao amigo e professor do Unibh, Alexandre Costa Washington, Mestre em matemática, agradeço a importante contribuição para este trabalho, por meio da elaboração das fórmulas empregadas na manipulação do solo para a construção da miniparede em taipa de pilão. Como você mesmo costuma dizer: “a matemática não mente!” Sem ela não teria conseguido construir o protótipo dentro dos parâmetros necessários para esta pesquisa.

Ao Sr. Olandino Raimundo do Nascimento, amigo da família, profissional da carpintaria, responsável pela execução da forma – taipal – usada para a construção da miniparede, agradeço todo o apoio ao longo do experimental desta pesquisa, e ao Carlos Junior da Silva Carvalho, responsável pela compactação da miniparede.

À querida tia Zélia Garcia, aos primos Alexandre Saber Gabriel e Soraya Saber Gabriel Figueiredo, e ao amigo da família, Sr. Ted Emile Cartianu, agradeço a preciosa ajuda em um momento difícil desta pesquisa. Obrigada pela companhia nas viagens em busca das construções em taipa de pilão, em Minas Gerais.

Ao Benjamim José da Silva, engenheiro geotécnico, e sua equipe de laboratório, obrigada pelo solo cedido para a execução do miniparede e pela execução dos ensaios geotécnicos – Engesolo LTDA e pela execução dos ensaios de resistência à compressão – Benjesolo LTDA.

Ao Marco Aurélio, técnico de laboratório de concreto, pelo auxílio durante a execução dos ensaios de campo e laboratoriais envolvidos nesta pesquisa.

A Dayse Mendes, pela revisão do português e normatização deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para mais esta conquista.

RESUMO

Esta tese apresenta o estudo realizado sobre o desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios de ultrassom em protótipos de paredes em taipa de pilão. A primeira e a segunda fase desta pesquisa foram realizadas com êxito, comprovando a existência de uma forte correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica em materiais terrosos. Buscando alcançar o objetivo proposto, esta pesquisa foi desenvolvida em cinco etapas. Na primeira etapa, foi realizado um estudo sobre a tecnologia construtiva da taipa de pilão. Na segunda, visitas técnicas às edificações mapeadas, erguidas com o emprego dessa tecnologia construtiva, no estado de Minas Gerais. Na terceira, a escolha do solo a ser trabalhado, levando-se em consideração o tipo de solo usado na segunda fase desse projeto de pesquisa. Na quarta, foram feitos ensaios geotécnicos, buscando compreender o comportamento do solo escolhido. Na quinta etapa, foram conduzidos os ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples. Para esta pesquisa, foi construída uma miniparede, em taipa de pilão, com espessura similar às paredes existentes erguidas em edificações do período colonial brasileiro, onde foram realizados os ensaios de ultrassom. Nesses mesmos pontos foram retirados corpos de prova para ensaios de resistência à compressão simples. Posteriormente, os resultados gerados, de ambos os ensaios, foram analisados, buscando-se averiguar a existência da correlação entre os pares. Embora os resultados tenham demonstrado baixa correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples, quando realizados em protótipos de dimensões similares às das paredes em taipa de pilão existentes, seria prematuro afirmar a inadequabilidade do emprego do ultrassom como método não destrutivo para verificação de presença de trincas em paredes erguidas com emprego dessa técnica construtiva. Analisando os dados obtidos, foi verificado que o ultrassom, com o auxílio de amplificador, poderá gerar resultados válidos. Portanto, deseja-se que este trabalho contribua para o desenvolvimento dos estudos sobre o emprego de ensaios não destrutivos na avaliação de edificações construídas com material terroso, entre elas, a taipa de pilão.

Palavras-chave: Ultrassom. Ensaios não destrutivos. Taipa de pilão. Velocidade ultrassônica.

ABSTRACT

This thesis presents a study on the development of a methodology for ultrasonic tests applying to prototypes walls in rammed earth. The first and second phases were successfully realized, proving the existence of a correlation between mechanical strength and ultrasonic velocity in earth materials. Searching to achieve the objective, the research was conducted in five stages. In the first stage, was elaborated a study about rammed earth construction technology. In the second, technical visits were realized on map buildings erected using this building technology, in Minas Gerais state. In a third the soil to be worked was chosen, taking into consideration the type of soil used in the second stage of the research project. In the fourth stage, geotechnical tests were conducted in order to understand the behavior of the chosen soil. On the fifth phase, ultrasonic tests and compressive strength test were conducted. At this research stage, a small wall was constructed, presenting similar thickness to the existing walls built during the Brazilian colonial period, where ultrasound tests were performed. After, at the tested points, specimens were removed and were submitted to compressive strength tests. The results generated from both tests were analyzed, seeking to determine the existence of the correlation between the pairs. Although results showed a low correlation between ultrasonic velocity and simple compression strength, when performed in prototypes with similar dimensions to the existing rammed earth walls, it would be premature to affirm the use of ultrasound inadequacy as a nondestructive method of verifying the presence of cracks in existing walls built in this constructive technique. Analyzing the obtained data, it was verified that the ultrasound, with the aid of an amplifier, is able to generate valid results. Therefore, it is hoped that this work may be a contribution to development studies on the use of non-destructive testing in the evaluation of structure walls built with earth material, among them, the rammed earth.

Key-words: Ultrasound. Non-destructive tests. Rammed earth. Ultrasonic velocity

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Diagrama de técnicas construtivas com terra	26
Figura 02: Casa do Butantã, S.P.	27
Figura 03: Matriz de Nossa Senhora da Conceição, Catas Altas	28
Figura 04: Formas de madeira na execução de paredes em taipa de pilão	29
Figura 05: Mosteiro da Luz, S.P.	33
Figura 06: Mosteiro da Luz, S.P.	33
Figura 07: Pátio interno do Mosteiro da Luz, S.P.	34
Figura 08: Sítio da Ressaca, S.P.	36
Figura 09: Tipos de transmissão no ensaio ultrassônico	55
Figura 10: Ensaios de Hoffmann e Gonçalves (2010) - Medições em três direções	63
Figura 11: Taipal	66
Figuras 12 e 13: Retirada da forma	67
Figura 14: Ensaio de ultrassom no painel 5	67
Figura 15: Processo de mistura do solo coletado e cedido pela Engesolo	74
Figura 16: Local de construção das miniparedes	79
Figura 17: Taipal e pilão empregados na construção da miniparede	79
Figura 18: Modelo do protótipo - miniparede	81
Figura 19: Modelo da malha do protótipo - miniparede	84
Figura 20: Casa de taipa de pilão em Baependi – arruinada, restando apenas registros fotográficos.	87
Figura 21: Igreja de Nossa Senhora das Mercês e Perdões de Ouro Preto	88
Figura 22: Casa do Bandeirante Fernão Dias Paes Leme	89
Figura 23: Igreja Matriz de Sant`Ana dos Montes	89
Figura 24: Igreja de Nossa Senhora das Mercês	90
Figura 25: Capela de Nossa Senhora das Dores	91
Figura 26: Capela de Nossa Senhora das Dores.	91
Figura 27: Catedral de Santo Antônio	92
Figura 28: Catedral de Santo Antônio	92
Figura 29: Matriz de Nossa Senhora da Conceição, Catas Altas	93
Figura 30: Matriz de Nossa Senhora da Conceição, Catas Altas	93
Figura 31: Igreja do Bom Jesus	94

Figura 32: Igreja do Bom Jesus	94
Figura 33: Igreja do Rosário	95
Figura 34: Igreja do Rosário	95
Figura 35: Igreja Matriz de Santa Cruz	96
Figura 36: Igreja Matriz de Santa Cruz	96
Figura 37: Santuário de Nossa Senhora da Conceição da Barra de Minas	97
Figura 38: Santuário de Nossa Senhora da Conceição da Barra de Minas	97
Figura 39: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição	98
Figura 40: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição	98
Figura 41: Matriz de Nossa Senhora da Conceição	99
Figura 42: Matriz de Nossa Senhora da Conceição	99
Figura 43: Igreja Matriz de Santo Antônio	100
Figura 44: Igreja Matriz de Santo Antônio	100
Figura 45: Catedral de Nossa Senhora da Assunção - Sé de Mariana	101
Figura 46: Catedral de Nossa Senhora da Assunção - Sé de Mariana	101
Figura 47: Matriz Senhor Bom Jesus do Monte	102
Figura 48: Matriz Senhor Bom Jesus do Monte	102
Figura 49: Matriz Nossa Senhora de Nazaré	103
Figura 50: Matriz Nossa Senhora de Nazaré	103
Figura 51: Capela de São Gonçalo	104
Figura 52: Capela de São Gonçalo	104
Figura 53: Igreja de Nossa Senhora do Amparo	105
Figura 54: Igreja de Nossa Senhora do Amparo	105
Figura 55: Igreja Matriz de São Francisco de Assis	106
Figura 56: Igreja Matriz de São Francisco de Assis	106
Figura 57: Igreja de São José	107
Figura 58: Igreja de São José	107
Figura 59: Sobrado próximo à Igreja de São José	108
Figura 60: Sobrado próximo à Igreja de São José	108
Figura 61: Monumento do Intendente Câmara	109
Figura 62: Monumento do Intendente Câmara	109
Figura 63: Igreja Matriz de Santo Antônio	110
Figura 64: Igreja Matriz de Santo Antônio	110

Figura 65: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar	111
Figura 66: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar	111
Figura 67: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição	112
Figura 68: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição	112
Figura 69: Igreja de Nossa Senhora do Rosário	113
Figura 70: Igreja de Nossa Senhora do Rosário	113
Figura 71: Sede da Fazenda de São Miguel	114
Figura 72: Sede da Fazenda de São Miguel	114
Figura 73: Igreja Nossa Senhora do Rosário	115
Figura 74: Igreja Nossa Senhora do Rosário	115
Figura 75: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar	116
Figura 76: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar	116
Figura 77: Capela de São João Evangelista	117
Figura 78: Capela de São João Evangelista	117
Figura 79: Igreja Matriz de Santo Antônio	118
Figura 80: Igreja Matriz de Santo Antônio	118
Figura 81: Ruínas da Igreja Nossa Senhora de Bom Sucesso	119
Figura 82: Ruínas da Igreja Nossa Senhora de Bom Sucesso	119
Figura 83: Mapa de incidência da taipa de pilão no estado de Minas Gerais	120
Figura 84: Comparativo entre mapas de incidência da taipa de pilão no estado de Minas Gerais e de precipitação anual média de Minas Gerais	121
Figura 85: Curva de distribuição granulométrica – solo coletado	123
Figura 86: Curva de distribuição granulométrica – solo corrigido	124
Figura 87: Gráfico – Curva de compactação do solo	125
Figuras 88 e 89: Taipal utilizado na compactação da miniparede em taipa de pilão	126
Figuras 90 e 91: Detalhe das cunhas do taipal utilizado na compactação da miniparede em taipa de pilão	126
Figuras 92, 93 e 94: Pesagem das cápsulas sem a amostra, com amostra úmida e com amostra seca	127
Figuras 95 e 96: Compactação da miniparede	130
Figuras 97 e 98: Retirada da forma da miniparede	131
Figuras 99 e 100: Retirada da forma da miniparede	131
Figuras 101 e 102: Malha e pontos de medição	132

Figura 103: Calibração dos transdutores de 54kHz	133
Figura 104: Calibração dos transdutores de 82kHz	133
Figura 105: Ensaio de ultrassom com transdutores de 54kHz	134
Figura 106: Ensaio de ultrassom com transdutores de 82kHz	140
Figuras 107 e 108: Tentativa de retirada de amostra com uso da broca-copo	141
Figura 109: Localização das amostras retiradas na miniparede para ensaio à compressão simples	142
Figuras 110 e 111: Retirada de amostra com uso da serra e da britadeira	143
Figura 112: Amostras retiradas para ensaio à compressão simples	143
Figura 113: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica. – Distância entre transdutores de 60 cm	148
Figura 114: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica. – Distância entre transdutores de 30 cm	151
Figura 115: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica. – Distância entre transdutores de 15 cm	153
Figura 116: Localização das amostras retiradas na miniparede para o segundo ensaio à compressão simples	158
Figura 117: Amostras moldadas	159
Figura 118: Calibração do ultrassom	159
Figura 119: Ensaio de ultrassom nos corpos de prova	160
Figuras 120 e 121: Ensaio de resistência à compressão simples	162
Figura 122: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 15 cm	166
Figura 123: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 11 cm	169

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação da qualidade entre resistência e velocidade ultrassônica	59
TABELA 2 – Comparativo entre procedimentos de normas para ensaio de ultrassom	61
TABELA 3 – Aparelho ultrassom	82
TABELA 4 – Resumo da caracterização granulométrica do solo coletado	122
TABELA 5 – Índices físicos do solo coletado	122
TABELA 6 – Resumo da caracterização granulométrica do solo corrigido	123
TABELA 7 – Índices físicos do solo corrigido	124
TABELA 8 – Limites de consistência do solo corrigido	124
TABELA 9 – Resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54kHz	135
TABELA 10 – Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54kHz. – Distância entre transdutores de 60 cm	137
TABELA 11 – Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54kHz. – Distância entre transdutores de 30 cm	138
TABELA 12 – Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54kHz. – Distância entre transdutores de 15 cm	138
TABELA 13 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples	144
TABELA 14 – Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de resistência à compressão simples	146
TABELA 15 – Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 60 cm	147
TABELA 16 – Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 60 cm	148
TABELA 17 – Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 30 cm	150
TABELA 18 – Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 30 cm	150
TABELA 19 – Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 15 cm	152
TABELA 20 – Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 15 cm	152
TABELA 21 – Resultados do ensaio de ultrassom – Trinca 1 – Lateral direita	156

TABELA 22 – Resultados do ensaio de ultrassom – Trinca 2 – Lateral esquerda	156
TABELA 23 – Resultados do ensaio de ultrassom com transdutor de 54 kHz	161
TABELA 24 – Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz. – Distância entre transdutores de 11 cm	161
TABELA 25 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples	163
TABELA 26 – Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de resistência à compressão simples	163
TABELA 27 – Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 15 cm	165
TABELA 28 – Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 15 cm	166
TABELA 29 – Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 11 cm	168
TABELA 30 – Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 11 cm	168

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
Objetivo	21
Objetivos específicos	22
Escopo do trabalho	22
CAPÍTULO 1 – REVISÃO DA LITERATURA	24
1.1 Arquitetura de terra	24
1.2 A tecnologia construtiva da Taipa de Pilão	26
1.3 O acervo arquitetônico em taipa de pilão do Brasil colonial	32
1.3.1 O acervo na cidade de São Paulo	32
1.4 O acervo arquitetônico em taipa de pilão como testemunho e objeto de memória e preservação	35
1.5 Novas formas de pensar a preservação do acervo arquitetônico	37
1.6 O ensino e o emprego da tecnologia construtiva de terra	38
1.7 A terra como matéria-prima para construção de paredes em taipa de pilão	40
1.7.1 O solo	40
1.7.1.1 Composição granulométrica, plasticidade e retração	41
1.7.1.2 Umidade e grau de compactação	42
1.7.2 O solo e sua influência nas paredes de taipa de pilão	43
1.7.3 Estudos sobre a execução de amostras e protótipos de paredes em taipa de pilão e ensaios de resistência	46
1.7.4 Estudos sobre a influência da umidade nos protótipos de paredes em taipa de pilão	50
1.8 A Tecnologia do ultrassom	54
1.9 Características da onda ultrassônica	55
1.10 A Tecnologia do ultrassom na determinação de propriedades do solo	56
1.11 A Tecnologia do ultrassom no estudo de patologias em edificações	58
1.12 A normalização existente para ensaios via emprego do ultrassom	60
1.13 Verificação da integridade mecânica de paredes de taipa de pilão utilizando a técnica do ultrassom	61
1.14 Considerações	71
CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA	72

2.1 Catalogação de construções em taipa de pilão em Minas Gerais	72
2.1.1 Pesquisa realizada no IEPHA	72
2.1.2 Pesquisa realizada no IPHAN	73
2.1.3 Pesquisa de campo	73
2.2 Procedimentos para a execução da miniparede em taipa de pilão	74
2.2.1 Processo de seleção do solo	74
2.2.1.1 Coleta e armazenamento do solo	74
2.2.1.2 Correção granulométrica do solo	75
2.2.1.3 Ensaios de caracterização	76
2.2.1.3.1 Preparação da amostragem – NBR 6457/1986	76
2.2.1.3.2 Análise granulométrica – NBR 7181/1984	76
2.2.1.3.3 Determinação de massa específica dos grãos – NBR 6508/1984	77
2.2.1.3.4 Limite de liquidez – NBR 6459/1984	77
2.2.1.3.5 Limite de plasticidade – NBR 7180/1984	77
2.2.1.3.6 Ensaio de compactação proctor normal – NBR 7182/1986	77
2.2.2 Aditivos	78
2.2.3 Local de construção	78
2.2.4 Execução do taipal e do pilão	79
2.2.5 Compactação da miniparede	80
2.2.6 Remoção do taipal	80
2.2.7 Amostragem	80
2.3 Ensaios de ultrassom	81
2.3.1 Definição do equipamento ultrassom	82
2.3.2 Escolha dos transdutores	82
2.3.3 Posicionamento dos transdutores	83
2.3.4 Calibração do equipamento ultrassom	83
2.3.5 Execução de ensaio de ultrassom	83
2.3.6 Definição dos pontos de ensaio	84
2.4 Ensaios de resistência à compressão simples	85
2.4.1 Retirada de corpos de prova da miniparede	85
2.4.2 Definição do equipamento para o ensaio de compressão simples	85
2.4.3 Execução do ensaio de compressão simples	85
2.5 Verificação da qualidade do coeficiente de correlação	86

2.6 Desenvolvimento de um protocolo de análise da qualidade global da parede de taipa de pilão	86
CAPÍTULO 3 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
3.1 O acervo existente em taipa de pilão no estado de Minas Gerais e patologias recorrentes nessas paredes	87
3.2 Execução da miniparede em taipa de pilão	122
3.2.1 Caracterização geotécnica do solo coletado	122
3.2.2 Caracterização geotécnica do solo corrigido	123
3.2.3 Compactação da miniparede em taipa de pilão	125
3.2.3.1 Controle do teor de umidade	126
3.2.3.2 Compactação das camadas da miniparede	128
3.2.4 Retirada da forma da miniparede em taipa de pilão	130
3.2.5 Malha e pontos de medição	131
3.3 Ensaio de ultrassom	132
3.3.1 Métodos de transmissão	132
3.3.2 Preparação para os ensaios	133
3.3.3 Transdutores utilizados	134
3.3.3.1 Resultados dos ensaios com transdutor de 54 kHz	134
3.3.3.2 Resultados dos ensaios com transdutor de 82 kHz	140
3.3.3.3 Resultados dos ensaios com transdutor de 150 kHz, 200 kHz e 500 kHz	140
3.4 Ensaio de resistência à compressão simples	141
3.4.1 Retirada das amostras	141
3.4.2 Definição do equipamento para o ensaio de compressão simples	143
3.4.3 Ensaio de resistência à compressão simples	143
3.5 Correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica	146
3.6 Ensaio de ultrassom em trincas	155
3.7 Novo ensaio de resistência à compressão simples para verificação de resultados	157
3.7.1 Retirada de amostras	157
3.7.2 Moldagem dos corpos de prova	158
3.7.3 Ensaio de ultrassom nos corpos de prova moldados	159
3.7.3.1 Calibração do aparelho ultrassom	159
3.7.3.2 Resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz	160

3.7.4	Ensaio de resistência à compressão simples	162
3.8	Correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica	164
3.8.1	Correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica – miniparede	164
3.8.2	Correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica – corpos de prova	167
	CONCLUSÃO	171
	REFERÊNCIAS	174
	FONTE DAS IMAGENS DE INTERNET	186
	APÊNDICES	187
	APÊNDICE A – Memória de cálculo do teor de umidade das camadas de compactação da miniparede em taipa de pilão	188
	APÊNDICE B – Resultados dos ensaios de ultrassom	201
	APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de resistência à compressão	207
	APÊNDICE D – Resultados dos ensaios de ultrassom - Trincas	209
	APÊNDICE E – Resultados dos ensaios de ultrassom – corpos de prova	211
	ANEXOS	212
	ANEXO A – Ensaio de caracterização granulométrica – Solo inicial	213
	ANEXO B – Curva de distribuição granulométrica – Solo inicial	214
	ANEXO C – Equação de correção do solo	215
	ANEXO D – Ensaio de caracterização granulométrica – Solo corrigido	216
	ANEXO E – Curva de distribuição granulométrica – Solo corrigido	217
	ANEXO F – Equação de correção do teor de umidade do solo a ser compactado	218
	ANEXO G – Equação de correção do teor de umidade do solo a ser compactado	219

INTRODUÇÃO

A arquitetura nasce da necessidade do homem de se proteger do ambiente natural e de encontrar algum lugar onde possa desenvolver as suas atividades cotidianas: morar, trabalhar, circular e lazer. Desde então, vem se desenvolvendo aliando fatores como conhecimento dos materiais construtivos disponíveis, do meio ambiente e da técnica de construção. De acordo com Rogers e Gumuchdjan (2001), "A arquitetura extrai a beleza da aplicação do pensamento racional. É o jogo entre conhecimento e intuição, lógica e espírito, mensurável e imensurável." Pode-se dizer que é a arte aliada à tecnologia, uma arte à qual estamos expostos diariamente.

Desde o início, os principais materiais utilizados são a terra, as pedras e as espécies vegetais. As técnicas construtivas foram elaboradas, adaptadas e aperfeiçoadas a partir da disponibilidade de material, o seu local de execução e a época em que são empregadas. Desse ofício surgem edificações que não apenas desempenham o papel de abrigo humano, mas também, se configuram como verdadeiras obras de artes a serem admiradas e usufruídas por toda a sociedade.

O sistema construtivo de terra é reconhecido pelo seu caráter universal, sendo empregado, no mínimo, há mais de 5.000 mil anos, por diversas culturas existentes em todas as partes do mundo. O Brasil conta com um rico acervo em arquitetura de terra. No período da colonização brasileira, esse material foi amplamente utilizado na construção das edificações em praticamente todas as nossas vilas e povoados. As principais técnicas construtivas de terra utilizadas foram trazidas, principalmente, da Europa, pelos colonizadores, entre elas o adobe, o pau a pique e a taipa de pilão.

A herança da arquitetura de terra, no Brasil, é muito rica e conta com um belo acervo. Minas Gerais possui um significativo patrimônio erguido com o emprego dessa tecnologia construtiva. Trata-se de edificações que, apesar de serem passíveis de sofrer com o processo de degradação, apresentam significativa durabilidade.

Atualmente, ocorre o aumento da consciência sobre a necessidade da preservação de nossos bens históricos e culturais, entre eles as construções históricas erguidas no período colonial, em terra. Esses tipos de edificações exigem para sua conservação um conhecimento específico e distinto das práticas usuais de construção de terra. (REZENDE; RODRIGUES, 2007).

Ao longo do tempo, as atividades de conservação e restauração evoluíram não só em suas dimensões teóricas, mas também em suas dimensões práticas, abordando as questões

técnicas (tecnologia construtiva) e de ofícios. As restaurações possibilitam o estudo dos próprios edifícios. Configuram-se como momentos de pesquisa sobre as edificações em suas dimensões histórica, técnica, estética e artística.

No desenvolver da atividade restauradora, torna-se necessário conhecer o estado físico em que se encontra a construção. Na fase de diagnóstico, os ensaios realizados para tal, por meio da avaliação das características físicas e mecânicas do material empregado, em geral, são destrutivos, envolvendo a retirada de corpos de prova. Como essa prática não é a ideal, verifica-se a necessidade de desenvolver novos métodos de diagnóstico do estado das construções buscando-se reduzir ao máximo os danos causados à edificação, durante essa atividade, através do emprego de ensaios não destrutivos (REZENDE; RODRIGUES, 2007).

A técnica do ultrassom é uma forma de se alcançar esse objetivo. Trata-se de um método não destrutivo de diagnóstico de patologias já empregado em estruturas de materiais como o concreto e aço. A pesquisa busca transportar a metodologia de ensaios não destrutivos para a arquitetura de terra, verificando a viabilidade de sua utilização na determinação das condições físicas e mecânicas do material componente dessas paredes, sem lhes causar prejuízos.

Objetivo

Neste trabalho, o objetivo é verificar a possibilidade de correlação entre a velocidade das ondas ultrassônicas e a resistência de uma parede de taipa de pilão e, em caso positivo, elaborar uma metodologia para a realização de testes de ultrassom que permitam inferir a resistência nessas paredes.

As pesquisas realizadas nessa área correlacionam valores de velocidade ultrassônica e tensão de ruptura obtidos a partir de ensaios em corpos de prova de dimensões reduzidas e confeccionados em laboratório. Neste trabalho, os ensaios foram realizados em um protótipo de parede em taipa de pilão, que apresenta dimensões mais aproximadas às paredes existentes no patrimônio arquitetônico edificado com o emprego dessa tecnologia construtiva.

Foi executada uma parede considerada ideal para a técnica da taipa de pilão que possibilite:

- a identificação de faixa de valores de tempo de transmissão de onda e velocidade ultrassônica;
- a retirada de corpos de prova para execução de ensaios de resistência à compressão simples e determinação de valores relacionados à resistência mecânica desse material.

A partir desses valores definidos, buscou-se verificar as possibilidades de utilização do ultrassom na identificação de patologias em paredes de taipa de pilão.

Objetivos específicos

- Catalogação das construções em taipa de pilão existentes no estado de Minas Gerais.
- Determinação da correlação entre as velocidades ultrassônicas e a resistência à compressão em corpos de prova de taipa de pilão.
- Determinação de patologias em paredes de taipa de pilão via emprego do ultrassom

Escopo do trabalho

Esta tese está dividida em 5 capítulos.

Introdução – Nesse capítulo, serão expostas a importância e a necessidade da preservação do patrimônio edificado em terra como bem cultural de valor nacional, assim como se fará menção, em linhas gerais, à importância da introdução do uso de tecnologia de ensaios não destrutivos na verificação da integridade das paredes. Insere-se, também, o escopo do trabalho.

Capítulo 1 – Revisão da literatura – Realizar-se-á a revisão da literatura sobre os assuntos a serem tratados nesta pesquisa, sendo eles: a técnica construtiva da taipa de pilão, o patrimônio existente edificado a partir do emprego dessa técnica e a importância desse acervo, a geotecnia dos solos, o emprego do ultrassom na avaliação da integridade das paredes, a normatização referente aos ensaios com a utilização do ultrassom, estudos realizados por outros pesquisadores sobre ensaios de ultrassom em materiais terrosos e a pesquisa, nessa temática, realizada em etapas anteriores.

Capítulo 2 – Metodologia – Será descrito todo o percurso realizado durante o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa, com o objetivo de elaborar uma metodologia para ensaios de ultrassom em paredes construídas em taipa de pilão.

Capítulo 3 – Apresentação e discussão dos resultados – Nesta etapa serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos seguintes procedimentos: caracterização dos solos, execução das paredes de taipa de pilão, ensaios ultrassônicos e a correlação entre velocidade ultrassônica e resistência mecânica. A partir desses resultados poderá ser verificada a

possibilidade do emprego desse tipo de ensaio, que já é utilizado em estruturas em concreto, também em paredes de taipa de pilão.

Conclusão – Serão expostas considerações com relação aos resultados obtidos pela pesquisa.

CAPÍTULO 1 – REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Arquitetura de terra

O sistema construtivo em terra é empregado na construção de edifícios há mais de 5.000 anos. Em várias partes do planeta, vestígios arqueológicos comprovam a existência de muitas cidades da antiguidade construídas com esse material. Em civilizações como a do Egito, há registros de usos desde 5.000 a.C. Esse sistema era usado também na Babilônia, na construção dos Zigurates, um tipo de templo construído na forma de pirâmide, criado pelos sumérios e também edificado por babilônios e assírios no antigo vale da Mesopotâmia (atual Iraque), na Pérsia (atual Irã), em Jericó (cidade bíblica da Palestina), na Turquia, em Atenas, na África, no Oriente e na Ásia (China, Índia). Algumas porções da Grande Muralha da China foram edificadas em taipa de pilão e, posteriormente, revestidas em pedra. Também na Europa, o emprego desse material foi muito difundido (Ex.: França séc. XIX, taipa de pilão) e ainda é usado (SANTIAGO, 2001; OLIVEIRA, 2006; ANGULO-ILBÁNEZ *et al.*, 2012).

No novo continente encontram-se construções, com esse material, em países como os Estados Unidos (Califórnia) e o México. Na América Andina, em Chán Chán, no Peru. Sabe-se que a construção com terra, nas Américas, já era praticada pelas civilizações inca e asteca, entre outras, muito antes da chegada dos colonizadores (SANTIAGO, 2001; OLIVEIRA, 2006).

O que se verifica, é que a terra crua é um material de construção amplamente utilizado no mundo, sendo difícil encontrar país que não tenha um acervo arquitetônico edificado nesse material. São muitas as técnicas construtivas com terra empregadas em diversas culturas. Em cada lugar, onde são utilizadas, elas recebem denominações distintas.

No Brasil, antes da colonização portuguesa, os índios construía seus abrigos usando paus roliços para fazer as estruturas, e as vedações eram feitas de palha e folhagens. Durante o período da colonização, as técnicas construtivas em terra crua foram introduzidas pelos colonizadores portugueses. As principais técnicas construtivas utilizadas foram o adobe, o pau a pique e a taipa de pilão. Mestres, oficiais, aprendizes, pedreiros, carpinteiros, taapeiros traziam consigo ensinamentos relativos aos seus ofícios, obtidos em sua terra natal (MONUMENTA, 2005). Os escravos africanos, que usavam essa tecnologia construtiva em seus países de origem, também deram sua contribuição para a difusão do uso da terra crua no Brasil. Esses sistemas construtivos, em função do contexto socioeconômico e meio ambiente físico (tipos de solo,

clima, vegetação, matéria-prima disponível nas diversas e distintas regiões do país), foram sendo adaptados de forma a atender melhor às necessidades da população nas distintas localidades e influenciados pela arquitetura indígena e africana (MILANEZ, 1958 *apud* BANDEIRA, 2009).

Como resultado do processo de colonização e da cultura arquitetônica desenvolvida durante esse período, verifica-se a existência de um rico acervo em arquitetura de terra no Brasil e em Minas Gerais, sendo que algumas dessas edificações foram erguidas a partir da utilização da técnica da taipa de pilão.

Na literatura técnica, há frequentes referências de que aproximadamente ou até mesmo pouco mais de 30% da população mundial habita construções feitas em terra crua. Nos países em desenvolvimento, essas construções podem chegar a 50% (SANTIAGO, 2001; ANGULO-ILBÁNEZ *et al.*, 2012). Para Weimer (2012), não há uma confirmação científica do fato, no entanto, o autor afirma que tais referências demonstram a importância da terra como matéria-prima para a construção (WEIMER, 2012). Em países desenvolvidos, novas edificações estão sendo construídas, considerando critérios relacionados à sustentabilidade, com o emprego de sistemas construtivos em terra (ANGULO-ILBÁNEZ *et al.*, 2012). As construções em terra são consideradas como uma tecnologia limpa, devido à baixa emissão de carbono na elaboração da matéria-prima empregada. Dentro desse contexto de desenvolvimento sustentável, o interesse por sua utilização vem sendo atraído e renovado na construção de edificações. A taipa de pilão vem sendo empregada em novas construções, em países como Austrália, Nova Zelândia e Estados Unidos (Califórnia). Essa nova tendência, o retorno à utilização de antigas técnicas vernaculares, traz consigo a necessidade de um estudo mais amplo sobre as características desse material de construção – a terra.

O CRATerre - *Centre International de La Construction en Terre* – apresenta um diagrama (Figura 01) contendo 12 técnicas construtivas, o qual busca sistematizar as variadas formas de emprego da terra como material de construção. Nele, as técnicas construtivas em terra foram agrupadas em três categorias ou sistemas construtivos: alvenaria, monolítico e misto. A taipa de pilão é um exemplo de sistema construtivo de terra monolítico.

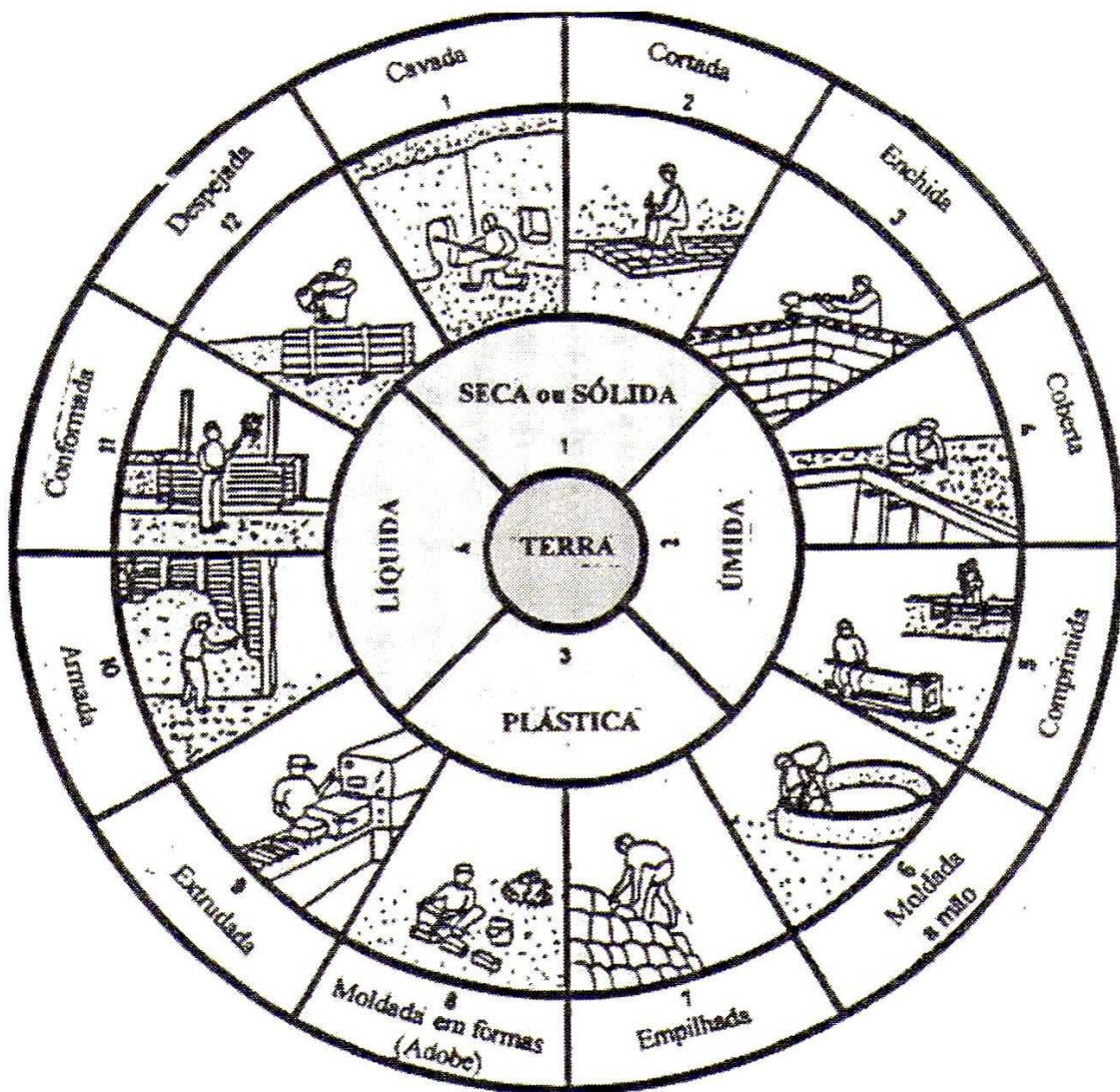


Figura 01: Diagrama de técnicas construtivas com terra.

Fonte: Adaptado de HOUBEN; GUILLAUD, 1994 *apud* BANDEIRA, 2009. p. 21.

1.2 A tecnologia construtiva da Taipa de Pilão

A técnica construtiva em taipa de pilão pode ser encontrada em todos os continentes, sendo utilizada pelas mais diversas culturas. Ela foi introduzida, pelos árabes, na região do Algarve, em Portugal, sendo posteriormente trazida ao Brasil, pelos colonizadores, e é amplamente utilizada em vilas e cidades do litoral e no estado de São Paulo. A casa do Butantã (Figura 02), na cidade de São Paulo, é um exemplo. Ao ser adaptada às condições do Planalto de Piratininga, apresentava algumas alterações em relação à arquitetura luso-árabe, tais como a eliminação de alicerces e baldrames de pedra. Em substituição a esses elementos, as fundações

eram feitas em terra compactada. Essas adaptações, aplicadas ao processo construtivo da taipa de pilão, contribuíram para o aparecimento da "tipologia Bandeirista". (LEMOS, 2008 *apud* MAYUMI, 2008; WEIMER, 2012).



Figura 02: Casa do Butantã, S.P.

Fonte: KON, 2008 citado em MAYUMI, 2008. p. 92. Adaptada pela autora, 2016.

A tecnologia construtiva da taipa de pilão foi introduzida nas regiões interioranas do país, especialmente em Goiás e no território mineiro, em função da sua exploração pelos bandeirantes, especialmente portugueses e paulistas, que partiam de São Paulo e São Vicente em direção ao interior do Brasil em busca de riquezas (ouro e pedras). Essas expedições (entradas e bandeiras) costumavam fazer o percurso seguindo os leitos de rios, por ser mais fácil viajar em uma canoa do que desbravar as florestas, embora o tenham feito também. (INSTITUTO ESTRADA REAL; LEAL, 1977).

O primeiro caminho a ser aberto foi o Caminho Velho, por volta da segunda metade do século XVII, anteriormente denominado Caminho do Ouro, que ligava Paraty a Ouro Preto (antiga Vila Rica), tendo ainda um ramo que saía de São Paulo, passando por Taubaté e Aparecida, chegando ao território mineiro. Foi muito utilizado até cerca de 1750, sendo praticamente abandonado no final do século XVIII. O segundo caminho, o Caminho Novo, começou a ser aberto em 1711, ficando pronto em 1767, ligando o Rio de Janeiro a Ouro Preto. O Caminho dos Diamantes surgiu em função da mineração, no segundo quartel do século

XVIII, ligando Ouro Preto a Diamantina (antigo Arraial do Tejuco), em decorrência da descoberta de diamantes nesse último arraial. O Caminho de Sabarabuçu surgiu também em função da mineração, no século XVIII, como uma rota alternativa entre Ouro Preto, no Caminho Velho e Barão de Cocais, no Caminho dos Diamantes.

Em Minas Gerais, foi raro o emprego dessa técnica, nas construções vernaculares, devido a características naturais do relevo nessa região (relevo acidentado, propiciando a dificuldade de execução dessas paredes) e por demandar uma execução demorada, sendo utilizada, quase que exclusivamente, em alguns exemplares da arquitetura religiosa. Assim como em outros estados, Minas Gerais conta com rico acervo de construções de taipa de pilão, porém bastante reduzido, uma vez que, como citado, essa tecnologia construtiva foi pouco empregada no estado, sendo preterida em relação às outras técnicas usuais nas construções da época – o adobe, a estrutura autônoma em madeira com vedação em pau a pique e a alvenaria de pedra. Foi usada, principalmente, em obras de maior porte (LEAL, 1977; MELLO, 1985). A Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Catas Altas (Figura 03) é uma imponente construção que compõe esse acervo.



Figura 03: Matriz de Nossa Senhora da Conceição, Catas Altas.

Fonte: Acervo da autora, 2007.

A técnica consiste em socar uniformemente, com um pilão – daí a origem do nome – sucessivas camadas de terra, ligeiramente umedecidas, dentro da forma de madeira, denominada taipal, como mostra a Figura 04. O taipal é feito a partir da colocação de duas

tábuas de madeira, paralelas, fixadas entre si, superior e inferiormente por peças denominadas cangalhas ou agulhas. Externamente, peças de paus roliços atravessam a forma sendo fixadas, à mesma, com o auxílio de cunhas, fazendo o seu travamento. Essas travas são dispostas em intervalos regulares. Os taipais podem possuir alturas variáveis, mas sempre maiores que 60 cm (LEAL, 1977; VASCONCELOS, 1979; MELLO, 1985; MONUMENTA, 2005; WEIMER, 2012).

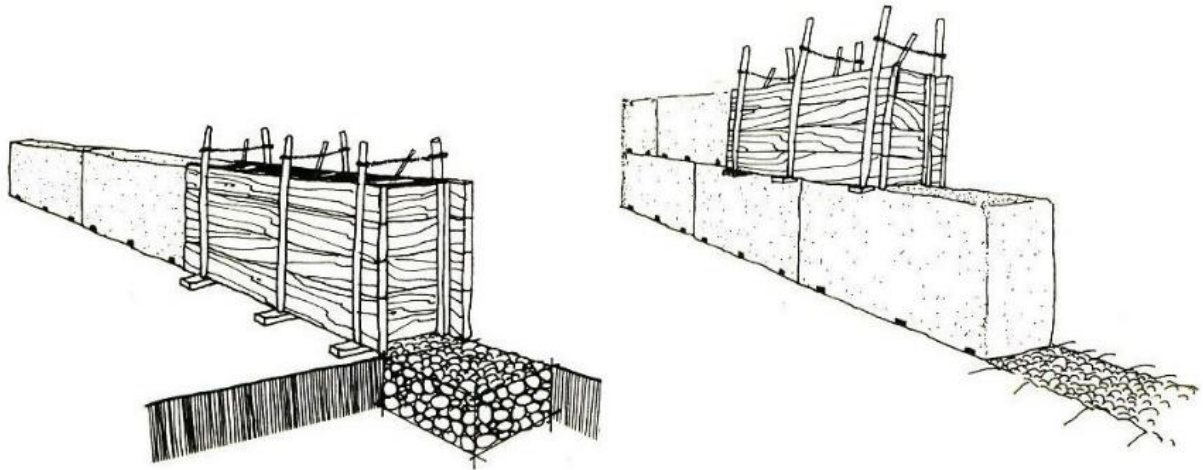


Figura 04: Formas de madeira na execução de paredes em taipa de pilão.

Fonte: BARDOU, 1981, p.20.

Para se construir usando a técnica da taipa de pilão, primeiramente eram feitas as fundações, a partir de abertura de valas, que seriam preenchidas com terra compactada (principalmente em São Paulo) ou matacões e argamassa de barro. Após a execução da fundação, as paredes começam a ser erguidas. Para iniciar a construção, a forma é fechada nas duas extremidades por peças móveis denominadas frontais. A terra deve ser colocada aos poucos, em camadas de, aproximadamente, 10 cm de altura, e apiloada uniformemente (LEAL, 1977; VASCONCELOS, 1979; MELLO, 1985; MONUMENTA, 2005; WEIMER, 2012).

De acordo com informações obtidas pelo agrônomo Carlos Borges Schmidt (1945), em conversa com antigos mestres taapeiros paulistas, os tipos de terra, comumente empregadas, eram a terra vermelha, a terra roxa e a parda, que é de boa liga (SHIMIDT, 1946 *apud* LEAL, 1977). Em entrevista com Fernando Veado (2014), técnico do IEPHA, o mesmo esclarece que a areia de granulometria maior ajuda a reduzir os problemas relacionados à retração e fissuração. É importante, também, controlar a umidade da terra, adicionando apenas água suficiente para propiciar a liga necessária ao material, para a sua compactação. O ideal é que a terra se apresente úmida e solta. Durante o processo de apiloagem, a terra não poderá receber água de chuva, pois a umidade em excesso propicia o aparecimento de trincas na parede. Após

a execução do primeiro pedaço de parede, o taipal é deslocado horizontalmente, de forma que uma das laterais seja fechada pela porção já construída, e a outra continua sendo fechada pelo frontal. Finalizadas as paredes de todo o perímetro da edificação, a forma é movida na vertical. Ao subir, ela se apoia nas "cangalhas de baixo", e o processo é reiniciado. Uma das características desse sistema construtivo é que, ao ser removido o taipal, o trecho da parede apiloada já está em condições de receber carga. Obviamente, a parede ainda terá que secar, e essa perda de umidade pode lhe gerar trincas, por isso é essencial a correta dosagem da água durante a sua compactação. (LEAL, 1977; VASCONCELOS, 1979; MELLO, 1985; MONUMENTA, 2005; WEIMER, 2012).

Uma forma de amenizar o problema das trincas e garantir a solidez das paredes seria adicionar, à terra, materiais considerados estáveis, tais como fibras vegetais (folhas secas, capim, galhos, ramos etc.), fibras animais (lã de ovelha, crina de cavalo etc.) e pedras, cuja utilização na mistura do solo gerou uma nova variedade à taipa de pilão, o formigão. As fibras vegetais foram amplamente utilizadas no estado de Goiás, onde era comum a colocação de folhas de palmeiras a cada camada de apiloamento.

A cal era empregada na correção de terra que não apresentasse características ideais ou até mesmo para obter uma parede mais resistente. Ao ser misturada ao solo e ao se adicionar a água, reage com a argila, formando componentes à base de silicatos, que permitem a respiração da parede (troca de umidade entre ambientes externo e interno), por meio do aumento de sua porosidade, sem aumentar a sua retenção. Ainda de acordo com relatos de antigos mestres taipeiros a técnicos do IEPHA-MG, outra forma de amenizar o problema da umidade era a utilização de chapisco feito com o solo e adição de fibras, emboço também contendo fibras, mas em menor quantidade, e o reboco contendo areia, cal e fixadores à base de caseínas, entre elas, clara de ovo, sangue de boi, urina de cavalo etc. A técnica era adaptada aos materiais de cada região (LEAL, 1977; VASCONCELOS, 1979; MELLO, 1985; MONUMENTA, 2005; VEADO, 2014; WEIMER, 2012).

Como resultado, tem-se uma construção de paredes da grande espessura e apresentando baixo coeficiente de transmissão de calor (o que confere uma temperatura amena no interior dessas construções), maciças, retilíneas, monolíticas, em geral com poucas aberturas, previamente planejadas, sendo seus espaços deixados durante a execução dessas paredes. (LEAL, 1977; VASCONCELOS, 1979; WEIMER, 2012).

Durante uma viagem ao Brasil, entre os anos de 1807 a 1811, o mineralogista inglês John Mawe produziu um importante relato sobre a cidade de São Paulo. Nesse documento, fez a descrição da técnica:

(...) Erguem-se as paredes da seguinte maneira: constrói-se um arcabouço com seis pranchas móveis, justapostas, e mantidas nessa posição por meio de travessões, presos por pinos móveis e vigas, à medida que avança no trabalho. Coloca-se o barro em pequenas quantidades, que os trabalhadores atiram com pás, umedecendo-o, de quando em quando, para dar-lhe maior consistência. Cheio o arcabouço, retiram o excesso, e prosseguem na mesma operação, até rebocar todo o madeiramento da casa, tomando-se cuidado de deixar espaços para as janelas, as portas e as vigas. A massa, com o correr do tempo, endurece; as paredes, perfeitamente lisas na parte interna, tomam qualquer cor que o dono lhes queira dar e são, em geral, ornadas com engenhosos enfeites. Esta espécie de estrutura é durável; vi casas assim construídas que resistiram duzentos anos e a maioria tem várias histórias. Os telhados constroem-se de modo a projetarem-se dois a três pés além da parede, fazendo com que a chuva corra distanciada da base; as calhas seriam um preservativo mais eficaz contra a umidade, mas aqui não se conhece o seu uso. Telhas curvas cobrem as casas, mas embora a região ofereça excelente argila, e lenha em quantidade, raramente cozinham os tijolos. (MAWE, 1978, p. 63-64 *apud* TOLEDO, 2007 p. 40-41).

O botânico francês Auguste de Saint-Hilaire, que esteve no Brasil entre os anos de 1816 a 1822, também descreve aspectos formais relacionados ao emprego da taipa de pilão nas construções que viu na época de sua visita:

As casas construídas de taipa muito sólida, são todas brancas e cobertas telhas côncavas; nenhuma delas apresenta grandeza e magnificência, mas há um grande número que, além do andar térreo, tem um segundo andar e fazem-se notar por um aspecto de alegria e de limpeza. Os telhados não avançam desmesuradamente além das casas, mas tem bastante extensão para dar sombra e garantir as paredes contra as chuvas” (SAINT-HILAIRE, 1972, p. 155-156 *apud* TOLEDO, 2007 p. 41).

As paredes de taipa são vulneráveis à umidade, especialmente às águas de chuva. O emprego de revestimento à base da caiação e a construção de beirais salientes amenizam esse problema. As cargas concentradas também são danosas a essas paredes, que apresentam baixa resistência à pressão superficial. Essas cargas podem ser causadas por apoios dos entrespisos (barrotes) sobre as paredes e por apoios de telhados. No primeiro caso, que ocorre em construções com dois pavimentos ou mais, o problema pode ser resolvido mergulhando vigas contínuas de madeira nas paredes, na altura de colocação desses apoios de entrespisos, e nelas são apoiadas as pontas dos barrotes. No segundo, a colocação de vigas contínuas, em madeira, no topo das paredes para receber as cargas das tesouras e as distribuir de forma uniforme, soluciona a questão da transmissão dessa carga para essas paredes de taipa de pilão. Outra questão delicada é a amarração entre os quadros em madeira dos vãos e as paredes. O

prolongamento dos peitoris e vergas, inseridos nas paredes, soluciona essa ligação, garantindo maior aderência entre esses dois materiais distintos (WEIMER, 2012).

1.3 O acervo arquitetônico em taipa de pilão do Brasil Colonial

A taipa de pilão é considerada um patrimônio universal, sendo encontrada em todos os continentes e em diversas culturas; sua origem remonta ao norte da África. Em Portugal, a técnica foi introduzida, pelos árabes, na região do Algarve e, posteriormente, trazida ao Brasil pelos colonizadores. É amplamente utilizada em vilas e cidades do litoral e no estado de São Paulo.

A técnica foi amplamente utilizada nos primeiros séculos de colonização, especialmente em regiões menos ricas em pedras. Primeiramente, foi empregada no estado de São Paulo, caracterizando a arquitetura empregada no planalto paulista, nos primeiros séculos da colonização. Foi amplamente utilizada na construção das casas rurais, conhecidas como “casas bandeiristas”, em construções religiosas e nos núcleos urbanos do planalto, incluindo a cidade de São Paulo.

Com o movimento das bandeiras, essa técnica foi levada ao interior do país, para os estados do Paraná, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. Em Goiás, a técnica foi também muito aplicada; já em Minas Gerais, acabou sendo substituída por outras técnicas de construção em terra, por não se adaptar à topografia local (MELLO, 1985).

1.3.1 O acervo na cidade de São Paulo

A maioria das edificações erguidas, na fundação da cidade de São Paulo, foram feitas a partir do emprego da técnica da taipa de pilão. De acordo com Leal (1977), o baixo custo e a facilidade de execução desse sistema construtivo foram os principais motivos para seu emprego em larga escala, nessa região, que nos primórdios da colonização apresentava uma economia pobre.

Atualmente, restam poucos exemplares, sendo o Mosteiro da Luz (Figura 05) a única construção, executada nessa técnica, a sobreviver íntegra, na cidade de São Paulo, tornando-se um importante lugar de memória da cidade.



Figura 05: Mosteiro da Luz, S.P.

Fonte: Autor desconhecido. Fotografia de 1867.

A sua implantação é significativa na paisagem urbana de São Paulo. O mosteiro é considerado um componente altamente expressivo do patrimônio histórico da cidade (TOLEDO, 2007). Essa é uma das poucas obras do período colonial cuja autoria é conhecida, atribuída ao Frei Galvão, que, além de religioso, era um reconhecido mestre de obras e taipeiro.



Figura 06: Mosteiro da Luz, S.P.

Fonte: Acervo da autora, 2014.

Apresenta ambientes bem arejados, corredores desafogados, fachada frontal imponente (Figura 06) e abertura para pátios ajardinados (Figura 07). A obra exprime um ar sólido, tendo

em vista que a arquitetura de taipa de pilão é composta por grandes panos de paredes maciças, e bem despojada.



Figura 07: Pátio interno do Mosteiro da Luz, S.P.

Fonte: Acervo da autora, 2014

As casas bandeiristas, também erguidas a partir do emprego dessa tecnologia construtiva, demonstravam grande sobriedade, proporções acertadas e apuro nos detalhes construtivos. Configuram como importante registro da arquitetura civil do período colonial, testemunhos das atividades dos bandeirantes. As construções apresentavam características básicas em comum, entre elas: presença de alpendre central vazado, ladeado pelo quarto de hóspedes e pela capela, sendo que suas paredes possuíam apenas uma pequena abertura proporcional às dimensões do conjunto. A sala de convívio ficava no centro da edificação e contava com um espaço amplo coberto por telha-vã. Em suas laterais, eram dispostos os quartos, um de cada lado, aos fundos eram encontradas as áreas destinadas a cozinha e serviços em geral. Os telhados de quatro águas contavam com amplos beirais apoiados em peças de madeira, os cachorros, e esses se apoiavam sobre os frechais, colocados no topo das paredes ao longo de toda a edificação, fazendo o seu cintamento. (TOLEDO, 2007).

1.4 O acervo arquitetônico em taipa de pilão como testemunho e objeto de memória e preservação

As construções erguidas, ao longo do tempo, passam a ser valorizadas não pelas questões ligadas ao uso, e sim por sua técnica, construtiva, qualidade estética e sua historicidade. Se, anteriormente, a questão do colecionismo se relacionava a peças de museu, agora as edificações também passam a ser peças colecionáveis. Um acervo de características bem peculiares, por se tratar de objetos imóveis, expostos ao meio ambiente externo, vulneráveis às questões atmosféricas e que, assim como as peças de coleções museológicas, requerem cuidados específicos, ações conservadoras e restauradoras.

Desde a época da criação do órgão federal de proteção ao patrimônio, o SPHAN – Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – em 1937, algumas casas bandeiristas foram selecionadas para compor o elenco de bens arquitetônicos a serem protegidos e dignos de tombamento, por serem consideradas exemplares de interesse histórico.

Segundo Carlos Lemos, Mário de Andrade, nomeado assistente técnico do SPHAN, responsável pela região Sul do Brasil, selecionou as casas exclusivamente por sua antiguidade, não compreendendo ou aceitando seus valores artísticos ou históricos. Já em 1944, Luiz Saia, em suas pesquisas, privilegia a investigação da arquitetura civil, especialmente a rural (MAYUMI, 2008). Exemplares de casas bandeiristas passam a ser considerados a partir de seus valores estéticos e da tecnologia construtiva da taipa de pilão, compondo, assim, o acervo da arquitetura bandeirista.

Em 1950, inicia-se, na cidade de São Paulo, a constituição de seu acervo arquitetônico. No intuito de preservar esse acervo, que se caracteriza como registro material de memória da colonização do território paulista, o mesmo passou por obras de restauro questionáveis. Essas edificações foram restauradas com o objetivo de se preservar a história e o modo de vida dos bandeirantes.

Na década de 70, dá-se início à atividade de preservação dessa herança colonial. Em São Paulo, as antigas casas bandeiristas começavam a ser restauradas, entre elas o Sítio da Ressaca (Figura 08). No entanto, durante os trabalhos, optaram pelo emprego de tecnologia contemporânea, mais especificamente a do concreto armado, visando a atender a premissas sugeridas pelas Cartas de Atenas e Veneza, que afirmavam a necessidade de se manter visível e identificável toda e qualquer atividade restauradora em um monumento. (LEMOS, 2008 *apud* MAYUMI, 2008).



Figura 08: Sítio da Ressaca, S.P.

Fonte: KON, 2005 *apud* MAYUMI, 2008. p. 167. Adaptada pela autora, 2016.

As obras realizadas buscando a salvaguarda do acervo da arquitetura bandeirista foram conduzidas de acordo com a visão modernista de arquitetura. Se, por um lado, salvou as construções da ruína completa, por outro propiciou intervenções tecnicamente equivocadas. De acordo com a Carta de Veneza, intervenções poderiam ser realizadas com o emprego de técnicas mais modernas e distintas da tecnologia construtiva identificada no bem; essa intervenção reparadora deveria ser mantida visível. Mas essas intervenções acabaram por propiciar a descaracterização da tecnologia construtiva original, preocupando-se apenas com questões de estética e historicidade. De acordo com Lemos (2008 *apud* MAYUMI, 2008):

(...) após garantida a estabilização estrutural da velha construção com emprego de inclusões invasivas de concreto armado, as paredes ganhavam novo revestimento. Depois de caiadas adquiriam uma brancura nunca vista, fazendo contraponto com todo o madeirame uniformizado em tons escuros obtidos com solução de extrato de noqueira. ...Muita gente lamenta o fato das construções tombadas não sugerirem a idade que tem.” (p. 14-15).

O que se observa é que, na tentativa de se salvar as edificações bandeiristas, que já tinham seu valor reconhecido, e também construções da arquitetura religiosa, danos maiores foram causados a essas estruturas. Algumas das obras erguidas em taipa de pilão ainda podem ser identificadas devido apenas às características estéticas, que foram mantidas. Essas construções, em sua maioria, foram alvo de restaurações, nas quais as paredes de terra, por apresentarem elevado grau de deterioração, foram refeitas em concreto.

Percebe-se que a escolha pelo emprego de tecnologia contemporânea na restauração das casas bandeiristas refletia uma situação muito mais grave do que uma simples questão estética e metodológica de identificação de intervenções em patrimônio edificado. Colocava em evidência a perda, mesmo que involuntária, do conhecimento da execução da técnica da taipa de pilão.

1.5 Novas formas de pensar a preservação do acervo arquitetônico

Se, por um lado, a atribuição de valores estéticos e históricos propicia o reconhecimento do acervo arquitetônico como objeto de memória e preservação, por outro, pode colocar as edificações em situações de risco, vulneráveis a intervenções e futuros usos inadequados. Esses são aspectos a serem contemplados nas ações de salvaguarda do patrimônio edificado, buscando evitar-lhe danos maiores.

A atividade restauradora passou por profundas mudanças ao longo dos anos e foi evoluindo não apenas com os acertos, mas, principalmente, com os erros. Esse processo gerou perdas irreversíveis ao patrimônio, mas também suscitou discussões e estudos em prol do aprimoramento da tecnologia de intervenção, ressaltando a importância do resgate das técnicas tradicionais de construção, tanto para o seu emprego nessa atividade como para um conhecimento a ser registrado como cultura imaterial – “saber fazer”.

Leal (1977), em seu livro “Restauração e Conservação de Monumentos Brasileiros”, atenta para a necessidade e importância de se conhecer bem as técnicas construtivas antigas, no processo de elaboração de estratégias de conservação e na escolha dos procedimentos a serem utilizados nos trabalhos de restauro.

De acordo com a Carta sobre o patrimônio vernacular edificado (1999), essas construções devem ser reconhecidas a partir de suas dimensões estéticas (coerência de estilo, forma e aparência) e técnicas (tipologias construtivas). Sua salvaguarda deve ser elaborada contemplando aspectos ligados ao conhecimento e emprego das técnicas tradicionais de construção e às novas demandas funcionais, sociais e ambientais.

Para se conservar uma arquitetura de terra, seja para salvaguardar, preservar a história de uma técnica ou restaurar patrimônio edificado, é necessário o trabalho de equipe interdisciplinar com a abordagem de diversas áreas do conhecimento, tais como arquitetura, engenharias (civil, de materiais), belas artes, entre outras. Sendo assim, um programa de investigação de campo e de laboratório é necessário para adoção de procedimentos e seleção de materiais adequados objetivando uma boa intervenção no edifício que se pretende restaurar ou

conservar. Oliveira (2002) afirma que “[...] para enfrentar o problema da conservação do patrimônio edificado em terra, o especialista deve estar preparado com uma boa fundamentação teórico-crítica, ao lado de excelente capacitação técnica e científica”.

Rezende e Rodrigues (2007), a partir de estudos realizados em ruínas e monumentos históricos construídos em taipa de pilão, desenvolveram metodologia para a reconstituição das construções dessa tipologia. Discutem, também, a questão referente aos métodos de seleção de solos e buscam validar os testes de campo expeditos como testes laboratoriais.

Para uma real proteção desse acervo é necessário, também, o envolvimento da comunidade, buscando manter vivas suas tradições e garantindo usos compatíveis, proteção legal, administrativa e financeira dessas edificações.

Ao serem contemplados os aspectos estéticos, históricos, técnicos, socioeconômicos, torna-se mais eficaz qualquer ação visando à salvaguarda do patrimônio, que continuará compondo o acervo artístico e histórico responsável pela transmissão da identidade cultural e da memória local às novas gerações.

1.6 O ensino e o emprego da tecnologia construtiva de terra

A preservação de um edifício antigo, com valores históricos e estéticos, é muito importante e tem valor bem maior que a sua simples substituição. É essencial reconhecer os valores geralmente intrínsecos ao nosso patrimônio e reverenciá-los.

As restaurações mais recentes já são conduzidas adotando-se uma postura mais consciente com relação a essa questão. Buscam recuperar as construções históricas, aplicando, nas intervenções, a técnica originalmente utilizada em sua execução, tornando-as aptas a novos usos e resgatando esse conhecimento, que estava restrito a um pequeno grupo de artesãos. Um dos motivos do quase desaparecimento da técnica foi a ausência da transmissão desse saber fazer, uma vez que a técnica não havia sido inventariada.

O IEPHA, buscando melhorar a qualidade das intervenções, em edificações erguidas em taipa de pilão, e também nas demais técnicas de arquitetura em terra, montou um grupo de obras a partir dos ensinamentos dos antigos mestres artífices que ainda trabalhavam para contratantes particulares (VEADO, 2014).

O projeto Mestres Artífices, elaborado pelo Programa Monumenta, configura-se como uma das ferramentas de pesquisa que busca valorizar as técnicas construtivas tradicionais e os detentores desse conhecimento: ferreiros, canteiros, taipeiros, carpinteiros, enfim, mestres em ofícios construtivos, relacionados à arquitetura brasileira. De acordo com o programa

Monumenta: "A ideia principal do projeto é o reconhecimento de que as técnicas tradicionais são úteis e podem ser aproveitadas pela própria arquitetura contemporânea e, principalmente, para o restauro de imóveis históricos" (MONUMENTA, 2007).

Também no âmbito acadêmico, diversos projetos de pesquisa vêm sendo propostos, entre eles investigação de patologias em taipa de pilão com uso de tecnologia dos ensaios não destrutivos, com o emprego do ultrassom. Nesse estudo, cujo foco é a área de investigação de patologias em estruturas de terra, também contribuiu para o resgate e registro dessa tecnologia construtiva. A fase do projeto de construção do protótipo de parede de taipa e o consequente resgate dessa técnica será descrita adiante.

Esses projetos desenvolvidos no meio acadêmico, em sua grande maioria, além de contribuírem para o resgate de conhecimento, também auxiliam na disseminação das informações adquiridas durante as etapas de seu desenvolvimento.

Como um desdobramento dessas pesquisas, vários tipos de atividades acadêmicas podem ser elaboradas e propostas na grade curricular dos cursos de graduação e pós-graduação, sendo na forma de disciplinas teóricas e/ou disciplinas práticas, por exemplo ou como oficinas das técnicas construtivas, entre elas a taipa de pilão. São atividades que aproximam os alunos e profissionais da área prática, dos canteiros de obras de restauração ou até mesmo de construções novas.

Ainda há a possibilidade real desse conhecimento tradicional associado à tecnologia contemporânea permitir inovações no desenvolvimento das atividades da construção em taipa de pilão e outras técnicas de terra também. Ele auxilia no processo de restauro ou de registro desses bens, por meio de novos ou até mesmo de antigos equipamentos que passam a ser utilizados, de forma inovadora, no desenvolver dessa tarefa (REZENDE; RODRIGUES, 2007).

Verifica-se que o uso da tecnologia tradicional aliada ao conhecimento artístico e histórico aprimoraram o desenvolvimento da atividade. Com isso, as restaurações vêm apresentando inovação tecnológica e, conseqüentemente, ganhos qualitativos (REZENDE; RODRIGUES, 2007).

Também é importante ressaltar que a tecnologia contemporânea pode ser aliada à tecnologia tradicional (antiga). Alguns avanços tecnológicos dão importantes contribuições para a área de conservação e restauração. Aspectos da interdisciplinaridade têm sido contemplados, e novas tecnologias vêm sendo empregadas com sucesso nos trabalhos de recuperação de estruturas históricas (REZENDE; RODRIGUES, 2007).

Na área de estudo e caracterização de solos, os equipamentos desenvolvidos para essa atividade, através do desenvolvimento tecnológico, auxiliam muito nos trabalhos de

intervenção, pois permitem ao profissional restaurador saber melhor todas as características físicas e químicas da matéria que constituem a edificação na qual ele está intervindo (REZENDE; RODRIGUES, 2007).

Estudos científicos sobre o adobe e a taipa de pilão vêm sendo realizados, buscando-se desenvolver normas de ensaio para estudos das suas propriedades físico-químicas e normas para eficiência de tratamento e estudos de conservação em si, conhecimento sobre os possíveis fatores de degradação desse material, além de formas de conservação e tratamento (OLIVEIRA, 2006)

O que se percebe é que a associação do conhecimento científico com a tecnologia tradicional e a contemporânea propiciou o desenvolvimento de novas formas de intervenção, não apenas nas estruturas de taipa, mas também em todo o patrimônio edificado em terra.

Observa-se, também, que o resgate e o registro dessas técnicas tradicionais são fundamentais para garantir o desenvolvimento de trabalhos de restauração de qualidade, o respeito à história e a manutenção e perpetuação da técnica tradicional da taipa de pilão.

1.7 A terra como matéria-prima para construção de paredes em taipa de pilão

1.7.1 O solo

O uso do solo como material de construção é muito antigo, sendo comprovado a partir dos inúmeros exemplares remanescentes de épocas passadas, configurando-se como testemunhos da história da arquitetura de terra (SANTIAGO, 2001).

O solo, como já dito anteriormente, é a matéria-prima básica empregada nas construções em taipa de pilão. É importante conhecer esse material, para poder intervir, adequadamente, em edificações históricas erguidas com o emprego dessa tecnologia construtiva.

As propriedades mais importantes a serem analisadas para escolha do solo para a construção são, segundo Neves *et al.* (2005, p. 4):

- na seleção: composição granulométrica, plasticidade e retração;
- no controle da execução: umidade e grau de compactação.

1.7.1.1 Composição granulométrica, plasticidade e retração

Os solos podem ser classificados como pedregulhos, areias, siltes e argilas. O solo também apresenta compostos orgânicos – o húmus. (LEPSCH, 2011; SANTIAGO, 2001).

Os solos grossos apresentam maior porcentagem de partículas visíveis a olho nu e formatos variados, sendo elas:

- Pedregulhos: apresentam dimensões maiores do que 2,0 mm (ABNT) ou 4,8 mm (ASTN).
- Areias: suas dimensões variam entre 2,0 mm e 0,06 mm (ABNT) ou 4,8 mm e 0,075 mm (ASTM). Tem como características aspereza ao tato e ausência de plasticidade.

Solos grossos podem apresentar uma determinada porcentagem de fração fina.

Os solos finos apresentam partículas com dimensões menores do que 0,06 mm (ABNT) ou 0,075 mm (ASTM). Apresentam formas lamelares, fibrilares, tubulares ou aciculares, variando em função do mineral presente. Seu comportamento é definido pelas forças de superfície (moleculares, elétricas) e pela água. São as partículas mais ativas do solo, sendo eles:

- Siltes: apresenta granulação fina, entre 0,06 mm e 0,002 mm (ABNT) ou 0,075 mm e 0,002 mm (ASTM).
- Argilas: apresenta granulação muito fina, inferior a 0,002 mm (ABNT) ou 0,002 mm (ASTM). São plásticas e demonstram elevada resistência, quando secas. (LEPSCH, 2011; PINTO, 2002; SANTIAGO, 2001).

Solos finos podem apresentar uma determinada porcentagem de fração grossa.

Para esta pesquisa, serão estudadas as argilas, partículas ativas que influenciam no comportamento do solo e, conseqüentemente, na qualidade das paredes erguidas com o uso desse material.

De acordo com Lepsch (2011), argila pode ser definida como:

(1) Um separado do solo que consiste de partículas menores que 0,002mm de diâmetro equivalente; (2) Em mineralogia, um material encontrado na natureza, composto primariamente de partículas muito pequenas de minerais, que desenvolve plasticidade quando pulverizado e endurece quando seco ou queimado. (LEPSCH, 2011, p.91).

As argilas podem ser encontradas quase em estado puro, em jazidas minerais, ou obtidas por separação e purificação dos solos, podendo se apresentar em diversas proporções: de 5 a

15% em solos arenosos, e nos argilosos chegam a compor entre 30 a 60% da matriz total. Apresentam estrutura química e mineralógica complexa, sendo formadas por sílica (SiO_2) no estado coloidal, alumina (Al_2O_3) e / ou óxido de ferro (Fe_2O_3) (LEPSCH, 2011; SANTIAGO, 2001).

Existem vários tipos de minerais argílicos, entre os quais quatro tipos se destacam:

- Caulinita: apresenta estrutura rígida. Estável em presença de água. Argila silicatada mais comum nos solos brasileiros.
- Montmorilonita: apresenta estrutura pouco rígida, facilita a penetração de água. É instável e expansiva (expandindo muito quando úmida e contraindo quando seca). Essa alta capacidade de contração e expansão, em geral, produz consequências negativas para construções – trincas e rachaduras nas fundações e paredes de terra.
- Ilita: embora apresente um arranjo estrutural semelhante ao da montmorilonita, a presença de íons não permutáveis lhe confere o aumento da estabilidade, fazendo com que seja um pouco menos afetada pela água. É menos expansiva que a montmorilonita.
- Vermiculita: apresenta estrutura similar à ilita, podendo ser definida como intermediária entre a ilita e a caulinita. É uma argila moderadamente expansiva. (LEPSCH, 2011; SANTIAGO, 2001).

Os solos são caracterizados a partir da análise granulométrica e classificados a partir da determinação dos limites de consistência: Limites de liquidez – LL, Limite de plasticidade – LP, Índice de plasticidade – IP. Essas características geotécnicas estão entre os principais ensaios de caracterização desse material, sendo os mesmos normatizados pela ABNT.

1.7.1.2 Umidade e grau de compactação

O grau de compactação está diretamente relacionado à resistência, quando adensado a partir de determinado esforço. O teor de umidade ótimo é específico para cada tipo de solo e para cada esforço de compactação. A umidade ótima de compactação é determinada em laboratório através do ensaio de compactação no qual se determinam diferentes umidades.

Ainda de acordo com os autores, o “*grau de compactação* corresponde à relação entre a massa específica de uma amostra retirada do trabalho executado no campo e a massa específica determinada em laboratório.” (NEVES *et al.*, 2005, p.9).

Demais informações básicas sobre o solo são obtidas a partir de ensaios que determinam as seguintes propriedades desse material de construção: Índices físicos; Compacidade; Compactação dos solos; Resistência dos solos; Ensaio para determinação de resistência dos solos; Resistência dos solos compactados; Estrutura dos solos compactados. Essas características geotécnicas estão entre os principais ensaios de caracterização desse material.

1.7.2 O solo e sua influência nas paredes de taipa de pilão

Antigamente, a escolha do solo a ser utilizado nas edificações erguidas em sistemas construtivos de terra, entre elas, a taipa de pilão, era realizada pelos mestres de obra. Eles tinham um conhecimento empírico sobre o solo ideal a ser empregado e correções a serem realizadas, quando não encontravam na natureza o material dentro das características ideais. Analisavam características tais como localização da jazida na natureza (solo, subsolo, superfície plana, encostas de morro, barrancos, etc.), cor (tonalidades de cinza, vermelho, amarelo, marrom, etc.), textura (áspero, liso, pegajoso, suave, talcoso, etc.) e tamanho das partículas (presença de pedras, areias ou grãos finos). Eles reconheciam, a partir de simples testes de campo, o tipo de solo ao qual tinham acesso. A partir desse saber, muitas construções em taipa foram erguidas com solos apropriadamente escolhidos.

Atualmente, existem diversos ensaios laboratoriais, citados anteriormente, para classificação dos solos. O emprego desses ensaios é essencial tanto nos trabalhos de restauração, permitindo o acesso à descrição correta do solo empregado na obra, objeto de intervenção, como na execução de novas obras. Eles permitem a determinação das características físicas e químicas do material e a sua adequabilidade para o emprego.

Existem vários estudos determinando o tipo de solo mais adequado a ser empregado em edificações erguidas em taipa de pilão. A seguir, serão estudadas as características ideais que esse material deve apresentar para ser empregado na execução de paredes em taipa de pilão, a partir de pesquisas realizadas por alguns autores estudiosos do assunto.

Hall e Djrbib (2004) descreveram como solo apropriado para a execução de amostras em taipa de pilão o material encontrado na camada já considerada subsolo. Segundo os autores, o solo deve conter, aproximadamente, 20 a 30 % de cascalho, 50 % de areia e 20 a 30 % de silte mais argila. O teor máximo admissível de material orgânico varia entre os valores de 1 a 2 % na composição do solo a ser usado. Ainda de acordo com os autores, a compactação deve ser realizada com o solo contendo teor de umidade ótimo (HALL; DJERBIB, 2004).

Delgado e Guerrero (2005) elaboraram um estudo buscando uniformizar a seleção de solos como um primeiro passo para sua normalização e utilização em construções em terra. Para eles, a seleção correta do solo a ser usado de acordo com a técnica a ser empregada é muito importante, uma vez que nem todos os solos são adequados às variadas tecnologias construtivas em terra existentes. É fundamental avaliar e adequar o tipo de solo à técnica. Para tal, os autores agruparam os diversos documentos, já produzidos sobre caracterização de solos, em função da técnica construtiva, em três tipologias de documentação. Para o primeiro grupo, foram selecionados todos os documentos desenvolvidos por órgãos governamentais de regulação, ou seja, documentos de normalização, manuais, guias ou códigos que visam estipular regras e condutas para seleção de solo e sua utilização nas construções em terra, sendo alguns deles: código de materiais de construções com terra do México, documentos normativos (CEB) da associação de normalização francesa, documentos do International Centre on Earthen Architecture - CRAterre, entre outros. O segundo grupo apresenta documentos de referência nacional de países como Austrália (Australia Earth Building Handbook, Earth Wall Construction), Espanha (Bases para el Diseño y Construcción con Tapial – Madrid), entre outros. E para o grupo três foi selecionada uma bibliografia geral produzida sobre construções usando terra como matéria-prima. Foram escolhidos documentos técnicos, artigos produzidos pelos principais autores da área de conhecimento e mais referenciados em estudos em geral. Desse último grupo foram selecionadas duas publicações do International Centre on Earthen Architecture - CRAterre (“Comprehensive Handbook for Earth construction” – Houben e Guillaud – e o “Manual for CEB production” – Rigassi – USA).

O estudo dos autores citados contempla as seguintes técnicas: adobe CEB (blocos de terra comprimidos) e taipa de pilão. Como essa pesquisa é sobre a última técnica mencionada, serão expostos, a seguir, os resultados relativos à mesma.

Durante a pesquisa, Delgado e Guerrero (2005) analisaram as propriedades dos solos escolhidos: textura, plasticidade, presença de sais, teor de matéria orgânica, retração e compactação, achando os seguintes resultados para a taipa de pilão:

- Textura: os solos indicados para a técnica podem ser a areia argilosa ou a argila arenosa. No entanto, deve haver um limite máximo de porcentagens das frações. Os efeitos negativos da argila, durante a compactação, devem ser levados em consideração, o excesso pode ocasionar trincas durante a secagem da parede. A mistura deve conter uma porcentagem mínima de 5 % de argila e, de acordo com documentos analisados, o percentual ideal de argila na mistura é de 10 a 15 %.

- Plasticidade: foram conduzidos os ensaios de limite de liquidez (LL) e de limite de plasticidade (LP), para a obtenção do índice de plasticidade (IP). Os valores determinados foram os seguintes: LL de 25 % a 46 %; IP de 2 % a 30 %. Os resultados foram obtidos a partir dos ensaios com o aparelho Casagrande.
- Sais: não devem ser usados solos com sais solúveis em água; a quantidade máxima permitida desse material não deve ultrapassar o valor de 2 % da mistura.
- Teor de matéria orgânica: não devem ser usados solos com presença de matéria orgânica. Solos superficiais devem ser descartados. O ideal é a utilização de material coletado já na camada do subsolo. Nessa pesquisa não foram encontrados valores numéricos de referência para porcentagens admissíveis desse material.
- Retração: os resultados apresentaram algumas diferenças. O valor mínimo obtido foi de 0,05 %, e não deverá ser superior a 2 %.
- Compactação: de acordo com o ensaio do Proctor Normal, foi estipulado o valor para densidade máxima de 2000 kg/m³.

Neves *et al.* (2005) afirmam que, em geral, o solo, com exceção dos altamente orgânicos ou solos cuja argila seja expansiva, a exemplo da montmorilonita, pode ser empregado em construções de terra. Mas existem limitações ao uso de determinados tipos de solos por razões de trabalhabilidade, a exemplo de solos muito argilosos, difíceis de serem misturados e adensados e, em função de retração elevada, produzem superfícies mal acabadas.

De acordo com os autores citados, normalmente a terra do próprio local é empregada nas construções, sendo utilizado um só tipo de solo. No entanto, em alguns casos, a terra é resultante de uma mistura de dois ou mais tipos de solo, buscando-se um material mais adequado à construção. Tal situação ocorre quando a terra do local é muito argilosa ou arenosa, precisando ter suas características granulométricas melhoradas.

O reconhecimento preciso dos solos pode ser feito a partir de diversos ensaios em laboratório, que são normalizados, geram resultados quantitativos de suas características e facilitam a comparação com solos usados em outras pesquisas e a identificação do solo ideal para a reprodução de determinada técnica construtiva com o emprego desse material (NEVES *et al.*, 2005).

1.7.3 Estudos sobre a execução de amostras e protótipos de paredes em taipa de pilão e ensaios de resistência

Burroughs (2008) conduziu um estudo quantificando vários aspectos da relação entre densidade seca máxima e resistência à compressão simples de amostras de taipa de pilão. De acordo com o autor, a densidade seca máxima depende de muitas variáveis físicas, incluindo a densidade específica das partículas do solo, granulometria do solo, compactação da amostra, teor de umidade ótimo do material e método e esforço de compactação do mesmo. Depende também do teor de argila presente no solo, onde as maiores densidades estão relacionadas a menores teores de argila na matriz (< 30 %). Os valores da densidade seca máxima influenciam os valores de resistência à compressão. Densidades mais altas tendem a aumentar a resistência à compressão do material terroso. Ambos os fatores costumam interferir na qualidade e durabilidade das paredes em taipa de pilão (BURROUGHS, 2009)¹.

Bui e Morel (2009)², ao construírem protótipos de paredes em taipa de pilão, em laboratório, levantam importantes questões com relação à sua execução. O primeiro problema identificado em laboratório foi a determinação do teor de umidade a ser adotado, e o segundo, a energia de compactação a ser empregada, de forma a se produzirem amostras representativas. Para o primeiro problema, a granulometria do material deverá ser considerada. O segundo problema exige cuidados com relação às dimensões das amostras, uma vez que influenciam na energia de compactação transmitida ao material. A taipa de pilão não é uma parede de material homogêneo, devido à presença das diversas camadas de sua compactação. Em cada camada, a densidade do material deve ser observada, levando-se em consideração que esse parâmetro pode variar da parte superior da camada em relação à sua parte inferior. A porção superior é atingida com maior intensidade pela energia da compactação do que a inferior, por estar em contato mais direto com a ferramenta de compactação, tendendo a apresentar maior densidade.

Para fazer as paredes, em laboratório, os autores utilizaram amostras de solo coletadas em um sítio, onde estava em construção uma casa em taipa de pilão. O teor de umidade usado na construção da parede protótipo foi de 10 %. Após a compactação, a densidade seca obtida foi de 1900 kg/m³, apresentando um grau de compacidade similar em relação ao encontrado nas construções de taipa, fator que pode ser explicado em função de o material usado ser o mesmo, e das dimensões das amostras serem representativas em relação às apresentadas pela edificação

¹ Texto original em inglês. Tradução nossa. (BURROUGHS, 2008. p. 113-114).

² Texto original em inglês. Tradução nossa. (BUI, Q.; MOREL, 2009. p. 103).

“in situ”. A densidade pode apresentar variação entre as diferentes camadas de compactação, fato que ocorre também em edificações em taipa (BUI *et al.*, 2008).

Após a produção das amostras, foram conduzidos os ensaios para a compressão simples. Para cada nível de carga, foram executados três ciclos, para determinar o módulo de elasticidade (BUI *et al.*, 2008).

Outro fator que apresentou variação, em laboratório, foi o teor de umidade. Esse fenômeno também ocorre nas paredes construídas das edificações em taipa, devido a alterações normais das condições de temperatura e umidade relativa do ar no ambiente externo. As amostras de laboratório tiveram seus valores de teor de umidade reduzidos com a passagem do tempo. O protótipo 1 terminado a três dias apresentou teor de umidade de 7 % e densidade de 2030 kg/m³. O protótipo 2, terminado com dezoito dias, apresentou teor de umidade de 4 % e densidade de 1980 kg/m³ (BUI *et al.*, 2008).

Maniatidis e Walker (2008)³ conduziram um estudo experimental sobre o comportamento da taipa de pilão sob carga de compressão simples, concêntrica e excêntrica. As amostras cilíndricas foram executadas usando-se solo com granulometria máxima de 20 a 25 mm. Para a utilização de um solo não estabilizado, a quantidade de argila (fração ligante) deveria ser suficiente para garantir a coesão de todas as frações do material da amostra, sem permitir a sua retração no processo de secagem. Para isso, determinou a porcentagem da fração da argila entre 8 a 15 % da mistura total. Na ausência de um solo com características aplicáveis à taipa de pilão, correções necessárias deveriam ser feitas nas porcentagens de cascalho, areia, argila e silte.

Foram realizados testes de resistência à compressão de pequena escala em corpos de prova cilíndricos de dimensões reduzidas, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, e de escala maior, em colunas com dimensões maiores de 300 mm x 300 mm de base e altura de 600 mm e colunas cilíndricas, com diâmetro de 300 mm e altura de 600 mm. As colunas foram compactadas com camadas entre 10 cm a 12 cm de altura (MANIATIDIS; WALKER, 2008).

No geral, as colunas apresentaram rupturas no terço superior da sua altura. Nas amostras de dimensões menores, com a aplicação de carga vertical, a ruptura ocorreu em um lado da seção, sem sinais de rupturas no outro lado. Entretanto, nas colunas, com o aumento da carga vertical, a ruptura à compressão nos estágios finais foi acompanhada por uma ruptura por tração superficial na seção e separação entre suas camadas. Foi presenciada uma variação significativa na performance entre as amostras cilíndricas de menor escala e as colunas, usando-se o mesmo

³ Texto original em inglês. Tradução nossa. (MANIATIDIS; WALKER, 2008. p. 232)

material. A redução da resistência à compressão e rigidez das colunas foi atribuída à variação da granulometria do material, com a inclusão de agregados com dimensões superiores a 20 mm, com a subsequente quebra dos agregados maiores durante a compactação e a variação dos esforços de compactação (MANIATIDIS; WALKER, 2008).

Bui e Morel (2009)⁴ desenvolveram um estudo sobre a anisotropia da taipa de pilão em duas escalas: a primeira, a partir da execução de amostras de paredes em taipa com dimensões próximas às paredes de edificações, construídas e testadas em laboratório, e a segunda em escala microscópica, analisando a heterogeneidade em cada camada do material buscando-se determinar a sua relação com as paredes em escala real. Foram conduzidos os ensaios de resistência à compressão nas direções perpendicular e paralela e calculado o módulo de elasticidade.

Antes da separação das camadas e depois da aplicação da carga, os autores observaram que o comportamento do material da taipa poderia ser caracterizado pelos seguintes parâmetros: resistência à compressão e módulo de elasticidade em ambas as direções (perpendicular e paralela às camadas). No entanto, após a separação das camadas, acharam relevante tratar a parede de taipa de pilão como um material descontínuo, com uma interface com interação eletrostática entre partículas entre cada uma das camadas da taipa de pilão. (BUI; MOREL, 2009).

Nas amostras representativas (escala de paredes reais), a anisotropia do material foi estudada usando-se os ensaios de compressão axial nas duas direções: perpendicular e paralela às camadas. Os resultados foram similares em ambas as direções, para resistência à compressão, módulo de ruptura e módulo de elasticidade no caso da carga maior que 0,2 MPa. No caso da carga menor que 0,2 Mpa, a diferença entre o módulo de elasticidade nas duas direções é de 5 a 25 %. Todos esses resultados possibilitaram aos autores intuir que a hipótese de a taipa de pilão ser um material isotrópico em primeira ordem, se as camadas se mantêm aderidas, é válida. Esses resultados justificaram a hipótese de a taipa de pilão ser um material isotrópico em escala macroscópica (paredes reais em pequena deformação) em estudos anteriores dos mesmos autores (BUI; MOREL, 2009). Ainda de acordo com os autores, esse assunto precisa ser mais pesquisado.

Recavarren *et al.* (2013) também elaboraram estudo sobre construção de paredes em taipa de pilão. Para os autores, essa técnica permite a construção de estruturas sustentáveis. Segundo eles, para a construção dessas paredes, é necessário ter à disposição solos argilosos,

⁴ Texto original em inglês. Tradução nossa. (BUI; MOREL, 2009, p. 3005)

que propiciam a coesão necessária para a estabilidade estrutural da taipa. O solo deve ser uma mistura de cascalho, areia, argila e silte. A argila, ou material ligante, deve ter índice de plasticidade acima de 5 %. Assim como os demais autores já citados, indica evitar o uso de solos superficiais por conter material orgânico, muito prejudicial à taipa de pilão.

Para o ganho de resistência e a cura apropriada das paredes, é importante a ausência de chuvas por pelo menos 10 dias após a sua execução. Ao ser recomeçada uma nova fiada sobre a anteriormente terminada, alinhar a forma de maneira a evitar que a posição das juntas da fiada superior coincida com a posição das juntas da fiada da camada abaixo. Esse cuidado assegura a construção das quinas sobrepostas em alternância, permitindo melhorar a força tensional nessa área da construção (RECAVARREN *et al.*, 2013).

Beckett *et al.* (2013) desenvolveram uma pesquisa buscando investigar as alterações ocorridas na macroestrutura das paredes em taipa de pilão com a compactação. De acordo com os autores, o comportamento mecânico do solo é controlado por suas microestruturas internas. Durante a compactação, mudanças da macroestrutura podem ocorrer, alterando suas características mecânicas. Investigaram, também, o efeito dessas alterações em camadas com diferentes alturas para compactação.

Para as amostras, foi empregado um solo com frações de 70 % de areia e 30% de argila e silte. Embora as paredes também contenham cascalho, devido às dimensões das amostras, o mesmo foi excluído da matriz. O solo apresentava limite de liquidez (LL) de 58,8 %, limite de plasticidade (LP) de 25,7% e índice de plasticidade (IP) de 33,1% (BECKETT *et al.*, 2013).

Os autores observaram que, nas amostras contendo apenas uma camada de compactação, a densidade macroestrutural se reduziu continuamente em direção à base da camada. É provável que o material da base da camada compactada seja mais fraco que o encontrado na superfície, apresentando aumento do tamanho dos poros e suas ligações. As amostras com dupla camada de solo mostraram que a macroestrutura da camada compactada não foi afetada pela compactação do material da camada acima. Com isso, as propriedades da taipa de pilão, compreendendo poucas camadas de compactação, podem ser consideradas representativas em relação às paredes reais. Mas, para tal comparação, a espessura da camada deve ser aproximada à de uma camada de parede real, devido à variação na densidade do material em relação à profundidade da mesma (BECKETT *et al.*, 2013).

Os resultados para amostras de uma camada mostraram que a macroestrutura do seu material compactado é heterogênea. Questões relacionadas à distribuição granulométrica do material das amostras e espessura das camadas da mesma devem ser tratadas com cuidado.

Bui *et al.* (2014) definem como tipo de solo apropriado, para a taipa de pilão, o argilo-arenoso com cascalho, sem presença de material orgânico, o qual deve ser preparado observando-se o teor de umidade ótimo, que permite um maior valor para densidade na compactação.

Os autores apontam em seu estudo que outros autores, como Jaquim *et al.* (2009 *apud* BUI *et al.*, 2014), estudaram a influência da absorção de umidade nas características mecânicas da taipa de pilão, verificando que ela seria uma fonte de força na taipa de pilão não estabilizada e que a resistência aumentava com a redução do teor de umidade. Entretanto, no estudo, o teor de umidade variava entre 5,5 a 10,2 %, enquanto o teor de umidade em paredes em taipa de pilão não estabilizada em condições normais varia entre 1 a 2%. A umidade contribui para a coesão do material terroso, mas também pode ocasionar a redução da resistência do mesmo. (JAQUIM *et al.*, 2009 *apud* BUI *et al.*, 2014)

1.7.4 Estudos sobre a influência da umidade nos protótipos de paredes em taipa de pilão

Hall e Djerbib (2003) desenvolveram um estudo sobre o ingresso de umidade em paredes de taipa de pilão. De acordo com os autores, o movimento da umidade é controlado pela descontinuidade do material usado em sua construção. Vos e Tannes (1968 *apud* HALL; DJERBIB, 2003) desenvolveram vários experimentos sobre o movimento da água por capilaridade e concluíram que esse movimento, através dos poros do material, por capilaridade, se dava duas vezes mais rápido na direção horizontal que na direção vertical, devido aos efeitos da gravidade (VOS; TANNES, 1968 *apud* HALL; DJERBIB, 2003)⁵. O fluxo da umidade é gerado no interior do material e sempre tende a ir para a superfície, onde a temperatura é mais baixa. Esse movimento pode resultar no transporte de sais presentes no solo, que são depositados na superfície das paredes, onde a evaporação ocorre. Como resultado, verificaram que, em geral, a taipa de pilão apresenta uma taxa inicial baixa de absorção, se comparada com alvenarias em material terroso, e absorve menor quantidade de água em um determinado intervalo de tempo. Esse fenômeno ocorre, provavelmente, devido à alta densidade e menor porosidade do solo compactado nessa técnica. Observaram também que o acabamento da superfície da face parece ser crucial para determinar o nível de umidade que penetra nas paredes de taipa de pilão. Esse movimento da umidade é controlado também pela distribuição granulométrica do solo e pela localização aleatória de suas partículas, com diferentes diâmetros

⁵ Texto original em inglês. Tradução nossa. (VOS; TANNES, 1968 *apud* HALL; DJERBIB, 2003, p. 271).

na face da parede, que também determina a quantidade de umidade a ser absorvida através da sucção capilar.

Ainda segundo os autores, em um bom solo, a proporção entre área de superfície total específica da fração de agregado e a massa da fração ligante parece estar ligada com a taxa de sucção por capilaridade. Quando a massa da fração ligante em um solo é menor que 10% da massa total, pode parecer que a proporção de umidade, por sucção de capilaridade, é significativamente aumentada. Verifica-se que, através de estabilização granular (modificação da distribuição granulométrica do solo através do acréscimo ou subtração de material), a taxa de ingresso de umidade por capilaridade poderá ser controlada nas paredes em taipa de pilão, que deve apresentar quantidade mínima de 10% do total da massa de fração ligante (HALL; DJERBIB, 2003).

Na segunda parte da pesquisa citada no item anterior, Hall e Djerbib (2005) afirmam que a umidade externa à parede em taipa de pilão pode penetrar na mesma através de diferentes mecanismos, entre eles: corrente de ar, chuvas, condensação (orvalho), infiltração, absorção da água (umidade) do solo e uso geral da edificação. Essa umidade pode causar efeitos físicos (manchas, apodrecimento do material, trincas devido à expansão e retração do material, diminuição da eficiência térmica do material) e químicos (perda de adesão entre os agentes ligantes e os agregados do solo, eflorescências). A diferença de pressão atmosférica entre o lado externo e o interno da parede induz à penetração e migração da umidade através da mesma, que se dá sempre em direção ao lado interno, onde a pressão é menor, buscando conservar a maior quantidade de energia no sistema. Esse movimento cria uma zona de pressão negativa na área interna da parede da edificação. Embora a mistura do material para as paredes de taipa de pilão apresente alto grau de homogeneidade, o mesmo é compactado em camadas, fazendo com que a parede seja um elemento não homogêneo. A porção inferior da camada apresenta um grau menor de compactação que a porção superior da mesma, criando uma separação entre as camadas de compactação. Com isso, pode-se assumir que ocorra um maior ingresso de umidade nos planos de compactação. Mais testes são necessários para a comprovação dessa hipótese (HALL; DJERBIB, 2005).

Ainda nessa pesquisa, perceberam que a coesão das partículas internas das amostras produzidas e a fricção entre elas podem ter sido reduzidas com a presença da umidade, tendo sido observadas falhas ocorridas nessas regiões úmidas. Durante a fase de trabalhos experimentais, notaram que a taipa de pilão tradicional (não estabilizada) poderá perder integridade estrutural quando significativamente umedecida, devido ao fato de que o solo (subsolo) não estabilizado é solúvel em água (HALL; DJERBIB, 2005).

Na terceira parte da pesquisa, os autores Hall e Djerbib (2005) estudaram a velocidade de absorção de umidade pela superfície da taipa de pilão. Trata-se de um material poroso – solo, e a absorção por capilaridade desse material depende, em parte, das propriedades do líquido a ser absorvido e da microestrutura do seu material de composição sólido e do raio dos poros, que irá variar de acordo com a natureza do material (tipo de solo), uma vez que ele exibe vários tipos de partículas de solo, com diferenciados tamanhos. Em geral, a taipa de pilão apresenta baixas taxas de absorção (fase inicial da infiltração de umidade na superfície da taipa). No entanto, considera-se que a questão não passa pela quantidade de água que penetra nas paredes, mas pela presença da umidade, que produz a diminuição da sua resistência à compressão, causando erosão e perda de sua integridade estrutural (HALL; DJERBIB, 2005).

Durante a fase experimental foi observado que a superfície finalizada da taipa de pilão influi na taxa de absorção de umidade pela parede. Uma compactação insuficiente pode deixar mais poros abertos ou defeitos na superfície, facilitando a entrada da umidade. O tipo de forma usada durante a compactação também interfere. Quando feita com uso de material mais liso ou com presença de óleos para facilitar sua remoção, permite acabamento liso, não coesivo, enquanto que as formas de madeira seca podem dar acabamento de superfície com textura mais áspera e poros mais abertos. As formas lisas permitem um acabamento mais uniforme, enquanto que as de material rugoso propiciam maior quantidade de poros abertos. No entanto, é necessário levar em consideração a granulometria do solo utilizado como fator determinante na produção de superfície acabada. Uma superfície de poros mais abertos permite a entrada de umidade em maior velocidade (HALL; DJERBIB, 2005).

Bui *et al.* (2014)⁶ também estudaram a influência da umidade nas características mecânicas das paredes em taipa de pilão, com diferentes tipos de solos e uma grande variação de teor de umidade, abrangendo desde o estado úmido, após a execução da parede (teor de 11 %) ao estado seco (teor entre 1 a 2 %). As amostras foram fabricadas e submetidas ao ensaio de compressão simples, com diferentes teores de umidade, os quais correspondiam a diferentes valores de absorção.

As amostras foram elaboradas com a porcentagem de argila dispendo de valores dentro dos intervalos de 5 a 10% da mistura. O índice de atividade das argilas foi calculado, possibilitando a identificação da composição mineralógica do solo. As camadas de compactação da taipa de pilão, nas paredes, medem em torno de 10 cm. No entanto, para a execução das amostras, levando-se em consideração as suas dimensões reduzidas, as camadas

⁶ Texto original em inglês. Tradução nossa. (BUI *et al.*, 2014. p. 164)

para a compactação foram estabelecidas em 5 cm de altura. Para correlacionar os resultados da compactação feita em laboratório em relação a uma compactação de paredes de taipa de pilão, foi necessário fazer a calibração do equipamento de compactação (BUI *et al.*, 2014).

A partir da realização dos ensaios de compressão simples, pôde-se verificar que a força de compressão diminuía com o aumento do teor de umidade. Quando esse teor se encontra abaixo de 4 %, a variação da resistência à compressão não é significativa, sendo quase constante para os solos arenosos e sofrendo uma diminuição de, aproximadamente, 10% para solos argilosos. Quando o teor de umidade está acima de 4%, a resistência à compressão diminui rapidamente, em solos não estabilizados (sem adição de cal ou cimento) (BUI *et al.*, 2014).

Ao ser realizado um estudo sobre os efeitos da sucção, percebeu-se que ela depende do tipo de solo, estando relacionada à porcentagem e ao tipo de argila. A absorção apresenta uma correlação com a resistência a compressão em paredes de taipa de pilão, executada com a utilização de solo não estabilizado. (BUI *et al.*, 2014).

Em solos arenosos, com baixo teor de argila, a coesão é proporcionada pela força da capilaridade. Nos solos argilosos, a coesão é propiciada não apenas pela capilaridade, mas também pelas forças de atração das partículas da argila. De acordo com a pesquisa, pode-se verificar que o solo usado em taipa de pilão não estabilizada é sensível à presença de água - teor de umidade (BUI *et al.*, 2014).

Bui *et al.* (2014)⁷ realizaram ensaios de resistência à compressão e à tração e verificaram a existência de uma relação entre ambas. A resistência à tração do material se mostrou similar no interior das camadas de terra compactada das amostras e na interface entre essas. Esse resultado confirma a hipótese de a taipa de pilão apresentar um meio isotrópico, apesar das diferenças de densidade, maiores valores obtidos no topo da camada (área mais próxima à superfície que recebe o impacto da compactação) e decrescendo em sentido à base da camada, apresentadas pelo material. Foi verificado que a resistência à tração e a resistência ao cisalhamento podem corresponder a 10% do valor da resistência à compressão, antes de ser calculada considerando fatores de segurança, podendo ser considerada não linear nesse tipo de material. Com a aplicação do coeficiente de segurança para a força de compressão, a resistência ao cisalhamento será equivalente a 6,7 % da resistência à compressão concebida. Esse resultado é similar ao preconizado pela norma da Nova Zelândia - Standards NZS 4297:1998. (BUI *et al.*, 2014).

⁷ Texto original em inglês. Tradução nossa. (BUI *et al.*, 2014. p. 302)

1.8 A Tecnologia do ultrassom

O aparelho ultrassom é composto por um módulo dotado de fonte geradora de impulsos elétricos, circuitos eletrônicos, um dispositivo para registro de tempo de propagação da onda, cabos coaxiais para condução dos pulsos elétricos e dois transdutores piezoelétricos de contato, sendo um emissor e o outro o receptor.

O ensaio “consiste na medição do tempo de propagação de ondas ultrassônicas através do material, entre o emissor e o receptor.” A velocidade média de propagação da onda é obtida a partir da razão entre o comprimento percorrido pela onda entre os transdutores e o seu tempo de propagação (MALHOTRA, 1984 *apud* EVANGELISTA, 2002).

Ainda de acordo com estudos anteriormente conduzidos, foi demonstrado por alguns autores, que a velocidade de ondas ultrassônicas que atravessam o material está diretamente relacionada à densidade e às propriedades elásticas desse material. O coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade e a massa específica do material são os principais fatores que interferem na velocidade da onda (PUNDIT, 1994; EVANGELISTA, 2002).

Para a realização dos ensaios, os transdutores devem estar totalmente em contato com a superfície, durante a transmissão e recepção do pulso ultrassônico. A existência de ar entre a superfície dos transdutores e a superfície da amostra introduzirá erro na leitura do tempo, uma vez que o pulso praticamente não consegue ser transmitido nesse meio. O emprego de um acoplante tipo óleo, gel, graxa ou vaselina, evita a ocorrência desse problema. Para superfícies de grande rugosidade, é preciso utilizar um acoplante de alta viscosidade (BANDEIRA, 2009 *apud* PEIXOTO, 2011).

A NBR 8802/1994 determina que, durante o ensaio, os transdutores (o emissor e o receptor) podem ser posicionados a partir de três formas de arranjos:

- 1) Transmissão direta, com os transdutores nas faces opostas do material.
- 2) Transmissão indireta, com os transdutores na mesma face.
- 3) Transmissão semidireta, com os transdutores nas faces adjacentes do material.

Esses arranjos são mostrados na Figura 09.

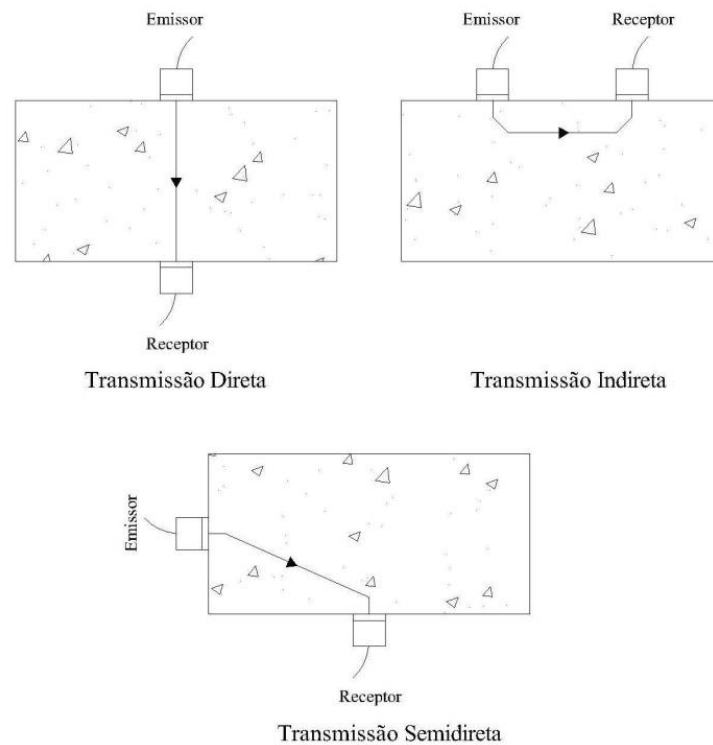


Figura 09: Tipos de transmissão no ensaio ultrassônico
 Fonte: NBR 8802/1994. Adaptada pela autora, 2016.

1.9 Características da onda ultrassônica

As ondas ultrassônicas podem ser longitudinais (compressão), transversais (cisalhamento) e de superfície. As principais características físicas são frequência, período, amplitude, velocidade e comprimento de onda. A velocidade de onda independe do tamanho e da forma do elemento a ser ensaiado. A relação entre velocidade de propagação da onda sonora (v), a frequência (f) e o comprimento de onda (λ) é dada pela seguinte expressão:

$$v = \lambda * f$$

Essa equação é válida para um meio de extensão infinita, portanto, para que esse requisito seja atendido em um elemento de dimensões finitas, é necessário que sua menor dimensão seja maior que o comprimento de onda.

De acordo com Naik, Malhotra e Popovics (2004 *apud* MEDEIROS, 2007, p.37), a distância percorrida pela onda ultrassônica e a sua frequência não devem influenciar o seu tempo de propagação e, conseqüentemente, a sua velocidade.

Sturup, Vecchio e Catarin (1984 *apud* MEDEIROS, 2007, p.38) verificaram que, em caso de pequenas distâncias, menores que 50 mm, ocorrem significativas alterações no valor da velocidade das ondas.

Transdutores de frequências menores (20 kHz) fornecem comprimentos de onda maiores ($\lambda = 200$ mm), possuem maior energia e são utilizados para medidas em peças de maiores dimensões (até 30 m). Já os transdutores de frequências maiores (200 a 1000 kHz) fornecem comprimentos de onda menores ($\lambda \leq 20$ mm), sendo mais apropriados para medidas em peças de pequenas dimensões (50 mm ou menos). Entre os transdutores mais comercializados, o mais utilizado é o de frequência de 54kHz (BUNGEY, 1989 *apud* MEDEIROS, 2007. p.38).

A relação entre velocidade e o comprimento de onda “ λ ” é diretamente proporcional, ou seja, maiores velocidades estão associadas a maiores comprimentos de ondas (BUNGEY, 1989 *apud* MEDEIROS, 2007. p.38).

1.10 A Tecnologia do ultrassom na determinação de propriedades do solo

Estudos sobre a possibilidade de emprego do ultrassom na determinação de propriedades do solo vêm sendo desenvolvidos por diversos autores, em diversas áreas do conhecimento, relacionadas ao material solo, entre elas: engenharia - mecânica dos solos, arquitetura – construções com terra e ciência da conservação.

Khazin e Goncharov (1974) conduziram pesquisa com o emprego de ultrassom para a medição da resistência dos solos à aplicação de cargas. Durante o experimento, usaram ondas ultrassônicas longitudinais que resultam em maiores velocidades e penetração mais profunda nos corpos de prova. A princípio, efetuaram ensaios para determinar a influência de fatores internos e externos (temperatura, umidade, porosidade, compactação) na velocidade ultrassônica. Concluíram que a velocidade ultrassônica, em solos congelados, depende de vários fatores, entre eles: temperatura, teor de umidade, teor de gelo, granulometria do solo. Posteriormente, conduziram experimentos para determinar a correlação entre ondas sonoras e características de resistência dos solos congelados (compressão, tensão, cisalhamento).

Os valores encontrados para o coeficiente de Poisson, a partir de ensaios de aplicação de carga e ensaios de ultrassom em solos congelados, diferem entre si. Na pesquisa, os autores não estabeleceram uma relação entre esses valores. No entanto, afirmam que os solos congelados podem ter sua capacidade de resistência classificada a partir do emprego de ultrassom. (KHAZIN; GONCHAROV, 1974).

Wang *et al.* (2005), em seu estudo, citam Nakano e Arnold (1973), que realizaram ensaios ultrassônicos em solos saturados e concluíram sobre a existência de forte relação entre o teor de água em um solo e a velocidade de onda. Verificaram, também, a tendência de decréscimo da velocidade de onda com o aumento da temperatura em solos congelados.

Yesiller *et al.* (2000) desenvolveram um estudo com o intuito de investigar o uso de métodos ultrassônicos na determinação de características de compactação de solos argilosos. Foi demonstrado que a velocidade ultrassônica cresceu com o aumento da densidade seca, até esta última atingir o teor de umidade ótimo. Após esse ponto, mesmo com o aumento da umidade, a velocidade ultrassônica diminuiu. A velocidade máxima foi obtida, aproximadamente, no ponto de densidade máxima e índice de vazios mínimo. O aumento da porcentagem de argila e da plasticidade do solo contribuiu para uma diminuição da velocidade ultrassônica no mesmo. De acordo com os autores, velocidades maiores de ultrassom se associam a solos com alta densidade e baixo teor de umidade. Ainda nessa pesquisa, os autores observaram que, na maioria dos casos, a velocidade obtida a partir da transmissão direta não é similar à obtida via transmissão indireta, embora essa última possa ser empregada em ensaios. Por isso, é sugerido um fator de correção para converter velocidade indireta em direta.

Wang *et al.* (2005) estudaram o comportamento da velocidade da onda ultrassônica de dilatação e a velocidade de onda ultrassônica de cisalhamento em três diferentes tipos de solos congelados, em função da temperatura. Concluíram que maiores velocidades de propagação de onda são encontradas em solos de granulometria mais grossa. Repararam, também, que velocidade ultrassônica tende a diminuir com o aumento da temperatura e o descongelamento do solo.

D'Orazio *et al.* (2007) notaram, em seu trabalho, as seguintes dificuldades encontradas para inspecionar compósitos usando a tecnologia do ultrassom: falta de normatização referente a diferentes espessuras de amostras e classificação das técnicas usadas para fazer a comparação dos sinais ultrassônicos e detectar pontos internos nas amostras. É necessário padronizar o material e as dimensões das amostras a serem submetidas aos ensaios e relacionar às faixas de frequências apropriadas às espessuras das amostras, permitindo a comparação entre diferentes sinais emitidos. Para amostras com menor espessura devem ser empregados transdutores de menores frequências, e para amostras mais espessas, transdutores com maiores frequências; no entanto, essa última medida pode acarretar perda de leitura de defeitos superficiais.

1.11 A Tecnologia do ultrassom no estudo de patologias em edificações

O patrimônio arquitetônico, incluído na categoria de bem cultural, reflete as características de uma sociedade em um determinado período de sua história. A preservação de uma edificação antiga garante não apenas a transmissão da identidade cultural do local de sua inserção, mas também a transmissão do conhecimento técnico empregado em sua construção. O edifício sempre será uma preciosa fonte de informação, seja ela estética, técnica ou histórica. A história da arquitetura e da civilização estarão sempre e profundamente ligadas uma à outra. A salvaguarda do patrimônio edificado significa a proteção e o resguardo da história da atividade humana naquela localidade.

No item 3.1 do capítulo 3 – Apresentação e discussão de resultados, foram elencadas algumas construções erguidas em taipa de pilão que ruíram com o tempo, configurando, assim, uma perda cultural e de fonte de conhecimento técnico irreversível.

Para a elaboração de estratégias adequadas de conservação e restauração de um bem cultural, é necessário conhecer, profundamente, suas características construtivas e o estado em que o mesmo se encontra, no momento. Atualmente, os ensaios realizados visando conhecer as características físicas e mecânicas da matéria que compõe essas estruturas arquitetônicas são destrutivos, envolvendo a retirada de corpos de prova e, conseqüentemente, aumentando os danos existentes. Como alternativa para eliminar tal problema, na fase de diagnóstico, a opção pelo emprego de ensaios não destrutivos para a verificação do desempenho físico e mecânico de estruturas vem sendo mais difundida e defendida pelos profissionais da área.

Os ensaios não destrutivos podem ser empregados tanto em estruturas recentes, como forma de monitorar a qualidade e a resistência dos materiais empregados em sua execução, como em estruturas históricas, na realização de diagnóstico de patologias e avaliação da resistência do material e sua capacidade de resistir aos esforços e cargas inerentes à construção ou provenientes de fatores externos (umidade, chuvas, ventos, movimentações de terreno, novas construções nas proximidades, atividades extrativistas – minas – fatores de degradação química e biológica etc.) (EVANGELISTA, 2002; REZENDE, 2009).

Entende-se por avaliação não destrutiva o processo científico usado para a identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma amostra de um determinado material, sem a necessidade de recorrer à retirada de corpos de prova. Este tipo de ensaio deixa apenas pequenos danos facilmente reparáveis após os ensaios, sem causar perda na capacidade de resistência do material (EVANGELISTA, 2002; REZENDE, 2011).

Os ensaios não destrutivos começaram a ser empregados na avaliação e detecção de defeitos em metais e ligas. Passaram a ser aplicados em materiais como concreto também. (BANDEIRA, 2009).

Foram também realizadas pesquisas sobre emprego do ultrassom em estruturas de madeira, na Universidade Federal de Santa Catarina, por Valle (2004), e no departamento de engenharia civil e na escola de engenharia civil da UFMG, por Teixeira (2009) (PEIXOTO, 2011).

Vantagens atribuídas aos testes não destrutivos em relação aos testes destrutivos (REZENDE, 2011; BANDEIRA, 2009):

- 1) Realização dos testes de resistência em estruturas “in loco”.
- 2) Redução de tempo de realização dos testes.
- 3) Simplificação dos trabalhos na realização dos testes.
- 4) Eliminação da necessidade de retirada de corpos de prova, com consequente minimização de danos causados às estruturas durante os testes.
- 5) Uso de equipamentos de baixo custo.
- 6) Obtenção de resultados mais precisos.
- 7) Redução de custos em obras de restauro de estruturas antigas.

O emprego do ultrassom viabiliza a avaliação da integridade de uma parede erguida com o emprego de material terroso, como a taipa de pilão, propiciando verificar o seu comportamento físico e mecânico, a qualidade do seu material compositivo e a sua resistência diante de esforços aos quais está submetida.

De acordo com Almeida (1993 *apud* BANDEIRA, 2008.), a correlação entre resistência à compressão e a velocidade ultrassônica pode ser avaliada em função do coeficiente de correlação (r^2) e ser classificada qualitativamente, conforme indicado na Tabela 1:

TABELA 1
Classificação da qualidade entre resistência e velocidade ultrassônica

Valores de r^2	Classificação
1,00 a 0,81	Bom
0,80 a 0,50	Razoável
0,49 a 0,25	Baixo
0,24 a 0,00	Muito baixo

Fonte: ALMEIDA, 1993 *apud* BANDEIRA, 2008.

1.12 A normalização existente para ensaios via emprego do ultrassom

Embora o emprego de ultrassom na detecção de patologias já esteja sendo estudado há alguns anos, a utilização desse método para a verificação das características físicas e mecânicas de um material ainda está mais restrita ao concreto e metais. Mas, como já descrito na fase anterior deste projeto de pesquisa, a transferência do uso dessa tecnologia para outros materiais, tais como madeira e solo, já vem sendo desenvolvida.

A normalização existente é restrita ao concreto. A seguir, normas nacionais e internacionais existentes, que estabelecem procedimentos para a execução desse tipo de ensaio neste material:

- British Standards Institution – BSI 1881: Part 203:1986 – *Testing concrete – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete* (BSI, 1986).
- American Society for Testing and Materials ASTM: C597-83/1991 – *Standard test method for pulse velocity through concrete* (ASTM, 1991).
- NBR 8802/1994 – *Concreto endurecido – Determinação da velocidade da propagação de onda ultrassônica* (ABNT, 1994).
- Comité Mercosur de Normalización, NM 58/1996 – *Hormigón endurecido – Determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos* (COMITÉ MERCOSUR, 1996 *apud* EVANGELISTA, 2002; BANDEIRA, 2009).
- Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux – RILEM NDT 1/1972 – *Testing of concrete by the ultrasonic pulse method* (RILEM, 1972 *apud* EVANGELISTA, 2002; BANDEIRA, 2009).

Essas normas descrevem os métodos de ensaio não destrutivo, via ultrassom, expondo os procedimentos a serem executados na verificação da qualidade do concreto, detecção de vazios e rachaduras, mudanças nas propriedades do concreto e verificação da estrutura para estimar a gravidade e a intensidade dos processos de deterioração ou quebras que possam estar ocorrendo no material inspecionado.

Segue, na Tabela 2, o quadro-resumo das normas citadas.

TABELA 2

Comparativo entre procedimentos de normas para ensaio de ultrassom

Procedimentos	Normas			
	RILEM NDT/1972	BSI 1881: Part 203/1986	ASTM C597/1983	NM 58/1996 NBR 8802/1994
Frequência do ultrassom	20 a 200 kHz	20 a 150 kHz	10 a 150 kHz	Acima de 20 kHz
Superfície	Plana	Seca ao ar, limpa e plana.	Seca ao ar, limpa e plana	Seca ao ar, limpa e plana
Área de ensaio para verificar uniformidade de elementos estruturais grandes	-	-	-	1 m ²
Distância entre os transdutores	Precisão ± 1 %	Precisão ± 1 %	Precisão = 0,5 %	Precisão ± 1 %
Medições de velocidade	-	Precisão ± 0,5 %	Precisão = 0,5 %	Precisão ± 1 %

Fonte: EVANGELISTA, 2002.

1.13 Verificação da integridade mecânica de paredes de taipa de pilão utilizando a técnica do ultrassom

Cada vez mais, a atividade restauradora evidencia a necessidade do emprego dos ensaios não destrutivos para a verificação da integridade mecânica das edificações erguidas em arquitetura de terra e mapeamento de suas patologias estruturais. Pesquisas sobre o emprego dessa tecnologia passam a ser desenvolvidas por diversos profissionais da área, com intuito de contribuir para a melhora qualitativa das obras de restauração e conservação desses bens culturais, os quais compõem um rico patrimônio arquitetônico.

Algumas pesquisas já foram conduzidas no sentido de viabilizar o emprego do ultrassom em paredes em taipa de pilão.

Nos estudos de Bandeira (2009) foram moldados 35 corpos de prova cilíndricos, com solo compactado, tendo as seguintes dimensões: 35 mm de diâmetro e 87 mm de altura. Essas amostras foram submetidas ao ensaio de ultrassom, realizado com o equipamento *Portable*

Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester – PUNDIT (1994), empregando transdutores com frequência de 54 kHz. O ensaio foi baseado em metodologias afins, como a NBR 8802/1994 (ABNT 1984f) – *Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*, tendo em vista a ausência de norma específica para corpos de prova em materiais terrosos. Posteriormente, foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples, desenvolvido de acordo com a NBR 12770/1984 (ABNT, 1984e) – *solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada*. A partir dos dados obtidos por ambos os ensaios, foram gerados gráficos que comprovaram a existência de correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica em corpos de prova feitos em material terroso. Segundo Bandeira (2009, p. 77), “existe uma forte correlação entre tensão de ruptura e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, cujo coeficiente de correlação foi igual a 0,96”.

Hoffmann e Gonçalves (2010) desenvolveram um estudo de análise da qualidade da taipa de pilão por meio de ondas ultrassônicas. Afirmam que esse tipo de aplicação é possível, uma vez que a matriz de rigidez do material pode ser obtida por meio da propagação de ondas. E os parâmetros que caracterizam o material – módulo de elasticidade longitudinal, módulo de elasticidade transversal e o coeficiente de Poisson – compõem a matriz de flexibilidade, que é inversa à primeira. De acordo com os autores, Christoffel (BUCUR, 2006 *apud* HOFFMANN; GONÇALVES, 2010) elaborou equações que correlacionam a velocidade de propagação da onda ultrassônica em sólidos aos termos da matriz de rigidez. Para a obtenção de resultados válidos, é necessário que o comprimento de percurso da onda seja maior que o comprimento da própria onda. Para tal, é fundamental o emprego de frequência adequada às dimensões do corpo de prova. Esse método também permite a determinação de diferenças de comportamento do material conforme o eixo do carregamento. Os materiais que apresentam respostas semelhantes para todos os eixos são classificados como isotrópicos. Para determinar essa isotropia, utilizam-se relações entre velocidades em diferentes direções da amostra. Também o estudo da atenuação de sinal pode oferecer informações sobre a homogeneidade do material, sendo avaliada, nesse caso, a amplitude do sinal.

Os pesquisadores confeccionaram corpos de prova cilíndricos com solo definido como arenoso, com 33,3% de grãos finos, menores que 0,075 mm e não plástico. Foram moldados no teor de umidade ótima de compactação (Proctor normal) determinado em 11,37%. A moldagem foi feita partindo do solo seco e peneirado e empregado o dosador de água, limitando a variabilidade do sistema construtivo, quando comparado ao canteiro de obras.

Para os ensaios com ultrassom, procederam a calibragem do equipamento, antes do início de cada medição, em uma peça de acrílico, cuja velocidade de onda é previamente

conhecida. Os ensaios foram realizados em duas etapas, sendo a primeira após sete dias da moldagem dos corpos de prova e a segunda após noventa dias. Na primeira etapa, foram realizadas medições nas faces planas, com ondas longitudinais e transversais de 1 MHz, sempre na direção da compactação do corpo de prova. O transdutor longitudinal emite ondas que se propagam e polarizam na mesma direção, e o transdutor de cisalhamento emite ondas que se propagam em uma direção e polarizam na direção perpendicular. A matriz de rigidez foi determinada a partir das velocidades longitudinais e transversais obtidas no ensaio. Na segunda etapa, buscando avaliar o comportamento do material, em termos de isotropia, os transdutores foram posicionados de forma que a onda percorresse o corpo de prova em três dimensões perpendiculares (Figura 10). Foram realizadas três medições em cada posição. As medições perpendiculares à altura foram feitas em duas alturas distintas.

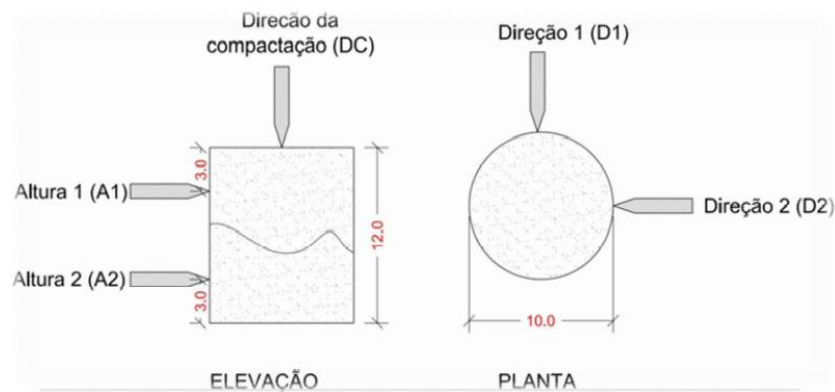


Figura 10: Ensaios de Hoffmann e Gonçalves (2010) - Medições em três direções.

Fonte: HOFFMANN; GONÇALVES, 2010. p. 5. Adaptado por PEIXOTO, 2016.

Determinados os tempos de propagação das ondas, foram calculadas as velocidades. A relação entre essas velocidades permitiu a avaliação da anisotropia do material.

Após as medições, os corpos de prova foram capeados com solução de enxofre e ensaiados à compressão estática. Esses ensaios foram realizados visando à determinação da resistência à compressão e o módulo de deformação tangencial inicial do solo.

Hoffmann e Gonçalves (2010) verificaram que as velocidades obtidas com transdutor de 45kHz, na segunda etapa, foram superiores às obtidas com transdutor de 1 MHz, na primeira etapa. Segundo os autores, esse resultado está associado às condições de umidade dos corpos de prova na ocasião dos ensaios.

Os autores verificaram ausência de diferença significativa entre as velocidades perpendiculares ao eixo de compactação e ocorrência de diferença significativa para velocidade

média no sentido de compactação. A menor velocidade na direção de compactação pode ter sido ocasionada pela zona de transição entre camadas de solos no processo da moldagem. Tais resultados indicam que o solo apresenta isotropia transversal.

Ainda de acordo com Hoffmann e Gonçalves (2010), o módulo de elasticidade obtido via ensaios de ultrassom foi bem próximo ao obtido por meio do ensaio à compressão, mesmo considerando o cálculo para material isotrópico. Segundo os autores: “Os resultados das propriedades estão dentro de intervalo esperado para o material analisado e os erros”. (HOFFMANN; GONÇALVES, 2010, p.9).

Para os autores, se o solo compactado não tivesse sido considerado para simplificação de cálculos, como isotrópico, os ensaios produziram resultados ainda mais adequados.

Rezende e Peixoto (2011) realizaram pesquisa sobre ensaios de ultrassom em miniparedes de taipa de pilão. Nesse estudo foram construídos quatro painéis, com as seguintes dimensões: 2,0 m de comprimento, 1,20 m de altura e 0,44 m de espessura (equivalente à medida de dois palmos, usada antigamente na arquitetura em taipa). Foram utilizadas formas confeccionadas de modo semelhante às de concreto, com travejamento interno (buscando não permitir a deformação da forma durante a compactação do solo), não sendo utilizado o taipal clássico, devido à falta de acesso à mão de obra especializada naquele momento. A compactação foi feita com o uso de um instrumento adaptado a partir de pedaços de tronco de árvores, assemelhando-se a um pilão. O solo foi sendo apiloado dentro da forma, em camadas de aproximadamente 15 cm.

O primeiro painel foi considerado já defeituoso – em sua execução, o solo foi apiloado, encharcado por água de chuva. Os demais foram compactados, com a terra apresentando teor de umidade mais baixo.

Todos os painéis foram submetidos ao ensaio ultrassônico. O aparelho utilizado para os ensaios foi o *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* – PUNDIT (1994), empregando transdutores com frequência de 82kHz, 150kHz e 200kHz. Assim como na primeira fase deste projeto de pesquisa, os ensaios foram conduzidos baseando-se em metodologias afins, como a NBR 8802/1994 (ABNT 1984f) – *Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. Os ensaios não produziram resultados válidos, exibindo ausência de leituras nos painéis 2, 3 e 4 e leituras produzindo dados considerados inválidos no painel 1 (PEIXOTO, 2011).

Devido à ausência de dados válidos, foram retiradas amostras de cada um dos painéis com dimensões aproximadas de 10,0 x 10,0 x 44,0 cm. Novamente foram realizados ensaios com o ultrassom, sendo empregado o mesmo equipamento e a mesma metodologia.

No painel 1, foram verificados o maior tempo médio de propagação e a menor velocidade média de propagação, devido à maior presença de água em sua constituição. Os painéis 2 e 3 exibem valores aproximados para tempo médio de propagação e velocidade média de propagação de onda, verificando-se uma diminuição do tempo e um aumento da velocidade em relação ao painel 1. Já o painel 4, compactado com a terra mais seca, exibiu o menor tempo médio de propagação e a maior velocidade de propagação de onda entre todos. A partir da tabulação desses dados, percebe-se que a umidade apresenta relação diretamente proporcional ao tempo de propagação da onda e inversamente proporcional à sua velocidade ao atravessar o corpo de prova (PEIXOTO, 2011).

Com esses dados, foi possível elaborar gráficos, empregando-se as equações desenvolvidas a partir dos resultados finais obtidos na pesquisa de Bandeira (2009). Os gráficos de tensão de ruptura x velocidade ultrassônica e velocidade ultrassônica x densidade, gerados a partir da inserção dos valores produzidos nas medições dos blocos de taipa na equação dos gráfico originais, não apresentaram curvas semelhantes aos mesmos. Somente o gráfico teor de umidade x velocidade ultrassônica mostrou curva semelhante ao gráfico original (PEIXOTO, 2011).

De acordo com a pesquisa de Peixoto (2011), alguns fatores relacionados ao aspecto operacional da execução dos painéis foram destacados como responsáveis pela produção de resultados inválidos durante os ensaios do ultrassom. São eles:

- O emprego de solo inapropriado, apresentando porcentagens de silte e argila superiores ao recomendado.
- A forma de estocagem do solo (estocado em montes, coronamento excessivo).
- Tipo de forma executada (semelhante à de concreto).
- Instrumento de compactação inadequado.
- Emprego de mão de obra não especializada.
- Transdutor utilizado (82 kHz, 150 kHz e 200 kHz).
- Faixa de leitura do equipamento (0-999).

Rezende *et al.* (2011) deram prosseguimento à pesquisa buscando corrigir os equívocos cometidos na fase anterior.

Para a execução do quinto painel, foi construído, por um carpinteiro⁸, o taipal clássico, exibido na Figura 11, com emprego de madeira de lei, para que ele estivesse apto a suportar a pressão sofrida durante a compactação. Internamente possui as seguintes dimensões: 1,5 m de

⁸ Taipal executado pelo carpinteiro Sr. Olandino Raimundo do Nascimento

comprimento, altura de 0,90 m e 44 cm de espessura (medida equivalente a dois palmos, usada antigamente na arquitetura de taipa, no caso de paredes menos espessas) (REZENDE *et al.*, 2011).



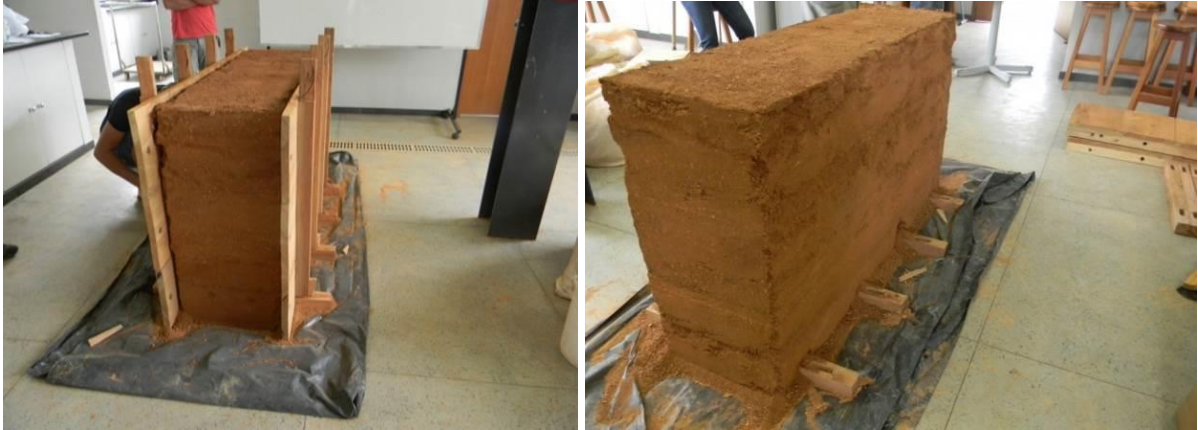
Figura 11: Taipal.

Fonte: Acervo da autora, 2011.

O solo selecionado foi coletado e doado pela empresa Engesolo. Foi classificado, segundo a ABNT, como uma argila areno-siltosa de cor amarela, altamente plástica, com pouquíssimo pedregulho.

Ainda de acordo com os autores, a compactação foi feita a partir do uso do pilão em madeira, com base cônica, instrumento ideal para este trabalho. Cada camada de terra a ser apiloada tinha uma altura aproximada de 15 cm antes da compactação e, depois de apiloada, passou a ter altura de 10 cm, aproximadamente.

A técnica da taipa de pilão permite a remoção da forma logo após a compactação do solo, para a execução da parede, portanto o taipal foi retirado assim que finalizados os trabalhos de compactação da parede – protótipo, conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13.



Figuras 12 e 13: Retirada da forma.

Fonte: Acervo da autora, 2011.

Os ensaios de ultrassom, realizados no painel 5 (Figura 14), produziram resultados satisfatórios. Foram realizados, segundo norma BSI 1881 Parte 206 – *Ultrasonic Test for concrete*, através do equipamento modelo PUNDIT, fabricado pela empresa CNS, e utilizados os transdutores de 54 kHz com sistema de medição indireto e transdutores de 500 kHz com sistema de medição direto. O acoplante utilizado foi o gel (REZENDE *et al.*, 2011).



Figura 14: Ensaio de ultrassom no painel 5.

Autoria: Acervo da autora, 2011.

Segundo os autores, nos ensaios executados com o uso do transdutor com frequência de 54 kHz, o ponto 1 apresentou o menor tempo médio de propagação e maior velocidade média de propagação que o ponto 2. Verificou-se maior amplitude no ponto 1 e maiores variância e desvio-padrão no ponto 2.

Ainda no ponto 1, foram realizados ensaios com transdutores com frequência de 500 kHz. Foi verificada a ocorrência de maiores tempos para a propagação da onda. Esse fenômeno pôde ser explicado devido à distância a ser percorrida. Nos ensaios indiretos, a distância entre transdutores era de 5 cm, e nos ensaios diretos (sistema usado com o transdutor de 500 kHz), a distância era de 44 cm. No entanto, foram registradas maiores velocidades de propagação da onda, provavelmente devido à frequência do transdutor e ao sistema direto de transmissão. Ainda nesse ensaio, foram notados maior variância e desvio-padrão entre os tempos marcados e velocidades obtidas pela onda ultrassônica (REZENDE *et al.*, 2011).

Os autores encontraram os seguintes resultados para os ensaios com transdutores de 54kHz:

- As maiores velocidades de onda correspondem às maiores tensões de ruptura.
- Verificou-se que maiores valores de massa específica seca apresentados pelo solo correspondem às maiores velocidades de onda.
- As maiores velocidades ocorrem em solos que apresentam menores teores de umidade.

Para os ensaios com transdutores de 500 kHz, os resultados gerados foram semelhantes aos realizados com transdutores de 54 kHz:

- As maiores velocidades de onda correspondem às maiores tensões de ruptura.
- Verificou-se que maiores valores de massa específica seca apresentados pelo solo correspondem às maiores velocidades de onda.
- As maiores velocidades ocorrem em solos que apresentam menores teores de umidade (REZENDE *et al.*, 2011).

Durante a pesquisa, a equipe técnica optou por revestir uma das faces do protótipo 5 e proceder aos ensaios de ultrassom, de acordo com a norma BSI 1881 Parte 206 – *Ultrasonic Test for concrete*. Utilizou-se o equipamento do modelo TICO, fabricado pela empresa CNS, e os transdutores de 54 kHz com sistema de medição indireto. O acoplante escolhido foi o gel. Esse ensaio teve como objetivo avaliar a qualidade de taipa de pilão por ultrassonografia, após preparo de superfície, com 4 (quatro) opções distintas, sendo elas:

- Aplicação de fina camada de calda de cal e água.
- Aplicação de fina camada de solo, cal a 6 % e água.
- Aplicação de camada de 10 mm de argamassa areia, cal, cimento e água e na proporção volumétrica de 6,66 : 2 : 1 : 2,8.
- Aplicação de verniz acrílico sobre taipal (REZENDE *et al.*, 2011).

De acordo com o resultado final do ensaio do ultrassom no protótipo 5 com revestimento, foi possível, para os autores, concluir:

- É possível correlacionar velocidade de pulso ultrassonográfico em taipa de pilão, desde que a superfície seja previamente tratada e preparada por ação indireta de camada regularizadora intermediária e adequadamente estabilizada.
- Pode-se usar gel acrílico, caldas de cimento, caldas de cal. Entretanto, em decorrência do uso de caldas, o fenômeno de retração será intenso, e a superfície de teste estará muito fissurada (REZENDE *et al.*, 2011).

Comparando os resultados das medições com o protótipo sem revestimento e depois com o protótipo tendo recebido uma camada de revestimento, foi verificada a ocorrência dos seguintes fenômenos:

- O tempo de propagação de onda na parede sem revestimento é maior que na parede revestida.
- A velocidade de propagação da onda ultrassônica é maior na parede com revestimento (REZENDE *et al.*, 2011).

Com o intuito de auxiliar a atividade restauradora, no sentido de melhorar as técnicas de verificação de patologias em paredes de taipa de pilão, outros pesquisadores também estão testando a possibilidade do emprego de testes de ultrassom nessas paredes.

Liang *et al.* (2013) utilizaram ensaios não destrutivos, via ultrassom e esclerômetro, para investigar construções erguidas em taipa de pilão na Vila de Hakka, situada na região de Yongding, Fujian, na China. A pesquisa de Liang *et al.* (2013) consistia na identificação dos materiais de constituição da taipa de pilão, na verificação da sua durabilidade; na investigação da integridade das paredes das construções de Hakka sob aplicação de cargas, incluindo possíveis modos de falha, caso ocorram rachaduras; análise do processo de transferência de calor através da parede, para verificar o conforto térmico e eficiência energética; avaliação dos possíveis benefícios do material em relação à energia incorporada (consumo) e performance da estrutura para potencial emprego em construções modernas.⁹

Os autores afirmam que o ultrassom pode ser usado de maneira a verificar as condições de resistência de paredes em taipa de pilão, sem causar danos a essas estruturas históricas. Esse tipo de ensaio de campo pode ser empregado como uma avaliação comparativa.

A forma de propagação da onda ultrassônica pode produzir informações relacionadas à integridade da parede a ser inspecionada, acusando ou não a existência de defeitos internos. A

⁹ Texto original em inglês. Tradução nossa. (LIANG *et al.*, 2013. p. 300)

onda ultrassônica atravessa o material inspecionado e a sua velocidade se dá em função de sua rigidez, densidade, coeficiente de Poisson e presença de defeitos. A combinação de medidas de velocidade ultrassônica e amplitude de onda ampliam a capacidade do ultrassom como método de identificação de patologias nos materiais. Ainda de acordo com os autores, em geral a diminuição de amplitude de onda corresponde à presença de defeitos e a combinação desse parâmetro com velocidade, quando apresentam inconsistências, reforçam a possibilidade de presença de patologias na parede inspecionada.

Na execução do ensaio, foi realizada a calibração do aparelho de ultrassom, para as paredes de taipa de pilão, viabilizando a obtenção de valores de resistência por meio dos testes ultrassônicos. Os ensaios foram conduzidos, a princípio, para verificar as condições das paredes, sem causar danos a essas estruturas históricas. Foram produzidas leituras em algumas paredes históricas de Hakka Tulou. A equipe verificou que os dados obtidos, via ultrassom, em períodos chuvosos, não eram válidos, sendo os mesmos descartados. A partir da análise dos gráficos, gerados pelos dados coletados, perceberam também a inexistência de correlação entre idade do material das construções de Tulou e a velocidade e amplitude da onda ultrassônica (parâmetros relacionados à resistência do material). Vários outros parâmetros relacionados às paredes de taipa de pilão apresentaram variação de uma construção para outra, incluindo diferentes composições do material empregado nas edificações e a existência ou não de reforços nas paredes. Tais fatores influenciam na qualidade dessas paredes (LIANG *et al.*, 2013).

Apesar da obtenção limitada de dados dos ensaios com o emprego do ultrassom, os pesquisadores, usando referências de propriedades de resistência à compressão de amostras de taipa de pilão, produzidas em laboratório, fizeram um comparativo entre os valores obtidos via ensaios de ultrassom nas construções de Tulou e ensaios de compressão nas amostras e verificaram que os valores apresentavam uma correlação. Segundo eles, os resultados obtidos a partir do emprego dos ensaios ultrassônicos aparentemente concordaram com as propriedades mecânicas das amostras de paredes de taipa de pilão (LIANG *et al.*, 2013).

Ainda de acordo com os autores, tanto o ultrassom como o esclerômetro foram empregados com o intuito de avaliar, em campo, o sistema construtivo das paredes, de forma comparativa. Os resultados obtidos via ensaios de ultrassom, aparentemente, refletiram melhor a resistência apresentada pelas paredes que os do esclerômetro (LIANG *et al.*, 2013).

1.14 Considerações

No desenvolver deste capítulo, foram abordados diversos aspectos que norteiam esta pesquisa, entre eles: aspectos históricos da arquitetura de terra e mais especificamente da taipa de pilão; as características construtivas dessa técnica; as questões relacionadas ao acervo arquitetônico edificado em taipa de pilão existente e às formas de preservação do mesmo; a importância da manutenção e transmissão do conhecimento relacionado a essa tecnologia construtiva; o material (solo) usado na execução das paredes em taipa de pilão; e o emprego dos ensaios ultrassônicos nesse material. Buscou-se verificar fatores positivos e negativos relacionados ao uso do ultrassom na verificação de patologias em materiais usados nas construções antigas e abordou a questão da normalização específica ou a ausência da mesma para ensaios de ultrassom em materiais terrosos.

As informações obtidas por meio dessa revisão da bibliografia expõem três questões importantes: a existência de poucos estudos sobre a possibilidade do emprego do ultrassom na verificação das características mecânicas de materiais terrosos empregados na construção de edifícios antigos e novos; a maioria dos estudos de correlação entre velocidade de onda ultrassônica e resistência mecânica de material terroso foram realizados a partir da produção de corpos de prova de tamanhos reduzidos e compactados em laboratório; a existência de restrições com relação ao emprego dessa tecnologia de verificação de patologias em materiais que apresentem superfícies irregulares e dimensões maiores. Observou-se a necessidade de adequação e compatibilização entre as dimensões das amostras e a frequência de transdutores a serem utilizados, durante a condução dos testes, e a necessidade de se definir equações diferenciadas para curvas obtidas a partir de gráficos elaborados com dados gerados por ensaios de amostras de laboratório em relação às curvas obtidas com dados gerados por testes em amostras de campo (retiradas de construções em taipa de pilão).

A partir da exposição dos aspectos supracitados, confirma-se a necessidade de se elaborar uma normatização para nortear ensaios ultrassônicos em matérias-primas que apresentem maior rugosidade e porosidade, entre eles, os materiais terrosos usados em paredes de edificações erguidas em arquitetura de terra, como a taipa de pilão.

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA

2.1 Catalogação de construções em taipa de pilão em Minas Gerais

Ao longo da pesquisa, verificou-se a necessidade de fazer a catalogação das construções em taipa de pilão no estado de Minas Gerais. Era preciso comprovar a existência de construções erguidas com essa técnica e verificar a sua incidência nessa região do país. Para tal, o recorte da área das cidades a serem pesquisadas, para a identificação dessas construções, foi estabelecido em função de dois parâmetros citados ao longo do item 1.2 da revisão bibliográfica. Foram pesquisados todos os municípios mineiros integrantes da Estrada Real (caminhos de ligação entre as cidades do ciclo do ouro e as cidades portuárias, naquele período, do Rio de Janeiro e Paraty, para onde o ouro era levado e embarcado com destino a Portugal) e os principais e mais antigos municípios localizados nas proximidades dos rios que compõem as bacias hidrográficas de Minas Gerais, os leitos de rios eram percursos naturais utilizados pelos desbravadores do território mineiro.

2.1.1 Pesquisa realizada no IEPHA

A pesquisa realizada no IEPHA (Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais) se deu a partir da análise de toda a documentação relacionada aos bens culturais dos municípios do Estado de Minas Gerais, integrantes no recorte previamente definido para esta pesquisa, existente nos arquivos do órgão, disponível para consulta, sendo ela:

- Inventários de Proteção de Acervo Cultural do Município – parte integrante da documentação entregue ao ICMS cultural, onde é encontrada a listagem de todo o acervo de bens culturais tombados e/ou registrados dos municípios e seus distritos.
- Dossiês de tombamento estadual de bens culturais imóveis.

Algumas questões dificultaram o desenvolvimento dessa busca:

- Ausência de material para pesquisa disponível de alguns municípios. Nem todas as prefeituras contratam o serviço de elaboração do ICMS cultural do município.
- Trabalho do ICMS ainda em fase de pesquisa de campo e elaboração. Todo inventário é realizado a partir de um cronograma preestabelecido. No caso de

muitos municípios, a documentação ainda está sendo gerada. Com isso, considerável parte do patrimônio do estado ainda não consta nos registros do órgão de preservação estadual.

- Documentos apresentando informações equivocadas, truncadas, sendo consideradas não confiáveis.

2.1.2 Pesquisa realizada no IPHAN

A pesquisa realizada no IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional) foi desenvolvida a partir da análise de toda a documentação relacionada aos bens culturais – edificações – tombados de Minas Gerais, que compõem o acervo das cidades previamente definidas no recorte da pesquisa, existente nos arquivos do órgão, disponível para consulta.

Apenas uma pequena parte da documentação encontra-se nos arquivos na sede do IPHAN em Belo Horizonte. Os dossiês de tombamento de bens culturais do acervo arquitetônico de Minas Gerais mais antigos encontram-se no Arquivo Noronha Santos, na superintendência da cidade do Rio de Janeiro, fator que dificulta o seu acesso. Foi necessário fazer o pedido de empréstimo e envio dessa documentação para a sede de Belo Horizonte, alegando como motivo, para tal, a presente pesquisa.

Foram consultados os arquivos correntes, especialmente os documentos referentes a inventários e processos de tombamento do acervo de construções do período do colonial mineiro.

2.1.3 Pesquisa de campo

Na segunda etapa desta pesquisa, foram realizadas visitas técnicas com o objetivo de conhecer melhor as edificações em taipa de pilão. Durante as visitas técnicas, para vistoria dessas edificações, foram coletados dados relacionados ao edifício em si, especialmente tecnologia construtiva e as principais patologias incidentes, tendo como objetivo a elaboração de relatório de patologias recorrentes nesse tipo de parede estrutural.

Os dados coletados serviram de base para elaboração do procedimento relativo ao ensaio do ultrassom nos protótipos, onde foram produzidas patologias estruturais – trincas – previamente identificadas nas construções em taipa de pilão do estado de Minas Gerais.

2.2 Procedimentos para a execução da miniparede em taipa de pilão

2.2.1 Processo de seleção do solo

Segundo a bibliografia internacional, o solo ideal para as construções em taipa de pilão deve conter, em sua composição granulométrica, 50 % de areia (MINKE, 2008). Já de acordo com Hall e Djerbib (2003), o solo a ser utilizado deve apresentar as seguintes frações: cascalho – 20 a 30%; areia -50%; argila + silte – 20 a 30%. O teor máximo de matéria orgânica admissível é em torno de 1 a 2%. De acordo com IEPHA, em geral as paredes de taipa apresentam 70% de areia e 30% de argila + silte. É importante que a areia seja de granulometria média a grossa.

2.2.1.1 Coleta e armazenamento do solo

O solo utilizado foi coletado pela empresa de consultoria técnica em obras de engenharia civil e análise geotécnica de solos – Engesolo Engenharia Ltda. Por se tratar de amostras para ensaios, foram obtidos solos de várias localidades, sendo, posteriormente, ensacados e estocados. Esses solos devidamente ensacados foram levados ao local da construção da miniparede e guardados em local protegido de intempéries, tendo em vista a necessidade de apresentarem baixo teor de umidade no momento da compactação da miniparede em taipa de pilão.



Figura 15: Processo de mistura do solo coletado e cedido pela Engesolo

Fonte: Acervo da autora, 2016.

Essas amostras de solo cedidas pela Engesolo foram misturadas em quantidades iguais, medidas em peso. A mistura foi sendo realizada aos poucos, manualmente, a partir da colocação de uma lata de cada tipo de solo por vez, conforme mostrado na Figura 15. Essa primeira mistura foi enviada para ensaios de análise granulométrica.

2.2.1.2 Correção granulométrica do solo

Como dito anteriormente, o solo ideal para as construções em taipa de pilão deve ter uma granulometria de, aproximadamente, 70% de fração grossa, composta por areia de granulometria média a grossa e pouco pedregulho e 30% de fração ligante – finos – composta por argila e silte.

Em geral, os solos do estado de Minas são argilosos e siltosos, sendo assim, de acordo com o resultado dos ensaios geotécnicos de caracterização granulométrica do solo, verificou-se a necessidade de se fazer a sua correção. Para tal, foi elaborada uma equação matemática, a partir das porcentagens das frações do solo disponibilizadas pelo ensaio supracitado. A partir da equação desenvolvida¹⁰, foi calculada a quantidade de areia a ser acrescentada à mistura, de forma a garantir um solo cuja composição se assemelha ao comumente empregado, nessa técnica construtiva da taipa de pilão, nas edificações históricas.

Equação:

$$A = \frac{42,8 + x}{100 + x} = 70\% \Rightarrow \frac{42,8 + x}{100 + x} = 0,7 \Rightarrow 42,8 + x = 0,7(100 + x) \Rightarrow 42,8 + x = 70 + 0,7x \Rightarrow x - 0,7x = 70 - 42,8 \Rightarrow 0,3x = 27,2 \Rightarrow \frac{27,2}{0,3} \Rightarrow x \approx 91$$

Ficou estipulado que, para cada 100 kg de solo, deveria ser acrescentado cerca de 91 kg de areia. O solo foi pesado em latas de 21 kg, portanto, para cada 10 latas de solo da primeira mistura, eram colocadas 9,1 latas de areia fina e grossa, misturadas em proporções iguais. Como as quantidades de solo disponibilizadas pela empresa eram desiguais, essa medida (lata) foi usada para garantir o controle do traço do solo a ser empregado em todas as camadas de compactação da miniparede. Esse traço foi mantido para a mistura de todas as camadas de compactação. Foram compactadas 6 camadas com altura inicial de 15 cm.

¹⁰ Equação elaborada pelo Professor Alexandre Costa Washington, Mestre em Matemática.

Foi necessária nova realização de ensaios de granulometria e limites de consistência para verificar as características geotécnicas dessa mistura final.

2.2.1.3 Ensaio de caracterização

O solo coletado foi devidamente caracterizado, buscando averiguar sua adequabilidade à técnica da taipa de pilão e a necessidade de adição de fração arenosa ao mesmo, tornando-o mais adequado à técnica. Para isso, foi importante a realização de uma primeira análise granulométrica, buscando conhecer as características geotécnicas iniciais do solo e, a partir desse resultado, foi possível calcular a quantidade de fração arenosa (areia fina e areia grossa) empregada na correção desse material.

Após realizada a correção do solo, foram feitos os ensaios necessários à caracterização dessa nova mistura, composta pelo solo previamente coletado e a fração grossa (areia) posteriormente adicionada, para atestar a sua adequabilidade para a execução da miniparede. Essa análise compreendeu as seguintes etapas:

2.2.1.3.1 Preparação da amostragem – NBR 6457/1986

Deve ser preparada de acordo com a norma *NBR 6457/1986 - Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*.

Esta norma prescreve o método para a preparação de amostras de solos para os ensaios de compactação e de caracterização (análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm e massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos grãos retidos na peneira de 4,8 mm). (ABNT, 1986).

2.2.1.3.2 Análise granulométrica – NBR 7181/1984

Os ensaios referentes à análise granulométrica devem ser executados de acordo com as prescrições apresentadas pela norma *NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica*. “Esta norma prescreve o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento”. (ABNT, 1984). A partir desses ensaios, busca-se quantificar os diversos tamanhos apresentados pelas partículas presentes em uma amostra de solo.

2.2.1.3.3 Determinação de massa específica dos grãos – NBR 6508/1984

Os ensaios referentes à determinação da massa específica dos grãos foram realizados segundo a norma *NBR6508/1984 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica*. A massa específica é obtida a partir da relação entre a massa de partículas sólidas de uma amostra e o volume preenchido por esse material (ABNT, 1984).

2.2.1.3.4 Limite de liquidez – NBR 6459/1984

O limite de liquidez da amostra foi determinado de acordo com a norma *NBR 6459/1984 – Solo – determinação do limite de liquidez*. O ensaio consiste em adicionar água destilada, em pequenos incrementos, em uma pequena amostra de solo, homogeneizando com auxílio de uma espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, apresentando consistência tal que, ao ser transferida para o aparelho Casagrande, sejam necessários, no máximo, 35 golpes, neste aparelho, para fechar a ranhura feita na massa. (ABNT, 1984).

2.2.1.3.5 Limite de plasticidade – NBR 7180/1984

O limite de plasticidade da amostra foi determinado de acordo com a norma *NBR 7180/1984 – Solo – determinação do limite de plasticidade*. O ensaio consiste em adicionar água destilada, em pequenos incrementos, em uma pequena amostra de solo, homogeneizando com auxílio de uma espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, apresentando consistência plástica. Uma pequena quantidade da amostra deve ser usada para se fazer uma bola, que deverá ser rolada sobre uma placa de vidro, com pressão suficiente da palma da mão, para lhe dar forma cilíndrica. Quando o cilindro começa a apresentar fissuras, o teor de umidade apresentado por essa amostra, neste momento, corresponde ao limite de plasticidade. (ABNT, 1984).

2.2.1.3.6 Ensaio de compactação Proctor normal – NBR 7182/1986

O ensaio de compactação do solo foi realizado de acordo com a norma *NBR 7182/1986. (ABNT, 1986) – Solo – ensaio de compactação*. “Esta norma prescreve o método para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos quando compactados, de acordo com os processos especificados” (ABNT, 1986). A curva de

compactação é obtida a partir de pares ordenados de valores correspondentes a umidade (%) e densidade (g/cm^3).

O objetivo do ensaio de compactação é determinar os seguintes parâmetros: massa específica (aparente) seca – denominada também densidade seca – e o teor de umidade ótimo do solo que será utilizado na construção da miniparede de taipa de pilão.

2.2.2 Aditivos

As paredes em taipa de pilão, em geral, apresentam grande heterogeneidade em sua composição. Essa característica está ligada, principalmente, à presença de aditivos na mistura da argamassa. Os aditivos mais usados eram cal, cascalho (variedade de formigão), fibras vegetais (folhas de palmeiras etc), fibras animais, sangue de boi, urina de cavalo, clara de ovo, pozolana, cinzas de carvão etc. Esses aditivos produzem significativas variações na composição da argamassa e, conseqüentemente, no comportamento do material constitutivo e na resistência dessas paredes.

Embora fosse comum o emprego de aditivos na construção de paredes em taipa de pilão, nas edificações do colonial, para esta pesquisa, não foram empregados quaisquer tipos de aditivos na miniparede a ser construída.

2.2.3 Local de construção

A parede foi erguida na área externa da residência da pesquisadora, conforme se mostra na Figura 16. Esse local foi escolhido em função de três importantes fatores:

- disponibilidade do local para abrigar a miniparede por tempo indeterminado;
- local de fácil acesso para ensaios de campo;
- controle e proteção contra fatores externos: intempéries e quaisquer tipos de ações danosas ao protótipo.

Verificou-se a necessidade de se fazer uma base para a miniparede, pois o piso do local é irregular e a mesma funcionou como base de compactação e proteção dessa miniparede contra possíveis intempéries (chuvas). Ela foi protegida contra chuvas, em sua porção superior e laterais, a partir da colocação de lona e uma cobertura provisória.



Figura 16: Local de construção da miniparede

Fonte: Acervo da autora, 2015.

2.2.4 Execução do taipal e do pilão

Utilizou-se o taipal clássico, construído em madeira, com capacidade de suportar a pressão sofrida durante a compactação. Internamente deverá apresentar as seguintes dimensões: 1,50 m de comprimento, altura de 0,90 m e 1,00 m de espessura. O instrumento de compactação foi um pilão de base cônica, em madeira. Ambos instrumentos foram confeccionados por carpinteiro, demonstrados, a seguir, na Figura 17.



Figura 17: Taipal e pilão empregados na construção da miniparede

Fonte: Acervo da autora, 2015.

2.2.5 Compactação da miniparede

A compactação da miniparede foi realizada com o pilão de madeira, de base cônica - circular. Cada camada de terra apiloada apresentava altura máxima de 15 cm antes da compactação; após apiloamento, apresentava altura em torno de 10 cm. Essa miniparede apresentava 1,5 m de comprimento, altura de 0,60 m e 1,00 m de espessura (medida média de espessuras usadas antigamente na arquitetura de taipa).

Foi realizado o controle de compactação de cada camada:

1 – O teor de umidade ótimo determinado pelo ensaio de compactação Proctor normal foi empregado no solo a ser compactado.

2 – A cada camada apiloada, o teor de umidade do solo utilizado foi verificado, buscando-se certificar que o mesmo apresentasse teor de umidade ótimo durante a compactação.

3 – Foi certificado o atendimento do grau de compactação: $GC = \text{densidade da camada} / \text{densidade máxima (determinada via ensaio laboratorial)} \geq 95 \%$. Para tal, foram definidos alguns parâmetros de compactação, entre eles: peso e área da base do pilão, altura de queda de pilão e número de golpes.

Dessa forma buscou-se a obtenção de uma parede homogênea e controlada.

2.2.6 Remoção do taipal

O taipal foi retirado após a compactação, buscando ser fiel ao processo de execução dessa técnica, em um canteiro de obras tradicional. A cura da parede procedeu de forma a possibilitar a troca de umidade com o meio ambiente onde foi construída.

2.2.7 Amostragem

Foi construída uma miniparede – protótipo, de dimensões apresentadas na Figura 18. Ela foi mantida à sombra, protegida de intempéries, por um determinado espaço de tempo, aproximadamente um mês. Ao longo desse tempo foi avaliada a troca de umidade com o ambiente (perda ou ganho) ocorrida e realizados os ensaios de ultrassom. Posteriormente, foram produzidas avarias na mesma e novos ensaios ultrassônicos foram realizados, buscando-se comparar as diferenças entre os resultados obtidos em todos os ensaios ultrassônicos.

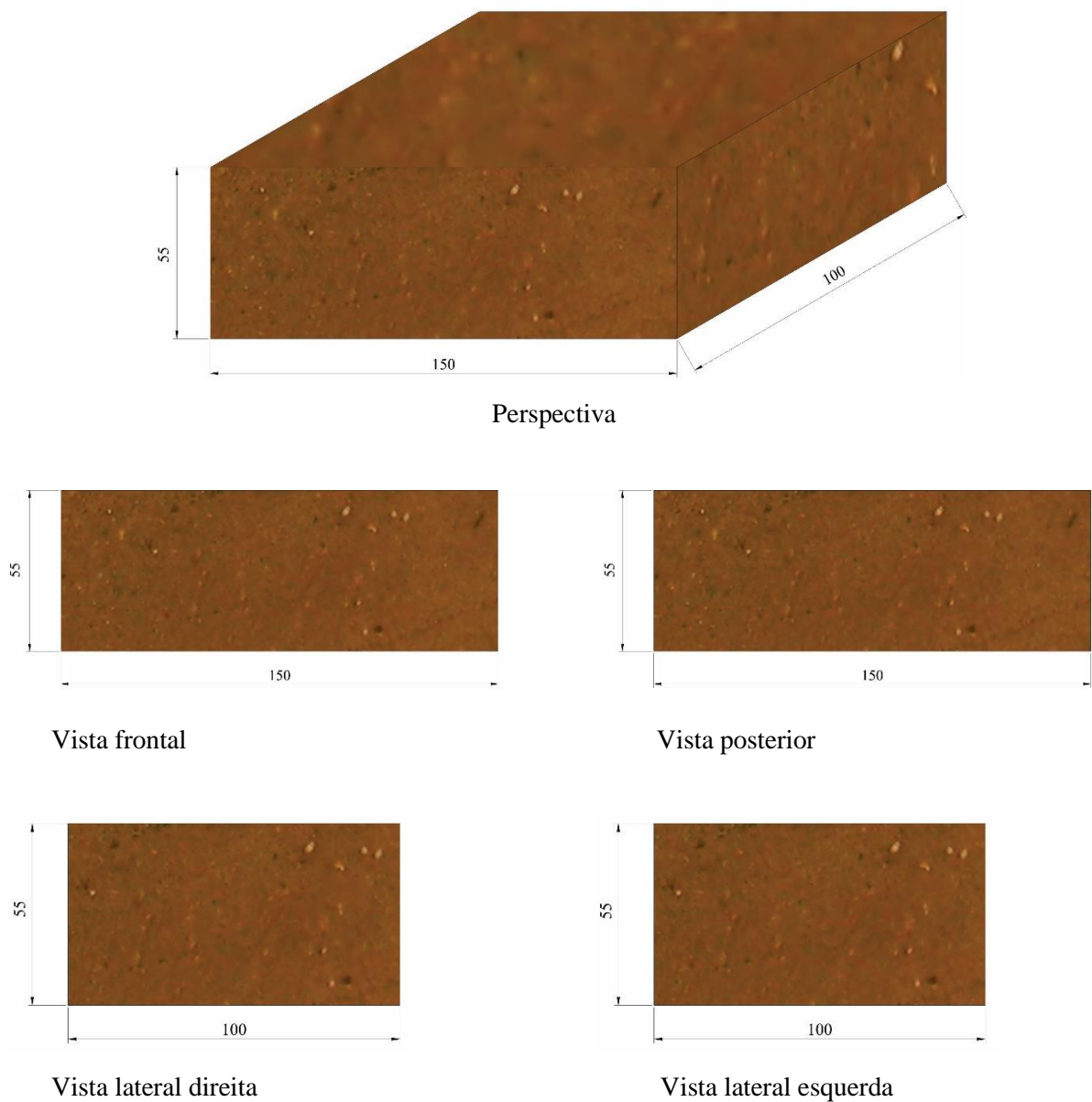


Figura 18: Modelo do protótipo - miniparede

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

2.3 Ensaios de ultrassom

Devido à inexistência de norma específica para o emprego do ultrassom na realização de ensaios não destrutivos em materiais terrosos, o método de ensaio empregado nesta pesquisa foi baseado na metodologia desenvolvida para o concreto, normalizada pela BS 1881: *Part 203:1986 – Testing concrete – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete* (BS, 1986), e pela NBR 8802/1994 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade da propagação de onda ultrassônica. (ABNT, 1984).

2.3.1 Definição do equipamento ultrassom

O aparelho ultrassom escolhido foi o *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* – PUNDIT, fabricado pela CNS Eletronics. O aparelho mede o tempo de propagação da onda em microssegundos (μs) e a velocidade de propagação em metros por segundos m/s. Ele é dotado de uma fonte emissora de impulso ultrassonor. Em seu painel, encontra-se um registrador digital de pulsos emitidos e velocidade e teclas de funções programáveis para ajustes necessários, dentre eles, inserção das distâncias entre transdutores. Também possui cabos coaxiais, dois transdutores de contato (emissor e receptor) e um bloco de calibração.

Na Tabela 3, é apresentado o aparelho comumente utilizado em ensaios de materiais, que fornece a leitura do tempo de propagação da onda (t), em μs , e velocidade de ondas (v), em m/s, entre os transdutores de emissão e recepção.

TABELA 3
Aparelho ultrassom

Aparelho	Fabricante	Modelo	Frequência de transdutor (KHz)
1	CNS eletronic	PUNDIT Lab	54, 82, 150, 200 e 500

Fonte: Elaborado pela autora.

2.3.2 Escolha dos transdutores

A escolha dos transdutores, para a realização dos ensaios, depende, fundamentalmente:

- do material analisado (o solo, verificando a granulometria apresentada pelo mesmo), cuja microestrutura irá definir o comportamento da transmissão da onda passante;
- da dimensão da amostra disponível, procurando-se sempre garantir que a amplitude da onda passante não vá além do material em análise.

Foram escolhidos transdutores das seguintes frequências: 54 kHz, 82 kHz, 150 kHz, 200 kHz e 500 kHz.

2.3.3 Posicionamento dos transdutores

A norma BS-1881 e a NBR 882/1994 especificam três posições para a instalação dos transdutores escolhidos e adequados à medição do tempo de propagação das ondas passantes pelos corpos-de-prova: transmissão direta; transmissão semidireta; transmissão indireta.

Durante os ensaios, os modos de transmissão empregados foram o direto e o indireto, esse último em função da espessura da miniparede.

2.3.4 Calibração do equipamento ultrassom

A calibração do aparelho do ultrassom foi realizada, tornando-o apto a avaliar os protótipos executados com o emprego do solo como material de construção. O outro objetivo era o estabelecimento e a identificação da faixa de frequência da onda sonora mais adequada e o método de transmissão a ser utilizado. Para fazer a calibração, acoplam-se os transdutores nas extremidades do bloco de calibração, untando suas superfícies de contato com material viscoso e ligante, tipo gel, graxa ou vaselina para obtenção de perfeito acoplamento. Realizado o acoplamento, o aparelho é ligado e procede-se à leitura do tempo que a onda sonora gasta para atravessar o cilindro de referência. O procedimento de calibração foi feito para todas as frequências utilizadas em ensaios, sendo elas: 54 kHz, 82 kHz, 150 kHz, 200 kHz e 500 kHz. Segundo o fabricante, a leitura padrão do tempo gasto pela onda para atravessar a barra é de 25,4 μ s.

2.3.5 Execução de ensaio de ultrassom

Após a calibração do aparelho, o mesmo é desligado. Para a realização dos ensaios, foram usados transdutores de diferentes frequências, para definir qual delas seria mais adequada à realização dos procedimentos de leitura, buscando a obtenção de dados relacionados à determinação do tempo e velocidade de propagação da onda sonora através de uma parede construída em material terroso. Os procedimentos de calibração continuam válidos para essa fase. Para os ensaios, foram utilizados transdutores de 54 kHz, 82 kHz, 150 kHz, 200 kHz e 500 kHz. Atendendo à norma BSI 1881, foram realizadas três medidas em cada ponto ensaiado. Os resultados registrados devem demonstrar variação máxima de 5 % do valor médio obtido.

2.3.6 Definição dos pontos de ensaio

Para os ensaios de ultrassom, foi desenhada, nas quatro superfícies laterais da parede, uma malha de forma a determinar os pares de pontos onde foram feitas as leituras, garantindo, assim, a perfeita correspondência entre os transdutores.

Essa malha, composta por linhas verticais e horizontais, conforme indicada na Figura 19, foi feita a partir do emprego da antiga técnica do barbante tensionado. Passa o barbante no pó xadrez branco, posiciona-o na parede, em alturas predefinidas, tencionando-o de uma extremidade a outra. Puxa o mesmo, soltando, em seguida. Ao bater na miniparede, a marca da linha será impressa na mesma, devido à presença do pó branco no barbante.

Os testes foram realizados nos pares de pontos definidos a partir das interseções das linhas da malha. O espaçamento entre linhas horizontais é de 10 cm, e entre linhas verticais é de 15 cm. Esse espaçamento foi definido em função das dimensões da miniparede e dimensões mínimas necessárias para o posicionamento dos transdutores para os ensaios de ultrassom, estipuladas em 65 mm para transdutores de 54 kHz e 27 mm para transdutores de 150 kHz, de acordo com a norma BS 1881: parte 203. Foram realizadas três leituras para pontos definidos a partir das seguintes distâncias entre transdutores: 60, 30 e 15 cm.

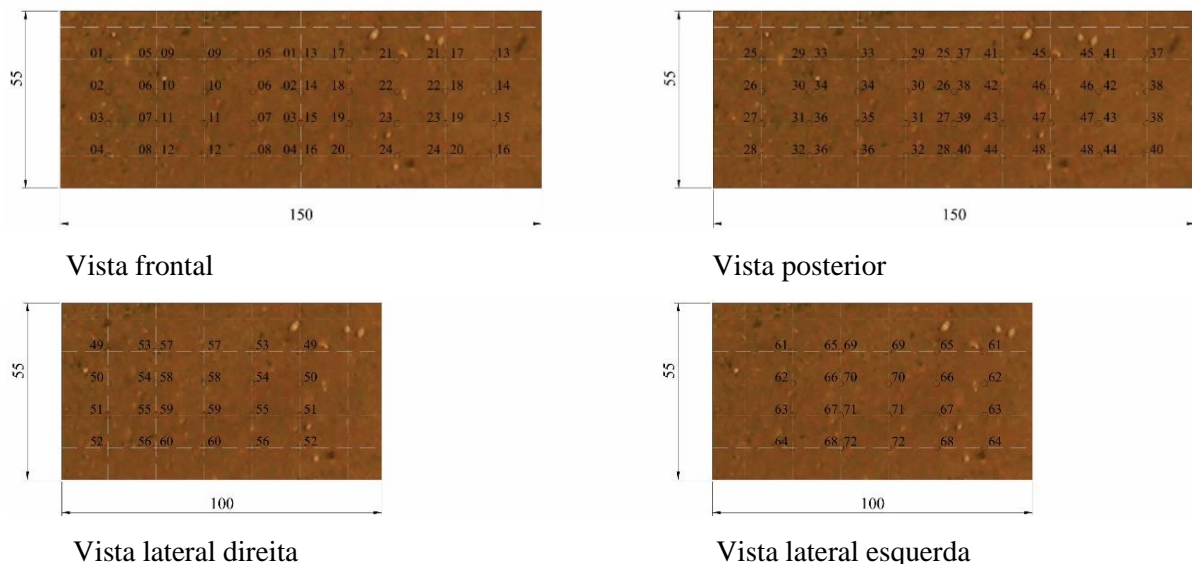


Figura 19: Modelo da malha do protótipo - miniparede

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

2.4 Ensaios de resistência à compressão simples

2.4.1 Retirada de corpos de prova da miniparede

A partir de alguns pontos, onde as leituras do ultrassom foram realizadas (etapa anterior), foram retirados corpos de prova para serem ensaiados à compressão simples.

Para retirada das amostras, deveria, a princípio, ter sido utilizada a broca-copo, com equipamento – máquina de arrancamento. Os corpos de prova extraídos deveriam ser cilíndricos e exibir as seguintes dimensões: diâmetro 15 cm e altura 20 cm. Constatada a impossibilidade do emprego da broca-copo, por se tratar de material terroso, outras alternativas foram consideradas, sendo escolhida, portanto, a serra para o corte corpos de prova. A partir dessa definição de equipamento para extração de amostras, foram retirados blocos paralelepípedos com dimensões aproximadas de 10 x 20 cm (base) x 30 cm (altura).

Os ensaios foram realizados em laboratório, para garantir a validade dos resultados gerados. Os corpos de prova, retirados no campo, foram embalados em plástico e transportados cuidadosamente para o laboratório.

2.4.2 Definição do equipamento para o ensaio de compressão simples

O equipamento utilizado nos ensaios de compressão simples nas amostras retiradas foi uma prensa hidráulica, com anel dinamométrico, para determinar a força aplicada para solos que apresentem resistência à compressão não confinada. Os valores resultantes a partir da aplicação dessa norma correspondem, aproximadamente, à resistência de solos coesivos, em termos de tensões totais. O equipamento utilizado foi a prensa hidráulica, dotada de controlador de pressão inteligente, modelo RFP – 03.

2.4.3 Execução do ensaio de compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados segundo a NBR 12770/1984 (ABNT, 1984e) – solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada. O método consiste em submeter o corpo de prova a um carregamento axial levando-o até a sua ruptura, registrando-se a deformação ocorrida em cada estágio do carregamento.

Os resultados dos ensaios à compressão, das amostras retiradas da parede, foram comparados com os resultados das leituras de ultrassom nos pontos correlacionados.

Nesta pesquisa, o resultado desse ensaio analisado é a tensão de ruptura, sendo a mesma, correlacionada com a velocidade de transmissão de onda ultrassônica, gerando o gráfico de Tensão de ruptura x Velocidade de onda ultrassônica.

2.5 Verificação da qualidade do coeficiente de correlação

A partir dos pares dos valores encontrados, nos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples, foi calculado o índice de correlação entre os valores obtidos nesse ensaios. O resultado permitiu verificar a qualidade do coeficiente de correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples da miniparede em taipa de pilão.

2.6 Desenvolvimento de um protocolo de análise da qualidade global da parede de taipa de pilão

A partir dos resultados obtidos em todas as etapas de pesquisa, pretende-se desenvolver um protocolo de avaliação da qualidade da parede de taipa de pilão inspecionada com emprego do ultrassom, adotando-se um índice quantitativo capaz de indicar a correspondência entre o grau de fraturamento (número de defeitos existentes na peça em relação a sua área superficial total) e a resistência da parede. Esse índice irá variar de uma construção para outra, devido à heterogeneidade do material empregado nas diversas construções. Deseja-se que esse índice auxilie na tomada de decisão quanto à necessidade, ou não, de restauro das paredes da edificação.

Trata-se de um protocolo de avaliação a ser utilizado em inspeções realizadas, em intervalos regulares de tempo, nas construções em taipa de pilão. Essas inspeções regulares irão gerar os índices quantitativos que reflitam a real resistência e estabilidade, ao longo da vida útil, dessas paredes. A partir desses resultados periódicos, será possível monitorar a parede e detectar possíveis necessidades de intervenções.

CAPÍTULO 3 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 O acervo existente em taipa de pilão no estado de Minas Gerais e patologias recorrentes nessas paredes

Em Minas Gerais, a taipa de pilão foi utilizada nas primeiras construções (devido à tradição seiscentista e provavelmente empregada pelos desbravadores bandeirantes) e em construções oficiais, por imposição real, por se tratar de paredes fortes e de baixo custo de execução. No entanto, essa imposição foi cedo suplantada por ter verificado a sua inadequabilidade ao território das minas de ouro, que exibia relevo acidentado, fator que dificultava a execução desse tipo de parede de terra (MELLO, 1985; VASCONCELLOS, 1979).

Verifica-se, também, que as edificações erguidas em taipa de pilão apresentam considerável vulnerabilidade à umidade, especialmente a águas de chuva. Algumas importantes construções erguidas em Minas Gerais acabaram por sucumbir ao tempo e às condições naturais de relevo e climáticas apresentadas pela região. A seguir, alguns desses exemplares:

Baependi: O engenho – Casa grande de Tomé de Rodrigues Nogueira. Edificada em taipa de pilão no século XVII, considerada a primeira casa do município, foi construída na época da sua fundação. No local, foi erguida também a Capela de Nossa Senhora de Montserrat, uma construção rústica, feita de taipa e paliça.



Figura 20: Casa de taipa de pilão em Baependi – arruinada, restando apenas registros fotográficos

Fonte: Autor desconhecido.

A casa ruiu completamente, restando apenas registros fotográficos. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho velho. É cortada pelo Rio Baependi, afluente do Rio Verde, localizado na bacia do Rio Grande, do qual é subafluente.

Ouro Preto: Igreja de Nossa Senhora das Mercês e Perdões de Ouro Preto. Edificada em taipa de pilão no século XVIII, foi reedificada em alvenaria de pedra (substituindo a taipa) no século XIX. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no cruzamento do caminho velho, caminho novo e caminho dos diamantes. Situa-se próxima às nascentes do Rio das Velhas e Piracicaba, em uma área de divisa entre as bacias do Rio Doce e do Rio São Francisco.



Figura 21: Igreja de Nossa Senhora das Mercês e Perdões de Ouro Preto

Fonte: Kayo Scrocaro Hisatomi, 2008.

Pedro Leopoldo: Casa do Bandeirante Fernão Dias Paes Leme. Localiza-se na quinta do Sumidouro, situada na bacia do Rio São Francisco. Essa região foi desbravada por bandeirantes no século XVII. Por volta de 1674, o bandeirante Fernão Dias Paes Leme, atravessando o Vale do Paraíba e a Serra da Mantiqueira, chega à região buscando pouso. Em sua busca por um local para se estabelecer, passou por regiões que onde, posteriormente, foram formadas povoações, sendo elas as atuais cidades de Ibituruna, Paraopeba (Betim), Sumidouro, Roça Grande (em Sabará), Itacambira, Itamarandiba, Esmeraldas, Mato das Pedrarias e Serro do Frio. Embora a técnica construtiva mais empregada por paulistas fosse a taipa de pilão, a atual casa do bandeirante Fernão Dias Paes Leme exibe estrutura autônoma de madeira com vedações em adobe (fachadas frontal e porção anterior da lateral esquerda), pau-a-pique (fachadas laterais direita e porção da esquerda e posterior) e paredes em bloquete de concreto. De acordo com

registros históricos, as técnicas construtivas, exibidas pela casa, passaram a ser utilizadas na região por serem mais adaptadas às suas condições naturais. A modenatura e comodulação indicam que se trata de uma construção de meados a fim do século XVIII. Esses indícios sinalizam que a atual casa não é a mesma que abrigou o bandeirante, podendo se tratar de uma reconstrução, o que explicaria a não utilização da taipa de pilão.



Figura 22: Casa do Bandeirante Fernão Dias Paes Leme

Fonte: Isabella C. D. Amarante, 2012.

Santana dos Montes: Igreja Matriz de Sant`Ana dos Montes. Edificada em pedra e taipa de pilão no século XVIII, tendo a taipa substituída por alvenaria de pedra. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, está localizada no caminho novo. Situa-se na bacia do Rio Doce.



Figura 23: Igreja Matriz de Sant`Ana dos Montes

Fonte: INSTITUTO ESTRADA REAL.

Tiradentes: Igreja de Nossa Senhora das Mercês. A fachada principal, originalmente construída em taipa de pilão, foi refeita em adobe e concreto. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, localiza-se no caminho velho. Está situada na bacia do Rio Grande.



Figura 24: Igreja de Nossa Senhora das Mercês

Fonte: PORTAL BRASIL. Adaptada pela autora, 2016.

Apesar da fragilidade da taipa de pilão, frente ao ambiente natural (clima e relevo) do estado de Minas Gerais, importantes obras resistiram ao tempo. Em geral são obras religiosas ou de caráter oficial, uma vez que, aqui, a taipa de pilão foi empregada em edificações de grande porte, especialmente em igrejas. Em pouquíssimos casos foi utilizada na arquitetura vernacular.

A utilização da técnica, em obras de pequeno porte, se deu mais nos primórdios do desbravamento do sertão, nas moradias dos bandeirantes, que seguiam o padrão de suas residências em São Paulo.

Trata-se de um acervo bem reduzido, uma vez que poucas edificações foram erguidas, em Minas Gerais, com o emprego de paredes em taipa de pilão e resistiram ao tempo. São obras raras que merecem ser conservadas e preservadas por apresentarem grande riqueza técnica, estética e histórica. Essa singular ocorrência contribui para aumentar a importância de sua preservação.

A seguir, a partir de uma pesquisa realizada nos arquivos correntes do órgão de preservação do Estado de Minas Gerais – IEPHA e do órgão de preservação federal – IPHAN, são listadas algumas das obras que sobreviveram ao tempo e compõem o acervo de Minas Gerais.

Campanha: Capela de Nossa Senhora das Dores. Erguida em 1799. A construção apresenta estrutura mista em alvenaria de pedra e taipa de pilão, na nave e capela mor, e alvenaria de tijolos maciços no campanário e na cobertura da torre. A cidade localiza-se na bacia do Rio Grande.



Figura 25: Capela de Nossa Senhora das Dores

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 26: Capela de Nossa Senhora das Dores

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Campanha: Catedral de Santo Antônio. Construída entre 1787 e 1822. Reformada entre 1909 e 1925. Em 1967, as fachadas externas foram reformadas. A construção exibe estrutura mista em alvenaria de pedra, taipa de pilão e alvenaria de tijolos maciços nas naves central e laterais, frontispício, partes das torres e fachadas laterais. A fachada sul e algumas porções das paredes das fachadas laterais foram reconstruídas em concreto e tijolo maciço. A cidade está localizada na bacia do Rio Grande.



Figura 27: Catedral de Santo Antônio

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 28: Catedral de Santo Antônio

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Catas Altas: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição. Construída em 1729. Edificada em taipa de pilão e alvenaria de pedra. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho dos diamantes. A cidade está situada próxima ao Rio Piracicaba, na bacia do Rio Doce.



Figura 29: Matriz de Nossa Senhora da Conceição, Catas Altas

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 30: Matriz de Nossa Senhora da Conceição, Catas Altas

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Chapada do Norte: Igreja do Bom Jesus. O início da construção se deu em 1874. Apresenta paredes construídas em taipa de pilão e madeira. A cidade está localizada na bacia do Rio Jequitinhonha.



Figura 31: Igreja do Bom Jesus

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 32: Igreja do Bom Jesus

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Chapada do Norte: Igreja do Rosário. Não consta em arquivos a data da construção. O relato mais antigo sobre essa edificação é do ano de 1817. Apresenta paredes construídas em taipa de pilão.



Figura 33: Igreja do Rosário

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 34: Igreja do Rosário

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Chapada do Norte: Igreja Matriz de Santa Cruz. Erguida no ano de 1728. Apresenta paredes construídas em taipa de pilão e madeira.



Figura 35: Igreja Matriz de Santa Cruz

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 36: Igreja Matriz de Santa Cruz

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Conceição da Barra de Minas: Santuário de Nossa Senhora da Conceição. Erguido em 1726 e reconstruído no início do século XIX. Apresenta paredes construídas em taipa de pilão, alvenaria de tijolo, adobes e alvenaria de pedra. A cidade integra a Estrada Real, estando situada no caminho velho. A cidade está localizada na bacia do Rio Grande.



Figura 37: Santuário de Nossa Senhora da Conceição da Barra de Minas

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 38: Santuário de Nossa Senhora da Conceição da Barra de Minas

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Congonhas: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição. Erguida em 1735. A obra exhibe estrutura mista. A parede da fachada frontal e as torres são em pedra. As paredes das fachadas laterais e posterior são em taipa de pilão. As paredes internas exibem estrutura autônoma em madeira e vedação em pau-a-pique. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, localiza-se no caminho velho. Está situada na bacia do Rio São Francisco.



Figura 39: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 40: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Conselheiro Lafaiete: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição. A construção foi iniciada no ano de 1733 e finalizada na segunda metade do século XVIII. Apresenta paredes das fachadas em alvenaria de pedra e paredes internas em taipa de pilão. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho novo. Está situada em uma área de divisa entre as bacias do Rio Doce e do Rio São Francisco.



Figura 41: Matriz de Nossa Senhora da Conceição

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 42: Matriz de Nossa Senhora da Conceição

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Itacambira: Igreja Matriz de Santo Antônio de Itacambira. Os registros sobre a construção são imprecisos, sendo o ano de 1751 a data provável de sua construção. Base em pedra. Paredes da nave em taipa de pilão e paredes laterais (sacristia e corredores) em estrutura de madeira e vedação em pau-a-pique. A cidade está localizada na bacia do Rio Jequitinhonha.



Figura 43: Igreja Matriz de Santo Antônio

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 44: Igreja Matriz de Santo Antônio

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Mariana: Catedral de Nossa Senhora da Assunção - Sé de Mariana. A construção inicial data do ano de 1713. Foi reedificada em 1798. Frontispício e as torres foram edificados em pedra, as paredes externas da nave em taipa de pilão, e as paredes internas apresentam estrutura autônoma em madeira e vedação em pau-a-pique. A cidade faz parte do circuito Estrada Real e localiza-se no caminho dos diamantes. Situa-se na bacia do Rio Doce.



Figura 45: Catedral de Nossa Senhora da Assunção - Sé de Mariana

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 46: Catedral de Nossa Senhora da Assunção - Sé de Mariana

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Mariana: Distrito de Furquim: Igreja Matriz Senhor Bom Jesus do Monte. O início da construção se deu no ano de 1745. 1ª fase: edificada em alvenaria de pedra (sacristia, capela-mor e arco cruzeiro). A nave, as torres e frontispício apresentam sistema construtivo em parede autoportante de taipa de pilão, com cunhais revestidos de pedra. O distrito faz parte do circuito Estrada Real, estando localizado no caminho dos diamantes. Encontra-se na bacia do Rio Doce.



Figura 47: Matriz Senhor Bom Jesus do Monte

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 48: Matriz Senhor Bom Jesus do Monte

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Mariana – Distrito de Santa Rita Durão: Igreja Matriz Nossa Senhora de Nazaré. Erguida no primeiro quartel do século XVIII. Possui sistema construtivo misto em alvenaria de pedra, alvenaria de adobe e taipa de pilão. O distrito faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho dos diamantes. Está inserido na bacia do Rio Doce.



Figura 49: Matriz Nossa Senhora de Nazaré

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 50: Matriz Nossa Senhora de Nazaré

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Minas Novas: Capela de São Gonçalo. Apresenta documentação escassa. Foi erguida durante o período colonial, sendo mencionada em textos que precedem a independência do país em 1822. Construída em taipa de pilão. A parede da fachada frontal foi refeita em estrutura em madeira e vedação em pau-a-pique. A cidade está localizada na bacia do Rio Jequitinhonha.



Figura 51: Capela de São Gonçalo

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 52: Capela de São Gonçalo

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Minas Novas: Igreja de Nossa Senhora do Rosário. A partir de suas características construtivas e ornamentais, presume-se que a edificação foi erguida durante o século XVIII. Construída em taipa de pilão.



Figura 53: Igreja de Nossa Senhora do Amparo

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 54: Igreja de Nossa Senhora do Amparo

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Minas Novas: Igreja Matriz de São Francisco de Assis. Construída provavelmente na segunda metade do século XVIII. Sistema construtivo em madeira e taipa de pilão.



Figura 55: Igreja Matriz de São Francisco de Assis

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 56: Igreja Matriz de São Francisco de Assis

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Minas Novas: Igreja de São José. Presume-se que a sua construção ocorreu na segunda metade do século XVIII. Edificada em taipa de pilão e adobe. Apresenta pórtico em adobe e paredes da nave, capela-mor e sacristia em taipa de pilão.



Figura 57: Igreja de São José
Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 58: Igreja de São José
Fonte: Acervo da autora, 2015.

Minas Novas: Sobrado próximo à Igreja de São José. Não há registros de sua construção. A partir de suas características construtivas e estilísticas, presume-se que foi erguido durante o século XVIII. Construído inicialmente em taipa de pilão e adobe. Atualmente resta apenas uma parede em taipa de pilão.



Figura 59: Sobrado próximo à Igreja de São José
Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 60: Sobrado próximo à Igreja de São José
Fonte: Acervo da autora, 2015.

Morro do Pilar: Monumento do Intendente Câmara. A implantação da Real fábrica de ferro se deu entre 1809 e 1813. Ruínas de paredes de taipa de pilão da 1ª fábrica de ferro da América do Sul. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando situada no caminho dos diamantes. Está localizada na bacia do Rio Doce.



Figura 61: Monumento do Intendente Câmara

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 62: Monumento do Intendente Câmara

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Ouro Branco: Igreja Matriz de Santo Antônio. Não há informações precisas sobre o ano de sua construção. Estima-se anterior ao ano de 1717, de acordo com documentação existente de registro do primeiro casamento ocorrido na matriz, no ano supracitado. A data de 1779, inscrita no frontispício, provavelmente se refere à conclusão do edifício. Originalmente edificada em taipa de pilão, atualmente apresenta trincas, preenchidas com lascas de pedras, nas paredes externas (fachadas laterais e posterior). A união entre paredes é feita com emprego dos tijolos de adobe e de peças em madeira na ligação entre ambos os materiais (colunas de adobe e paredes em taipa de pilão). A parede frontal e as torres sineiras são em alvenaria de pedra. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, localizada no caminho novo. Pertence à bacia do Rio Doce.



Figura 63: Igreja Matriz de Santo Antônio

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 64: Igreja Matriz de Santo Antônio

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Ouro Preto: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar. Erguida em torno de uma capela construída em 1696 e ampliada em 1712, sofreu intervenções até o final do século. Conserva as paredes laterais da capela mor de taipa de pilão. A parede traseira, construída na mesma técnica, desabou na madrugada do dia 13 de março de 1961, devido à ação lenta e continuada de águas de chuva (LEAL, 1977). As paredes da nave são em alvenaria de pedra. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, localiza-se no cruzamento do caminho velho, caminho novo e caminho dos diamantes, próxima às nascentes do Rio das Velhas e Piracicaba. Bacias do Rio Doce e Rio São Francisco.



Figura 65: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 66: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Prados: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição. Erguida no início do XVIII, provavelmente entre os anos de 1711 e 1718. Apresenta sistema construtivo autoportante em alvenaria de pedra e paredes em taipa de pilão. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho velho. Está situada na bacia do Rio Grande.



Figura 67: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 68: Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Prados: Igreja de Nossa Senhora do Rosário. Não há registros do início da construção, sendo o ano de 1770 a provável data da sua conclusão. Apresenta sistema construtivo autoportante em alvenaria de pedra e paredes em taipa de pilão. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho velho. Está inserida na bacia do Rio Grande.



Figura 69: Igreja de Nossa Senhora do Rosário

Fonte: Acervo da autora, 2015.

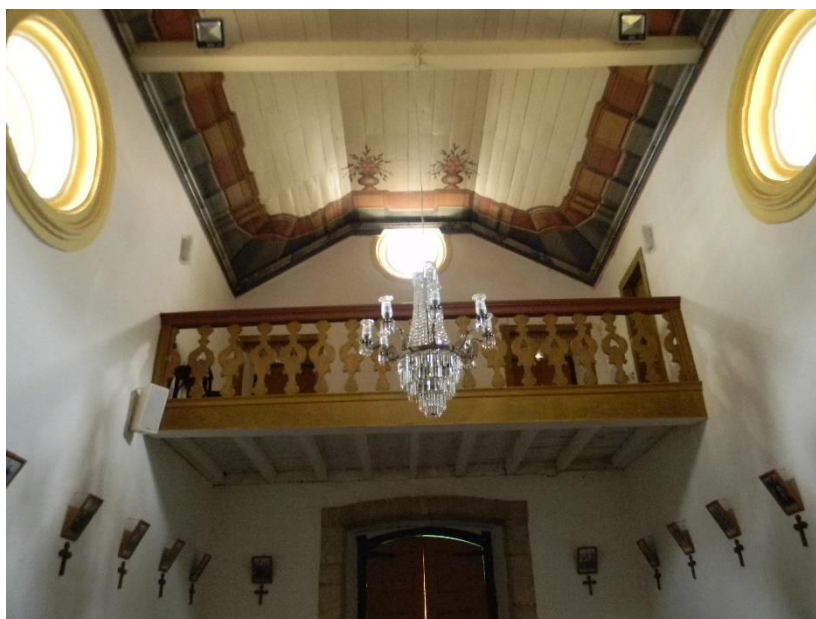


Figura 70: Igreja de Nossa Senhora do Rosário

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Ritópolis (zona rural): Sede da Fazenda São Miguel. Erguida no ano de 1750, apresenta embasamento em pedra, paredes externas em taipa de pilão e paredes internas em pau-a-pique. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho velho. Está situada na bacia do Rio Grande.



Figura 71: Sede da Fazenda de São Miguel

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 72: Sede da Fazenda de São Miguel

Fonte: Acervo da autora, 2015.

São Francisco de Paula: Igreja Nossa Senhora do Rosário. A parte antiga da construção – a frente – foi erguida no ano de 1882. Posteriormente, em 1932, sofreu ampliação aos fundos. Possui paredes em taipa de pilão e outras em adobe. A cidade está situada na bacia do Rio São Francisco.



Figura 73: Igreja Nossa Senhora do Rosário

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 74: Igreja Nossa Senhora do Rosário

Fonte: Acervo da autora, 2015.

São João Del Rey: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar. A construção inicial ocorreu entre os anos de 1721 e 1750, sendo erguida em taipa de pilão. Passou por obras no ano de 1817 e posteriormente entre os anos de 1850 e 1860, recebendo a influência da arquitetura neoclássica em seu frontispício, reconstruído em alvenaria de pedra. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho velho. Está situada na bacia do Rio Grande.



Figura 75: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar

Fonte: Acervo da autora, 2015.

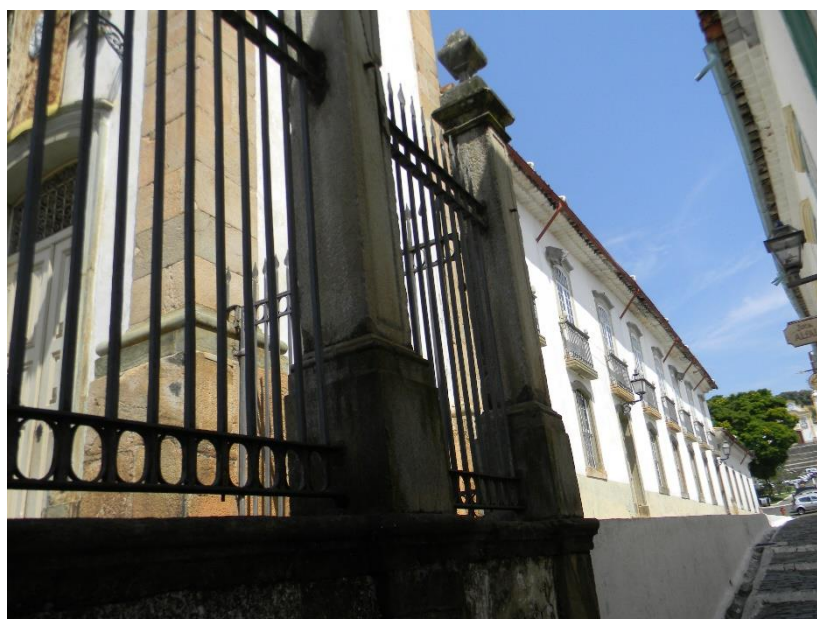


Figura 76: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Tiradentes: Capela de São João Evangelista. Construção iniciada por volta de 1760, se estendendo até os últimos anos do século XVIII e início do século XIX. Apresenta sistema construtivo em taipa de pilão e embasamento em alvenaria de pedra. A cidade é integrante do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho velho. Situa-se na bacia do Rio Grande.



Figura 77: Capela de São João Evangelista

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 78: Capela de São João Evangelista

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Tiradentes: Igreja Matriz de Santo Antônio. Erguida em 1732. Durante os anos de 1807 e 1810, passou por intervenções nas fachadas, trabalho realizado por Aleijadinho, sob a influência do rococó. Apresenta sistema construtivo autoportante em alvenaria de pedra e paredes em taipa de pilão e adobe. As paredes mais antigas são em pau-a-pique. A cidade faz parte do circuito Estrada Real, estando localizada no caminho velho. Está situada na bacia do Rio Grande.



Figura 79: Igreja Matriz de Santo Antônio

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 80: Igreja Matriz de Santo Antônio

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Várzea da Palma (Povoado de Porteiras): Ruínas da Igreja Nossa Senhora de Bom Sucesso. A construção se deu, provavelmente, entre os anos de 1728 a 1770. A fachada frontal foi erguida em pedra argamassada. Possui algumas paredes laterais em taipa de pilão. A cidade está situada na bacia do Rio São Francisco.



Figura 81: Ruínas da Igreja Nossa Senhora de Bom Sucesso

Fonte: Acervo da autora, 2015.



Figura 82: Ruínas da Igreja Nossa Senhora de Bom Sucesso

Fonte: Acervo da autora, 2015.

Entre as construções estudadas e visitadas, foram verificadas ocorrências de patologias relacionadas a:

- Idade do material – desgaste natural em função do tempo.
- Umidade em paredes externas e internas – chuvas, umidade do solo (capilaridade), lençol freático.
- Presença de material orgânico – sementes, vegetação.
- Presença de fungos – podridão.
- Ausência de manutenção.
- Desconhecimento do material, gerando intervenções inadequadas.
- Ausência de uso.

Ao ser realizada a pesquisa, sobre o acervo de construções em taipa de pilão no estado de Minas Gerais, verificou-se a importância do registro da técnica para a preservação desse patrimônio, uma vez que se trata de obras de grande beleza estética e rara ocorrência no estado, como já afirmado anteriormente. No mapa da Figura 83, é possível verificar as áreas de ocorrência de edificações que possuem paredes erguidas em taipa de pilão.

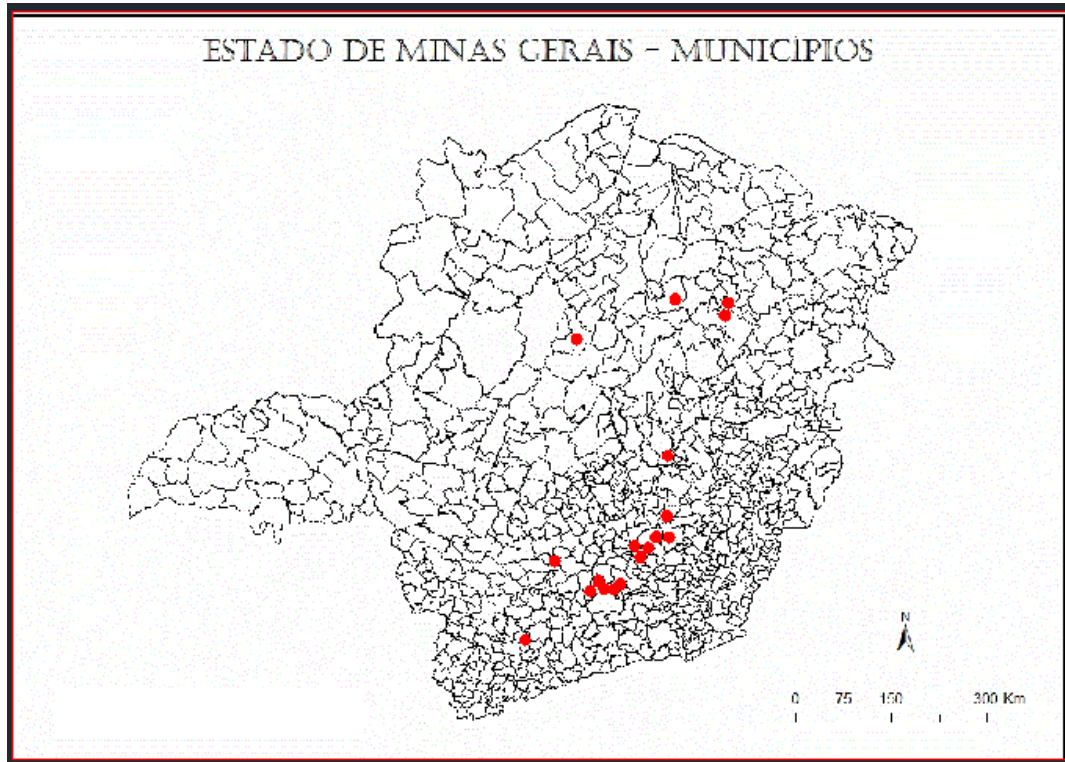


Figura 83: Mapa de incidência da taipa de pilão no estado de Minas Gerais

Fonte: <http://imagestack.co/225686532-mapa-de-minas-gerais-completo-para-imprimir-e-colorir.html>

(Adaptado de dicasnaweb.net. 2015)

Percebe-se que, embora os bandeirantes tenham entrado em território mineiro a partir do sul de Minas, nessa região, foi encontrada apenas uma edificação erguida com o emprego dessa técnica. A maioria das construções, erguidas com técnica mista e, em geral, com menores trechos de paredes em taipa de pilão, encontram-se nas áreas de intensa exploração aurífera, na região metropolitana de Belo Horizonte e no Campo das vertentes. Essas áreas apresentam médio a altos índices pluviométricos (Figura 84). Apenas quatro cidades, nas regiões mais ao norte do estado (Norte de Minas e Jequitinhonha), apresentam edificações quase ou inteiramente erguidas em taipa de pilão, o que não ocorre nos exemplares das demais regiões, com clima mais úmido. Essas localidades contam com aproximadamente um terço das igrejas catalogadas no território mineiro. Nessa região, onde os índices pluviométricos são mais baixos (Figura 84), as construções listadas apresentam melhor conservação de suas estruturas.

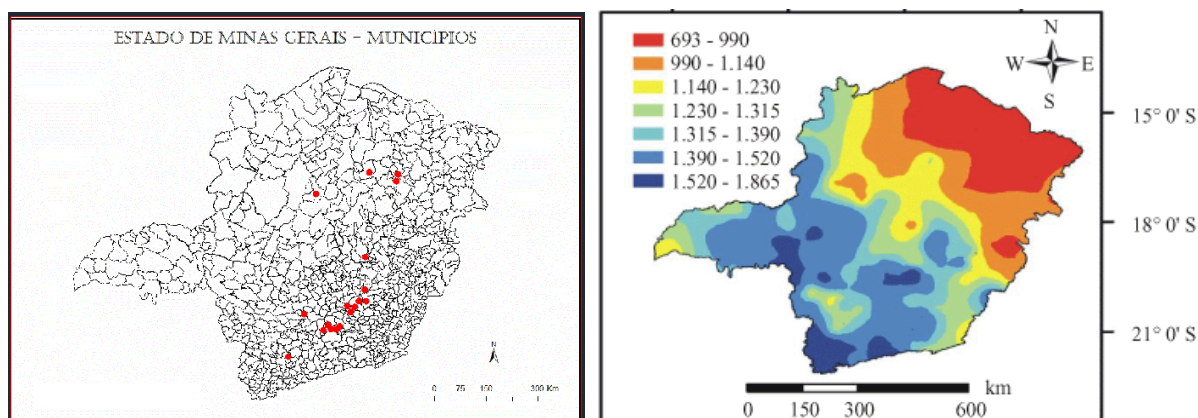


Figura 84: Comparativo entre mapas de incidência da taipa de pilão no estado de Minas Gerais e de precipitação anual média de Minas Gerais

Fontes: <http://imagestack.co/225686532-mapa-de-minas-gerais-completo-para-imprimir-e-colorir.html>

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000900009

(Adaptado de dicasnaweb.net. 2015)

Algumas construções passaram por obras de restauro, no entanto, a maioria das edificações exibem precário estado de conservação. Em geral, as maiores perdas e problemas de umidade ocorreram nas edificações encontradas nas cidades situadas em áreas de maior índice pluviométrico do estado.

Trata-se de um acervo precioso que precisa ser conservado, por sua estética, sua historicidade e, principalmente, em função do raro emprego dessa tecnologia construtiva.

3.2 Execução da miniparede em taipa de pilão

Para verificar a existência de correlação entre a velocidade das ondas ultrassônicas e a resistência de parede em taipa de pilão e elaborar uma metodologia para a realização de ensaios de ultrassom, que permitam inferir a resistência nessas paredes, é necessária a construção de um protótipo – uma miniparede – com o emprego dessa tecnologia construtiva e uso de material terroso apresentando granulometria e teor de umidade ideais para a sua execução.

3.2.1 Caracterização geotécnica do solo coletado

Após a realização da mistura do solo, foi retirada uma amostra de 3 kg e enviada para ensaios laboratoriais geotécnicos – ensaio de caracterização granulométrica por peneiramento e sedimentação e determinação da densidade real do solo (Figura 85).

O solo recebeu a seguinte classificação:

- Classificação de campo: solo predominantemente argiloso.
- Classificação laboratorial: Argila areno-siltosa de cor avermelhada.

As características geotécnicas da amostra estão descritas nas Tabelas 4 e 5:

TABELA 4

Resumo da caracterização granulométrica do solo coletado

Granulometria (ABNT)	(%)
Argila ($d < 0,002$ mm)	39,7
Silte ($0,002 < d < 0,06$ mm)	17,5
Areia ($0,06 < d < 2,0$ mm)	39,7
Pedregulho ($d > 2,0$ mm)	3,1

Fonte: ENGESOLO – Engenharia Ltda. Ensaio laboratoriais.

TABELA 5

Índices físicos do solo coletado

Índices físicos	
Densidade real do solo – δ (g/cm ³)	2,681

Fonte: ENGESOLO – Engenharia Ltda. Ensaio laboratoriais.

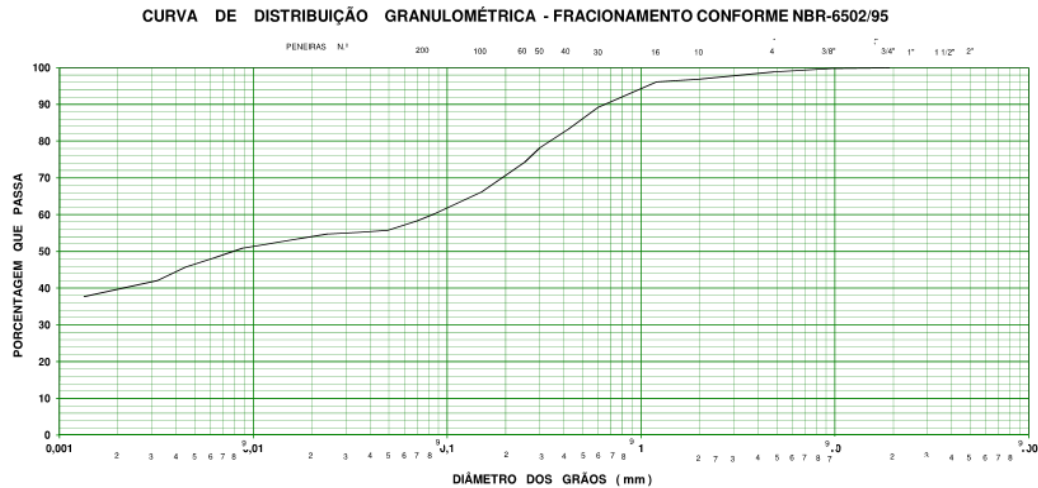


Figura 85: Curva de distribuição granulométrica – solo coletado

Fonte: ENGESOLO, 2016.

3.2.2 Caracterização geotécnica do solo corrigido

Após a correção do solo inicialmente coletado, a partir da adição de uma mistura de areia fina e areia grossa em iguais proporções, novamente foi enviada uma amostra de 3 kg para o laboratório, para a realização dos ensaios geotécnicos – ensaio de granulométrico por peneiramento e sedimentação (Figura 86), determinação dos índices físicos (determinação de peso específico e teor de umidade) e índices de consistência (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) e ensaio de compactação – Proctor Normal.

O solo recebeu a seguinte classificação:

- Classificação de campo: mistura de areia com solo argiloso.
- Classificação laboratorial: areia argilo-siltosa de cor amarelada com pedregulho.

As características geotécnicas da amostra estão descritas nas Tabelas 6, 7 e 8:

TABELA 6

Resumo da caracterização granulométrica do solo corrigido

Granulometria (ABNT)	(%)
Argila ($d < 0,002$ mm)	20,2
Silte ($0,002 < d < 0,06$ mm)	9,2
Areia ($0,06 < d < 2,0$ mm)	63,4
Pedregulho ($d > 2,0$ mm)	7,2

Fonte: ENGESOLO – Engenharia Ltda. Ensaios laboratoriais.

TABELA 7
Índices físicos do solo corrigido

Índices físicos	
Teor de umidade ótimo (%)	14,0
Densidade seca (g/cm^3)	1,865
Peso específico dos sólidos – γ_s (g/cm^3)	2,659

Fonte: ENGESOLO – Engenharia Ltda. Ensaios laboratoriais.

TABELA 8
Limites de consistência do solo corrigido

Índices físicos	
Limite de liquidez – LL	26
Limite de plasticidade – LP	16
Índice de plasticidade – IP	10

Fonte: ENGESOLO – Engenharia Ltda. Ensaios laboratoriais.

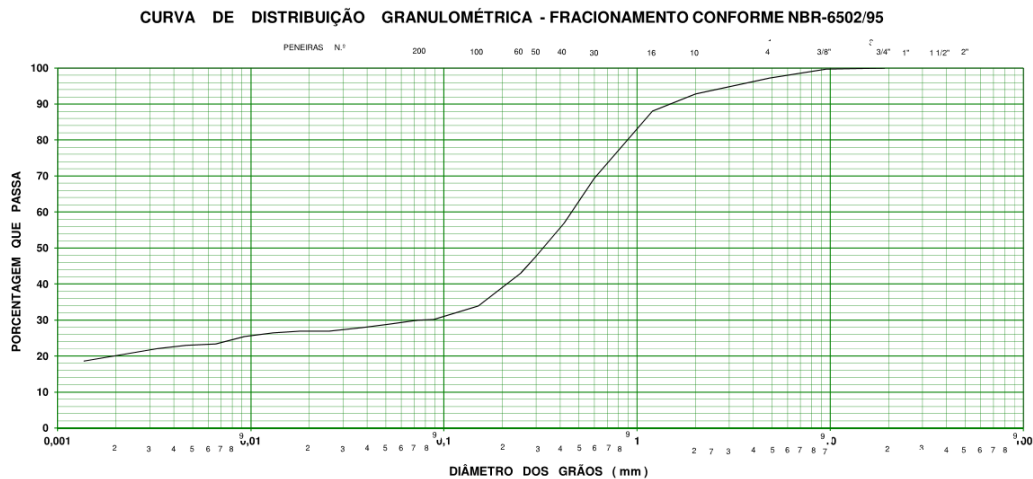


Figura 86: Curva de distribuição granulométrica – solo corrigido

Fonte: ENGESOLO, 2016.

O ensaio de compactação do solo gerou uma curva de compactação, apresentada no gráfico da Figura 87. Essa curva determina a relação entre o teor de umidade e a densidade seca do solo, quando compactado, obedecendo às prescrições da NBR 7182/1986 – Solo – Ensaio de Compactação. O solo foi compactado a partir da aplicação de energia de compactação normal, e o cilindro utilizado foi o de Proctor Normal.

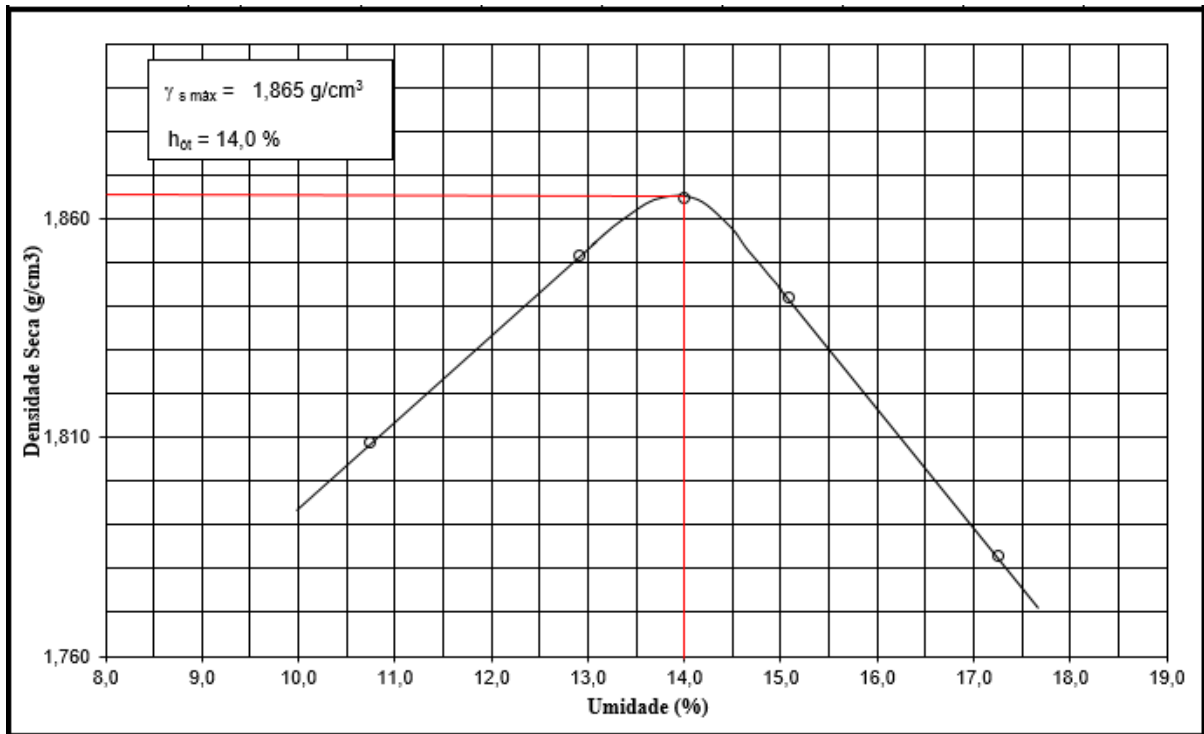


Figura 87: Gráfico – Curva de compactação do solo ¹¹

Fonte: ENGESOLO, 2016.

3.2.3 Compactação da miniparede em taipa de pilão

Para a compactação da miniparede em taipa de pilão, foi empregado um taipal, confeccionado em madeira (Figuras 88, 89, 90 e 91), por um mestre em carpintaria¹², apresentando *design* o mais próximo possível do taipal clássico, utilizado nas construções em taipa de pilão do período colonial brasileiro, com as seguintes dimensões internas: 1,50 m de comprimento, altura de 0,90 m e 1,00 m de espessura. O instrumento de compactação empregado foi um pilão de madeira, de base cônica, com diâmetro de 9,0 cm e com peso de 4 kg. As camadas de solo foram compactadas apresentando altura inicial de 15 cm e, após a compactação, passaram a ter, aproximadamente, 10 cm de altura. O protótipo foi compactado apenas por uma pessoa que, durante a execução, levantava o pilão a 40 cm de altura e o deixava cair em queda livre, buscando, assim, garantir homogeneidade de compactação em toda a miniparede.

¹¹ Gráfico elaborado a partir dos resultados apresentados pelo laudo de ensaio de compactação do solo realizado pela Engesolo – Engenharia Ltda.

¹² Taipal, confeccionado em madeira, pelo mestre em carpintaria Sr. Olandino Raimundo do Nascimento.



Figuras 88 e 89: Taipal utilizado na compactação da miniparede em taipa de pilão

Fonte: Acervo da autora, 2016.



Figuras 90 e 91: Detalhe das cunhas do taipa utilizado na compactação da miniparede em taipa de pilão

Fonte: Acervo da autora, 2016.

3.2.3.1 Controle do teor de umidade

Foi realizado o controle do teor de umidade para cada camada de compactação, sendo as mesmas executadas no teor de umidade ótimo de 14 %, obtido no ensaio de compactação de laboratório conforme descrito no item 3.2.2.

A cada camada compactada, foi verificado, inicialmente, o teor de umidade apresentado pelo solo, a partir do método expedito da frigideira, executado da seguinte forma:

1 – Foram pesadas três cápsulas metálicas e os pesos devidamente anotados, com uso de balança de precisão de 0,001 g.

2 – Foram colocadas, nas cápsulas metálicas, amostras do solo a ser compactado.

3 – As cápsulas, com as amostras, foram novamente pesadas e os pesos respectivos anotados – peso mínimo de solo estipulado em 80 g.

4 – As cápsulas foram colocadas em uma bandeja com areia aquecida, apoiada sobre fogareiro.

5 – O solo dentro das cápsulas era seco pelo calor. O procedimento de secagem durava em torno de 30 a 40 minutos e o mesmo só era retirado quando estivesse completamente seco.

6 – A cápsula aquecida era tampada e, ao atingir a temperatura ambiente, era destampada e pesada novamente.

7 – Com os pesos anotados, era calculado o teor de umidade do solo.

Para a realização do controle de umidade, de cada camada de solo a ser compactada, a partir do emprego do método expedito da frigideira (Figuras 92, 93 e 94) foram retiradas três amostras, em pontos diferentes do solo reservado. Por ser uma quantidade significativa, foi verificada a necessidade desse procedimento, visando encontrar uma média do teor de umidade apresentada pelo solo a ser utilizado na compactação da camada e possibilitando uma amostra com valor do teor de umidade ótima o mais aproximado possível do indicado pelos ensaios laboratoriais.



Figuras 92, 93 e 94: Pesagem das cápsulas sem a amostra, com amostra úmida e com amostra seca

Fonte: Acervo da autora, 2016.

A partir do teor de umidade ótimo e do teor de umidade, apresentados pelo solo de cada camada, foi elaborada uma equação matemática, para fazer a correção do teor de umidade.

A equação empregada: ¹³

$$A = \frac{Ms * Y}{100} = \frac{Mh * 100}{100 + X} * \frac{Y}{100} = \frac{(Mh * 100)}{(100 + X)} * \frac{(hót - X + P)}{100} = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

¹³ Equação elaborada pelo Engenheiro Benjamim José da Silva, responsável pelo laboratório de Geotecnia - Engesolo.

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

Onde: “Mh” é o peso original do solo úmido, “A” é o peso em água a ser acrescentado, hót é a umidade ótima do solo quando compactado na energia do Proctor normal, “X” é a porcentagem original de água no solo e “Y” é a porcentagem de água a acrescentar definida para compactação da parede de taipa.

Tendo em vista que o trabalho foi realizado em área a céu aberto, onde o sol e o vento atuam significativamente para a secagem do solo, no período de preparo do mesmo, antes da compactação da camada da parede de taipa, entendeu-se por bem considerar uma perda de umidade da ordem de 1,2% durante o processo de mistura. Foi acrescentada tal perda na correção de umidade do solo. As umidades obtidas, após esse processo de preparo, exibiram valores muito aproximados do valor de teor de umidade conforme definido/desejado.

Após a correção da umidade do solo, o mesmo procedimento era refeito, buscando-se averiguar se o mesmo tinha atingido o teor de umidade ótimo para a sua compactação. Essa verificação, assim como a primeira, foi realizada para todas as camadas de compactação da miniparede em taipa de pilão, buscando garantir uma parede compactada com controle do seu teor de umidade, durante a sua execução.

O memorial de todos os cálculos de verificação e correção do teor de umidade inicial e no momento da compactação de todas as camadas da miniparede em taipa de pilão estão descritos no Apêndice A.

3.2.3.2 Compactação das camadas da miniparede

Para certificar se o grau de compactação foi atendido, alguns parâmetros tiveram que ser estipulados em função da revisão bibliográfica sobre a construção de edificações em taipa de pilão, durante o período colonial.

A energia de compactação é dada por:

$$E_c = \frac{P * H * n * N}{V}$$

Onde: “Ec” é a energia de compactação, “P” é o peso do soquete (4kg x 9,81), “H” (0,4 m – 1ª variável – previamente estipulada) é a altura de queda do soquete, “n” é o número de camadas (1 – uma camada), “N” é o número de golpes por camada (2ª variável) e “V” (área da base do soquete x altura da camada compactada – V = A (base do pilão - A = πr² = 3,14 x

$(0,045 \text{ m}^2 = 0,0064 \text{ m}^2) \times h$ (camada compactada – 0,10 m). $\Rightarrow V = 0,0064 \times 0,10 = 0,00064 \text{ m}^3$)
é o volume do solo compactado.

Partindo da equação de energia de compactação descrita, foi verificada a existência de duas variáveis. De acordo com a revisão bibliográfica, na taipa histórica, as camadas apresentavam uma altura inicial de 15 cm, atingindo, após a compactação, uma altura aproximada de 10 cm. Para a compactação, foi estipulada a altura de queda do pilão em 40 cm, considerada confortável pelo profissional responsável pela compactação da miniparede. A partir da definição dessa variável, foram realizados experimentos de compactação em campo, dentro de uma forma, com uma camada de altura inicial de 15 cm, do próprio solo a ser empregado, buscando verificar o número de golpes necessários, com o pilão caindo de 40 cm, para que a mesma atingisse a altura de 10 cm, após a compactação. Ficaram definidos 4 golpes por área equivalente à área da base do pilão.

Cálculo da energia de compactação:

$$E_c = \frac{(4,0 \times 9,81) * 0,4 * 1 * 4}{0,00064} = 98.690 \text{ J/m}^3 = 98,7 \text{ kJ/m}^3$$

A compactação da miniparede foi feita em observância às características da técnica construtiva da taipa de pilão. Foram sendo colocadas camadas de 15 cm de altura dentro da forma – taipal e compactadas.

O solo a ser colocado dentro da forma foi calculado em volume. Posteriormente, foi quantificado em latas, para facilitar o cálculo de água a ser acrescentada na correção da umidade e sua colocação dentro da forma. Para preencher a altura de 15 cm, foram necessárias 12 latas (foi usada a lata de tinta como medida padrão, para jogar o solo dentro da forma) preenchidas com solo.

- Peso da lata = 1 kg
- Peso do solo = 21 kg

A camada compactada atingiu, aproximadamente, 10 cm de altura. Após a compactação, eram feitas ranhuras na superfície da camada finalizada, de forma a obter melhor aderência com próxima camada a ser compactada. O processo foi repetido para as seis camadas que compõem a miniparede – protótipo desta pesquisa. A seguir, as Figuras 95 e 96 ilustram o trabalho de compactação da miniparede em taipa de pilão.

Durante a compactação, verificou-se uma maior dificuldade de sua realização em determinadas áreas das camadas de terra que compõem a parede, sendo elas: os cantos e as áreas imediatamente abaixo das travas horizontais da forma. Essas ocorrências foram

consideradas como fatores capazes de gerar alterações na qualidade de compactação dessas áreas.



Figuras 95 e 96: Compactação da miniparede.

Fonte: Acervo da autora, 2016.

3.2.4 Retirada da forma da miniparede em taipa de pilão

Após a compactação, a miniparede ainda ficou protegida pela forma por aproximadamente três semanas. Embora a técnica permita a retirada imediata da forma, após a compactação, isso não ocorreu devido à opção por manter o protótipo protegido de intempéries. A parede foi compactada no final do mês de maio, em geral mês de baixo índice de pluviosidade, portanto, pouca probabilidade de chuva, porém nesse ano, ocorreram chuvas ao longo desse mês, daí a necessidade de se proteger o protótipo. A forma foi cuidadosamente removida no início do mês de junho e a parede passou a ser protegida por lona de caminhão.

Primeiramente foram retirados os cunhais e as travas superiores. E então foram removidas as quatro laterais da forma. Optou-se por se deixar as travas inferiores, pois foi verificada a possibilidade de danos ao protótipo a partir da retirada dessas peças em madeira. Como dito anteriormente, a forma foi executada com base no modelo do taipal clássico, mas algumas adaptações precisaram ser feitas, em função da disponibilidade de materiais e mão de obra disponíveis no mercado. As travas inferiores foram feitas apresentando secção quadrangular, que permitiu um sistema de encaixe eficiente para o travamento da forma, mas dificultando a sua remoção após a compactação da miniparede. As Figuras 97, 98, 99 e 100 ilustram o trabalho de remoção do taipal.



Figuras 97 e 98: Retirada da forma da miniparede

Fonte: Acervo da autora, 2016.



Figuras 99 e 100: Retirada da forma da miniparede

Fonte: Acervo da autora, 2016.

Embora a parede tenha ficado protegida por lona de caminhão, foi possível verificar a troca de umidade, com o ambiente externo, devido à presença de água na superfície da parede e na própria lona que a cobriu. A parede perdeu umidade para o meio ambiente.

3.2.5 Malha e pontos de medição

Após a retirada da forma, foi feita uma malha nas faces laterais da parede (conforme Figuras 101 e 102), para definir os pontos de ensaios de ultrassom. A malha foi feita com o uso da antiga técnica do barbante tracionado e pó xadrez branco para marcar as linhas verticais e horizontais nas faces de paredes. O espaçamento utilizado entre as linhas horizontais foi de 10 cm e entre linhas verticais de 15 cm, sendo definidos em função das dimensões da própria

miniparede e das dimensões mínimas necessárias para o posicionamento dos transdutores para os ensaios de ultrassom, descritas no item 2.3.6 – Definição dos pontos de ensaio, do capítulo 2 – Metodologia. Os testes foram realizados nos pontos de interseção das linhas da malha.



Figuras 101 e 102: Malha e pontos de medição

Fonte: Acervo da autora, 2016.

3.3 Ensaio de ultrassom

Buscando estabelecer valores de tempo de transmissão e velocidade de onda, compatíveis com uma parede sem patologias, foram realizados ensaios de ultrassom, empregando-se o aparelho Pundit Lab - *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*, já descrito no item 2.3.1 - Definição do equipamento ultrassom do capítulo 2 – Metodologia. Os ensaios foram executados atendendo às prescrições das normas BS 1881: Part 203:1986 – *Testing concrete – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete* (BS, 1986) e a NBR 8802/1994 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade da propagação de onda ultrassônica (ABNT, 1984).

3.3.1 Métodos de transmissão

Conforme citado, a norma BS-1881 especifica três posições para a instalação dos transdutores escolhidos e adequados à medição do tempo e velocidade de propagação das ondas passantes pelos corpos de prova: transmissão direta, transmissão semidireta, transmissão indireta. Para o ensaio, foram empregados dois métodos de transmissão: direto e indireto.

O método de transmissão direta, em que os transdutores foram posicionados em faces opostas da miniparede, não gerou resultados em nenhuma das frequências de transdutores utilizados, durante os ensaios realizados. Apenas no método de transmissão indireta, em que os transdutores foram posicionados na mesma face da parede, o ensaio de ultrassom produziu leituras, resultados considerados válidos.

3.3.2 Preparação para os ensaios

Na fase de preparação dos ensaios, antes de realizar as medições, o aparelho foi calibrado para a frequência de transdutor a ser empregada, conforme demonstrado nas Figuras 103 e 104. Esse procedimento foi realizado para todas as frequências.



Figura 103: Calibração dos transdutores de 54 kHz.

Fonte: Acervo da autora, 2016.



Figura 104: Calibração dos transdutores de 82 kHz

Fonte: Acervo da autora, 2016.

Durante o processo de calibração, foi usado gel para o perfeito acoplamento entre os transdutores e o cilindro calibrador. De acordo com o fabricante, a leitura padrão do tempo gasto pela onda para atravessar o cilindro é de 25,4 μ s.

Em todas as frequências, para cada medição realizada, foi utilizado também o gel acoplante, colocado na superfície do transdutor, fazendo a ligação entre o mesmo e a superfície da parede, de forma a evitar presença de ar entre as superfícies de contato.

3.3.3 Transdutores utilizados

Para os ensaios de ultrassom foram utilizados os seguintes transdutores: 54 kHz, 82 kHz, 150 kHz, 200 kHz e 500 kHz.

3.3.3.1 Resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz

Foram realizados ensaios com o uso de transdutores de frequência de 54 kHz. As leituras geradas pelo aparelho ultrassom apresentaram estabilização em todos os pontos. Portanto, esses dados produzidos pelo ensaio foram considerados válidos.



Figura 105: Ensaio de ultrassom com transdutores de 54 kHz

Fonte: Lídia S. Peixoto, 2016.

Foram realizadas três leituras em cada par de pontos definidos na malha (Figura 105). No entanto, as leituras apresentaram resultados com variações significativas. Os resultados das três leituras dos pares de pontos marcados pela malha estão descritos no Apêndice B. A seguir, na Tabela 9, estão descritas as médias dos resultados do ensaio de ultrassom em cada par de pontos definidos nas faces da miniparede.

TABELA 9
Resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz

Pontos	Distância entre transdutores (cm)	Média das velocidades de transmissão de onda (m/s)
1	60	255
2	60	277
3	60	288,67
4	60	280
5	30	303,33
6	30	271
7	30	286,67
8	30	336,33
9	15	354
10	15	356,33
11	15	399,33
12	15	304,33
13	60	283
14	60	259,33
15	60	272,67
16	60	300,33
17	30	295,33
18	30	320,67
19	30	271,67
20	30	291,33
21	15	400
22	15	373
23	15	375,33
24	15	414,67
25	60	298,67
26	60	307,67
27	60	318,33
28	60	295

Pontos	Distância entre transdutores (cm)	Média das velocidades de transmissão de onda (m/s)
29	30	338,33
30	30	334
31	30	271,67
32	30	273,33
33	15	563,33
34	15	385,67
35	15	363
36	15	367,67
37	60	304,33
38	60	287,67
39	60	302
40	60	292
41	30	302,33
42	30	287,67
43	30	250,33
44	30	241,33
45	15	404,33
46	15	352
47	15	335,33
48	15	347,67
49	60	327
50	60	437,33
51	60	358,33
52	60	318,33
53	30	324,33
54	30	296,67
55	30	260
56	30	247
57	15	388,67
58	15	385
59	15	380,67

Pontos	Distância entre transdutores (cm)	Média das velocidades de transmissão de onda (m/s)
60	15	330,33
61	60	335,67
62	60	291,67
63	60	280,67
64	60	269
65	30	335
66	30	320,33
67	30	279,33
68	30	331,33
69	15	367,67
70	15	318,33
71	15	351
72	15	429,67

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

A seguir, nas Tabelas 10, 11 e 12, a descrição estatística das médias dos resultados do ensaio de ultrassom nas faces da miniparede.

TABELA 10

Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz. – Distância entre transdutores de 60 cm

Máximo	437,33
Mínimo	255,00
Média	306,21
Amplitude	182,33
Moda	–
Desvio-padrão	39,05
Variância	1.524,89

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

TABELA 11

Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz. – Distância entre transdutores de 30 cm

Máximo	338,33
Mínimo	241,33
Média	294,55
Amplitude	97,0
Moda	–
Desvio-padrão	29,74
Variância	884,57

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

TABELA 12

Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz. – Distância entre transdutores de 15 cm

Máximo	563,33
Mínimo	304,33
Média	376,97
Amplitude	259,0
Moda	367,67
Desvio-padrão	48,78
Variância	2.379,97

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

De acordo com o resumo da descrição estatística, apresentado nas Tabelas 10, 11 e 12, dos ensaios com o uso do transdutor de 54 kHz, nas três diferentes distâncias entre transdutores, sendo elas de 15 cm, 30 cm e 60 cm, pode-se perceber que as maiores velocidades de ondas ultrassônicas ocorrem com os transdutores posicionados a 15 cm de distância entre seus eixos. O valor mínimo ocorreu em medições com distância intermediária de 30 cm entre os eixos dos transdutores. As velocidades médias também não seguem um padrão diretamente ou inversamente proporcional às distâncias ensaiadas, sendo a maior, de 376,97 m/s, relacionada à menor distância, de 15 cm, entre transdutores, e a menor, de 294,55 m/s, relacionada à

distância, intermediária, de 30 cm entre transdutores. Nessa parede, ao se compararem valores de medições nas três distâncias de posicionamentos de transdutores supracitadas, foi verificado que os valores de velocidade de onda registrados, embora não apresentem variações extremamente significativas, exibem números que indicam variações acima da porcentagem admitida pelas normas de ensaios ultrassônicos. Assim como as velocidades médias, a amplitude atingida pelos valores de velocidade de onda, nas três distâncias ensaiadas, também não apresenta um padrão diretamente ou inversamente proporcional, podendo ser verificado que a maior amplitude ocorre com transdutores posicionados a 15 cm de distância entre eixos, e a menor com transdutores posicionados a 30 cm de distância entre eixos. O maior desvio-padrão ocorre com transdutores posicionados a 15 cm de distância, e o menor com transdutores posicionados a 30 cm de distância. A variância segue o mesmo padrão de comportamento do desvio-padrão. Diante dos dados expostos, verifica-se que o ensaio ultrassom não produziu resultados que apresentem um comportamento estável. As velocidades registradas não são diretamente ou inversamente proporcionais às distâncias ensaiadas, ou seja, elas não crescem ou diminuem em função do aumento ou da diminuição da distância entre transdutores. Apresentam um comportamento bastante variável. Essa variabilidade ocorre também em medições em mesmo ponto e com mesma distância entre transdutores. A norma pede o mínimo de três leituras em cada ponto ensaiado e uma precisão de 0,5 a 1% entre os valores de velocidade e tempo de transmissão de onda registrados. Tais parâmetros não conseguiram ser atendidos nos ensaios realizados na miniparede em taipa de pilão. Esses valores podem ser verificados no quadro do Apêndice B - Resultados dos ensaios de ultrassom.

Ao se compararem valores de medições nas três distâncias de posicionamentos de transdutores supracitadas, foi verificado que as velocidades de onda registradas – embora não demonstrem variações extremamente significativas, o que é esperado, uma vez que se trata do mesmo material, ou seja, mesmo meio de propagação de onda – exibem valores que indicam variações acima da porcentagem máxima permitida pelas normas de ensaios ultrassônicos, exibindo, portanto, inconsistências nos dados gerados. Tais inconsistências poderiam ser indicativo de presença de trincas, no entanto a parede ensaiada não apresentava a existência das mesmas. Portanto, essas inconsistências podem estar relacionadas à ausência de homogeneidade do material – solo, empregado em paredes de taipa de pilão. Esses resultados, podem ser um indicativo da inadequabilidade do emprego do ultrassom como método de investigação de patologias estruturais em paredes de terra compactada, como a taipa de pilão.

3.3.3.2 Resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 82 kHz

Foram realizados ensaios com o uso de transdutores de frequência de 82 kHz (Figura 106). As leituras geradas não apresentaram estabilização, dificultando a realização do ensaio, motivo pelo qual foi realizada apenas uma leitura em cada ponto, cujos resultados estão descritos no Apêndice B. Esses dados gerados foram considerados inconsistentes, portanto, inválidos. Sendo assim, essa frequência foi considerada inadequada para a utilização em ensaios nas paredes de taipa de pilão.



Figura 106: Ensaio de ultrassom com transdutores de 82kHz

Fonte: Lídia S. Peixoto, 2016.

3.3.3.3 Resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 150 kHz, 200 kHz e 500 kHz

Foram realizados ensaios com o uso de transdutores de frequência de 150 kHz, 200 kHz e 500 kHz. Para cada ensaio, foi realizada, com sucesso, a calibração do aparelho na frequência do transdutor a ser utilizado. Embora a calibração tenha sido feita de forma satisfatória, o aparelho ultrassom, ao ser empregado para a realização de ensaios, na miniparede, não produziu leitura com transdutores de 150 kHz, 200 kHz e 500 kHz. Essa ausência de resultados confiáveis indicam que essas frequências são inadequadas para a utilização em ensaios nas paredes em taipa de pilão.

3.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Buscando estabelecer correlação entre velocidade ultrassônica e resistência mecânica da parede em terra apiloada, erguida com o emprego da técnica construtiva da taipa de pilão, foram executados ensaios de resistência à compressão simples do solo compactado.

3.4.1 Retirada das amostras

Foram retiradas 16 amostras da parede, em diferentes pontos estabelecidos para os ensaios de ultrassom, para serem submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples.

Para a retirada das amostras, estava previsto o uso da broca-copo e máquina de arrancamento. No entanto, a broca-copo, ao ser utilizada para cortar a amostra, mostrou-se inadequada ao emprego em paredes em terra. O equipamento funciona com água, causando danos à amostra (Figuras 107 e 108).



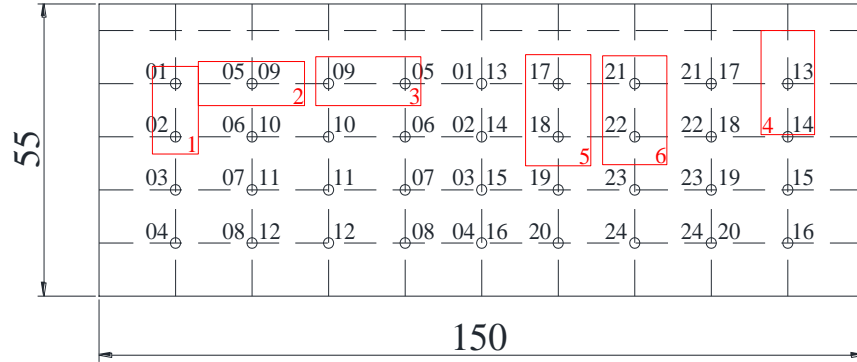
Figuras 107 e 108: Tentativa de retirada de amostra com uso da broca-copo

Fonte: Acervo da autora, 2016.

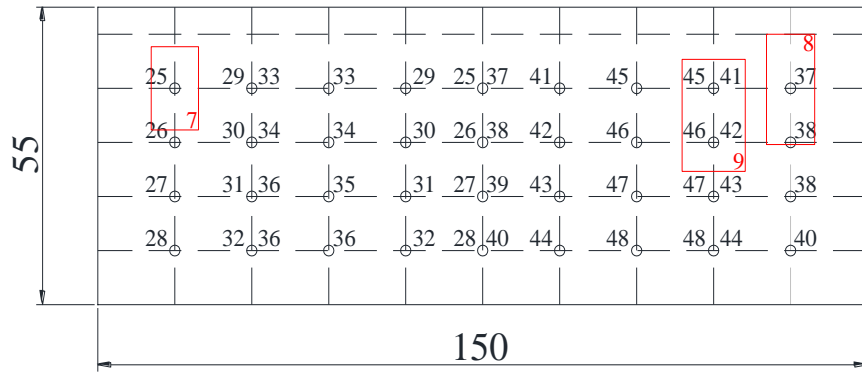
Foi empregado, portanto, uma serra para o corte de corpos de prova em concreto, com auxílio de um martelo (empregado com muito cuidado, apenas para auxiliar no descolamento do bloco da miniparede), como mostram as Figuras 110 e 111, na retirada dos blocos paralelepípedos com dimensões aproximadas de 10 x 20 cm (base) x 30 cm (altura).

Os corpos de prova retirados tiveram suas faces transversais (superior e inferior) regularizadas, para propiciar seu correto encaixe na prensa hidráulica, para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples.

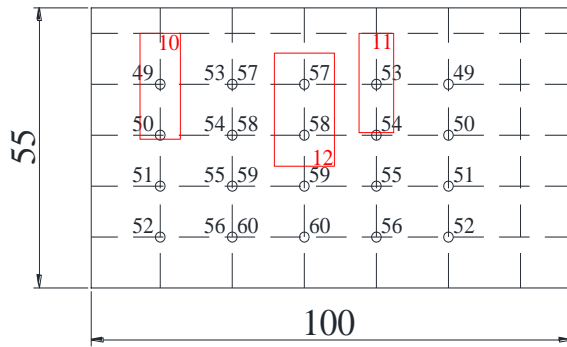
Os 16 corpos de prova retirados da miniparede (Figura 109) foram embalados em plástico (Figura 112) e transportados para o laboratório.



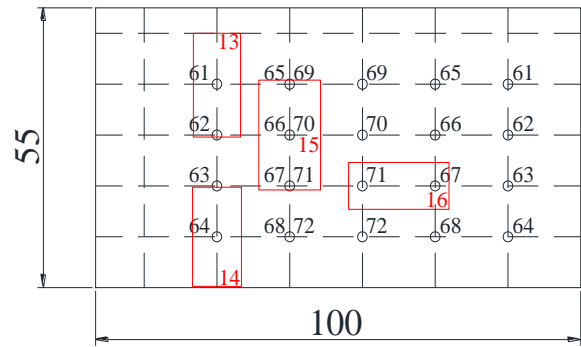
Painel – Vista Frontal



Painel – Vista Posterior



Painel – Vista Lateral direita



Painel – Vista Lateral esquerda

Figura 109: Localização das amostras retiradas na miniparede para ensaio à compressão simples

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.



Figuras 110 e 111: Retirada de amostra com uso da serra e da britadeira

Fonte: Acervo da autora, 2016.



Figura 112: Amostras retiradas para ensaio à compressão simples

Fonte: Acervo da autora, 2016.

3.4.2 Definição do equipamento para o ensaio de resistência à compressão simples

O equipamento utilizado nos ensaios de compressão simples, nas amostras retiradas, foi uma prensa hidráulica de regulagem manual, dotada de controlador de pressão inteligente, modelo RFP – 03. Foram ensaiados os 16 corpos de prova retirados da miniparede.

Os resultados dos ensaios à compressão foram comparados com os resultados das leituras de ultrassom nos pontos correlacionados.

3.4.3 Ensaio de resistência à compressão simples

Antes dos ensaios, os corpos de prova foram medidos, com o emprego do paquímetro digital, e as medidas, em polegadas, foram convertidas para centímetros. Também foram pesados em balança de precisão, com precisão de 0,1 kg. Os corpos de prova foram devidamente

colocados entre peças de neoprene, e o chapéu da prensa foi encaixado até encostar nos mesmos, buscando nivelar a superfície de contato entre eles e a prensa. Após a colocação dos corpos de prova, fechou-se o óleo e o ar, nesse momento ainda não havia carga sendo aplicada. Ao iniciar o procedimento, o óleo foi aberto no mínimo e a prensa começou a imprimir carga. Os corpos de prova foram submetidos a um carregamento axial, levando-os até a sua ruptura. No momento da ruptura dos mesmos, o óleo foi novamente fechado e o equipamento registrou a leitura da carga de ruptura. A tensão de ruptura foi calculada a partir do emprego da fórmula:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Onde: σ = Tensão de ruptura

P = Carga de ruptura

A = Seção transversal ao sentido da carga

Na Tabela 13, estão descritas as dimensões dos corpos de prova e os resultados do ensaio à compressão simples.

TABELA 13

Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples

Amostras	Pontos das amostras	Peso das amostras (kg)	Dimensões: Área da base x altura das amostras – L x C x H (m)	Área (transversal ao sentido da carga) (m ²)	Carga de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
1	1 e 2	3,950	0,145 x 0,090 x 0,165	0,013	3,01	231,54
2	5 e 9	2,550	0,092 x 0,083 x 0,208	0,008	1,65	206,25
3	5 e 9	2,400	0,083 x 0,092 x 0,206	0,008	1,28	160,00
4	13	3,500	0,102 x 0,105 x 0,196	0,011	2,92	265,45

Amostras	Pontos das amostras	Peso das amostras (kg)	Dimensões: Área da base x altura das amostras – L x C x H (m)	Área (transversal ao sentido da carga) (m ²)	Carga de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
5	17 e 18	4,700	0,110 x 0,128 x 0,209	0,014	4,56	235,71
6	21 e 22	5,200	0,115 x 0,126 x 0,205	0,015	5,08	338,67
7	25	2,400	0,097 x 0,092 x 0,154	0,009	1,92	213,33
8	37	2,800	0,098 x 0,094 x 0,204	0,009	2,93	325,55
9	45 e 46	4,650	0,116 x 0,123 x 0,207	0,014	4,91	350,71
10	49	3,200	0,091 x 0,084 x 0,208	0,008	2,32	290,00
11	53	3,950	0,098 x 0,072 x 0,195	0,007	2,92	417,14
12	57 e 58	4,350	0,100 x 0,125 x 0,222	0,013	4,84	372,31
13	61	2,850	0,083 x 0,097 x 0,204	0,008	1,93	241,25
14	64	2,400	0,113 x 0,101 x 0,195	0,011	2,84	258,18
15	66 e 70	4,250	0,097 x 0,127 x 0,216	0,012	3,19	265,83
16	67 e 71	3,800	0,103 x 0,092 x 0,207	0,01	2,57	257,00

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

TABELA 14

Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de resistência à compressão simples

Máximo	417,14
Mínimo	160
Média	273,88
Amplitude	257,14
Moda	–
Desvio-padrão	66,44
Variância	4.414,54

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

A partir do resumo da descrição estatística, apresentado na Tabela 14, dos ensaios de compressão simples, verificou-se a ocorrência de uma significativa variação nos valores de tensão de ruptura das amostras. Essa variação é atestada nos resultados explicitados pelo resumo da descrição estatística, os quais exibem amplitude de 259 kPa, desvio-padrão igual a 48,78 kPa e variância igual a 2.379,97 kPa². As amostras, embora sejam do mesmo protótipo, foram retiradas em diferentes áreas do mesmo. Embora o apiloamento tenha sido controlado, trata-se de uma miniparede compactada em campo. Algumas questões envolvendo a compactação da parede podem contribuir para a variação ocorrida nas tensões de ruptura demonstradas pelas amostras, entre elas:

- Compactação manual – apiloamento – variação na energia de compactação.
- Presença de peças de travamento que atravessam a forma, podendo criar dificuldade na compactação em determinadas áreas da miniparede.
- Os cantos podem apresentar condições de resistência diferentes em relação às demais regiões da miniparede, em função da dificuldade de compactação.
- Áreas de interface entre as camadas de compactação apresentam densidade diferente em relação à região interna da camada.

3.5 Correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica

O objetivo deste trabalho é investigar a existência de correlação entre a velocidade de onda ultrassônica e a resistência mecânica de uma parede de taipa de pilão, buscando apurar a possibilidade do uso do ultrassom como método de ensaio não destrutivo na verificação de

patologias nessas paredes. Para tal, foi necessária a realização de diversos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão simples em protótipo de parede erguida com o emprego dessa técnica de construção.

Aparentemente, a partir dos dados obtidos em ambos os ensaios – ultrassom e resistência à compressão simples –, pôde-se observar que não é possível estabelecer correlação desejável que ateste a possibilidade de emprego do ultrassom, como acontece com o concreto armado, na verificação da integridade mecânica de paredes em taipa de pilão.

A partir dos resultados dos ensaios supracitados, puderam ser elaboradas as Tabelas 15, 16, 17, 18, 19 e 20, com o comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão simples e, também, os gráficos, mostrados pelas Figuras 113, 114 e 115, que exibem a curva de correlação entre os parâmetros estudados: velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples, em uma miniparede de taipa de pilão. Essas tabelas e gráficos permitirão uma melhor análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

A seguir, a Tabela 15 demonstra o comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom com distância entre transdutores de 60 cm e de resistência à compressão simples e a Tabela 16 o resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios supracitados. O gráfico da Figura 113 exibe a curva obtida a partir da correlação dos pares ordenados dos resultados dos ensaios – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 60 cm.

TABELA 15

Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples –
Distância entre transdutores 60 cm

Corpo de prova	Ponto correspondente na malha	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
1	1	255,00	231,54
1	2	277,00	231,54
4	13	283,00	265,45
7	25	298,67	213,33
8	37	304,33	325,55
10	49	327,00	290,00
13	61	335,67	241,25
14	64	269,00	258,18
16	71	351,00	257,00

TABELA 16

Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 60 cm

Resumo da descrição estatística		
Propriedades estatísticas	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
Máximo	351	325,55
Mínimo	255	213,33
Média	300,07	257,09
Amplitude	96	112,22
Desvio-padrão	30,59	32,17
Variância	936,31	1034,71

A partir do resumo da descrição estatística, apresentado na Tabela 16, que exibe o comparativo entre os resultados dos ensaios de ultrassom com transdutores posicionados a 60 cm de distância e de resistência à compressão simples, observa-se a ocorrência de uma significativa variação dos parâmetros estatísticos dos resultados do ensaio de ultrassom, apresentando amplitude de 96m/s, desvio-padrão igual a 30,59 m/s e variância igual a 936,31 m/s². O mesmo ocorre para os resultados do ensaio de resistência à compressão simples, que mostra amplitude de 112,22 kPa, desvio-padrão de 32,17 kPa e variância de 1034,71 kPa². Verifica-se que o comportamento da variância, em ambos os ensaios, exibe valores significativos, e no parâmetro tensão de ruptura, esse valor é ligeiramente aumentado.

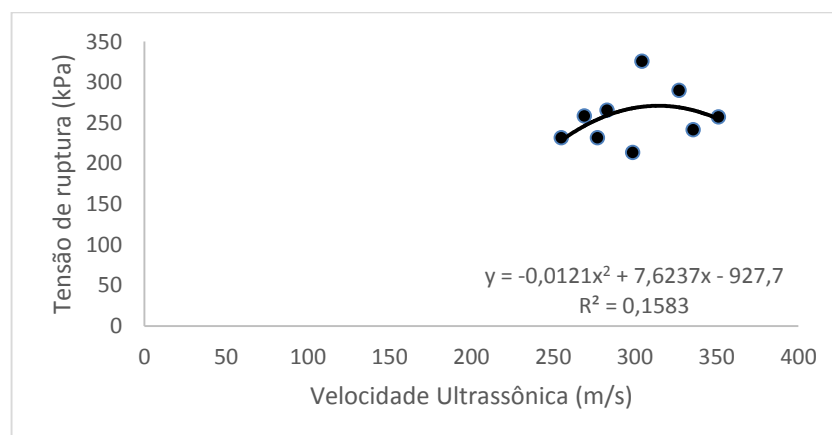


Figura 113: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica. – Distância entre transdutores de 60 cm

Fonte: PEIXOTO, 2016.

A partir dos pares dos valores encontrados nos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão simples, para transdutores posicionadas à distância de 60 cm, foi calculado o índice de correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples – r^2 . Para os pares das medições com transdutores distanciados em 60 cm, $r^2 = 0,16$. Esse coeficiente corresponde à muito baixa correlação.

A seguir, a Tabela 17 mostra o comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom com distância entre transdutores de 30 cm e de resistência à compressão simples e a Tabela 18 o resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios supracitados. O gráfico da Figura 114 exibe a curva obtida a partir da correlação dos pares ordenados dos resultados dos ensaios – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 30 cm.

TABELA 17

Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples –
Distância entre transdutores 30 cm

Corpo de prova	Ponto correspondente na malha	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
2	5	303,33	206,25
3	5	303,33	160,00
5	17	295,33	235,71
5	18	320,67	235,71
11	53	324,33	417,14
15	66	320,33	265,83
16	67	279,33	257,00

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

TABELA 18

Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 30 cm

Resumo da descrição estatística		
Propriedades estatísticas	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
Máximo	324,33	417,14
Mínimo	279,33	160,00
Média	306,66	253,95
Amplitude	45	257,14
Desvio-padrão	15,08	74,21
Variância	227,55	5506,96

De acordo com o resumo da descrição estatística, demonstrado na Tabela 18, que apresenta o comparativo entre os resultados dos ensaios de ultrassom com transdutores posicionados a 30 cm de distância e de resistência à compressão simples, verificou-se a ocorrência de uma significativa variação de parâmetros estatísticos dos resultados do ensaio de ultrassom, apontando amplitude de 45 m/s, desvio-padrão igual a 15,08 m/s e variância igual a 227,55 m/s². Nos resultados do ensaio de resistência à compressão simples, foi observada uma amplitude de 257,14 kPa, desvio-padrão igual a 74,21 kPa e variância igual a 5506,96 kPa². Pode-se aferir que o comportamento da variância, verificado a partir dos resultados da descrição estatística, de ambos os ensaios, exibe valores significativos e, no parâmetro tensão de ruptura, esse valor é sensivelmente aumentado.

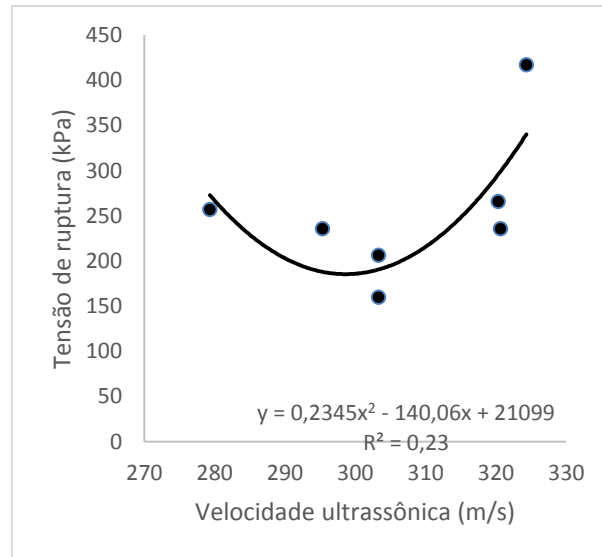


Figura 114: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 30 cm

Fonte: PEIXOTO, 2016.

A partir dos pares dos valores encontrados nos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão simples, para transdutores posicionadas à distância de 30 cm, foi calculado o índice de correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples – r^2 . Para os pares das medições com transdutores distanciados em 30 cm, $r^2 = 0,23$. Esse coeficiente corresponde à muito baixa correlação.

A seguir, a Tabela 19 mostra o comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom com distância entre transdutores de 15 cm e de resistência à compressão simples e a Tabela 20 o resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios supracitados. O gráfico da Figura 115 exibe a curva obtida a partir da correlação dos pares ordenados dos resultados dos ensaios – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 15 cm.

TABELA 19

Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples –
Distância entre transdutores 15 cm

Corpo de prova	Ponto correspondente na malha	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
2	9	354	206,25
3	9	354	160,00
6	21	400	338,67
6	22	373	338,67
9	45	404,33	350,71
9	46	352	350,71
12	57	388,67	372,31
12	58	385	372,31
15	70	318,33	265,83

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

TABELA 20

Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à
compressão simples – Distância entre transdutores 15 cm

Resumo da descrição estatística		
Propriedades estatísticas	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
Máximo	404,33	372,31
Mínimo	318,33	160,00
Média	369,93	306,16
Amplitude	86	212,31
Desvio-padrão	26,18	72,88
Variância	685,21	5311,79

A partir do resumo da descrição estatística, apresentado na Tabela 20, que mostra o comparativo entre os resultados dos ensaios de ultrassom com transdutores posicionados a 15 cm de distância e de resistência à compressão simples, constatou-se a ocorrência de uma significativa variação de parâmetros estatísticos dos resultados do ensaio de ultrassom, exibindo

amplitude de 86 m/s, desvio-padrão igual a 26,18 m/s e variância igual a 685,21 m/s², e nos resultados do ensaio de resistência à compressão simples, demonstrando uma amplitude de 212,31 kPa, desvio-padrão igual a 72,88 kPa e variância igual a 5311,79 kPa². Verifica-se que o comportamento da variância, em ambos os ensaios, exibe valores relevantes, especialmente no parâmetro tensão de ruptura, em que esse valor é sensivelmente aumentado.

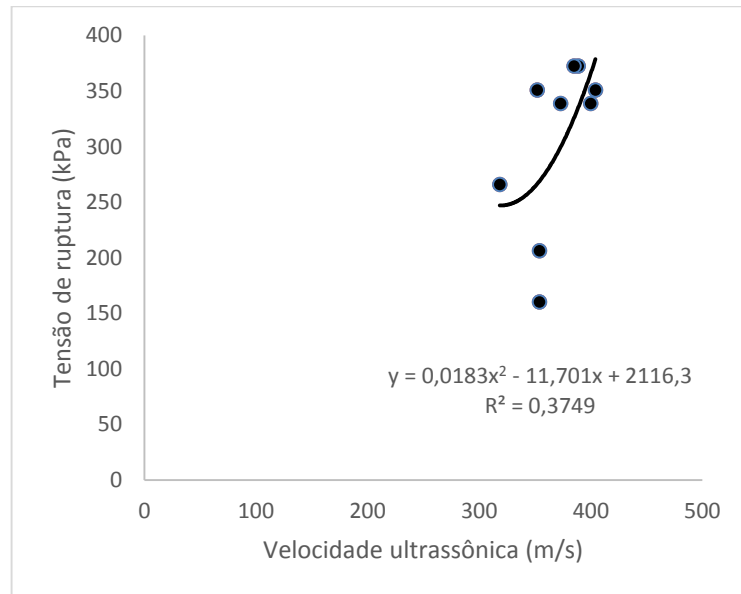


Figura 115: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 15 cm

Fonte: PEIXOTO, 2016.

A partir dos pares dos valores encontrados nos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão simples, para transdutores posicionadas à distância de 15 cm, foi calculado o índice de correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples – r^2 . Para os pares das medições com transdutores distanciados em 15 cm, $r^2 = 0,37$. Esse coeficiente corresponde à baixa correlação.

Conforme explicitado anteriormente, levando-se em consideração apenas o ensaio de ultrassom, percebe-se que as maiores velocidades de ondas ultrassônicas, registradas nos pontos de retirada de amostras para ensaios à compressão simples, ocorrem com os transdutores posicionados a 15 cm de distância entre seus eixos. O valor mínimo de velocidade encontrado corresponde às medições realizadas com distância intermediária de 30 cm, entre os eixos dos transdutores. Ao se comparar apenas velocidades médias relacionadas aos pontos de ensaio à

compressão simples, verifica-se que seu valor aumenta com a diminuição da distância entre transdutores, no entanto esse aumento não é substancial.

O parâmetro estatístico de amplitude também não apresenta valores diretamente ou inversamente proporcional às distâncias ensaiadas pelo ultrassom, podendo ser verificado que a maior amplitude ocorre com transdutores posicionados a 60 cm de distância entre eixos. O menor valor de amplitude para as medições ultrassônicas é exibido em pontos onde os transdutores foram posicionados a 30 cm de distância entre eixos. O menor valor de amplitude para ensaios de compressão simples é exibido em pontos onde os transdutores foram posicionados a 60 cm de distância entre eixos, e o maior em pontos onde os transdutores foram posicionados a 30 cm de distância entre eixos, demonstrando comportamento inverso em relação ao ensaio de ultrassom.

Ainda para essa amostragem, reduzida aos pontos de ensaio de resistência à compressão simples, o maior desvio-padrão, nos ensaios de ultrassom, ocorre com transdutores posicionados a 60 cm de distância, e o menor com transdutores posicionados a 30 cm de distância. Já para o parâmetro relacionado ao ensaio de resistência à compressão simples, verifica-se que o maior desvio-padrão se relaciona ao ponto de ensaio de ultrassom com 30 cm, o menor valor ocorre no ponto de ensaios de ultrassom com transdutores distantes a 60 cm, demonstrando comportamento oposto em relação ao ensaio de ultrassom.

A variância, nos ensaios de ultrassom, nos pontos de retirada de corpos de prova, apresenta maior valor no posicionamento entre transdutores de 60 cm e menor valor no posicionamento entre transdutores de 30 cm. Nos ensaios de resistência à compressão simples, ocorre a situação inversa, sendo o maior valor verificado no posicionamento entre transdutores de 30 cm e o menor valor no posicionamento de 60 cm.

Foi verificada a ausência de uma relação direta entre os valores de máximo e mínimo obtidos nos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples. Não há correspondência direta entre valores de velocidade ultrassônica e de resistência à compressão simples, obtidos nos pontos de leitura de retirada das amostras. Embora as médias desses valores apresentem relação direta, ou seja, maiores velocidades médias correspondem a maiores tensões de ruptura para as três distâncias entre transdutores ensaiadas, essas médias não refletem a realidade demonstrada pelo conjunto de valores individuais registrados dos parâmetros em questão, ou seja, maiores valores de velocidade ultrassônica não correspondem a maiores valores de tensão

de ruptura. Portanto, não foi possível estabelecer um padrão de comportamento ao se tentar correlacionar velocidade ultrassônica e tensão de ruptura, nos pontos ensaiados, em todas as distâncias definidas entre os transdutores.

A partir dos pares de valores encontrados nos ensaios de ultrassom e de resistência à compressão simples, para transdutores posicionados à distância de 60, 30 e 15 cm, foram obtidos os seguintes coeficientes de correlação – r^2 , respectivamente: 0,16, 0,23 e 0,37. Observa-se que a qualidade de correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples apresenta um ligeiro aumento com a diminuição da distância de posicionamento entre os transdutores. Para as distâncias de 60 e 30 cm, foram verificados valores de coeficientes de correlação correspondentes a muito baixa. Para a distância de 15 cm, embora o coeficiente de correlação apresente valor aumentado, o mesmo indica que a qualidade dessa correlação é baixa.

Esse resultado demonstra que a verificação integridade mecânica em paredes de taipa de pilão, com o emprego do ultrassom, pode não gerar dados confiáveis.

3.6 Ensaio de ultrassom em trincas

Embora os resultados dos ensaios executados na miniparede, sem a inserção de trincas, já indicassem a baixa correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples, no intuito de verificar a aplicabilidade do ultrassom, como ensaio não destrutivo para avaliação da integridade de paredes em taipa de pilão e detecção de patologias estruturais, foram produzidas trincas nesse protótipo e realizados os ensaios de ultrassom para averiguar o comportamento da onda ultrassônica, ao passar por uma região com a presença de patologias – trincas.

Primeiramente, foi conduzido o ensaio em uma área intacta da parede. Logo após o ensaio, nessa mesma área, foi produzida uma patologia, uma trinca interna, próxima à face ensaiada da parede, feita através da perfuração da parede a partir do seu topo. Feita a trinca, a área foi ensaiada novamente. Os ensaios foram todos realizados por método indireto, com uso de transdutores de 54 kHz.

A seguir, as Tabelas 21 e 22 mostram os resultados obtidos para as duas trincas produzidas na miniparede em taipa de pilão.

TABELA 21

Resultados do ensaio de ultrassom – Trinca 1 – Lateral direita

Ponto	Distância entre transdutores (cm)	Velocidade de transmissão de onda (m/s)
Sem trinca	60	290,34
Com trinca	60	264,67
Sem trinca	30	331,67
Com trinca	30	348,34
Sem trinca	15	387,67
Com trinca	15	351,67

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Moraes – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

TABELA 22

Resultados do ensaio de ultrassom – Trinca 2 – Lateral esquerda

Ponto	Distância entre transdutores (cm)	Velocidade de transmissão de onda (m/s)
Sem trinca	60	276,34
Com trinca	60	339,34
Sem trinca	30	341,67
Com trinca	30	294,67
Sem trinca	15	428,34
Com trinca	15	304,67

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Moraes – Técnico de laboratório de concreto – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

Ao verificar as leituras registradas pelo ensaio de ultrassom, nas duas trincas criadas, na miniparede, verifica-se que ele não demonstra resultados satisfatórios. Para todas as distâncias entre transdutores ensaiadas, em ambas as áreas, a princípio intactas e posteriormente com trincas, os resultados não apresentam variação significativa e nem comportamento regular. Na área da trinca 1, a partir dos resultados dos ensaios realizados, com posicionamento de transdutores a 60 e 15 cm de distância entre seus eixos, observa-se uma diminuição da velocidade de onda com inserção da trinca. No entanto, para o posicionamento de transdutores a 30cm, ocorre o contrário. Também na área da trinca 2, esse comportamento irregular pôde ser

confirmado, pois nos resultados obtidos nas áreas ensaiadas, com posicionamento de transdutores a 60 cm de distância entre seus eixos, verifica-se um aumento da velocidade de onda com inserção da trinca e, para o posicionamento de transdutores a 30 e 15 cm, ocorre o contrário. Observa-se, também, uma ausência de variação significativa da velocidade da onda ultrassônica em função da inserção da trinca na miniparede, que pode ser justificada pelo fato de o material – solo – ser granuloso e já apresentar porosidade e descontinuidades. Pôde-se supor que o equipamento não possui sensibilidade suficiente para diferenciar e detectar trincas em um material que apresenta essas características supracitadas.

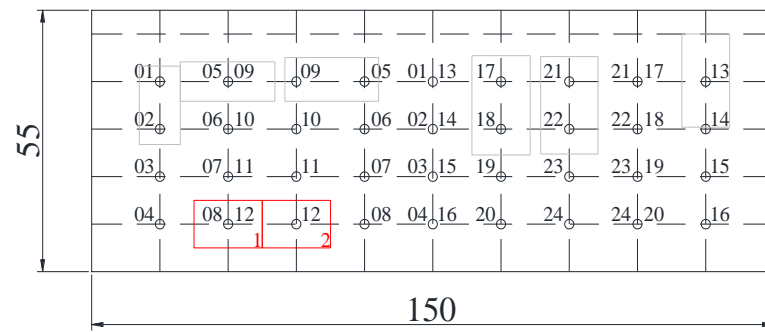
3.7 Novo ensaio de resistência à compressão simples para verificação de resultados

Como essa pesquisa apresentou resultados diferentes em relação aos demonstrados em pesquisas anteriores da autora e de outros autores, descritos no Capítulo 1 – Revisão da literatura, foram conduzidos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples, em novas amostras retiradas da mesma miniparede, buscando verificar a validade dos resultados apresentados nesse trabalho.

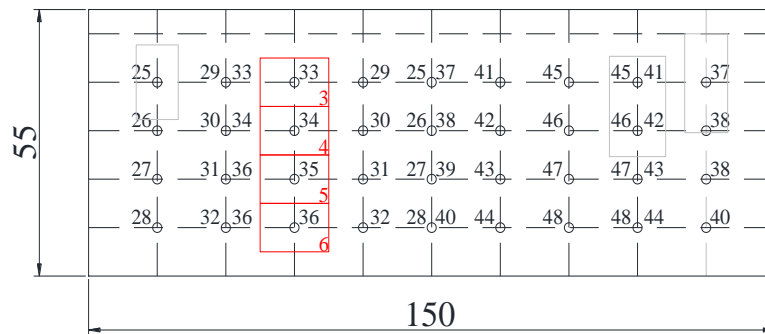
3.7.1 Retirada de amostras

Foram extraídos 10 blocos de terra em diferentes pontos da parede, a partir dos quais foram moldados 10 corpos de prova para serem submetidos a novos ensaios de ultrassom e ensaio de resistência à compressão simples. Trata-se, portanto de amostras de tamanho reduzido, retiradas de pontos previamente ensaiados.

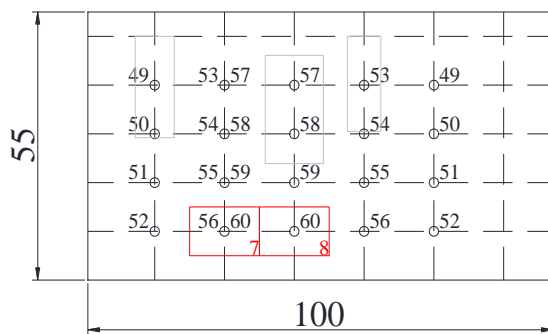
Para essa segunda retirada de amostras, foi empregada uma serra, para o corte, com auxílio de um martetele (empregado com muito cuidado, apenas para ajudar no descolamento do bloco da miniparede). Foram extraídos blocos paralelepípedos com dimensões mínimas aproximadas de 10 x 10 cm (base) x 15 cm (altura), necessárias para a posterior moldagem de corpos de prova de acordo com a norma de ensaio da ABNT – NBR 6457 – Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – método de ensaio.



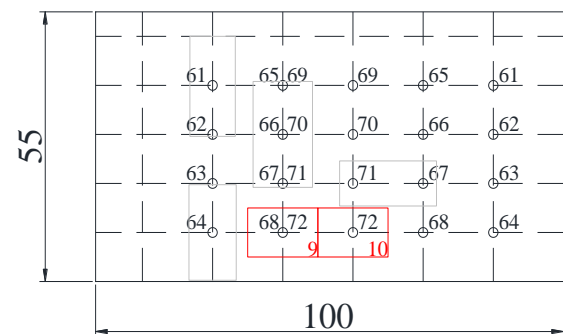
Painel – Vista Frontal



Painel – Vista Posterior



Painel – Vista Lateral direita



Painel – Vista Lateral esquerda

Figura 116: Localização das amostras retiradas na miniparede para o segundo ensaio à compressão simples

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

3.7.2 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi efetuada de acordo com a metodologia preconizada pela norma da ABNT – NBR 6457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – método de ensaio. A partir dos blocos de amostras retiradas da miniparede foram moldados corpos de prova cilíndricos, nas dimensões de 5,08 cm de diâmetro e 11,0 cm de altura. Os corpos de prova estão demonstrados na Figura 117, abaixo.



Figura 117: Amostras moldadas

Fonte: Acervo da autora, 2017.

3.7.3 Ensaio de ultrassom nos corpos de prova moldados

Buscando averiguar a correlação entre velocidade de onda de ultrassom e resistência à compressão simples, em amostras de dimensões reduzidas de taipa de pilão, novos ensaios foram realizados nos corpos de prova produzidos, em laboratório, a partir dos blocos retirados da miniparede, erguida com o emprego dessa técnica.

3.7.3.1 Calibração do aparelho ultrassom

Nessa segunda fase de ensaios, antes de realizar as medições, o aparelho foi calibrado para a frequência de transdutor a ser empregada, de 54 kHz, conforme demonstrado na Figura 118.



Figura 118: Calibração do ultrassom

Fonte: Acervo da autora, 2017.

3.7.3.2 Resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz

O ensaio, com transdutores de 54 kHz, foi realizado a partir do emprego do método de transmissão direta. A distância entre os transdutores é correspondente à altura do corpo de prova – 11 cm. As leituras geradas pelo aparelho ultrassom apresentaram estabilização em todos os corpos de prova ensaiados. Portanto, esses dados produzidos pelo ensaio, foram considerados válidos.



Figura 119: Ensaio de ultrassom nos corpos de prova

Fonte: Gladstone A. da Silva, 2017.

Foram realizadas três leituras em cada corpo de prova e as mesmas produziram resultados apresentando pequenas variações, permitidas pelas normas. Após o ensaio de ultrassom foi feita uma média das leituras obtidas para cada corpo de prova. Os resultados das três leituras, realizadas nos corpos de prova, estão descritos no Apêndice E.

A seguir, na Tabela 23, estão descritas as médias dos resultados do ensaio de ultrassom nos corpos de prova e na Tabela 24, o resumo da descrição estatística dos resultados desse ensaio.

TABELA 23

Resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz.

Corpos de prova	Ponto correspondente na miniparede	Distância entre transdutores (cm)	Média das velocidades de transmissão de onda (m/s)
1	12	11	112,93
2	12	11	755,33
3	33	11	2370
4	34	11	611,67
5	35	11	429,33
6	36	11	3396,33
7	60	11	3380,66
8	60	11	3551,66
9	72	11	3451,66
10	72	11	3517,66

Responsável pelo ensaio: Maria Virgínia Simão Peixoto

TABELA 24

Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz. – Distância entre transdutores de 11 cm

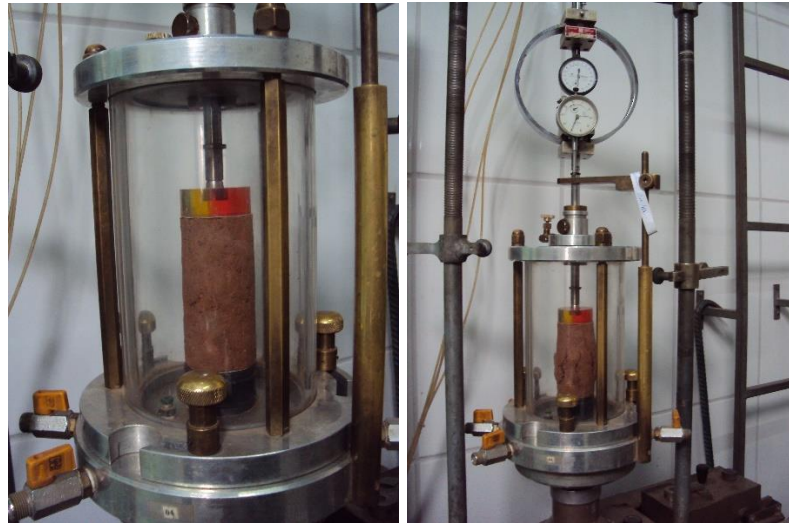
Máximo	3551,66
Mínimo	112,93
Média	2.157,72
Amplitude	3.438,73
Moda	-
Desvio-padrão	1.493,21
Variância	2.229.672,5

Responsável pelo ensaio: Maria Virgínia Simão Peixoto

De acordo com o resumo da descrição estatística, apresentado na Tabela 24, dos ensaios de ultrassom com transdutor de 54 kHz, verificou-se a ocorrência de uma significativa variação nos valores de velocidade de transmissão de onda. Os resultados demonstrados pelo resumo da descrição estatística, apresentam valores de amplitude, desvio-padrão e variância muito altos, resultantes da grande variação apresentada nos valores de velocidade de transmissão de onda.

3.7.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Para a realização do ensaio foi utilizada a prensa Testop, ADI 008, modelo Wykeham Farrance (WF), com capacidade máxima de 200kg. Cada corpo de prova foi colocado na célula triaxial, conforme Figura 120. Em seguida a mesma foi acoplada à prensa com anel dinométrico, como pode ser vista na Figura 121. Em seguida, o extensômetro foi zerado para a realização da leitura. Iniciado o carregamento, foi aplicada a carga axial no corpo de prova, em prensa de deformação controlada, com velocidade de deformação de 0,351 mm/min. O critério de ruptura adotado foi o de máxima variação da tensão axial no intervalo de 0 a 20 % de deformação.



Figuras 120 e 121: Ensaio de resistência a compressão simples

Fonte: PEIXOTO, 2016.

Na Tabela 25, estão descritos os pontos das amostras retiradas, a umidade natural, a massa específica aparente natural, o módulo de deformação na ruptura e a tensão de ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio à compressão simples.

TABELA 25

Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples

Amostras	Pontos das amostras	Umidade natural $h_{nat.}$	Massa específica aparente natural γ_{snat}	Módulo de Deformação na Ruptura E_{rup}	Tensão de ruptura - σ_{rup} (kN/m ² ou kPa)
1	12	5,6	1,818	26.125,0	409,9
2	12	8,0	1,760	18.420,0	361,3
3	33	10,9	1,676	9.210,0	90,3
4	34	10,6	1,835	14.542,9	199,7
5	35	10,8	1,813	7.914,3	108,7
6	36	6,7	1,822	32.831,3	515,2
7	60	14,2	1,836	5.314,3	73,0
8	60	14,0	1,781	6.442,8	88,5
9	72	13,6	1,733	6.592,9	90,5
10	72	9,9	1,748	17.185,7	236,0

Responsável pelo ensaio: Benjesolo – Engenharia e Geotecnia Ltda.

TABELA 26

Resumo da descrição estatística – resultados dos ensaios de resistência à compressão simples

Máximo	515,2
Mínimo	73,0
Média	217,31
Amplitude	442,2
Moda	–
Desvio-padrão	159,39
Variância	25.405,31

Responsável pelo ensaio: Benjesolo – Engenharia e Geotecnia Ltda.

A partir do resumo da descrição estatística, apresentado na Tabela 26, dos ensaios de resistência à compressão simples, verificou-se a ocorrência de significativa variação nos valores de tensão de ruptura das amostras. Os resultados demonstrados, pelo resumo da descrição estatística, apresentam amplitude de 442,2 kPa, desvio-padrão igual a 159,39 kPa e variância igual a 25.405,31 kPa².

As amostras foram retiradas em diferentes posições da miniparede. Por se tratar de uma miniparede, que embora tenha sido objeto de compactação controlada (teor de umidade da solo, altura de queda do pilão e número de golpes definidos) a mesma foi apiloada manualmente e em campo. Assim como no primeiro ensaio de resistência à compressão simples, algumas questões envolvendo a compactação da parede provavelmente contribuíram para a variação ocorrida nas tensões de ruptura registradas nesse segundo ensaio, entre elas:

- Compactação manual – apiloamento – variação na energia de compactação.
- Presença de peças de travamento que atravessam a forma, podendo criar dificuldade na compactação em determinadas áreas da miniparede.
- Os cantos podem apresentar condições de resistência diferentes em relação às demais regiões da miniparede, em função da dificuldade de compactação.
- Áreas de interface entre as camadas de compactação apresentam densidade diferente em relação à região interna da camada.
- Teor de umidade diferenciado nas amostras retiradas da parede.miniparede.

3.8 Correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica

Como descrito anteriormente, o objetivo deste trabalho é investigar a existência de correlação entre a velocidade das ondas ultrassônicas e a resistência à compressão simples de uma parede de taipa de pilão.

Os primeiros ensaios de ultrassom produziram resultados que apontavam valores de velocidades bem variados e, esses valores, ao serem correlacionadas com os valores de tensão de ruptura, produzidos pelos ensaios de resistência à compressão simples, em amostras retiradas nos respectivos pontos, apontaram resultados que indicaram a baixo índice de correlação entre esses parâmetros analisados.

Buscando verificar a qualidade dos resultados produzidos pelos ensaios supracitados e ainda apurar a possibilidade do uso do ultrassom, como método de ensaio não destrutivo, na verificação de patologias estruturais em paredes de taipa de pilão, foram realizados outros ensaios e os seus resultados foram correlacionados.

3.8.1 Correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica – miniparede

Para essa segunda verificação, foram realizadas as seguintes correlações:

- Velocidade ultrassônica nos pontos da malha da miniparede x tensão de ruptura dos corpos de prova moldados a partir das amostras retiradas desses mesmos pontos
- Velocidade ultrassônica nos corpos de prova moldados a partir das amostras retiradas dos mesmos pontos da malha da miniparede x tensão de ruptura desses corpos de prova.

A partir dos resultados, dos ensaios supracitados, puderam ser elaboradas as Tabelas 27 e 28, com o comparativo dos resultados desses ensaios, e o gráfico, mostrado pela Figura 122, que demonstra a curva de correlação entre os parâmetros estudados: velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples, em uma miniparede de taipa de pilão. Essas tabelas e gráfico permitirão uma melhor análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

A seguir, a Tabela 27 mostra o comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom com distância entre transdutores de 15 cm na miniparede e resistência à compressão simples dos corpos de prova moldados a partir das amostras retiradas. A Tabela 28 exhibe o resumo da descrição estatística desses resultados.

TABELA 27

Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples –
Distância entre transdutores 15 cm

Corpo de prova	Ponto correspondente na malha	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura - σ_{rup} (kN/m ² ou kPa)
1	12	304,33	409,9
2	12	304,33	361,3
3	33	563,33	90,3
4	34	385,67	199,7
5	35	363	108,7
6	36	367,67	515,2
7	60	330,33	73,0
8	60	330,33	88,5
9	72	429,67	90,5
10	72	429,67	236,0

TABELA 28

Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 15 cm

Resumo da descrição estatística		
Propriedades estatísticas	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
Máximo	563,33	515,2
Mínimo	304,33	73,0
Média	380,83	217,31
Amplitude	259	442,2
Desvio-padrão	78,45	159,39
Variância	6.155,16	25.405,31

A partir do resumo da descrição estatística, apresentado na Tabela 28, que mostra o comparativo entre os resultados dos ensaios de ultrassom, com transdutores posicionados a 15 cm de distância, e resistência à compressão simples, constatou-se a ocorrência de uma significativa variação dos valores dos parâmetros demonstrados a partir dos resultados do ensaio de ultrassom, exibindo amplitude de 259 m/s, desvio-padrão igual a 78,45 m/s e variância igual a 6.155,16 m/s², e dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples, que apresenta uma amplitude de 442,2 kPa, desvio-padrão igual a 159,39 kPa e variância igual a 25.405,31 kPa². Verifica-se que o comportamento da variância, registrado para as duas variáveis, demonstra valores significativos, especialmente no parâmetro tensão de ruptura, em que esse valor é sensivelmente aumentado.

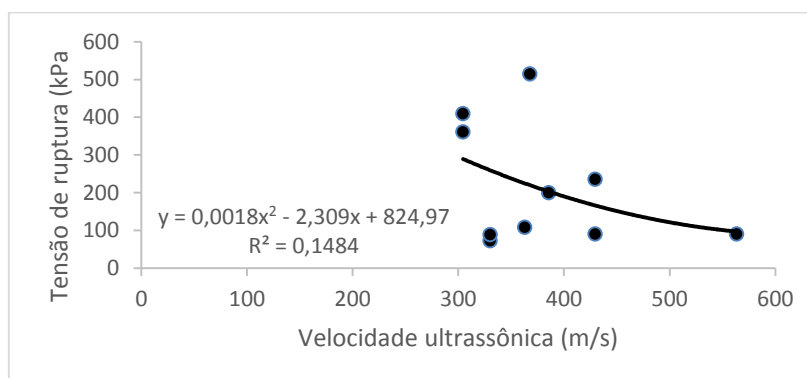


Figura 122: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 15 cm

Fonte: PEIXOTO, 2016.

A partir dos pares de valores encontrados, nos ensaios de ultrassom (para transdutores posicionadas à distância de 15 cm) e resistência à compressão simples, foi calculado o índice de correlação entre os parâmetros estudados – r^2 , demonstrado no gráfico da Figura 121. Para os pares de resultados dos ensaios supracitados, a correlação – $r^2 = 0,15$. Esse coeficiente corresponde à muito baixa correlação.

Os pares dos valores encontrados na correlação realizada entre os ensaios de ultrassom e os três primeiros ensaios de resistência à compressão simples, para transdutores posicionados à distância de 60, 30 e 15 cm, forneceram os seguintes coeficientes de correlação – r^2 , respectivamente: 0,16, 0,23 e 0,37. Pôde-se observar que a qualidade de correlação entre velocidade ultrassônica e resistência mecânica apresentava um ligeiro aumento com a diminuição da distância de posicionamento entre os transdutores. Nesse novo ensaio de correlação entre velocidade ultrassônica, para transdutores posicionados à distância 15 cm, e resistência à compressão simples, o coeficiente de correlação obtido – r^2 – foi igual a 0,15. Esse valor não acompanhou a tendência dos valores dos três primeiros ensaios, onde observou-se que a menor distância entre transdutores apresentava o maior valor do índice de correlação, configurando-se como o menor valor de correlação obtido em todas gráficos elaborados para esse estudo.

Esse resultado evidencia dificuldades no estabelecimento de correlação desejável para a verificação da integridade mecânica em paredes de taipa de pilão, ou seja, indica que o emprego dessa tecnologia do ultrassom, como método de verificação da integridade mecânica de paredes em taipa de pilão, pode não ser a mais adequada, pois aponta a possibilidade de geração de dados não confiáveis.

3.8.2 Correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica – corpos de prova

Ainda nessa fase de verificação, foram realizados ensaios de ultrassom nos corpos de prova moldados, a partir das amostras de taipa de pilão retiradas da miniparede e, posteriormente, enviados para o ensaio de resistência à compressão simples.

A partir dos resultados dos ensaios supracitados, puderam ser elaboradas a Tabela 29, com o comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência mecânica e a Tabela 30, que apresenta o resumo da descrição estatística desses resultados. Foi elaborado, também, o gráfico mostrado pela figura 123, que exhibe a curva obtida através da correlação desses parâmetros estudados.

TABELA 29

Comparativo dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples –
Distância entre transdutores 11 cm

Corpo de prova	Ponto correspondente na malha	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura - σ_{rup} (kN/m ² ou kPa)
1	12	112,93	409,9
2	12	755,33	361,3
3	33	2370	90,3
4	34	611,67	199,7
5	35	429,33	108,7
6	36	3396,33	515,2
7	60	3380,66	73,0
8	60	3551,66	88,5
9	72	3451,66	90,5
10	72	3517,66	236,0

TABELA 30

Resumo da descrição estatística dos resultados dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples – Distância entre transdutores 11 cm

Resumo da descrição estatística		
Propriedades estatísticas	Velocidade média de onda ultrassônica (m/s)	Tensão de ruptura (kN/m ² ou kPa)
Máximo	3551,66	515,2
Mínimo	112,93	73,0
Média	2157,72	217,31
Amplitude	3438,73	442,2
Desvio-padrão	1493,21	159,39
Variância	2.229.672,5	25.405,31

A partir do resumo da descrição estatística, apresentado na Tabela 30, que mostra o comparativo entre os resultados dos ensaios de ultrassom, com transdutores posicionados a 11 cm de distância, e resistência à compressão simples, constatou-se a ocorrência de uma enorme variação dos valores obtidos nos resultados do ensaio de ultrassom, exibindo amplitude

de 3438,73 m/s, desvio-padrão igual a 1493,21 m/s e variância igual a 2.229.672,5 m/s², e nos resultados do ensaio de resistência à compressão simples, que exhibe uma amplitude de 442,2 kPa, desvio-padrão igual a 159,39 kPa e variância igual a 25.405,31 kPa². Verifica-se que a variância obtida pelos dois parâmetros estudados, apresenta valores expressivos, especialmente no parâmetro velocidade de ultrassom, em que esse valor é sensivelmente aumentado.

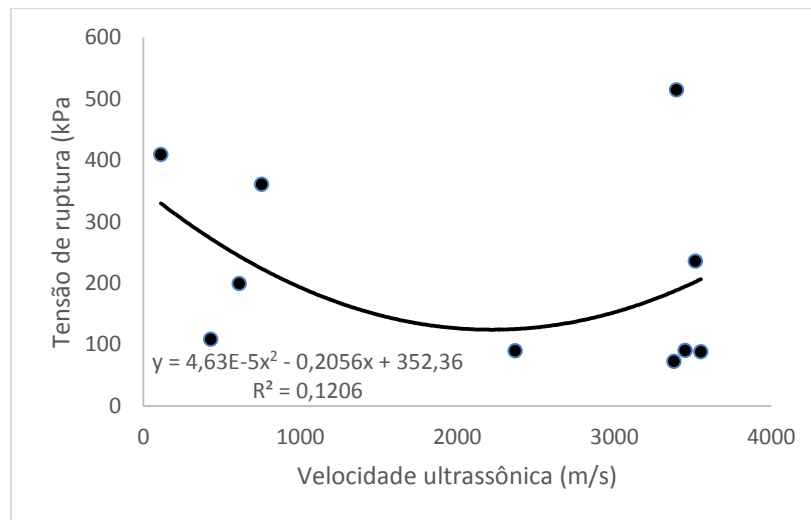


Figura 123: Gráfico – Tensão de ruptura x Velocidade Ultrassônica – Distância entre transdutores de 11 cm

Fonte: PEIXOTO, 2016.

A partir dos pares dos valores encontrados, nos ensaios de ultrassom e resistência à compressão simples, foi calculado o índice de correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples – r^2 , demonstrado no gráfico da Figura 120. Para os corpos de prova ensaiados, com transdutores distanciados em 11 cm, $r^2 = 0,12$. Esse coeficiente corresponde à muito baixa correlação.

Em pesquisas anteriores, conforme descrito no item 1.13 desse trabalho, autores, através de estudos desenvolvidos, afirmam a existência de uma forte correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples em corpos de prova de material terroso. Fato que não foi validado nessa pesquisa, onde os resultados dos ensaios indicam uma correlação muito baixa. Os fatores que podem justificar tal resultado:

- Dificuldades de compactação em função dos limites da própria técnica;
- Dificuldades de extração das amostras e moldagem dos corpos de prova;
- Heterogeneidade do material solo;

- Porosidade do solo;
- Variações do teor de umidade dos corpos de prova em função da localização das amostras retiradas na miniparede.

CONCLUSÃO

O objetivo desta pesquisa é a verificação da correlação entre velocidade ultrassônica e resistência à compressão simples em paredes de taipa de pilão, e a produção de um conjunto de valores para velocidade ultrassônica e tensão de ruptura que se configurassem como base de dados relativos a uma parede que apresente boas condições de cumprir a sua função estrutural.

Buscando produzir essa base de dados, um protótipo foi construído de forma a atender a parâmetros essenciais para a produção de uma miniparede em taipa de pilão, que apresentasse boa qualidade mecânica. Para tal, foram controlados os parâmetros geotécnicos de granulometria e teor de umidade do solo. Ambos foram manipulados, com o objetivo de construir essa parede “ideal”. No entanto, o último parâmetro não pôde ser totalmente controlado. O solo, embora tenha tido seu teor de umidade corrigido antes de ser compactado, por estar exposto ao tempo, ou seja, em ambiente externo durante a sua preparação, mistura e compactação, ficou sujeito à troca de umidade com esse meio, impossibilitando o total controle do seu teor de umidade.

Os ensaios de ultrassom produziram dados válidos apenas para transdutores de frequência de 54 kHz, nas três distâncias estipuladas entre os eixos dos transdutores: 60, 30 e 15 cm. As demais frequências não apresentaram resultados válidos. As maiores velocidades foram registradas para o posicionamento entre transdutores de 15 cm, no entanto, o conjunto de valores de velocidade ultrassônicas obtidos, para todas as distâncias, apresenta variações maiores que a permitida pelas normas. Outro fator importante é o parâmetro estatístico da amplitude, que apresentou valores expressivos para todas as distâncias ensaiadas, sendo o maior valor para o posicionamento, entre transdutores, de 30 cm. Os parâmetros estatísticos como desvio-padrão e variância também apresentaram valores altos.

A eficiência estrutural da parede foi atestada a partir dos ensaios de resistência à compressão simples, que geraram valores que correspondem à boa qualidade de compactação. Os valores de tensão de ruptura exibiram variação considerável para blocos retirados de diferentes locais da parede de taipa de pilão. Essa variação pode ser explicada em função das restrições de compactação, impostas pela própria forma, gerando trechos de paredes com densidades de compactação diferenciadas, podendo influenciar na capacidade de resistência dessas áreas da mesma. Portanto, esse fator limitador pode contribuir para a geração de áreas mais resistentes e outras com menor capacidade de resistência em uma mesma parede de taipa de pilão. Tal variação também pode ser explicada em função dos diferentes teores de umidade encontrados nas amostras retiradas nessa parede.

Embora as velocidades registradas possam ser consideradas compatíveis, em sua ordem de grandeza, com uma estrutura que apresenta boa resistência mecânica, as mesmas exibem variações acima do desejável, que podem refletir a ausência de homogeneidade e a porosidade apresentada pelo material – solo.

Ao serem criadas trincas nessa mesma parede, ensaios de ultrassom foram realizados, buscando detectar a presença dessas falhas. No entanto, não foram observadas variações significativas nas velocidades obtidas, a partir desses ensaios, em relação aos valores registrados, durante os primeiros ensaios, realizados na parede intacta, para nenhuma das distâncias estipuladas entre os transdutores.

Os coeficientes de correlação – r^2 – obtidos, também, ao contrário do esperado, tendo em vista resultados de pesquisas apontados pela autora (em estudos anteriores) e por outros autores, demonstraram baixa qualidade de correlação entre velocidade ultrassônica e resistência mecânica em paredes estruturais em taipa de pilão. Como afirmado anteriormente, esse resultado indica que a verificação integridade mecânica em paredes de taipa de pilão, via emprego do ultrassom, pode não gerar dados confiáveis. Alguns fatores possivelmente contribuíram para esse resultado:

- Dimensão da amostra – aumento da dimensão da amostra pode ser um fator gerador de dificuldade para a execução do ensaio;
- Ausência do emprego do amplificador de ondas ultrassônicas, que possibilitaria maior alcance da onda em amostras de maiores dimensões, gerando resultados mais precisos;
- Dificuldades de compactação em função dos limites da própria técnica;
- Heterogeneidade do material solo;
- Porosidade do solo;
- Teor de umidade – por se tratar de ensaios elaborados em campo, esse fator pode sofrer variações ao longo do dia, apresentando alterações inclusive em diferentes áreas da mesma parede, devido a trocas constantes com o meio ambiente;
- Dificuldades de extração das amostras para ensaios de resistência à compressão simples;
- Amostras apresentando diferentes teores de umidade.

Se em nível de laboratório, a partir da produção de amostras de taipa de pilão, em tamanho reduzido e tendo fatores como teor de umidade e energia de compactação controlados, os resultados dos ensaios ultrassônicos e ensaios de resistência à compressão simples produzem

resultados que permitem estabelecer uma boa correlação, o mesmo não se pode afirmar com relação aos ensaios no protótipo com dimensões similares às paredes existentes em campo, e também nos corpos de provas modelados a partir de amostras retiradas do mesmo, nos quais os fatores supracitados provavelmente interferem nos resultados e se configuram como complicadores para o emprego do ultrassom na avaliação da integridade mecânica em paredes de taipa de pilão.

Embora tenha sido elaborada, ao longo da pesquisa, uma metodologia para ensaios de ultrassom e resistência mecânica em paredes construídas em taipa de pilão, visando estabelecer uma correlação entre esses parâmetros, os ensaios não produziram a geração de dados consistentes e confiáveis. Portanto, não é possível afirmar a existência de uma correlação entre velocidade ultrassônica e tensão de ruptura em paredes de terra compactada. A princípio, verifica-se a inviabilidade do emprego dessa tecnologia, como opção de ensaio não destrutivo, para avaliação de patologias estruturais em paredes de terra erguidas a partir do uso da tecnologia construtiva da taipa de pilão. A partir desses resultados, até o presente momento, não há como desenvolver um protocolo de avaliação da qualidade da parede de taipa de pilão, por meio de ensaios de ultrassom.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 597-83. *Standard test method for pulse velocity through concrete*. Philadelphia, 1991. 3p.

ANGULO-IBAÑEZ, Q.; MAS-TOMÁS, Á.; GALVAÑ-LLOPIS, V.; SÁNTOLARIA-MONTESINOS, J. L. Traditional braces of earth constructions. *Construction and Building Materials*, 30, pp.389-399, 2012. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com.ez27.periodicos.capes.gov.br> > Acesso em: 03 fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 6457 – *Amostras de solos*. Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 6459 – *Solo*. Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 6508 – *Grãos de solos que passam pela peneira de 4,8mm*. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 7180 – *Solo*. Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 7181 – *Solo*. Análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 8802 – *Concreto endurecido*. Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 8p.

BANDEIRA, R. F. *Estudo da correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica para um material terroso*. 2009. 89f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído

Patrimônio Sustentável) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, M.G., 2009.

BARDOU. *Coisas da arquitetura*. 1981. Disponível em: <https://coisasdaarquitetura.wordpress.com/2010/09/06/tecnicas-construtivas-do-periodo-colonial-i/>
Acesso em: 02 jul. 2014

BECKETT, C. T. S.; HALL, M. R.; AUGARDE, C. E. Macrostructural changes in compacted earthen construction materials under loading. *Acta Geotechnica*. 8, p. 423 – 438, 2013. Disponível em: <http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 04 jun. 2014.

BRASIL. Ministério da Cultura. Instituto do Programa Monumenta. *Caderno de encargos*. Brasília: Ministério da Cultura, Instituto do Programa Monumenta, 2005. 420p.:Il. (Programa Monumenta, cadernos técnicos 2)

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI 1881: Part 203. *Testing concrete – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete*. London, 1986. 16p.

BUI, Q. B.; MOREL, J. C. Assessing the anisotropy of rammed earth: From observations to quantifications. *Construction and Building Materials*, 23, p. 3005 – 3011, 2009. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com.ez27.periodicos.capes.gov.br> > Acesso em: 03 fev. 2014.

BUI, Q. B. *et al.* Compression behavior of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth. *Materials and Structures*, 42, p. 1101 – 1116, 2008. Disponível em: <http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 04 jun. 2014.

BUI, Q. B. *et al.* Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54, p. 163 – 169, 2014. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com.ez27.periodicos.capes.gov.br> > Acesso em: 04 jun. 2014.

BUI, T. T. *et al.* Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications. *Construction and Building Materials*, 51, p. 295 – 302, 2014. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com.ez27.periodicos.capes.gov.br> > Acesso em: 04 jun. 2014.

BURROUGHS, S. Relationships between the density and strength of rammed Earth. *Construction Materials*, 162, p. 113 – 120, 2009. Disponível em:

<<http://link.periodicos.capes.gov.br.ez27.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 04 jun. 2014.

CAMPANHA. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Conselheiro Lafaiete*. V. 02/01. Bens Imóveis, 2001. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2002.

CAMPANHA. Prefeitura Municipal. Dossiê de tombamento da Catedral de Santo Antônio. Setor 1. Quadro II, V. 01/03, 2008. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2009.

CARSALADE, Flávio de Lemos. *Critérios para a Revitalização Arquitetônica*. Apostila do Curso de Especialização em Revitalização Urbana e Arquitetônica. Escola de Arquitetura, UFMG, Belo Horizonte, M.G., 2005.

CARVALHO, Elizabeth Sales de. *Atelier de conservação e recuperação do patrimônio edificado*. Apostila da disciplina – ACR 802. Curso de Especialização em Revitalização Urbana e Arquitetônica. Escola de Arquitetura da UFMG. Belo Horizonte, 2006.

CATAS ALTAS. Prefeitura Municipal. *Processo de tombamento do Núcleo Histórico da sede do Município de Catas Altas*, 1999. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2000.

CHOAY, Françoise. *A alegoria do patrimônio*. Tradução de Luciano Vieira Machado. 3. ed. São Paulo: Estação Liberdade: UNESP, 2006. 288p.:il.

CIANCIO, D. *et al.* Advances on the assessment of soil suitability for rammed Earth. *Construction and Building Materials*, 42, p. 40 – 47, 2013. Disponível em: <<http://ac.els-cdn.com.ez27.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 03 fev. 2014.

CLARK, J. I.; GILLOTT, J. E. The role of composition and fabric of soils in selected geotechnical engineering case histories. *Applied Clay Science, Elsevier Science Publishers B.* V. Amsterdam, p. 173 – 191, 1985. Disponível em: <<http://ac.els-cdn.com.ez27.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 04 jun. 2014.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN, NM 58. *Hormigón endurecido: determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos*. Argentina, 1996. 10p.

CONCEIÇÃO DA BARRA DE MINAS. Prefeitura Municipal. *Complementação de dossiê de tombamento. Santuário de Nossa Senhora da Conceição*, Quadro III, 2006. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2007.

CONSELHEIRO LAFAIETE. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Conselheiro Lafaiete*, 2001. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2002.

DELGADO, M. C. J.; GUERRERO, I. C. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, 21, p. 237-251, 2005. Disponível em: <<http://ac.els-cdn.com.ez27.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 04 jun. 2014.

D'ORAZIO, T. *et al.* Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials, *NDT&E Internacional*, p. 145-154, 2007. Disponível em: <<http://ac.els-cdn.com>> Acesso em: jan. 2011.

EVANGELISTA, A.C.J. *Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não-destrutivos*. 2002. 219f. Tese (Doutorado Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2002. Disponível em: <<http://wwwp.coc.ufrj.br>> Acesso em: abr. 2014.

GOMBRICH, E. H. *A história da arte*. 16. ed. Tradução de Álvaro Cabral. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 688p.:II

HALL Matthew; DJERBIB, Youcef. Moisture ingress in rammed: part 1 – The effect os soil particle size distribution on the rate of capillary suction. *Construction and Building Materials*, 18, p. 269 – 280, 2004. Disponível em: <<http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 03 fev. 2014

HALL Matthew; DJERBIB, Youcef. Moisture ingress in rammed: part 2 – The effect os soil particle size distribution on the absorption of static pressure-driven water. *Construction and Building Materials*, 20 p. 374 – 383, 2005. Disponível em: <<http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 03 fev. 2014.

HALL Matthew; DJERBIB, Youcef. Moisture ingress in rammed: part 3 – Sorptivity, surface receptiveness and surface inflow velocity. *Construction and Building Materials*, 20, p. 384 – 395, 2005. Disponível em: <<http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 03 fev. 2014.

HALL Matthew; DJERBIB, Youcef. Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18, p. 281 – 286, 2004. Disponível em:
<<http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 02 jun. 2009.

HOFFMANN, Márcio. V.; GONÇALVES, Raquel. Análise da qualidade da taipa de pilão por meio de ondas ultrassônicas. *III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil*, 2010.

HUYSEN, Andréas. Passados presentes: mídia, política, amnésia. In: HUYSEN, Andréas. *Seduzidos pela memória, arquitetura, monumentos, mídia*. Rio de Janeiro: Aeroplano, 2000.

ICOMOS. *Carta sobre o patrimônio vernacular edificado*. México, 1999. Disponível em: <<http://www.icomos.org.br/cartas>>. Acesso em: 1º dez. 2013.

IEPHA/MG (Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais). *Guia dos bens tombados*. Belo Horizonte: IEPHA-MG, 2011/2012.

IEPHA/MG (Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais). *Programa de cidades históricas: PCH Tiradentes – sede – Igreja Nossa Senhora das Mercês – Projeto de restauração*. V1/2. Belo Horizonte: IEPHA-MG, 2012.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Congonhas - Parecer final – Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição*. Processo 01514.000741/2010 – 43, 2010.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Guia dos bens tombados: Minas Gerais*. Coord. Prof. Wladimir Alves de Souza. Rio de Janeiro: Expressão e cultura, 1984.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Mariana*: Catedral de Nossa Senhora da Assunção – Sé de Mariana 1980 e 1981. Minas Gerais. Arquivo – Série 1 – Mariana, 1983.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Minas Novas* – Igreja de São José. Instituto Brasileiro do Patrimônio Cultural. 13ª CR – IEPHA. Ficha Técnica – 09/12/1993. Arquivo – Série 1 – Minas Novas, 1993.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Ouro Branco* – Relatório de análise e recomendações - Igreja Matriz de Santo Antônio, 1995. Arquivo – Série 1 – Ouro Branco, 1995.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Prados* – Igreja Matriz Nossa Senhora da Conceição, 1985. Arquivo – Série 1 – Ouro Branco, 1985. Arquivo do SPHAN – Fundação Nacional pró-Memória.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Projeto de restauração arquitetônica e estrutural da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição*. Congonhas/MG (Autor do projeto: Rafael Caldeira Ferreira Pinto, 2009), 2010.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *São João Del Rey* – Proposta para reforço de uma estrutura de taipa de pilão. Estudo de caso: Igreja Matriz Nossa Senhora do Pilar de São João Del Rey. 1990. Arquivo – Série 1 – Ouro Branco, 1985. Arquivo do SPHAN – Fundação Nacional pró-Memória – Escritório técnico de São João Del Rey, 1990.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Tiradentes* – Projeto de restauração de bens integrados da Igreja de São João Evangelista de Tiradentes - MG. Arquivo – Série 1 – Tiradentes. – Escritório técnico de Tiradentes, 2013.

IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). *Tiradentes* – Igreja Matriz de Santo Antônio – Prospecções para levantamentos de materiais. Arquivo – Série 1 – Tiradentes. – Arquivos correntes, 2000.

ITACAMBIRA. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Itacambira*. Quadro II, 2008. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2009.

KHAZIN, B. G.; GONCHAROV, B. V. The use of ultrasound to estimate the strength of frozen soils during work. *Scientific-Research of Construction Planning, Ufa*. Translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, n. 2, p 20 – 23, March – April 1974. Disponível em:

<<http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 26/ jun. 2014.

LEAL, Fernando Machado. *Restauração e conservação de monumentos brasileiros*. Recife, PE: Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, 1977. 171p.

LEPSCH, Igo F. *19 lições de pedologia*. São Paulo, SP: Oficina de textos, 2011. 456p.:Il.

LIANG, R. *et al.* Nondestructive Evaluation of Historic Hakka Rammed Earth Structures. *Sustainability*. 5p. 423 – 438, 2013.

Disponível em: <<http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 04 jun. 2014.

MANIATIDIS, V.; WALKER, P. Structural Capacity of Rammed Earth in Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20, p. 230-238, 2008. Disponível em: <<http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 04 jun. 2014.

MARIANA. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Mariana*, Distrito de Furquim, Pasta 02/04, 2004. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2005.

MASCARÓ, Lúcia (coord.). *Tecnologia & Arquitetura*. Tradução de Encarnación Gimenes Mazza e Sara Gedanke. São Paulo: Nobel, 1989. 136p.

MAYUMI, Lia. *Taipa, Canela Preta e Concreto – Estudo sobre o restauro de casas bandeiristas*. São Paulo, SP: Romano Guerra Editora, 2008. 320p.:Il. (Coleção Olhar Arquitetônico 3).

MEDEIROS, A. *Aplicação do ultrassom na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado*. 180fls. Dissertação

(Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC – Mestrado em engenharia civil)
- Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis,
S.C., 2007.

MELLO, Suzy. *Barroco Mineiro*. São Paulo: Brasiliense, 1985. 288p.:Il.

MILANI, A.P.S. *Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz*. 2005. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2005.

MINKE, Gernot. *Manual de Construcción em Tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación em la arquitectura actual*. Montevideo: Fin de Siglo, 2008. 224p. :Il.

MONUMENTA. *Projeto Mestres Artífices*. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br>>
Acesso em: 16 maio 2013.

MORRO DO PILAR. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Morro do Pilar*. 1999. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2000.

NEVES, Célia Maria Martins; FARIA, Obede Borges; ROTONDARO, Rodolfo; CEVALLOS, Patricio S.; HOFFMANN, Márcio. (2005). Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra – práticas de campo. Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra – prácticas de campo. In: IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, 4. Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 3. 2005, Monsaraz (Portugal). *Actas...* Vila Nova de Cerveira (Portugal): Escola Superior Galaecia / PROTERRA-CYTED. 1 CD-ROM. p. 1-31.

Disponível em: <<https://www.ige.unicamp.br>> Acesso em: 24 fev. 2016.

NUNES, A. J. da Costa. *Curso de mecânica dos solos e fundações*. Fundamentos e Aplicações da Mecânica dos Solos. Rio de Janeiro, Porto Alegre, São Paulo: Globo, 1956.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. *Tecnologia da conservação e restauração: materiais e estruturas: um roteiro de estudos*. 3 ed. Salvador: EDUFBA, 2006. 244p.:il.

OURO PRETO. Prefeitura Municipal. *Complementação do dossiê de tombamento do Núcleo Histórico da Cidade de Ouro Preto*, 2011. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2012.

OURO PRETO. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Ouro Preto*, Bairro do Pilar. IEPHA/MG, ICMS, exercício 1999.

OURO PRETO. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Ouro Preto*, Bairro do Pilar, Quadro II, Volume 02/08. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2012.

PEDRO LEOPOLDO. Prefeitura Municipal. *Processo de tombamento conjunto histórico constituído pela Capela de Nossa Senhora do Rosário sítio*. Pedro Leopoldo, Distrito de Fidalgo, PTE 039, V. 1/03. IEPHA/MG.

PEIXOTO, M. V. S. *Metodologia para aplicação de ensaios ultrassônicos em minipainéis de taipa de pilão*. 2011. 109fls. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído Patrimônio Sustentável) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, M.G., 2011.

PINTO, Carlos de Souza. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. 2.ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2002. 355p.

POPOVICS, S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship, materials evaluation, *ACI Materials Journal*, p. 123-130, feb. 2001.

PRADOS. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Prados*, Quadro II, Pasta 3/7, 2006. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2007.

PROCEQ. *Instruções operacionais*. Pundit Lab. London, CNS Electronics Ltd. 2014. 32p. Disponível em: <<http://www.proceq.com>> Acesso em: 04 jul. 2016.

PUNDIT MANUAL, CNS Eletronics Ltd., London, 76pp.

RECAVARREN, C. G. *et al.* Rammed Earth: Construction Lessons from Experience. *Practice periodical on structural design and construction*, 18, p. 149 – 154, 2013. Disponível em: <<http://ascelibrary-org>> Acesso em: 04 jun. 2014.

REDE CIDADE Arquitetura / Urbanismo / Patrimônio Cultural. Projeto de restauração arquitetônica da Igreja Matriz de Nossa Senhora de Nazaré. Santa Rita Durão – Mariana / Minas Gerais. Volume 1 – Identificação / diagnóstico, 2012. IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). Série 1 – Mariana - Santa Rita Durão. Igreja Matriz de Nossa Senhora de Nazaré, 2012.

REZENDE, M.A.P. *Inovação Tecnológica nas Edificações e a Introdução da Estrutura Metálica em Minas Gerais*. 2003. 226fls. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, S.P., 2003.

REZENDE *et al.* Avaliações conjuntas não destrutivas de construções históricas. 2011. Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, M.G., 2011.

RICOUER, Paul. Fase documental: a memória arquivada. *In: A memória, a história e o esquecimento*. Campinas: UNICAMP, 2010, p.155-192.

RITÁPOLIS, Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Ritápolis*. Quadro II, Conjunto II – Plano de inventário, 2010. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2011.

ROGERS, Richard; GUMUCHDJIAN, Philip. *Cidades para um Pequeno Planeta*. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2001, 210 p.

SALVATORI, Elena. Arquitetura no Brasil: ensino e profissão. *In: Arquitetura revista*. Vol. 4, n. 2, julho / dezembro 2008. p. 52 - 77. Disponível em: <<http://www.arquiteturarevista.unisinos.br>> Acesso em: 16 maio 2013.

SANTANA DOS MONTES. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Santana dos Montes*. Quadro II, 2006. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2007.

SÃO FRANCISCO DE PAULA. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de São Francisco de Paula*. Quadro II - 1, 2005. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2006.

SANTIAGO, Cybele Celestino. *O solo como material de construção*. 2. ed. Salvador: EDUFBA, 2001. 72p.:il.

TEIXEIRA, Amanda Rocha. *Metodologia para determinação da integridade da madeira de edificações históricas por meio de pulsos ultrassônicos*. 2009. 111f. Dissertação (Programa de pós graduação em engenharia de estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, M.G., 2009. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

TOLEDO, Benedito Lima. *Frei Galvão: arquiteto*. Cotia, SP: Ateliê Editorial, 2007. 71p.

UNESCO. *Arquitetura na formação do Brasil*. Organizado por Briane Elisabeth Panitz Bicca e Paulo Renato Silveira Bicca. 2. ed. Brasília: UNESCO, Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, 2008, 368p.:il.

VALLE, Angela do; TEREZO, Rodrigo Figueiredo; TELES, Carlos Dion de Melo. Uso de técnicas não destrutivas no diagnóstico de patologias em estruturas de madeiras. *e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil*. V.1, n. 2, p. 148-157, nov. 2004.

VÁRZEA DA PALMA. Prefeitura Municipal. *Inventário de Proteção de Acervo Cultural do Município de Várzea da Palma*. Quadro II, 2006. IEPHA/MG, ICMS, exercício 2007.

VASCONCELOS, Silvio. *Arquitetura no Brasil: sistemas construtivos*. 5. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1979. 186p.

VASCONCELOS, Silvio. *Vila Rica*. 2. ed. São Paulo: Perspectiva, 2011. (Debates; 100)209p.

VEADO, Fernando de Roberto de Castro. Entrevista sobre obras erguidas em taipa de pilão. Realizada em 18/12/2014. Sede do IEPHA/MG. Entrevista concedida a Maria Virgínia Simão Peixoto.

WANG, Da-yan *et al.* Application of ultrasonic technology for physical-mechanical of frozen soils, *Cold Regions Science and Technology*, p. 12-19, 2005. Disponível em: <<http://link.periodicos.capes.gov.br>> Acesso em: 02 jun. 2009.

WEIMER, Gunter. *Arquitetura popular brasileira*. 2. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2012, 333p.: Il. (Raízes)

YESILLER, Nazli *et al.* Ultrasonic Assessment of Stabilized Soils. *Soft Ground Technology*, p. 170-181, 2000. Disponível em: <www.ascelibrary.org> Acesso em: 02 jun. 2009.

YESILLER, Nazli *et al.* Ultrasonic Testing for Compacted Clayey Soils. *Advances in Unsaturated geotechnics*, p. 54-68, 2000. Disponível em: <www.ascelibrary.org> Acesso em: 02 jun. 2009.

Sites de internet

A RELÍQUIA. *Estrada Real – A rota dos bandeirantes em busca do ouro das Gerais*. <<http://jornalareliquia.blogspot.com.br>> Acesso em: 02 jul. 2014.

INSTITUTO ESTRADA REAL. *Caminhos*. Disponível em: <<http://www.institutoestradaareal.com.br>> Acesso em: 02 jul. 2014.

GRANBEL. Disponível em: <<http://granbel.com.br/index.php>> Acesso em: 14 maio 2014.

TERRADENHÁCHICA.COM. Disponível em: <<http://www.terradenhachica.com>> Acesso em: 06 maio 2014.

FONTE DAS IMAGENS DE INTERNET

Figura 04: Formas de madeira na execução de paredes em taipa de pilão. Autoria: Bardou, 1981, p.20.

Disponível em: <<https://coisasdaarquitetura.wordpress.com> > Acesso em 15 jan. 2015.

Figura 05: Mosteiro da Luz, S.P. Autoria: desconhecido. Fotografia de 1867.

Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Museu_de_Arte_Sacra_de_S%C3%A3o_Paulo. > Acesso em: 04 dez. 2013.

Figura 20: Casa de taipa de pilão em Baependi – arruinada, restando apenas registros fotográficos. Autoria: desconhecido. Sem data.

Disponível em: <<http://visitebaependi.com.br/historia>> Acesso em: 06 maio 2014.

Figura 21: Igreja de Nossa Senhora das Mercês e Perdões de Ouro Preto. Autoria: Kayo Scrocaro Hisatomi, 2008. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org>> Acesso em: 09 jun. 2014.

Figura 23: Igreja Matriz de Sant`Ana dos Montes. Autoria: Instituto Estrada Real. Sem data.

Disponível em: <<http://www.institutoestradaareal.com.br>> Acesso em: 09 jun. 2014.

Figura 24: Igreja de Nossa Senhora das Mercês. Autoria: Portal Brasil. Sem data. Adaptado por Peixoto, 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br> > Acesso em: 09 jun. 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Memória de cálculo do teor de umidade das camadas de compactação da miniparede em taipa de pilão

Determinação da umidade do solo – Método expedito da frigideira

A – Peso da amostra úmida + cápsula

B – Peso da amostra seca + cápsula

C – Peso da água

D – Peso da cápsula

E – Peso do solo seco

F – % de umidade

Peso da água – $C = A - B$

Peso solo seco – $E = B - D$

% umidade – $F = (C/E) \times 100$

Para cada camada a ser compactada, foram retiradas três amostras do solo, buscando produzir uma média do montante. Ao todo foram compactadas seis camadas.

Camada 1

Amostra de solo reservado para compactação da camada

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 311,29</p> <p>A2 = 328,23</p> <p>A3 = 303,46</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 291,37</p> <p>B2 = 306,50</p> <p>B3 = 281,36</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 311,29 – 291,37 = 19,92</p> <p>C2 = 328,23 – 306,50 = 21,63</p> <p>C3 = 303,46 – 281,36 = 22,10</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 55,06</p> <p>D2 = 52,97</p> <p>D3 = 53,95</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 291,37 – 55,06 = 236,31</p> <p>E2 = 306,5 – 52,97 = 253,53</p> <p>E3 = 281,37 – 53,95 = 227,42</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (19,92/236,31) x 100 = 8,43</p> <p>F2 = (21,63/253,53) x 100 = 8,53</p> <p>F3 = (21,10/227,42) x 100 = 9,72</p> <p>Média = (8,43 + 8,53 + 9,72) / 3 = 8,89</p>

Teor de umidade ótima para compactação: 14 %

Teor de umidade apresentado pelo solo da camada 1 = 8,89 %

Correção necessária: 14 % – 8,89 % + 1,2 % = 6,31 %

Para a compactação da camada serão utilizadas 12 latas preenchidas com solo.

- Peso da lata = 1 kg.
- Peso do solo = 21 kg

Cálculo da correção de umidade do solo, aplicando a fórmula descrita no Apêndice F:

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

Para cada lata de solo

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)} = \frac{21 * (14,0 - 8,89 + 1,2)}{(100 + 8,89)} = 1,22 \text{ kg}$$

Para a camada: 12 x 1,22 kg = 14,64 kg de água.

Amostra de solo reservado para compactação da camada após correção

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 220,73</p> <p>A2 = 218,61</p> <p>A3 = 209,74</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 200,05</p> <p>B2 = 198,88</p> <p>B3 = 190,80</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 220,73 – 200,05 = 20,68</p> <p>C2 = 218,61 – 198,88 = 19,73</p> <p>C3 = 209,74 – 190,08 = 19,38</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 55,06</p> <p>D2 = 52,97</p> <p>D3 = 53,95</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 200,05 – 55,06 = 144,99</p> <p>E2 = 198,88 – 52,97 = 145,91</p> <p>E3 = 190,80 – 53,95 = 136,41</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (20,68/200,05) x 100 = 14,26</p> <p>F2 = (19,73/145,91) x 100 = 13,52</p> <p>F3 = (19,38/136,41) x 100 = 13,84</p> <p>Média = (14,26 + 13,52 + 13,84) / 3 = 13,99</p>

Camada 2

Amostra de solo reservado para compactação da camada

A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas) A1 = 216,79 A2 = 210,59 A3 = 206,15	B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas) B1 = 199,29 B2 = 194,90 B3 = 191,54
C – Peso da água => C = A – B (em gramas) C1 = 216,79 – 199,29 = 17,50 C2 = 210,59 – 194,90 = 15,69 C3 = 206,15 – 191,54 = 14,61	D – Peso da cápsula (em gramas) D1 = 55,06 D2 = 52,97 D3 = 53,95
E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas) E1 = 199,29 – 55,06 = 144,32 E2 = 194,90 – 52,97 = 141,93 E3 = 191,54 – 53,95 = 137,59	F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %) F1 = (17,50/144,32) x 100 = 12,13 F2 = (15,69/141,93) x 100 = 11,05 F3 = (14,61/137,59) x 100 = 10,62 Média = (12,13 + 11,05 + 10,62) / 3 = 11,26

Teor de umidade ótima para compactação: 14%

Teor de umidade apresentado pelo solo da camada 2 = 11,26 %

Correção necessária: 14 % – 11,26 % + 1,2 % = 3,94 %

Para a compactação da camada serão utilizadas 21 latas preenchidas com solo.

- Peso da lata = 1 kg.
- Peso do solo = 21 kg

Cálculo da correção de umidade do solo, aplicando a fórmula descrita no Apêndice F:

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

Para cada lata de solo

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)} = \frac{21 * (14,0 - 11,26 + 1,2)}{(100 + 11,26)} = 0,74 \text{ kg}$$

Para a camada: 12 x 0,74 kg = 8,88 kg de água.

Amostra de solo reservado para compactação da camada após correção

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 230,87</p> <p>A2 = 216,36</p> <p>A3 = 221,54</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 209,14</p> <p>B2 = 196,38</p> <p>B3 = 200,96</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 230,87 – 209,14 = 21,73</p> <p>C2 = 216,36 – 196,38 = 19,98</p> <p>C3 = 221,54 – 200,96 = 20,58</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 55,06</p> <p>D2 = 52,97</p> <p>D3 = 53,95</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 209,14 – 55,06 = 154,08</p> <p>E2 = 196,38 – 52,97 = 143,41</p> <p>E3 = 200,96 – 53,95 = 147,01</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (21,73/154,08) x 100 = 14,1</p> <p>F2 = (19,98/143,41) x 100 = 13,93</p> <p>F3 = (20,58/147,01) x 100 = 13,99</p> <p>Média = (14,1 + 13,93 + 13,99) / 3 = 13,98</p>

Camada 3

Amostra de solo reservado para compactação da camada

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 201,86</p> <p>A2 = 226,83</p> <p>A3 = 202,60</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 186,03</p> <p>B2 = 212,19</p> <p>B3 = 185,63</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 201,86 – 186,03 = 15,83</p> <p>C2 = 226,83 – 212,19 = 14,64</p> <p>C3 = 202,60 – 185,63 = 16,97</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 48,34</p> <p>D2 = 48,94</p> <p>D3 = 47,74</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 186,03 – 48,34 = 137,69</p> <p>E2 = 212,19 – 48,94 = 163,25</p> <p>E3 = 185,63 – 47,74 = 137,88</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (15,83/137,69) x 100 = 11,5</p> <p>F2 = (14,64/163,25) x 100 = 8,97</p> <p>F3 = (16,97/137,88) x 100 = 12,31</p> <p>Média = (11,5 + 8,97 + 12,31) / 3 = 10,93</p>

Teor de umidade ótima para compactação: 14 %

Teor de umidade apresentado pelo solo da camada 3 = 10,93 %

Correção necessária: 14 % – 10,93 % + 1,2 % = 4,27 %

Para a compactação da camada serão utilizadas 21 latas preenchidas com solo.

- Peso da lata = 1 kg.
- Peso do solo = 21 kg

Cálculo da correção de umidade do solo, aplicando a fórmula descrita no Apêndice F:

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

Para cada lata de solo

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)} = \frac{21 * (14,0 - 10,93 + 1,2)}{(100 + 10,93)} = 0,81 \text{ kg}$$

Para a camada: 12 x 0,81 kg = 9,72 kg de água.

Amostra de solo reservado para compactação da camada após correção

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 208,74</p> <p>A2 = 217,93</p> <p>A3 = 211,65</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 189,07</p> <p>B2 = 197,17</p> <p>B3 = 191,61</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 208,74 – 189,07 = 19,67</p> <p>C2 = 217,93 – 197,17 = 20,76</p> <p>C3 = 211,65 – 191,61 = 20,04</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 48,34</p> <p>D2 = 48,94</p> <p>D3 = 47,74</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 189,07 – 48,34 = 140,73</p> <p>E2 = 197,17 – 48,94 = 148,23</p> <p>E3 = 191,61 – 47,74 = 143,87</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (19,67/140,73) x 100 = 13,98</p> <p>F2 = (20,76/148,23) x 100 = 14,01</p> <p>F3 = (20,04/143,87) x 100 = 13,93</p> <p>Média = (13,98 + 14,01 + 13,93) / 3 = 13,97</p>

Camada 4

Amostra de solo reservado para compactação da camada

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 238,04</p> <p>A2 = 217,93</p> <p>A3 = 228,35</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 221,73</p> <p>B2 = 203,73</p> <p>B3 = 214,58</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 238,04 – 221,73 = 16,31</p> <p>C2 = 217,92 – 203,73 = 14,20</p> <p>C3 = 228,35 – 214,58 = 13,77</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 48,34</p> <p>D2 = 48,94</p> <p>D3 = 47,74</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 221,73 – 48,34 = 173,39</p> <p>E2 = 203,73 – 48,94 = 154,79</p> <p>E3 = 214,58 – 47,74 = 166,84</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (16,31/173,39) x 100 = 9,41</p> <p>F2 = (14,20/154,79) x 100 = 9,17</p> <p>F3 = (13,77/166,84) x 100 = 8,25</p> <p>Média = (9,41 + 9,17 + 8,25) / 3 = 8,94</p>

Teor de umidade ótima para compactação: 14 %

Teor de umidade apresentado pelo solo da camada 4 = 8,94 %

Correção necessária: 14 % – 8,94 % + 1,2 % = 6,26 %

Para a compactação da camada serão utilizadas 21 latas preenchidas com solo.

- Peso da lata = 1 kg.
- Peso do solo = 21 kg

Cálculo da correção de umidade do solo, aplicando a fórmula descrita no Apêndice F:

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

Para cada lata de solo

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)} = \frac{21 * (14,0 - 8,94 + 1,2)}{(100 + 8,94)} = 1,21 \text{ kg}$$

Para a camada: 12 x 1,21 kg = 14,52 kg de água.

Amostra de solo reservado para compactação da camada após correção

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 225,70</p> <p>A2 = 219,32</p> <p>A3 = 226,48</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 203,87</p> <p>B2 = 198,58</p> <p>B3 = 204,59</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 225,70 – 203,87 = 21,83</p> <p>C2 = 219,32 – 198,58 = 20,74</p> <p>C3 = 226,48 – 204,59 = 21,89</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 48,34</p> <p>D2 = 48,94</p> <p>D3 = 47,74</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 203,87 – 48,34 = 155,53</p> <p>E2 = 198,58 – 48,94 = 149,64</p> <p>E3 = 204,59 – 47,74 = 156,85</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (21,83/155,53) x 100 = 14,04</p> <p>F2 = (20,74/149,64) x 100 = 13,86</p> <p>F3 = (21,89/156,85) x 100 = 13,96</p> <p>Média = (14,04 + 13,86 + 13,96) / 3 = 13,95</p>

Camada 5

Amostra de solo reservado para compactação da camada

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 239,26</p> <p>A2 = 243,03</p> <p>A3 = 231,82</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 223,94</p> <p>B2 = 230,25</p> <p>B3 = 221,61</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 239,26 – 223,94 = 15,32</p> <p>C2 = 243,03 – 230,25 = 12,78</p> <p>C3 = 231,82 – 221,61 = 11,21</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 48,34</p> <p>D2 = 48,94</p> <p>D3 = 47,74</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 223,94 – 48,34 = 175,60</p> <p>E2 = 230,25 – 48,94 = 181,31</p> <p>E3 = 221,61 – 47,74 = 172,87</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (15,32/175,60) x 100 = 8,72</p> <p>F2 = (12,78/181,31) x 100 = 7,05</p> <p>F3 = (11,21/172,87) x 100 = 6,49</p> <p>Média = (8,72 + 7,05 + 6,49) / 3 = 7,42</p>

Teor de umidade ótima para compactação: 14 %

Teor de umidade apresentado pelo solo da camada 5 = 7,42 %

Correção necessária: 14 % – 7,42 % + 1,2 % = 7,78 %

Para a compactação da camada serão utilizadas 21 latas preenchidas com solo.

- Peso da lata = 1 kg.
- Peso do solo = 21 kg

Cálculo da correção de umidade do solo, aplicando a fórmula descrita no Apêndice F:

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

Para cada lata de solo

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)} = \frac{21 * (14,0 - 7,42 + 1,2)}{(100 + 7,72)} = 1,52 \text{ kg}$$

Para a camada: 12 x 1,52 kg = 18,24 kg de água.

Amostra de solo reservado para compactação da camada após correção

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 210,89</p> <p>A2 = 209,73</p> <p>A3 = 212,54</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 190,88</p> <p>B2 = 190,09</p> <p>B3 = 192,46</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 210,89 – 190,88 = 20,01</p> <p>C2 = 209,73 – 190,09 = 19,64</p> <p>C3 = 212,54 – 192,46 = 20,08</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 48,34</p> <p>D2 = 48,94</p> <p>D3 = 47,74</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 190,88 – 48,34 = 142,54</p> <p>E2 = 190,09 – 48,94 = 140,15</p> <p>E3 = 192,46 – 47,74 = 144,72</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (20,01/142,54) x 100 = 14,04</p> <p>F2 = (19,64/140,15) x 100 = 14,01</p> <p>F3 = (20,08/144,72) x 100 = 13,88</p> <p>Média = (14,04 + 14,01 + 13,88) / 3 = 13,98</p>

Camada 6

Amostra de solo reservado para compactação da camada

A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas) A1 = 230,61 A2 = 220,94 A3 = 221,96	B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas) B1 = 215,76 B2 = 206,50 B3 = 205,59
C – Peso da água => C = A – B (em gramas) C1 = 230,61 – 215,76 = 14,85 C2 = 220,94 – 206,50 = 14,44 C3 = 221,96 – 205,59 = 16,37	D – Peso da cápsula (em gramas) D1 = 48,34 D2 = 48,94 D3 = 47,74
E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas) E1 = 215,76 – 48,34 = 167,42 E2 = 206,50 – 48,94 = 157,56 E3 = 205,59 – 47,74 = 157,85	F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %) F1 = (14,85/167,42) x 100 = 8,87 F2 = (14,44/157,56) x 100 = 9,16 F3 = (16,37/157,85) x 100 = 10,37 Média = (8,87 + 9,16 + 10,37) / 3 = 9,47

Teor de umidade ótima para compactação: 14 %

Teor de umidade apresentado pelo solo da camada 6 = 9,47 %

Correção necessária: 14 % – 9,47 % + 1,2 % = 5,73 %

Para a compactação da camada serão utilizadas 21 latas preenchidas com solo.

- Peso da lata = 1 kg.
- Peso do solo = 21 kg

Cálculo da correção de umidade do solo, aplicando a fórmula descrita no Apêndice F:

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

Para cada lata de solo

$$A = \frac{Mh * (hót - X + P)}{(100 + X)} = \frac{21 * (14,0 - 9,47 + 1,2)}{(100 + 9,47)} = 1,10 \text{ kg}$$

Para a camada: 12 x 1,10 kg = 13,20 kg de água.

Amostra de solo reservado para compactação da camada após correção

<p>A – Peso da amostra úmida + cápsula (em gramas)</p> <p>A1 = 217,72</p> <p>A2 = 219,23</p> <p>A3 = 202,44</p>	<p>B – Peso da amostra seca + cápsula (em gramas)</p> <p>B1 = 197,49</p> <p>B2 = 197,54</p> <p>B3 = 183,28</p>
<p>C – Peso da água => C = A – B (em gramas)</p> <p>C1 = 217,72 – 197,49 = 20,23</p> <p>C2 = 219,23 – 197,54 = 21,69</p> <p>C3 = 202,44 – 183,28 = 19,16</p>	<p>D – Peso da cápsula (em gramas)</p> <p>D1 = 48,34</p> <p>D2 = 48,94</p> <p>D3 = 47,74</p>
<p>E – Peso do solo seco => E = B – D (em gramas)</p> <p>E1 = 197,49 – 48,34 = 149,15</p> <p>E2 = 197,54 – 48,94 = 148,60</p> <p>E3 = 183,28 – 47,74 = 135,54</p>	<p>F – % de umidade => F = (C/E) x 100 (em %)</p> <p>F1 = (20,23/149,15) x 100 = 13,56</p> <p>F2 = (21,69/148,60) x 100 = 14,60</p> <p>F3 = (19,16/135,54) x 100 = 14,14</p> <p>Média = (13,56 + 14,60 + 14,14) / 3 = 14,10</p>

Responsável pelos ensaios de determinação da umidade do solo – Método expedito da frigideira: Maria Virgínia Simão Peixoto.

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios de ultrassom

Ensaio – Transdutores com frequência de 54 kHz								
Ponto	Distância entre transdutores (cm)	Medições						Média das medições - Velocidade de transmissão de onda (m/s)
		Medição 1		Medição 2		Medição 3		
		Tempo transmissão (µs)	Velocidade (m/s)	Tempo transmissão (µs)	Velocidade (m/s)	Tempo transmissão (µs)	Velocidade (m/s)	
1	60	2032,0	295	2394,5	250	2719,9	220	255
2	60	1895,7	316	2462,3	243	2197,9	272	277
3	60	2066,3	290	2141,0	280	2024,5	296	288,67
4	60	1929,0	311	2155,2	278	2387,3	251	280
5	30	992,0	302	1060,1	282	918,1	326	303,33
6	30	1117,8	268	1057,1	283	1144,6	262	271
7	30	1046,1	286	1027,8	291	1056,6	283	286,67
8	30	838,6	357	890,8	336	949,1	316	336,33
9	15	454,6	329	420,2	356	397,1	377	354
10	15	416,2	360	430,3	348	414,4	361	356,33
11	15	384,5	390	397,4	377	482,2	311	399,33
12	15	527,7	284	5432,3	316	478,1	313	304,33
13	60	2348,9	255	1935,9	309	2100,5	285	283
14	60	2691,0	222	2285,9	262	2034,3	294	259,33
15	60	2033,2	295	2319,9	258	2263,2	265	272,67
16	60	1922,0	312	1897,5	316	2190,3	273	300,33
17	30	1208,7	248	937,7	319	938,2	319	295,33
18	30	972,9	308	920,3	325	910,0	329	320,67
19	30	967,4	310	1164,3	257	1207,5	248	271,67
20	30	913,0	328	1210,5	247	1034,3	299	291,33
21	15	392,8	381	366,4	409	365,0	410	400

22	15	391,7	382	411,7	364	401,7	373	373
23	15	377,0	397	430,1	348	393,3	381	375,33
24	15	369,7	405	354,4	423	360,5	416	414,67
25	60	1940,4	309	3082,2	288	2003,4	299	298,67
26	60	2017,8	294	1809,9	331	2009,0	298	307,67
27	60	2015,4	283	1565,6	383	2011,7	289	318,33
28	60	2218,5	270	1916,3	313	1980,4	302	295
29	30	1015,3	295	760,8	394	917,5	326	338,33
30	30	1044,3	287	823,5	364	852,5	351	334
31	30	1164,3	257	1003,0	299	1157,4	259	271,67
32	30	976,4	307	1174,2	255	1162,0	258	273,33
33	15	407,1	368	223,4	671	230,2	651	563,33
34	15	409,4	366	379,4	395	378,2	396	385,67
35	15	389,1	385	430,3	348	420,7	356	363
36	15	364,7	411	430,1	348	435,6	344	367,67
37	60	2320,1	258	1974,3	304	1709,4	351	304,33
38	60	2139,3	280	2036,6	294	2097,4	289	287,67
39	60	1935,0	310	2082,9	288	1947,0	308	302
40	60	2470,2	242	1870,8	320	1905,0	314	292
41	30	1223,5	267	959,4	312	913,0	328	302,33
42	30	1079,7	277	1011,7	296	1032,5	290	287,67
43	30	1248,5	240	1170,3	256	1174,9	255	250,33
44	30	1258,7	238	1190,3	252	1281,9	234	241,33
45	15	370,5	404	364,3	411	376,6	398	404,33
46	15	375,5	399	423,6	354	494,4	303	352
47	15	363,5	412	489,5	306	534,8	288	335,33
48	15	340,0	441	492,6	304	502,6	298	347,67
49	60	2925,0	205	1929,1	447	1758,4	329	327
50	60	1923,7	459	1890,0	468	1832,0	385	437,33
51	60	2392,7	250	1928,1	429	1840,0	396	358,33
52	60	2198,4	272	2122,0	320	1988,4	363	318,33
53	30	1042,2	287	970,6	337	935,0	349	324,33
54	30	954,4	314	1002,0	224	993,0	352	296,67

55	30	1081,2	277	943,0	245	901,0	258	260
56	30	1183,7	253	1100,0	205	1084,0	283	247
57	15	443,9	337	328,9	456	321,2	373	388,67
58	15	349,4	429	382,8	391	397,4	335	385
59	15	356,9	420	419,7	357	410,8	365	380,67
60	15	407,8	367	383,3	310	378,2	314	330,33
61	60	2016,8	297	1667,1	359	1706,6	351	335,67
62	60	2106,7	284	2075,0	289	1984,5	302	291,67
63	60	2440,7	245	2015,4	297	1997,3	300	280,67
64	60	1935,9	284	2326,8	258	2260,6	265	269
65	30	934	321	1152,9	334	856,5	350	335
66	30	907,4	320	943,8	317	826,4	324	320,33
67	30	1071,8	278	1074,1	279	1066,0	281	279,33
68	30	928,5	323	906,9	330	877,4	341	331,33
69	15	342,3	438	439,8	341	462,0	324	367,67
70	15	346	433	596,5	251	351,9	271	318,33
71	15	364,8	411	451,7	332	483,5	310	351
72	15	357,5	419	318,0	471	375,2	399	429,67

Responsáveis pelos ensaios: Marco Aurélio Araújo Moraes – Técnico de laboratório – e Maria Virgínia Simão Peixoto.

Ensaio – Transdutores com frequência de 82 kHz								
Observação: Medidas não estabilizadas								
Ponto	Distância entre transdutores (cm)	Medições						Média das medições - Velocidade de transmissão de onda (m/s)
		Medição 1		Medição 2		Medição 3		
		Tempo trans - missão (µs)	Veloci - dade (m/s)	Tempo trans - missão (µs)	Veloci - dade (m/s)	Tempo trans - missão (µs)	Veloci - dade (m/s)	
1	60	942,7	321	-	-	-	-	-
2	60	891,6	534	-	-	-	-	-
3	60	823,7	568	-	-	-	-	-
4	60	882,8	293	-	-	-	-	-
5	30	416,5	202	-	-	-	-	-
6	30	580,5	220	-	-	-	-	-
7	30	422,5	115	-	-	-	-	-
8	30	534,2	106	-	-	-	-	-
9	15	403,3	371	-	-	-	-	-
10	15	475,0	423	-	-	-	-	-
11	15	376,1	389	-	-	-	-	-
12	15	355	358	-	-	-	-	-
13	60	854,0	413	-	-	-	-	-
14	60	896,6	412	-	-	-	-	-
15	60	768,8	438	-	-	-	-	-
16	60	863,6	240	-	-	-	-	-
17	30	464,7	174	-	-	-	-	-
18	30	510,1	90	-	-	-	-	-
19	30	420,6	125	-	-	-	-	-
20	30	429,9	149	-	-	-	-	-
21	15	255,8	79	-	-	-	-	-
22	15	404,4	370	-	-	-	-	-
23	15	273,7	250	-	-	-	-	-

24	15	325,8	328	-	-	-	-	-
25	60	922,4	678	-	-	-	-	-
26	60	787,8	409	-	-	-	-	-
27	60	952,1	427	-	-	-	-	-
28	60	947,9	521	-	-	-	-	-
29	30	492,7	83	-	-	-	-	-
30	30	427,2	180	-	-	-	-	-
31	30	389,9	164	-	-	-	-	-
32	30	395,1	301	-	-	-	-	-
33	15	402,8	222	-	-	-	-	-
34	15	355,0	55	-	-	-	-	-
35	15	298,7	154	-	-	-	-	-
36	15	390,7	50	-	-	-	-	-
37	60	938,7	294	-	-	-	-	-
38	60	846,1	520	-	-	-	-	-
39	60	789,5	340	-	-	-	-	-
40	60	982,6	529	-	-	-	-	-
41	30	384,6	113	-	-	-	-	-
42	30	394,2	133	-	-	-	-	-
43	30	437,1	222	-	-	-	-	-
44	30	498,9	221	-	-	-	-	-
45	15	322,9	175	-	-	-	-	-
46	15	324,8	165	-	-	-	-	-
47	15	419,5	143	-	-	-	-	-
48	15	431,1	137	-	-	-	-	-
49	60	945,7	391	-	-	-	-	-
50	60	945,1	582	-	-	-	-	-
51	60	830,9	317	-	-	-	-	-
52	60	925,7	440	-	-	-	-	-
53	30	334,4	113	-	-	-	-	-
54	30	393,3	123	-	-	-	-	-
55	30	437,1	172	-	-	-	-	-
56	30	462,6	175	-	-	-	-	-

57	15	257,7	283	-	-	-	-	-
58	15	321,4	190	-	-	-	-	-
59	15	368,9	122	-	-	-	-	-
60	15	396,6	170	-	-	-	-	-
61	60	919,2	223	-	-	-	-	-
62	60	843,9	461	-	-	-	-	-
63	60	863,6	557	-	-	-	-	-
64	60	846,4	384	-	-	-	-	-
65	30	459,2	280	-	-	-	-	-
66	30	528,5	142	-	-	-	-	-
67	30	624,8	190	-	-	-	-	-
68	30	532,8	211	-	-	-	-	-
69	15	463,4	157	-	-	-	-	-
70	15	361,8	242	-	-	-	-	-
71	15	390,2	99	-	-	-	-	-
72	15	262,8	90	-	-	-	-	-

Responsáveis pelos ensaios: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto
– e Maria Virgínia Simão Peixoto.

APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Amostras	Pontos das amostras	Peso das amostras (kg)	Dimensões: Área da base x altura das amostras – L x C x H (m)	Área (transversal ao sentido da carga) (m ²)	Carga de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (kN/m ³)
1	1 e 2	3,950	0,145 x 0,090 x 0,165	0,013	3,01	231,54
2	5 e 9	2,550	0,092 x 0,083 x 0,208	0,008	1,65	206,25
3	5 e 9	2,400	0,083 x 0,092 x 0,206	0,008	1,28	160,00
4	13	3,500	0,102 x 0,105 x 0,196	0,011	2,92	265,45
5	17 e 18	4,700	0,110 x 0,128 x 0,209	0,014	4,56	235,71
6	21 e 22	5,200	0,115 x 0,126 x 0,205	0,015	5,08	338,67
7	25	2,400	0,097 x 0,092 x 0,154	0,009	1,92	213,33
8	37	2,800	0,098 x 0,094 x 0,204	0,009	2,93	325,55
9	45 e 46	4,650	0,116 x 0,123 x 0,207	0,014	4,91	350,71
10	49	3,200	0,091 x 0,084 x 0,208	0,008	2,32	290,00
11	53	3,950	0,098 x 0,072 x 0,195	0,007	2,92	417,14
12	57 e 58	4,350	0,100 x 0,125 x 0,222	0,013	4,84	372,31
13	61	2,850	0,083 x 0,097 x 0,204	0,008	1,93	241,25

14	64	2,400	0,113 x 0,101 x 0,195	0,011	2,84	258,18
15	66 e 70	4,250	0,097 x 0,127 x 0,216	0,012	3,19	265,83
16	67 e 71	3,800	0,103 x 0,092 x 0,207	0,01	2,57	257,00

Responsáveis pelo ensaio: Marco Aurélio Araújo Morais – Técnico de laboratório de concreto
– e Maria Virgínia Simão Peixoto.

APÊNDICE D – Resultados dos ensaios de ultrassom - Trincas

Trinca 1 – Lateral direita

Ensaio – Transdutores com frequência de 54 kHz				
Ponto / Trinca	Distância entre transdutores (cm)	Tempo de transmissão de onda (μ s)	Velocidade de onda (m/s)	Média das medições - Velocidade de transmissão de onda (m/s)
Sem trinca	60	2.168,2	276	290,34
		1.989,1	289	
		1.999,4	306	
Sem trinca	30	852,5	351	331,67
		849,6	356	
		877,1	288	
Sem trinca	15	383,1	391	387,67
		389,0	385	
		386,5	387	
Com trinca	60	2.208,1	271	264,67
		2.307,7	255	
		2.231,8	268	
Com trinca	30	832,8	360	348,34
		827,9	356	
		883,4	329	
Com trinca	15	425,1	352	351,67
		427,4	346	
		421,5	357	

Trinca 2 – Lateral esquerda


Ensaio – Transdutores com frequência de 54 kHz				
Ponto / Trinca	Distância entre transdutores (cm)	Tempo de transmissão de onda (μ s)	Velocidade de onda (m/s)	Média das medições - Velocidade de transmissão de onda (m/s)
Sem trinca	60	2.196,0	273	276,34
		2.188,1	286	
		2.201,2	270	
Sem trinca	30	869,0	345	341,67
		902,3	332	
		864,7	348	
Sem trinca	15	334,3	448	428,34
		403,9	382	
		334,7	455	
Com trinca	60	1.777,4	337	339,34
		1.703,8	352	
		1.801,7	329	
Com trinca	30	1090,3	275	294,67
		957,0	313	
		998,4	296	
Com trinca	15	519,5	288	304,67
		466,1	321	
		491,6	305	

APÊNDICE E – Resultados dos ensaios de ultrassom – corpos de prova

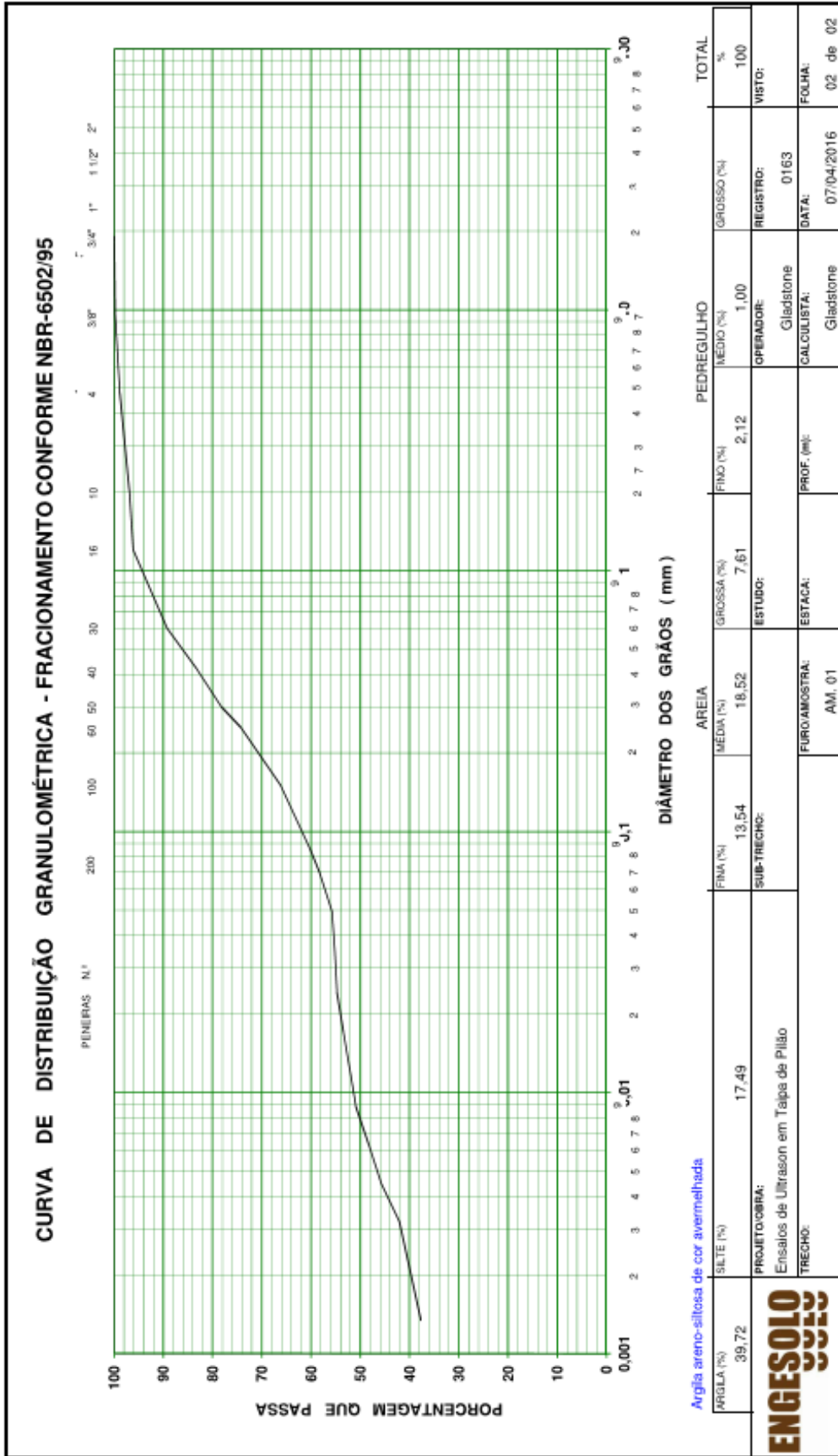
Ensaio – Transdutores com frequência de 54 kHz								
Ponto	Distância entre transdutores (cm)	Medições						Média das medições - Velocidade de transmissão de onda (m/s)
		Medição 1		Medição 2		Medição 3		
		Tempo transmissão (µs)	Velocidade (m/s)	Tempo transmissão (µs)	Velocidade (m/s)	Tempo transmissão (µs)	Velocidade (m/s)	
12	11	112,4	978	114	964	112,4	978	112,93
12	11	145,5	756	145,3	757	145,9	753	755,33
33	11	46,4	2370	46,5	2365	46,3	2375	2370
34	11	178,8	615	179,4	613	181	607	611,67
35	11	245,3	432	254,7	431	255	425	429,33
36	11	31,5	3396	31,6	3386	31,4	3407	3396,33
60	11	32,5	3384	32,4	3395	32,7	3363	3380,66
60	11	31,1	3536	31	3548	30,8	3571	3551,66
72	11	31,9	3448	31,8	3459	31,9	3448	3451,66
72	11	31,2	3525	31,2	3525	31,4	3503	3517,66

ANEXOS

ANEXO A – Ensaio de caracterização granulométrica – Solo inicial

		QUADRO RESUMO CARACTERIZAÇÃO COM SEDIMENTAÇÃO E COMPACTAÇÃO																		REG: 0163 /															
		FURO/AMOSTRA	ESTACA	PROFUNDIDADE DEATÉ	LL	IP	GRANULOMETRIA - % QUE PASSA					IG	T.R.B	EA	h nat	COMPACTAÇÃO		EXP.	I.S.C.	SEDIMENTAÇÃO			δ												
Nº	Nº	m	%	%	#1"	#3/4"	#3/8"	#4	#10	#40	#200	%	%	%	%	%	h	γ _r	%	%	Argila	Silte	Areia	Pod.	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
AM.01						100	99	97	83	59									39,7	17,5	39,7	3,1	2,681												
CLASSIF. DE CAMPO : Solo predominantemente argiloso																		CLASSIF. LAB. : Argila areno-siltosa de cor avermelhada										PROCTOR :							
FURO/AMOSTRA	ESTACA	PROFUNDIDADE DEATÉ	LL	IP	GRANULOMETRIA - % QUE PASSA					IG	T.R.B	EA	h nat	COMPACTAÇÃO		EXP.	I.S.C.	SEDIMENTAÇÃO			δ														
Nº	Nº	m	%	%	#1"	#3/4"	#3/8"	#4	#10	#40	#200	%	%	%	%	h	γ _r	%	%	Argila	Silte	Areia	Pod.	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
CLASSIF. DE CAMPO :																		CLASSIF. DE LAB. :										PROCTOR :							
CLIENTE: FUNDEP - Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa																		TRECHO :										FOLHA No. 01/02							
PROJETO/OBRA: Ensaios de Ultrason em Taipa de Pilão																		ESTUDO :										DATA : 09/12/15	VISTO :	OBS.: * Nót. - 7 cm.ár.					

ANEXO B – Curva de distribuição granulométrica – Solo inicial



ANEXO C – Equação de correção do solo

Equação matemática desenvolvida pelo Professor Mestre em Matemática Alexandre Costa Washington

Composição inicial do solo (em porcentagem %)		Composição solo ideal (em porcentagem %)	
Argila	39,7	Argila	39,7
Silte	17,5	Silte	17,5
Areia	39,7	Areia	39,7 + X
Pedregulho	3,1	Pedregulho	3,1
Total	100,00		100,00 + X

Deseja-se aumentar a proporção de areia no solo, de modo que areia e pedregulho juntos sejam 70% da composição desse solo.

Equação para determinar a quantidade, em quilos, de areia a ser acrescentada ao solo inicial:

Usando-se o lado direito da tabela: Areia + Pedregulho = 42,8 %

$$A = \frac{42,8 + x}{100 + x} = 70\% \Rightarrow \frac{42,8 + x}{100 + x} = 0,7 \Rightarrow 42,8 + x = 0,7(100 + x) \Rightarrow 42,8 + x = 70 + 0,7x \Rightarrow x - 0,7x = 70 - 42,8 \Rightarrow 0,3x = 27,2 \Rightarrow \frac{27,2}{0,3} \Rightarrow x \approx 91$$

Em cada 100kg de solo, devem ser acrescentados cerca de 91kg de areia.

Verificação:

Composição inicial do solo (em porcentagem %)		Composição solo ideal (em porcentagem %)	
Argila	39,7	Argila	39,7
Silte	17,5	Silte	17,5
Areia	39,7	Areia	130,7
Pedregulho	3,1	Pedregulho	3,1
Total	100,00		191,00

Proporção da areia mais pedregulho:

$$\frac{130,7 + 3,1}{191} = \frac{133,8}{191} \approx 0,70 = 70\%$$

ANEXO D – Ensaio de caracterização granulométrica – Solo corrigido

FURO/ AMOSTRA		ESTACA	PROFUNDIDADE DEATÉ	LL	IP	GRANULOMETRIA - % QUE PASSA						IG	T.R.B	EA	h _{nat}	COMPACTAÇÃO		EXP.	I.S.C.	SEDIMENTAÇÃO							
						#1"	#4	#10	#40	#200	h					γ _r	Argila			Silte	Areia	Pod.					
Nº		Nº	m	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	g/cm ³	%	%	%	%	%	g/cm ³					
AM.02			26	10	100	97	93	57	30	0	A-2.4	13,7	14,0	1865	20,2	9,2	63,4	7,2	2,659								
CLASSIF. DE CAMPO : Mistura de areia com solo argiloso												CLASSIF. LAB. : Areia argilo-siltosa de cor amarelada com pedregulho												PROCTOR : Normal			
FURO/ AMOSTRA		ESTACA	PROFUNDIDADE DEATÉ	LL	IP	GRANULOMETRIA - % QUE PASSA						IG	T.R.B	EA	h _{nat}	COMPACTAÇÃO		EXP.	I.S.C.	SEDIMENTAÇÃO							
						#1"	#4	#10	#40	#200	h					γ _r	Argila			Silte	Areia	Pod.					
Nº		Nº	m	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	g/cm ³	%	%	%	%	%	%	g/cm ³					
CLASSIF. DE CAMPO :												CLASSIF. DE LAB. :												PROCTOR :			
CLIENTE: FUNDEP - Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa												TRECHO:												FOLHA No. 01/02			
PROJETO/OBRA : Ensaios de Ultrason em Tapa de Pílo												ESTUDO :												DATA : 07/04/16 VISTO:		OBS.: * Not. - 7 rms	

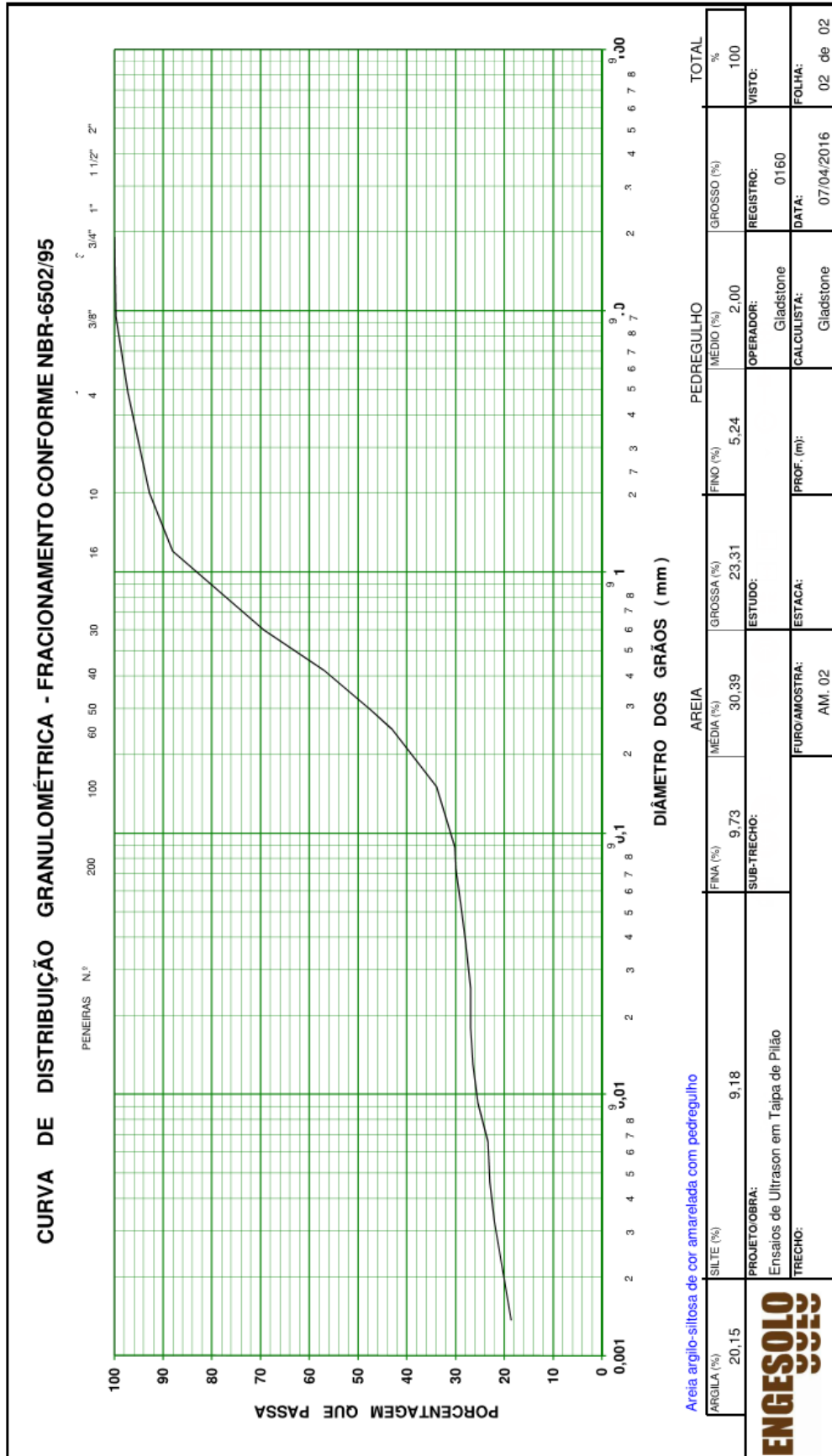


QUADRO RESUMO

CARACTERIZAÇÃO COM SEDIMENTAÇÃO E COMPACTAÇÃO

REG.: 0160 /

ANEXO E – Curva de distribuição granulométrica – Solo corrigido



ANEXO F – Equação de correção do teor de umidade do solo a ser compactado

Equação desenvolvida pelo Professor Mestre em Matemática Alexandre Costa Washington e adaptada pelo Engenheiro Benjamim José da Silva, responsável pelo laboratório de Geotecnia - Engesolo

Equação desenvolvida para obtenção da quantidade de água a acrescentar ao solo para correção da umidade (colocar o solo na umidade ótima do ensaio de compactação da energia do Proctor normal)

Variáveis:

M_h	Massa original do solo úmido
M_s	Massa original do solo seco
hót	Umidade ótima de laboratório
A	Massa de água a ser acrescentada ao solo
X	Porcentagem original de água no solo
P	Porcentagem de Perda Considerada (???)
Y	Nova porcentagem de água no solo (hót - x + P), definida para compactação da parede de taipa

M_s = Massa original do solo seco (kg de solo seco):


$$M_s = \frac{M_h * 100}{100 + X}$$

A = Massa de água a adicionar (kg de água a acrescentar ao solo):

$$A = \frac{M_s * Y}{100} = \frac{M_h * 100}{100 + X} * \frac{Y}{100} = \frac{(M_h * 100)}{(100 + X)} * \frac{(hót - X + P)}{100} = \frac{M_h * (hót - X + P)}{(100 + X)}$$

Após o acréscimo de água, a nova massa total do solo vale M_h (Massa Original do Solo Úmido) + A (Massa de Água a Acrescentar) em quilogramas (considerando-se para efeitos práticos a densidade da água como sendo 1000 kg/m³)

ANEXO G – Equação de correção do teor de umidade do solo a ser compactado

		QUADRO RESUMO - RESULTADOS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES -SOLOS				
CLIENTE: Maria Virgínia Peixoto				FOLHA: 01/01		
PROJETO: Avaliação da Integridade Mecânica em Paredes de Taipa de Pilão – Utilizando a Técnica do Ultrasson				DATA: 31/01/2017		
TIPO DE AMOSTRA: Amostras Indeformadas (blocos), Retiradas da Miniparede de Taipa e Pilão				VISTO:		
PARÂMETROS INTERPRETADOS						
REGISTRO	FURO / AMOSTRA	LOCAL DA RETIRADA DA AMOSTRA	σ_{rup}	E_t	E_{rup}	S_u
Nº	Nº	m	KPa	KPa	KPa	KPa
0007	8	Vista Lateral	409,9	30.303,8	26.125,0	205,0
0008	12	Vista Frontal	361,3	28.655,6	18.420,0	180,6
0009	33	Vista Posterior	90,3	33.200,0	9.210,0	45,2
0010	34	Vista Posterior	199,7	24.640,0	14.542,9	99,8
0011	35	Vista Posterior	108,7	31.857,1	7.914,3	54,3
0012	36	Vista Posterior	515,2	41.700,0	32.831,3	257,6
0013	56	Lateral Direita	73,0	23.800,0	5.314,3	36,5
0014	60	Lateral Direita	88,5	15.228,6	6.442,8	44,2
0015	68	Lateral Esquerda	90,5	20.000,0	6.592,9	45,3
0016	72	Lateral Esquerda	236,0	24.316,7	17.185,7	118,0
REGISTRO	FURO / AMOSTRA	LOCAL DA RETIRADA DA AMOSTRA	$h_{nat.}$	γ_{snat}		
Nº	Nº	m	%	g/cm ³		
0007	8	Vista Lateral	5,6	1,818		
0008	12	Vista Frontal	8,0	1,760		
0009	33	Vista Posterior	10,9	1,676		
0010	34	Vista Posterior	10,6	1,835		
0011	35	Vista Posterior	10,8	1,813		
0012	36	Vista Posterior	6,7	1,822		
0013	56	Lateral Direita	14,2	1,836		
0014	60	Lateral Direita	14,0	1,781		
0015	68	Lateral Esquerda	13,6	1,733		
0016	72	Lateral Esquerda	9,9	1,748		

Legenda:

σ_{rup} = Tensão de Ruptura,

E_t = Módulo de Deformação Tangente,

E_{rup} = Módulo de Deformação na Ruptura,

S_u = Resistência ao Cisalhamento.

$h_{nat.}$ = Umidade Natural

γ_{snat} = Massa Específica Aparente Natural

OBS.:

-Os parâmetros calculados e interpretados nos resultados dos ensaios de compressão simples pelo laboratório deverão ser reavaliados pelo projetista.