

MARIA VIRGÍNIA SIMÃO PEIXOTO

**METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE ENSAIOS ULTRASSÔNICOS EM
MINIPAINÉIS DE TAIPA DE PILÃO.**

Belo Horizonte
Escola de Arquitetura
2011

MARIA VIRGÍNIA SIMÃO PEIXOTO

**METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE ENSAIOS ULTRASSÔNICOS EM
MINIPAINÉIS DE TAIPA DE PILÃO.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ambiente Construído Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura.

Área de concentração: Conservação de Bens culturais. Tecnologia do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Penido de Rezende

Co-orientadores: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes

Profa. Dra. Judy Norka Rodo Mantilla

Belo Horizonte

Escola de Arquitetura

2011

MARIA VIRGINIA SIMÃO PEIXOTO

“Metodologia para a avaliação da integridade mecânica de mini painéis de Taipa de Pilão”

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes (co-orientador – EEUFMG)



Prof. Dr. Marco Antônio Penido de Rezende (EAUFMG - orientador)



Prof. Dr. Mario Mendonça de Oliveira (Universidade Federal da Bahia)

Belo Horizonte, 01 de agosto de 2011

Dedico este trabalho aos meus amados pais, José Carlos e Lúdia, por todos os preciosos ensinamentos e por acreditarem em mim. Muito obrigada pelo amor incondicional e por estarem sempre ao meu lado nos momentos mais importantes da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus todas as bênçãos recebidas ao longo da minha caminhada e a Nossa Senhora, que também sempre se faz presente em minha vida.

À Tetê, mãezinha do coração, os cuidados ao longo de toda minha vida.

À minha querida tia Piedade, que sempre está ao meu lado me incentivando.

À UFMG e ao Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura esta oportunidade de estudo.

Ao pessoal da UFMG, minha querida equipe de apoio: Ao Juarez, da Fazenda Modelo da UFMG, ao Cândido e ao Marco Aurélio, da Escola de Engenharia, agradeço a enorme ajuda durante o desenvolvimento da pesquisa. Ao Denis Kiyoshi, responsável pelos testes do solo, agradeço a paciência em ensinar os procedimentos dos ensaios.

Aos professores do MACPS e aos amigos e funcionários da Escola de Arquitetura.

Obrigada a professora Judy Mantilha, co-orientadora desta pesquisa, pela imensa ajuda com a revisão bibliográfica na área de solos e por ceder o laboratório de geotecnia para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores Mário Mendonça e Cybèle Santiago da UFBA, por me receberem em minha breve visita ao laboratório da escola politécnica da UFBA, contribuindo com informações para o desenvolvimento desta pesquisa.

A Eliza e Suzana, a imensa ajuda revisando com toda dedicação esta dissertação.

Ao Professor Abdias Magalhães, um profissional exemplar e co-orientador desta pesquisa, agradeço a preciosa ajuda ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Em especial, agradeço ao Professor Marco Antônio Penido de Rezende, um modelo de profissional, que foi meu orientador na especialização e agora nesta pesquisa. Obrigada por me estimular a ingressar neste mestrado, pelo convite para entrar neste projeto de pesquisa e pela paciente e cuidadosa orientação. Aproveito para agradecer, também, a grande oportunidade de iniciar a minha carreira acadêmica ao confiar a disciplina Técnicas Retrospectivas durante o período em que estive cursando pós-doc. nos Estados Unidos, apostando na minha capacidade profissional. Ao longo deste percurso, se revelou um verdadeiro amigo. Serei sempre grata por tudo.

Enfim, só tenho a agradecer a todos que direta ou indiretamente contribuíram para mais esta conquista.

RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo sobre o desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de testes de ultrassom em minipainéis em taipa de pilão. Este estudo está inserido dentro de um projeto de pesquisa, no qual a primeira fase foi realizada com êxito, comprovando a existência de uma correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica em materiais terrosos. Buscando alcançar o objetivo proposto, esta pesquisa foi desenvolvida em três etapas. Na primeira, foi realizada a escolha do solo a ser trabalhado, levando-se em consideração o tipo de solo usado na primeira fase do projeto de pesquisa. Na segunda foram realizados os testes geotécnicos, buscando compreender o comportamento do solo escolhido. Na terceira etapa foram conduzidos os testes de ultrassom. Deseja-se que este trabalho contribua para o desenvolvimento dos estudos sobre o emprego de ensaios não destrutivos na avaliação de estruturas construídas com material terroso, como por exemplo, a taipa de pilão.

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

ABSTRACT

This dissertation presents a study on the development of a methodology for ultrasonic tests applying on mini panels in rammed earth. This study is part of a broader research project, in which the first phase was successfully realized, proving the existence of a correlation between mechanical strength and ultrasonic velocity in earth material. Seeking to achieve the objective, the research was conducted in three stages. In the first stage, the soil to be worked was chosen, taking into consideration the type of soil used in the first stage of the research project. In the second stage, geotechnical tests were conducted in order to understand the behavior of the chosen soil. Finally, on the third phase, ultrasonic tests were conducted. It is hoped that this work may be a contribution to the studies development on the use of non-destructive testing in the evaluation of structures built with earth material, such as rammed earth, for example.

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

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Principais técnicas de terra crua	17
FIGURA 2 – Formas de madeira para execução de paredes em taipa de pilão	20
FIGURA 3 – Formas de madeira para execução de paredes em taipa de pilão	20
FIGURA 4 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica do solo	25
FIGURA 5 – Diagrama das fases do solo	28
FIGURA 6 – Diagrama das fases do solo	30
FIGURA 7 – Curva de compactação típica	33
FIGURA 8 – Curvas de compactação em um solo com diferentes energias	34
FIGURA 9 – Correlação entre tensão cisalhante e tensão normal	35
FIGURA 10 – Ensaio de compressão simples	36
FIGURA 11 – Curva de compactação \times curva de resistência	37
FIGURA 12 – Estrutura de solos compactados, segundo proposição de Lambe	38
FIGURA 13 – Aparelho ultrassom	44
FIGURA 14: Tipos de transmissão no ensaio ultrassônico	45
FIGURAS 15 e 16 – Coleta do solo	61
FIGURA 17 – Coleta e transporte do solo	61
FIGURAS 18 e 19 – Primeira estocagem do solo coletado	61
FIGURAS 20 e 21 – Execução das fôrmas dos painéis	64
FIGURAS 22 e 23 – Execução das fôrmas dos painéis	65
FIGURAS 24, 25 e 26 – Execução das fôrmas dos painéis	65
FIGURA 27 – Local de construção dos painéis	66
FIGURA 28 – Projeto das paredes	67
FIGURA 29 – Projeto das paredes – Perspectiva	67
FIGURAS 30, 31 e 32 – Compactação do painel 1 – painel defeituoso	68
FIGURAS 33 e 34 – Compactação do painel 1 – painel defeituoso	68
FIGURA 35 – Compactação do painel 1 – painel defeituoso	69
FIGURAS 36 e 37 – Secagem e nova estocagem da terra para execução dos demais painéis	69
FIGURAS 38 e 39 – Peneiramento da terra para painel	70
FIGURAS 40 e 41 – Compactação do painel 2	70
FIGURAS 42 e 43 – Compactação do painel 2	71
FIGURAS 44 e 45 – Compactação do painel 2	71
FIGURAS 46 e 47 – Peneiramento e colocação da terra para painel 3	71
FIGURAS 48, 49 e 50 – Compactação do painel 3	73
FIGURAS 51 e 52 – Peneiramento e colocação da terra para painel 4	72
FIGURAS 53 e 54 – Compactação do painel 4	72
FIGURAS 55, 56 e 57 – Compactação do painel 4.	73
FIGURAS 58 e 59 – Painel 1	74
FIGURAS 60 e 61 – Painel 4	74

FIGURAS 62 e 63 – Painel 4	75
FIGURA 64 – Equipamento utilizado nos testes – PUNDIT	76
FIGURA 65 – Calibração do equipamento ultrassom	77
FIGURA 66 – Gráfico Índice de Plasticidade x Limite de Liquidez.	79
FIGURA 67 – Curva de distribuição granulométrica do solo	80
FIGURA 68 – Curva de compactação solo	81
FIGURA 69 – Malha para ensaios de ultrassom e retirada de corpos de prova	82
FIGURA 70 – Corpos de prova para ensaios a compressão simples	82
FIGURA 71 – Novos corpos de prova retirados	83
FIGURAS 72 e 73 – Corpo de prova do painel 1 – Painel defeituoso	84
FIGURAS 74 e 75 – Corpo de prova do painel 2	84
FIGURAS 76 e 77 – Corpo de prova do painel 3	84
FIGURAS 78 e 79 – Corpo de prova do painel 4	85
FIGURAS 80 e 81 – Ensaio no corpo de prova do painel 1 – Painel defeituoso	85
FIGURAS 82 e 83 – Ensaio no corpo de prova do painel 2	86
FIGURAS 84 e 85 – Ensaio no corpo de prova do painel 3	86
FIGURAS 86 e 87 – Ensaio no corpo de prova do painel 4	86
FIGURA 88 – Corpo de prova produzido em laboratório durante a primeira etapa do projeto de pesquisa desenvolvido pela autora Bandeira, 2009	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação granulométrica brasileira	24
TABELA 2 – Classificação quanto ao índice de liquidez	27
TABELA 3 – Classificação quanto ao índice de plasticidade	27
TABELA 4 – Classificação quanto ao índice de contração	28
TABELA 5 – Valores típicos de índices de vazios da areias	31
TABELA 6 – Classificação das areias segundo a compactidade	31
TABELA 7 – Consistência em função da resistência à compressão	32
TABELA 8 – Classificação das argilas quanto à consistência	32
TABELA 9 – Classificação da qualidade entre resistência e velocidade ultrassônica	44
TABELA 10 – Frequência mínima do transdutor	48
TABELA 11 – Comparativo entre procedimentos de normas para ensaio de ultrassom	54
TABELA 12 – Resumo da caracterização do solo	78
TABELA 13 – Resumo da caracterização do solo após peneiramento para compactação dos painéis 2, 3 e 4	79
TABELA 14 – Resultados dos testes do ultrassom no painel 1	87
TABELA 15 – Resultados dos testes do ultrassom no painel 2	88
TABELA 16 – Resultados dos testes do ultrassom no painel 3	89
TABELA 17 – Resultados dos testes do ultrassom no painel 4	90
TABELA 18 – Tensão de ruptura x Velocidade ultrassônica	92
TABELA 19 – Velocidade ultrassônica x Densidade	93
TABELA 20 – Velocidade ultrassônica x Teor de umidade	94
TABELA 21 – Laboratório x Campo	96

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Tensão de ruptura x velocidade ultrassônica	92
GRÁFICO 2 – Velocidade ultrassônica x densidade	92
GRÁFICO 3 – Velocidade ultrassônica x teor de umidade	94

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo	15
1.2 Escopo do trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Arquitetura de terra	16
2.2 O solo	22
2.2.1 Formação	22
2.2.2 Estrutura	23
2.2.3 Classificação granulométrica dos solos	24
2.2.4 Classificação dos solos por meio de ensaios	25
2.2.5 Fases dos solos	28
2.2.5.1 Estados dos solos	29
2.2.5.2 Índices físicos	30
2.2.5.3 Compacidade	31
2.2.5.4 Consistência	32
2.2.6 Compactação dos solos	33
2.2.7 Resistência dos solos	34
2.2.7.1 Ensaios para determinação da resistência dos solos	36
2.2.7.2 A resistência dos solos compactados	36
2.2.7.3 Estrutura dos solos compactados	37
2.3 Análises de distribuição das partículas do solo	38
2.4 Recomendações para execução de painéis em taipa de pilão	40
2.5 Verificação de patologias a partir de ensaios não destrutivos	41
2.5.1 Aparelho de ultrassom	44
2.5.2 Descrição do método de ensaio	44
2.6 Normalização	47
2.6.1 Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux – RILEM NDT 1/1972 – <i>Testing of concrete by the ultrasonic pulse method</i> (RILEM, 1972; Apud EVANGELISTA, 2002; BANDEIRA, 2009)	47
2.6.2 British Standards Institution – BSI 1881: Part 203:1986 – <i>Testing concrete – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete</i> (BSI, 1986)	49
2.6.3 American Society for Testing and Materials ASTM: C597-83/1991 – <i>Standard test method for pulse velocity through concrete</i> (ASTM, 1991)	50
2.6.4 NBR 8802/1994 – <i>Concreto endurecido – Determinação da velocidade da propagação de onda ultrassônica</i> (ABNT, 1994)	51
2.6.5 Comité Mercosur de Normalización, NM 58/1996 – <i>Hormigón endurecido – Determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos</i> (COMITÉ MERCOSUR, 1996; Apud Evangelista, 2002; Bandeira, 2009)	53
2.6.6 Quadro comparativo entre procedimento de normas para ensaio de ultrassom	54

2.7 Ensaio realizado com a tecnologia do ultrassom em materiais terrosos – solos	54
2.8 Conclusão	59
3 METODOLOGIA	60
3.1 Amostragem do solo para execução dos painéis de taipa de pilão	60
3.2 Ensaio de caracterização do solo	62
3.2.1 Amostras de solo	62
3.2.2 Análise granulométrica	62
3.2.3 Massa específica	62
3.2.4 Limite de liquidez	63
3.2.5 Limite de plasticidade	63
3.3 Ensaio de compactação da amostra do solo usado nos painéis	63
3.4 Local de desenvolvimento da pesquisa	64
3.5 Execução das fôrmas dos painéis de taipa de pilão	64
3.6 Execução dos painéis de taipa de pilão	66
3.6.1 Projeto dos protótipos.	66
3.6.2 Paineis defeituosos	67
3.6.3 Demais painéis	69
3.7 Retirada das fôrmas dos painéis	73
3.8 Ensaio do ultrassom	75
3.8.1 Calibração do aparelho de ultrassom	76
3.8.2 O ensaio do ultrassom	77
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	78
4.1 Caracterização geotécnica do solo	78
4.2 Ensaio de compactação do solo	80
4.3 Moldagem dos painéis	81
4.4 Ensaio do ultrassom e resistência à compressão simples.	82
4.4.1 Ensaio do ultrassom nos painéis	82
4.4.2 Ensaio de resistência à compressão simples	82
4.5 Nova metodologia proposta para os ensaios do ultrassom	83
4.5.1 Ensaio do ultrassom nos corpos de prova	85
4.6 Resultado final	91
5 CONCLUSÕES	96
REFERÊNCIAS	99
ANEXOS	103
ANEXO A – Ensaio de caracterização do solo – Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG	104
ANEXO B – Ensaio de compactação e caracterização do solo – ViaTest	107
ANEXO C – Testes de ultrassom dos corpos de prova	109

1 INTRODUÇÃO

O sistema construtivo de terra vem sendo empregado há mais de 5000 mil anos, por diversas culturas existentes em todas as partes do mundo, tornando-se um método construtivo universal.

No período da colonização brasileira, a terra foi amplamente utilizada 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, dentre elas, o adobe, o pau-a-pique e a taipa de pilão. Ao longo do tempo, devido a diferenças de tipos de solo, clima, vegetação, matéria prima disponível para o emprego nas construções e, também, a alguma influência recebida da arquitetura indígena e africana, essas técnicas foram sofrendo adaptações.

A herança da arquitetura de terra, no Brasil, é muito rica em Minas Gerais, que conta com um belo acervo. No entanto, este se encontra em precário estado de conservação. Trata-se de construções que apresentam significativa durabilidade, mas que são passíveis de sofrer processos de degradação variados.

Atualmente, ocorre o aumento da consciência sobre a necessidade da preservação de nossos bens históricos e culturais, dentre eles as edificações históricas erguidas no período colonial, em terra. No desenvolvimento 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 (REZENDE, RODRIGUES, 2009).

Como isso não é o ideal, verifica-se a necessidade de desenvolver novas formas de se fazer o diagnóstico do estado das construções buscando não danificar e, sim, conservar a edificação, através do emprego de ensaios não destrutivos, usando os métodos adequados.

A técnica do ultrassom é uma forma de se alcançar esse objetivo. Essa já é empregada em estruturas de alguns materiais como o concreto e aço. Portanto, a proposta é de se verificar a viabilidade de sua utilização também na arquitetura de terra, visando determinar as condições físicas e mecânicas sem causar prejuízos a sua estrutura.

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é a elaboração de metodologia, tendo como base a existente e utilizada em concretos, desenvolvida de acordo com as normas da ABNT, para adaptá-la em painéis de taipa de pilão, buscando verificar o estado em que se encontra a estrutura a partir da correlação entre velocidade ultrassônica e resistência mecânica.

Dentro dessa metodologia a ser desenvolvida, busca-se a identificação das etapas do processo executivo e verificação dos resultados obtidos nos testes, visando comprovar a eficácia desses testes não destrutivos na atividade de restauração e conservação do patrimônio edificado em terra.

1.2 Escopo do trabalho

Esta dissertação será dividida em 5 capítulos.

Capítulo 1 – Introdução – Nesse capítulo, será exposta a importância do patrimônio edificado em terra e a necessidade de sua preservação. Também será mencionado, em linhas gerais, a importância da introdução do uso de tecnologia de ensaios não destrutivos na verificação da integridade das estruturas. Será, ainda, apresentado o escopo do trabalho

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica – Realizar-se-á revisão da literatura sobre os assuntos a serem tratados nesta pesquisa, sendo eles: a técnica construtiva da taipa de pilão, a geotecnia dos solos, o emprego do ultrassom na avaliação da integridade das estruturas, normatização referente aos ensaios com a utilização do ultrassom e estudos realizados por outros pesquisadores sobre ensaios de ultrassom em materiais terrosos.

Capítulo 3 – 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 estruturas construídas em materiais terrosos.

Capítulo 4 – Apresentação e discussão de resultados – Nesta etapa será feita a análise dos resultados obtidos na caracterização dos solos, nos ensaios ultrassônicos, que compreende a medição da velocidade de propagação da onda ultrassônica, nos ensaios de resistência a compressão simples e, por fim, a correlação entre velocidade ultrassônica e resistência mecânica.

Capítulo 5 – Conclusão – Serão expostas considerações, com relação aos resultados obtidos pela pesquisa, verificando a possibilidade desse tipo de ensaio, que já é utilizado em estruturas em concreto, ser aplicado, também, em estruturas de terra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será brevemente transcrito o arcabouço teórico usado para fundamentar o desenvolvimento deste trabalho, sem com isso se ter a preocupação em esgotar um assunto que é bem extenso e complexo.

2.1 Arquitetura de terra

O sistema construtivo de terra vem sendo empregado, há mais de 5.000 anos, na construção de edificações. 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 (atual Iraque), na Pérsia (atual Irã), na Turquia, na África, no Oriente e na Ásia, (China, Índia). Também na Europa, o uso desse material foi muito difundido (Ex.: França séc. XIX, Taipa de pilão) e ainda é usado (SANTIAGO, 2001; OLIVEIRA, 2006).

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

A terra crua é um material de construção amplamente utilizado no mundo, sendo difícil encontrar país que não tenha um acervo arquitetônico edificado nessa técnica.

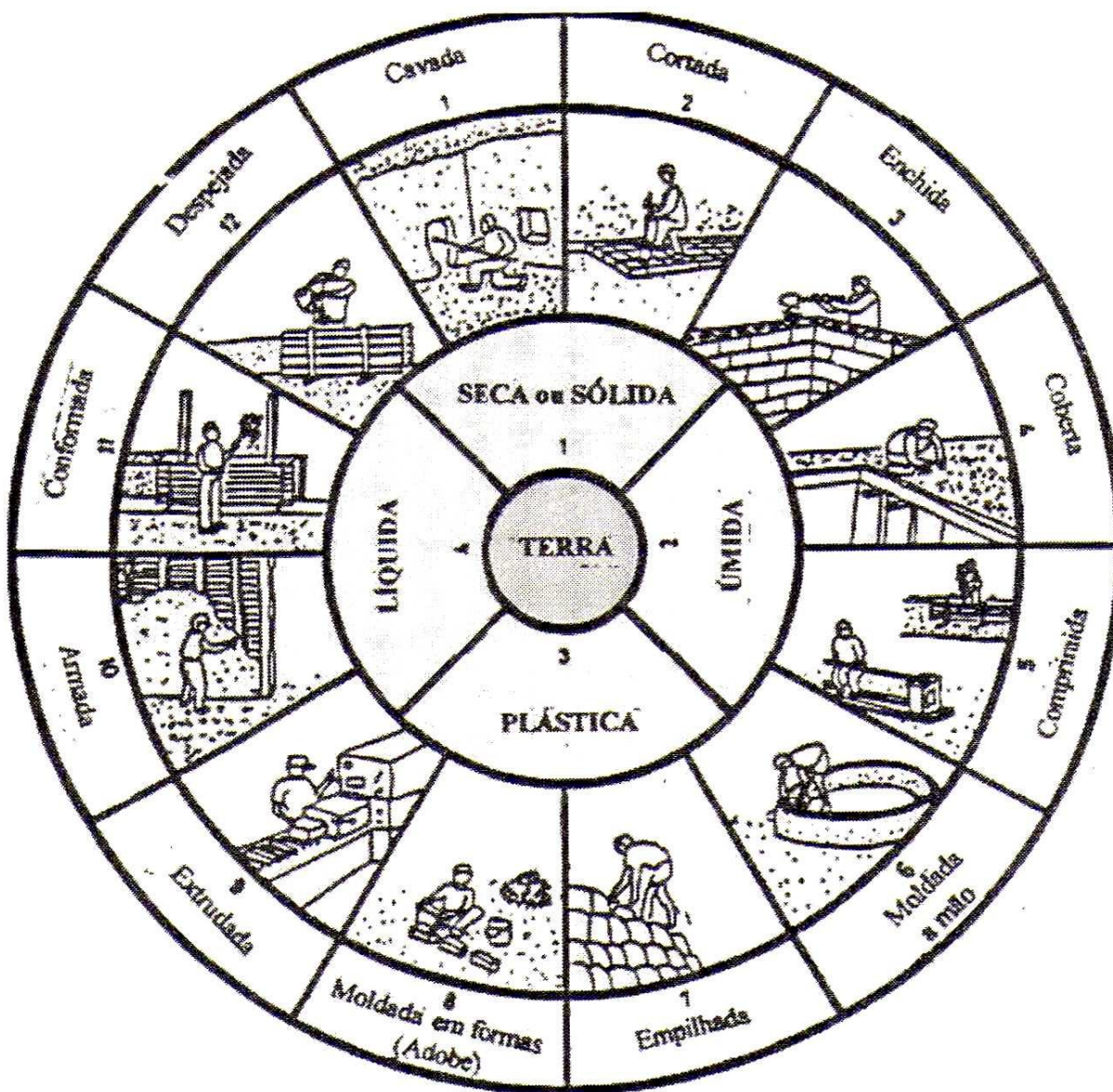
No Brasil, antes da colonização portuguesa, os índios construía seus abrigos usando paus roliços para fazer as estruturas e as vedações eram feitas de palha e folhagens. As técnicas construtivas em terra crua foram introduzidas pelos portugueses. Os escravos africanos, que usavam essa tecnologia construtiva em seus países de origem, também deram sua contribuição para a difusão do uso da terra crua no Brasil. Devido a diferenças de tipos de solo, clima, vegetação, matéria prima disponível para o emprego nas construções, e, também, alguma influência recebida da arquitetura indígena, essas técnicas foram sofrendo adaptações, ao longo do tempo (MILANEZ, 1958. Apud BANDEIRA, 2009).

São muitas as técnicas construtivas com terra empregadas em diversas culturas. Em cada lugar onde são utilizadas, elas recebem denominações distintas.

Estima-se que 1/3 da população mundial habita construções feitas em terra crua. Nos países em desenvolvimento e nos subdesenvolvidos, essas construções podem chegar a 50% (SANTIAGO, 2001).

O CRATerre - *Centre International de La Construction en Terre*, mostrou um diagrama, contendo 12 técnicas construtivas, buscando sistematizar as variadas formas de emprego da terra como material de construção (FIG. 1).

FIGURA 1 – Principais técnicas de terra crua



Fonte: adaptado de CraTerre (HOUBEN; GUILLAUD, 1994. Apud BANDEIRA, 2009. p. 21)

As técnicas construtivas em terra foram agrupadas em três categorias ou sistemas construtivos. Alvenaria, monolítico e misto.

a) sistema construtivo de alvenaria: composto a partir do empilhamento de tijolos, organizados de tal maneira que formam uma estrutura de terra. Nessas construções, o tijolo do tipo adobe, é o mais empregado;

b) sistema construtivo monolítico: é realizado por meio da compactação da terra com uso de fôrmas, resultando na obtenção de uma peça monolítica. A taipa de pilão é o tipo de técnica mais conhecida usada nesse sistema;

c) sistema construtivo misto: a estrutura é construída utilizando madeira ou material pétreo, sendo ela do tipo portante, e a terra, posteriormente, é usada como material de vedação ou enchimento dos entramados. Paredes em adobes ou pau-a-pique sobre pilares de alvenaria de pedra é um exemplo desse sistema.

A partir do diagrama, as técnicas existentes são classificadas de acordo com a quantidade de água adicionada ao material terroso:

a) estado sólido – usa-se uma quantidade mínima necessária de água ao se trabalhar o material terroso. As técnicas de terra cavada e de terra cortada, que pode ser em torrões de terra e blocos cortados, representam o grupo de construções trabalhadas nesse estado;

b) estado seco – a terra é trabalhada com certa quantidade de água, que lhe garante uma consistência que permite seu apiloamento à compactação ou ser prensada. Ex.: Taipa de pilão;

c) estado plástico – a quantidade de água adicionada ao material terroso é a necessária para que este atinja certa plasticidade que permite a moldagem. O tijolo de adobe manual é moldado com terra nesse estado físico;

d) estado líquido – a quantidade de água adicionada à terra torna-a semelhante a um líquido espesso e homogêneo, não apresentando resistência ao cisalhamento. O material é trabalhado por meio das técnicas de terra derramada e de terra de enchimento.

As técnicas de construção, em terra crua, mais empregadas no Brasil foram o adobe, o pau-a-pique e a taipa de pilão. Apresentam as seguintes características:

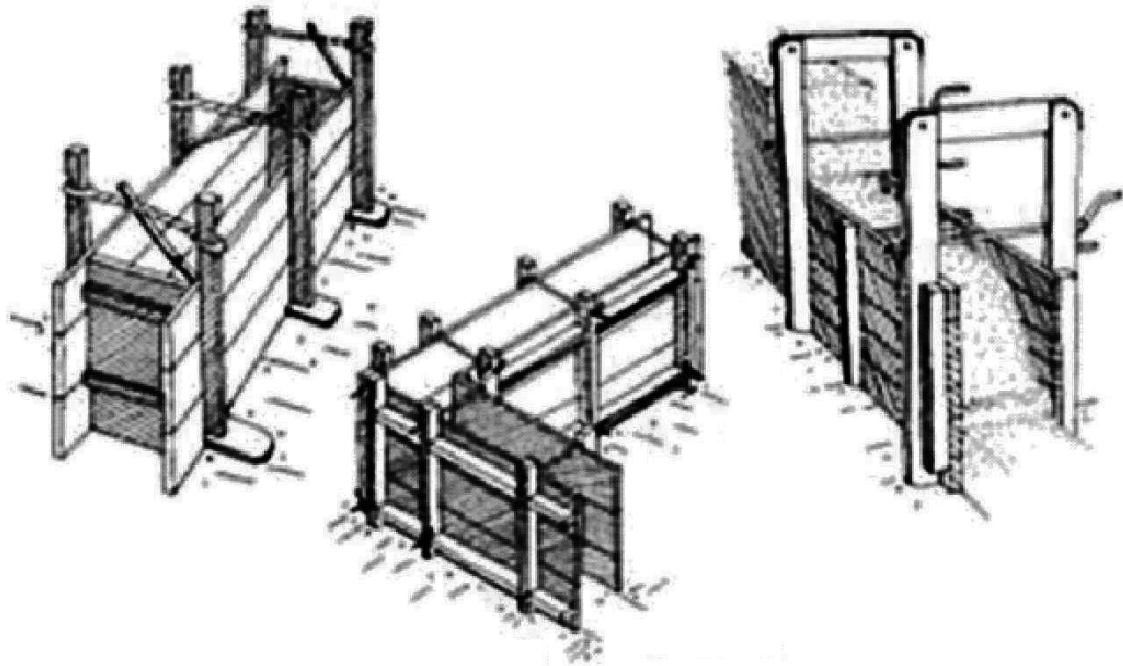
a) adobe: trata-se de um sistema construtivo em que o material usado é o tijolo de barro cru, seco a sombra e ao sol, sendo assentado com argamassa de barro, formando paredes de alvenaria. O termo adobe, que significa tijolo seco ao sol, deriva da língua árabe *attob* e da egípcia *thobe* (BANDEIRA, 2009). Os tijolos são confeccionados a partir da mistura de terra e água, podendo apresentar formas e tamanhos variados. O tipo de solo recomendado para ser usado na sua fabricação é uma areia argilosa, apresentando, portanto, uma proporção de areia maior do que de argila, devendo estar no estado plástico. Em geral, é adicionada, à mistura,

palha picada ou outras fibras, para melhorar sua resistência mecânica à retração durante o processo de secagem. Pode-se adicionar cal à mistura também. São executados manualmente ou com auxílio de equipamentos mecânicos, em moldes simples ou múltiplos, confeccionados em madeira, plástico ou metal. Devem secar ao sol ou à meia sombra.

b) pau-a-pique: também conhecido como taipa de sopapo, de sebe ou de mão. A terra, no estado plástico, é aplicada manualmente sobre uma estrutura portante. Em geral, executada a partir do emprego de peças de madeira roliças, dispostas na vertical e fixadas entre os baldrames e frechais por meio de furos ou pregos. Normalmente a essas, são colocadas, em ambos os lados, ripas ou varas, bambus, esteira de palha, fixados com sisal, tiras de couro, arame, pregos, etc. Esse entramado tem a função de sustentar o barro que será jogado posteriormente.

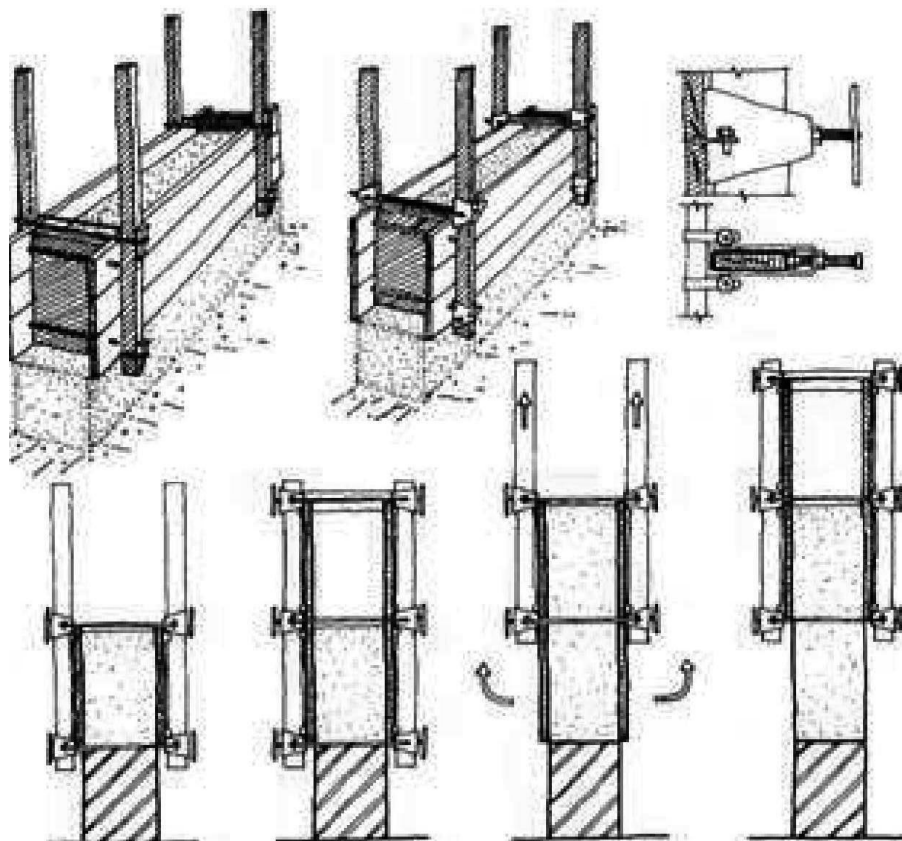
c) taipa de pilão: a terra é apiloada, manualmente ou mecanicamente, dentro de fôrmas, feitas a partir da colocação de duas tábuas, de madeira, paralelas, fixadas por cunhas dispostas em intervalos regulares. O travejamento desta fôrma é feito com a colocação de peças de paus roliços que a atravessam, sendo-lhe fixados, externamente. As edificações feitas em taipa de pilão são caracterizadas por paredes maciças, monolíticas. Para a execução dessas paredes são utilizadas fôrmas de madeira dotadas de uma placa de fechamento, permitindo a amarração a prumo das secções de uma parede ou de um muro. Em geral, apresentam largura de 40 a 80cm, podendo chegar a, aproximadamente, 1,20m, dependendo da carga e da altura final da construção. Dentro das fôrmas, era colocado o barro em camadas de 15 a 20cm de altura. Em seguida, essas eram compactadas com o uso do pilão ou auxílio dos pés, buscando a obtenção de maior consistência da massa. Após o término do preenchimento da primeira camada, de acordo com Vasconcellos (1979), os taipais (FIGS. 2 e 3) se sucediam verticalmente, uns sobre os outros, sendo que cada fiada se prolongava por toda a extensão da parede ou por toda a extensão da periferia da construção que, assim, iria subindo, progressivamente, em toda sua dimensão. Ao subir, a fôrma se apoia em paus transversais, denominados “agulha” ou “cangalha de baixo”. Em termos arquiteturais, o resultado é a prevalência dos cheios sobre os vazios, resultando, portanto, em grandes superfícies planas com algumas pequenas aberturas. As juntas a prumo, em geral, compõem a textura das paredes que normalmente recebem revestimento.

FIGURA 2 – Formas de madeira para execução de paredes em taipa de pilão



Fonte: http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2004-1/arq_terra/terra.htm

FIGURA 3 – Formas de madeira para execução de paredes em taipa de pilão



Fonte: http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2004-1/arq_terra/terra.htm

No Estado de São Paulo, o emprego dessa técnica construtiva foi predominante desde a sua fundação até meados do século XIX, sendo amplamente empregada na execução das casas bandeiristas (LEAL, 1977; VASCONCELOS, 1979; MELLO, 1985; MONUMENTA, 2005). Mayumi (2008), em seu livro *Taipa, Canela Preta e Concreto – Estudo sobre o restauro de casas bandeiristas*, trata do modelo empregado no desenvolvimento do restauro de algumas casa bandeiristas tombadas pelo Departamento do Patrimônio Histórico (DPH) da Secretaria Municipal de São Paulo. Em seu estudo ela aborda aspectos relacionados a valores históricos, tipológicos, ambientais, da técnica construtiva, do estado e das estratégias de conservação, da legislação, dos planos de restauro, dos novos usos etc.. Esta técnica se propagou para os estados do Paraná, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. Em geral, eram os mestres de ofícios quem executava essa técnica nas construções, procurando desenvolver seus próprios métodos e, posteriormente, transmitir suas experiências para as gerações seguintes.

Apesar dessas construções, erguidas em terra, apresentarem grande durabilidade, sendo muitas delas já seculares, elas são passíveis de sofrerem degradação ao longo do tempo.

A conservação e a restauração dos edifícios antigos exigem elaboração de diretrizes de projeto e procedimentos para resgatar a tipologia arquitetônica, a técnica construtiva e a identificação dos tipos de materiais ali empregados, na tentativa de realizar intervenção consistente e eficaz.

Fernando 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.

O manual de obras em edificações preservadas, desenvolvido pela Prefeitura do Rio de Janeiro, trata também de questões relacionadas a preservação, conservação de monumentos e formas de intervir em edificações protegidas, desenvolvendo uma metodologia para este tipo atividade.

Rezende e Rodrigues (2006, 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. É um importante referencial nessa pesquisa.

Varum et al (2006), empregando a técnica do ultrassom, ensaio não destrutivo, têm realizado pesquisas em relação ao comportamento estrutural de edificações construídas

com alvenarias de adobe, a partir da estimação da resistência e do módulo de rigidez por ela apresentados. Tinham como objetivo desenvolver diretrizes de procedimentos de reabilitação dessas estruturas e criar um conjunto de estratégias de ações para prevenção contra um colapso delas. De acordo com informações obtidas pelo coordenador do projeto piloto, no qual este estudo se insere, essa pesquisa não atingiu resultados esperados. Uma das causas apontadas seria uma sensibilidade apresentada pelo aparelho utilizado.

Para se conservar uma arquitetura de terra, seja para salvaguardar, preservar a história de uma técnica ou restaurar patrimônios, é necessário o trabalho de equipe interdisciplinar com a abordagem de diversas áreas do conhecimento, tais como: arquitetura, engenharia, belas artes, dentre outras. Sendo assim, um programa de investigação de campo e de laboratório é necessário para adoção de procedimentos e seleção de materiais adequados para 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”.

2.2 O solo

2.2.1 Formação

Os solos são formados a partir da decomposição da rocha, que acontece por meio do intemperismo, podendo esse ser químico ou físico. O primeiro se refere a reações químicas, tais como a oxidação, carbonatação e hidratação, gerando novos minerais e sais solúveis. Essa decomposição é responsável pela formação de solos de partículas finas, como os argilosos e siltosos. Esse tipo é mais frequente em climas quentes e úmidos, sendo muito comum no Brasil. O segundo provém da desagregação física a partir da variação de temperatura, do calor por atividade química. Em geral, formam solos de partículas grossas e com presença de pedregulhos, como os solos arenosos, também presentes em algumas partes do Brasil (SANTIAGO, 2001; PINTO, 2002). Esse material pode também ser definido como denso e resistente, constituído a partir de uma mistura natural de diversos minerais e matéria orgânica (em alguns casos). Pode ser escavado com equipamentos simples, sendo eles manuais ou mecânicos.

Os solos são classificados em três tipos básicos, a partir de sua origem:

- residual: permanece em seu local de formação, ou seja, sobre a rocha-mãe, sendo muito comum no Brasil. Ex.: terra-roxa, massapé;
 - sedimentar: Depois de sua formação, é removido da rocha matriz por ação de algum agente transportador, tais como vento, água, geleiras e vulcões. Ex.: areia de dunas, solo de leitos de rios, *loess* (solo de origem eólica, sendo fino e homogêneo e siltoso);
 - orgânico: é formado por uma mistura de sedimentos preexistentes e restos de vegetais e/ou animais. Ex.: turfa
- (SANTIAGO, 2001)

2.2.2 Estrutura

A estrutura dos solos dá-se de acordo com a forma com que suas partículas de tamanhos distintos se organizam. Segundo Santiago (2001), os principais componentes da estrutura do solo são:

- 1 – o tamanho das partículas, seu arranjo físico e as proporções relativas da estrutura mineralógica;
 - 2 – o tamanho dos poros e a distribuição das fases fluidas nesses poros;
 - 3 – a química das três fases do solo, com ênfase para as forças entre as partículas.
- Os solos grossos apresentam estrutura mais simples e os finos mais complexa.

Como já foi dito anteriormente, o solo pode ser composto por minerais e matéria orgânica. Esses minerais podem ser classificados como primários e secundários.

- 1 – primários: encontrados no solo e que sobreviveram à transformação da rocha;
- 2 – secundários: formados durante a transformação da rocha em solo.

Ainda de acordo com Santiago (2001), os solos grossos, que são as areias e pedregulhos, apresentam:

1. minerais silicatados (90%). Ex.: quartzo (ou sílica), feldspato, mica, serpentina;
2. óxidos. Ex.: hematita, magnetita, limonita;
3. carbonatos. Ex.: calcita, dolomita;
4. sulfatos. Ex.: gesso, anidrita.

E os solos finos apresentam:

1. argila: exhibe complexa constituição química e mineralógica, sendo formada por sílica (no estado coloidal), alumina e/ou óxido de ferro;

2. argilomineral: tendo sua estrutura formada por duas unidades cristalográficas básicas, sendo elas a sílica e a alumínica encontrando-se dispostas em forma laminar.

Os minerais argílicos são formados a partir da associação dessas unidades cristalográficas. Os principais grupos são:

1. caulinita: dotada de estrutura rígida, com pequenos espaços interfoliares, sendo estável em presença de água;
2. montmorilonita: estrutura pouco rígida, com grandes espaços interfoliares. Sendo assim, permite a penetração de água e é instável e expansiva;
3. ilita: mostra arranjo estrutural semelhante ao da montmorilonita, com íons não permutáveis, o que lhe confere uma maior estabilidade. Portanto, não é muito afetada pela água, sendo menos expansiva que a montmorilonita.

2.2.3 Classificação granulométrica dos solos

Os solos são classificados a partir das características das partículas que o constituem. Podem apresentar grãos maiores, perceptíveis a olho nu, que são os solos grossos, em geral, compostos por grãos de areia e pedregulhos, e grãos extremamente finos, não perceptíveis a olho nu, que são os solos finos, em geral compostos por grãos de siltes ou argilas.

Segundo a norma brasileira (NBR) 6502/1995 da ABNT (1995), as partículas dos solos são classificadas em: pedregulhos, areias, siltes e argilas, conforme abaixo na tabela 1.

TABELA 1
Classificação granulométrica brasileira.

Dimensões dos grãos (mm)	Classificação das partículas
$2 \leq d \leq 20$	Pedregulho
$0,06 \leq d \leq 2$	Areia
$0,002 \leq d \leq 0,06$	Silte
$d < 0,002$	Argila

Fonte: ABNT, 1995

2.2.4 Classificação dos solos por meio de ensaios

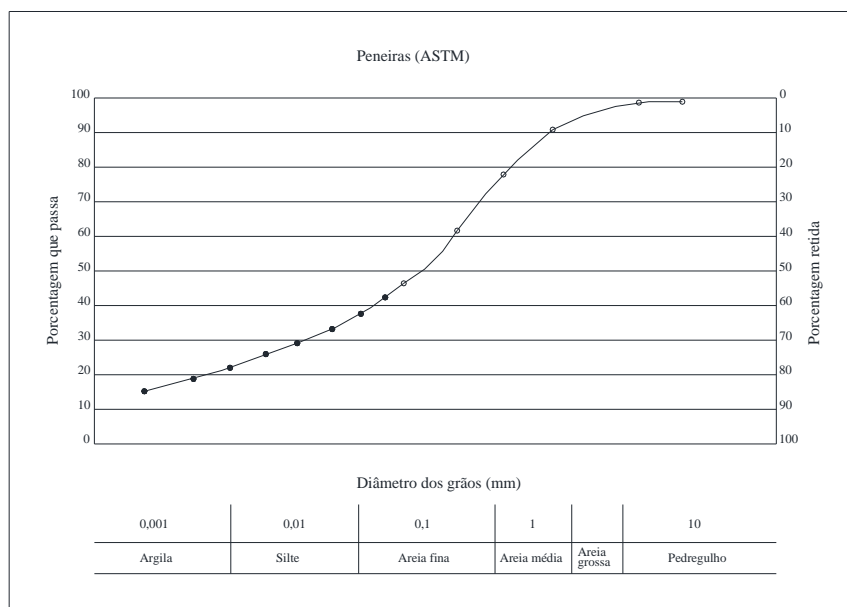
Para poder realizar a classificação dos solos, em função do tamanho das partículas que os constituem, é realizado o ensaio de análise granulométrica. Também podem ser classificados a partir da determinação dos índices de consistência. Esses ensaios são normatizados pela ABNT.

Análise granulométrica:

Em geral, os solos são constituídos por partículas de tamanhos diversos, não sendo estas de fácil determinação. Muitas vezes elas apresentam aspecto de aglomeração, onde partículas de areia estão envoltas por grande quantidade de partículas argilosas e, portanto dificilmente seriam identificadas a seco. No entanto, ao se umedecer essa mistura, a areia passa a ser facilmente reconhecida pelo tato e a argila se transforma em uma pasta fina. Para uma identificação tátil-visual é importante que esse solo esteja úmido.

A composição granulométrica do solo é representada pelo gráfico de curva granulométrica, representando o resultado do ensaio de granulometria por peneiramento (pedregulho e areia) e por sedimentação (silte e argila). Esse método de ensaio, por peneiramento, é ideal para solos grossos, areias e pedregulhos. Os procedimentos empregados nesse ensaio são normalizados pela NBR 7181/1984 (ABNT, 1984a).

FIGURA 4 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica do solo



Fonte: Adaptado de PINTO (2002). p.9

Plasticidade e consistência dos solos

Plasticidade é a propriedade que o solo tem de sofrer deformações rápidas sem haver variações volumétricas e rupturas significativas. A manifestação dessa propriedade depende do teor de umidade do solo, ou seja, quantidade de água presente nele, que é dado pelos limites de liquidez, plasticidade e contração, sendo esses os indicadores qualitativos de seu comportamento mecânico e hidráulico. Essa manifestação depende, também, do argilomineral presente na constituição desse solo (forma da partícula, constituição mineralógica e sua atividade).

O solo pode apresentar os seguintes estados de consistência:

- sólido: não há variação de volume, podendo perder peso quando realizada a secagem;
- semissólido: não é possível moldá-lo inteiramente, podendo haver variação de volume quando realizada a secagem;
- plástico: é moldável e plástico;
- úmido: solo líquido, não apresenta resistência ao cisalhamento.

Limites de consistência (Limites de Atterberg):

Os limites de consistência estão baseados na constatação de que um solo de granulação fina ocorre com aspectos bem distintos, podendo exibir qualquer um dos quatro estados físicos conforme seu teor de umidade. Quando apresenta alto teor de umidade, comporta-se como um líquido. Ao perder parte de sua água se torna plástico. Passa pelo estado semissólido e torna-se quebradiço, quando encontrado em estado sólido. Esses teores de umidade correspondentes às mudanças de estado são definidos como limite de liquidez, índice de plasticidade e limite de plasticidade.

O limite de liquidez (*LL* ou *WL*) é definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele requer cerca de 25 golpes e no máximo 35 golpes para ser fechada na concha do aparelho de Casagrande. Corresponde à passagem do estado líquido para o plástico. Os procedimentos de ensaio são realizados de acordo com a NBR 6459/1984 (ABNT, 1984b).

O **limite de plasticidade (LP)** é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3mm de diâmetro, rolando-se o solo com a palma da mão. Corresponde à passagem do estado plástico para o semissólido. Os procedimentos de ensaio são realizados de acordo com a NBR 7180/1984 (ABNT, 1984c).

O **limite de contração (LC)** é definido como o teor de umidade da mudança do estado semissólido para o sólido. Uma argila inicialmente saturada, ao perder água, sofrerá diminuição no seu volume inicial, até atingir um teor de umidade a partir do qual a amostra não sofrerá variação no seu volume. Os procedimentos de ensaios são realizados de acordo com a NBR 7183/1984 (ABNT, 1984d).

Índice de liquidez (IL): $IL = LP - h / IP$

TABELA 2
Classificação quanto ao índice de liquidez

Classificação	Índice de liquidez
Solos plásticos	$0 < IL < 1$
Solos quebradiços	$IL < 0$
Solos viscosos	$IL > 1$

Fonte: VARGAS, 1981

Índice de plasticidade (IP): $IP = LL - LP$

TABELA 3
Classificação quanto ao índice de plasticidade

Classificação	Índice de plasticidade
Fracamente plásticos	$1 < IP < 7$
Mediamente plásticos	$7 < IP < 15$
Altamente plástico	$IP > 15$

Fonte: VARGAS, 1981

Índice de contração (IC): $IC = (V_i - V_f) / V_f$

Sendo: V_i o volume inicial do solo úmido e V_f o volume final do solo seco.

TABELA 4

Classificação quanto ao índice de contração (VARGAS, 1981)

Classificação	Índice de contração
Solos bons	$IC < 5\%$
Solos regulares	$5\% < IC < 10\%$
Solos sofríveis	$10\% < IC < 15\%$
Solos péssimos	$IC > 15\%$

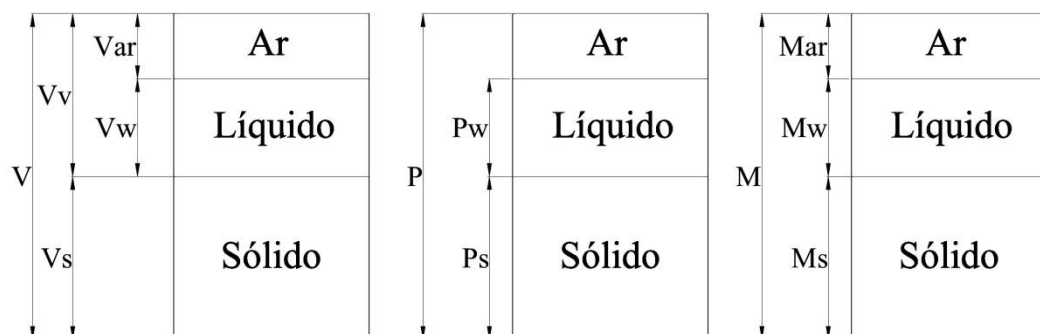
Fonte: VARGAS, 1981

2.2.5 Fases dos solos

Apenas uma parte do volume total do solo é ocupada por partículas sólidas. O volume restante, geralmente chamado de vazios, pode estar ocupado não apenas por ar, mas também por água. Sendo assim, este material é constituído por três fases: partículas sólidas, água e ar (PINTO, 2002).

Seu comportamento depende, dentre outras coisas, da quantidade relativa de cada uma das três fases. A princípio, as quantidades de ar e água podem sofrer variações. A quantidade de água pode diminuir por meio da evaporação, dando lugar ao ar, e a compactação do solo pode provocar a eliminação de água e ar e, conseqüentemente, a redução do volume de vazios. *A priori*, as partículas, que constituem o solo, permanecem intactas, variando apenas o seu estado, definindo assim, as propriedades daquele.

FIGURA 5 – Diagrama das fases do solo



Fonte: Adaptado de PINTO, 2002. p. 23 e BANDEIRA, 2009. p. 25

Onde V é o volume total, V_{ar} é o volume do ar, V_w é o volume de água e V_s é o volume de sólidos; P é o peso total, P_w é o peso de água, P_s é o peso de sólidos ; M é a massa total, M_{ar} é a massa do ar, M_w é a massa de água e M_s é a massa de sólidos.

2.2.5.1 Estados dos solos

“São as propriedades decorrentes dos solos como eles são encontrados na natureza ou quando depositados e compactados artificialmente” (VARGAS, 1981). São usados para identificar o estado do solo.

Teor de umidade (w): é a relação entre o peso da água e o peso dos sólidos.

$$w = P_w/P_s$$

Índice de vazios (e): é a relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas.

$$e = V_v/V_s \Rightarrow e = (V_{ar} + V_w)/V_s$$

Porosidade (n): é a relação entre o volume de vazios e o volume total.

$$n = V_v/V_t \Rightarrow e = (V_{ar} + V_w)/V_t$$

Grau de saturação (s): é a relação entre o volume de água e o volume de vazios.

$$s = V_w/V_v \Rightarrow s = V_w/(V_{ar} + V_w)$$

Peso específico dos sólidos (γ_s): é a relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume.

$$\gamma_s = P_s/V_s$$

Peso específico da água (γ_w): apesar de variar um pouco, adota-se sempre:

$$\gamma_w = 10\text{kN/m}^3$$

Peso específico natural (γ_n): é a relação entre o peso total do solo e seu volume total. Tratando-se de compactação de solo, passa a ser denominado **peso específico úmido**.

$$\gamma_n = P/V$$

Peso específico aparente seco (γ_d): é a relação entre o peso dos sólidos e o volume total.

$$\gamma_d = P_s/V$$

Peso específico aparente saturado (γ_{sat}): peso específico do solo caso este viesse a ficar saturado sem ocorrer variação de volume.

Para $S = 100\%$

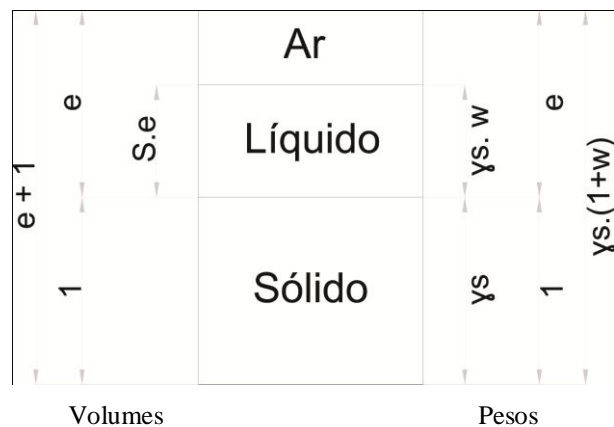
Peso específico submerso (γ_{sub}): é o peso específico efetivo do solo quando submerso. É igual ao peso natural menos o peso específico da água.

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

2.2.5.2 Índices físicos

Apenas três dos índices relacionados no item anterior são determinados em laboratório, sendo eles: a umidade, o peso específico dos grãos e o peso específico natural. O peso específico da água é adotado e os outros são calculados a partir dos previamente determinados.

FIGURA 6 – Diagrama das fases do solo



Fonte: Adaptado de PINTO, 2002. p. 23

O esquema acima representa as três fases baseadas na definição dos índices. O volume de sólidos adotado é igual a 1. Adotando o volume de vazios igual a “e”, e o volume de água é igual a “S.e”, por outro lado o peso dos sólidos é igual a “ γ_s ”, e o peso da água é “ $\gamma_s \cdot w$ ” (PINTO, 2002).

2.2.5.3 Compacidade

“Compacidade é uma característica de maior ou menor densidade dos solos não coesivos” (VARGAS, 1981).

Uma areia com índices de vazios iguais pode apresentar-se compactada ou fofa. Portanto, para se analisar o comportamento de uma areia, é necessário verificar seu índice de vazios natural e confrontá-lo com os índices de vazios máximo e mínimo que aquela pode apresentar (VARGAS, 1981; PINTO, 2002).

TABELA 5
Valores típicos de índices de vazios das areias

Descrição da areia	e min	e max
Areia uniforme de grãos angulares	0,70	1,10
Areia bem graduada de grãos angulares	0,45	0,75
Areia uniforme de grãos arredondados	0,45	0,75
Areia bem graduada de grãos arredondados	0,35	0,65

Fonte: PINTO, 2002. p. 27

A compacidade ou o estado de uma areia pode ser expresso pelo índice de vazios em que ela se encontra em relação a esses valores extremos, por meio do índice de **compacidade relativa**:

$$CR = \frac{e_{\max} - e_{\text{nat}}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

Sendo que quanto maior o valor de CR, mais compacta é a areia.

TABELA 6
Classificação das areias segundo a compacidade

Classificação	CR
Areia fofa	abaixo de 0,33
Areia de compacidade média	entre 0,33 e 0,66
Areia compacta	acima de 0,66

Fonte: PINTO, 2002. p. 28

As areias compactas geralmente apresentam maior resistência e menor deformabilidade. Tais características dependem também da distribuição granulométrica e o formato dos grãos, mas a compactação é fator muito importante.

2.2.5.4 Consistência

A consistência das argilas do solo pode ser definida em função da resistência à compressão simples que elas apresentam.

TABELA 7
Consistência em função da resistência à compressão

Consistência	Resistência (em kPa)
Muito mole	< 25
Mole	25 a 50
Média	50 a 100
Rija	100 a 200
Muito rija	200 a 400
Dura	>400

Fonte: PINTO, 2002. p. 28

Índice de consistência

Indica a posição relativa da umidade apresentada pelo material aos limites de mudança de estado deste, que são definidos pelos limites de liquidez e de plasticidade.

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP}$$

TABELA 8
Classificação das argilas quanto à consistência

Consistência	Índice de consistência
Mole	< 0,5
Media	0,5 a 0,75
Rija	0,75 a 1,0
Dura	> 1,0

Fonte: PINTO, 2002. p. 31

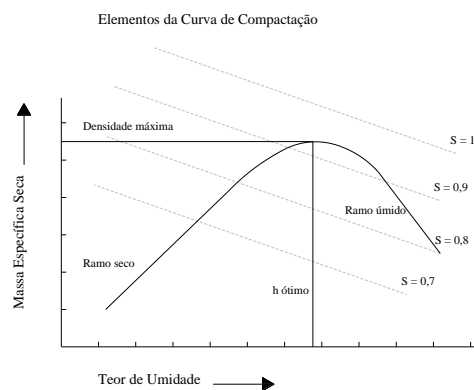
2.2.6 Compactação dos solos

A compactação do solo é a sua densificação por meio de processos manuais ou de equipamentos mecânicos, busca a redução de seus índices de vazios e, conseqüentemente, o aumento de sua massa específica. A compactação visa à melhoria da qualidade mecânica do solo a partir do rearranjo de suas partículas sólidas (PINTO, 2002).

O engenheiro norte-americano Ralph Proctor publicou, em 1933, estudos sobre compactação de aterros, mostrando que, a massa específica resultante da compactação é função da umidade em que o solo estiver. Ao se compactar com baixa umidade, o atrito entre as partículas é muito alto, não conseguindo, com isso, uma redução significativa de vazios. A água provoca certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si. Sendo assim, em um solo apresentando umidades elevadas, essas partículas se acomodam num arranjo mais compacto (PINTO, 2002; BANDEIRA, 2009).

Durante a compactação, as quantidades de partículas e de água permanecem constantes. A saída de ar dos vazios, que é facilitada, uma vez que, quando a umidade não é muito elevada, o ar forma canalículos intercomunicados, corresponde ao aumento da massa específica. Quando o teor de umidade é maior, devido à redução do atrito pela água e os canalículos de ar, torna-se possível obter uma massa específica maior. No entanto, a partir de um determinado teor de umidade, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios, uma vez que esse ar fica ocluído devido ao elevado grau de saturação do solo. Portanto, para determinada “energia de compactação aplicada”, há sempre um teor de umidade ideal correspondente, denominado “teor de umidade”, que propicia uma “massa específica seca máxima” ou “densidade seca máxima (w_t)” (PINTO, 2002; BANDEIRA, 2009).

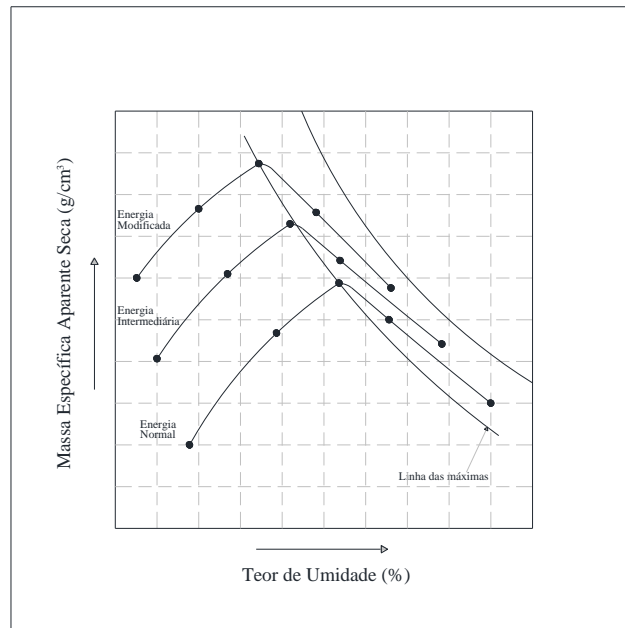
FIGURA 7 – Curva de compactação típica



Fonte: Adaptado de BANDEIRA, 2009. p 31.

Ao se realizar compactação, com diferentes energias, em um mesmo solo, esse apresentará valores mais altos de massa específica aparente seca e teores mais baixos de umidade ótima para valores crescentes dessa energia.

FIGURA 8 – Curvas de compactação em um solo com diferentes energias



Fonte: Adaptado de PINTO, 2002. p 71 e BANDEIRA, 2009. p. 32

A NBR 7182/1986 estabeleceu procedimentos a serem seguidos na execução do ensaio de compactação, que consiste em compactar uma amostra de solo coletado em um recipiente cilíndrico com capacidade de 1.000cm³, disposta em três camadas, uniformemente distribuídas, recebendo 25 golpes de um soquete pesando 2,5kg, caindo em queda livre de uma altura de 30cm, desprendendo nessa operação uma energia igual a 6kg cm/cm³.

2.2.7 Resistência dos solos

A resistência do solo ao cisalhamento pode ser qualitativamente definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. Pode também ser definida, em termos quantitativos, como a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo. Quase sempre, a ruptura em solos é causada pelo fenômeno do cisalhamento. A resistência ao cisalhamento é devida aos fenômenos de atrito e coesão entre as partículas desse material (PINTO, 2002; BANDEIRA, 2009).

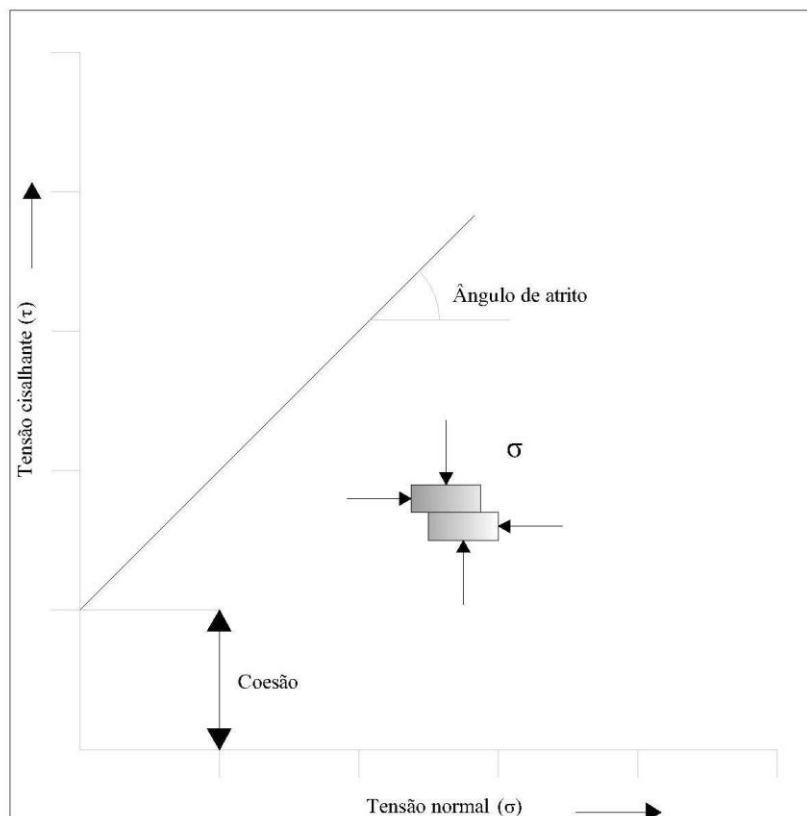
A resistência ao cisalhamento dos solos é obtida especialmente a partir do atrito entre suas partículas. No entanto, a partir da atração química entre essas partículas pode surgir uma resistência independente da tensão normal que atua no plano, constituindo uma coesão real (PINTO, 2002).

De acordo com o gráfico abaixo, verifica-se relação diretamente proporcional entre tensão cisalhante, necessária para fazer um corpo deslocar, e tensão normal. A inclinação da reta, encontrada a partir da correlação de seus valores, definirá o ângulo de atrito. Se a superfície entre os dois corpos encontrar-se selada, no caso de tensão normal igual a zero, será necessário que a tensão cisalhante apresente um valor mínimo que ocasione a movimentação do corpo. Esse valor define a coesão. A relação entre tensão cisalhante e tensão normal para a maioria dos solos dá-se a partir da expressão:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

onde τ corresponde a resistência ao cisalhamento; c , à coesão ao longo do plano de ruptura; σ , à tensão normal ao plano de cisalhamento e ϕ , ao ângulo de atrito do material ao longo da superfície de ruptura (NUNES, 1956; BANDEIRA, 2009).

FIGURA 9 – Correlação entre tensão cisalhante e tensão normal



Fonte: Adaptado de BANDEIRA, 2009. p 33.

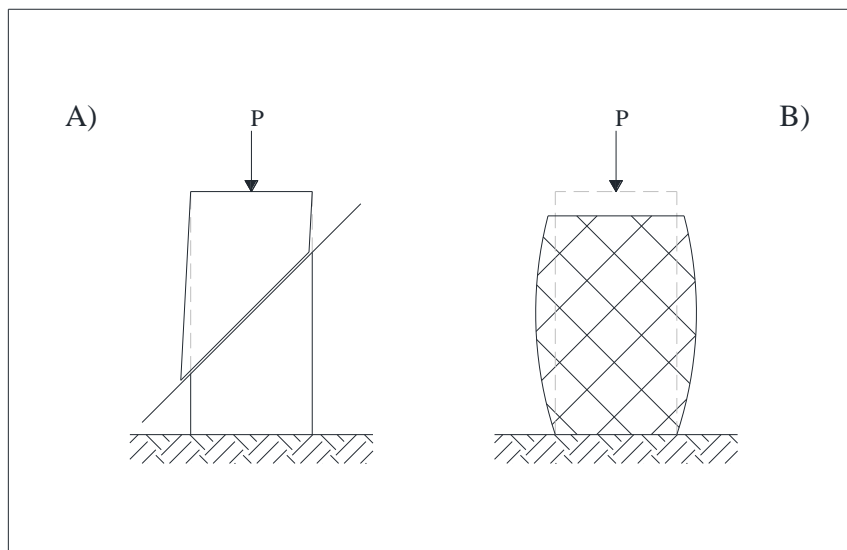
2.2.7.1 Ensaio para determinação da resistência dos solos

Ensaio de compressão simples

De acordo com Vargas (1981), o ensaio de compressão simples é realizado da seguinte forma:

Molda-se um corpo de prova cilíndrico que será submetido à compressão, em uma máquina de ensaio adequada, até rompê-lo. A carga de ruptura dividida pela área média do cilindro é chamada “Resistência à compressão simples”. O corpo de prova poderá romper-se a partir de duas formas: por cisalhamento, ao longo de um plano de ruptura inclinado (FIG. 10 A), ou por embarrigamento, tratando-se, neste caso, de uma ruptura por cisalhamento ao longo de vários planos paralelos (FIG. 10 B).

FIGURA 10 – Ensaio de compressão simples



Fonte: Adaptado de VARGAS, 1981.

2.2.7.2 A resistência dos solos compactados

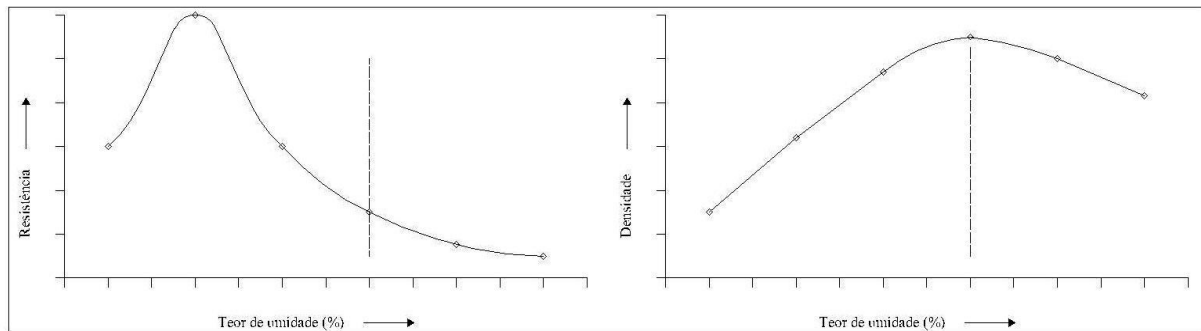
Em geral os materiais exibem relação diretamente proporcional entre resistência e densidade, sendo assim, os corpos que apresentam maior densidade mostram, também, maior resistência.

No caso dos solos, nota-se que a resistência máxima não coincide com o menor grau de teor de umidade. Sendo assim, não necessariamente a resistência decresce com o aumento da umidade.

Comparando-se as curvas de compactação e de resistência de um solo compactado, mostradas na figura abaixo (FIG. 11), ao se aplicar determinada energia de compactação a um solo, verifica-se que o valor correspondente à resistência máxima deste não coincide com o valor da resistência correspondente ao seu “teor de umidade ótimo”.

Em termos de construções, pode-se dizer que nem sempre a compactação máxima garante resistência ideal. Um solo encontrado nas condições de densidade máxima e teor de umidade ótimo se apresentará mais estável em relação às variações climáticas às quais estará exposto (sol e chuva, variações de umidade do ar), conferindo assim melhor desempenho mecânico e melhor estabilidade à construção (PINTO, 2002; BANDEIRA, 2009).

FIGURA 11 – Curva de compactação x curva de resistência

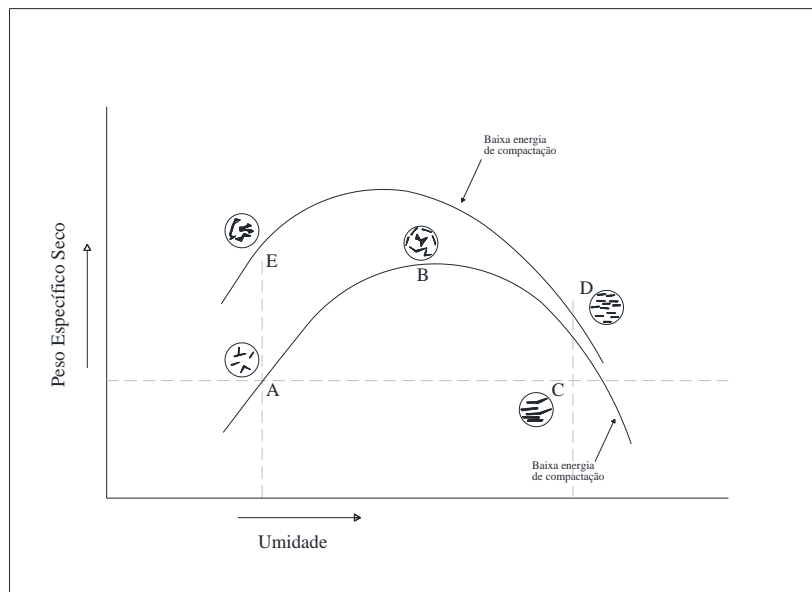


Fonte: Adaptado de BANDEIRA, 2009. p. 36

2.2.7.3 Estrutura dos solos compactados

A estrutura do solo compactado depende da energia despendida em sua compactação e da umidade exibida por ele, por ocasião da compactação. Se este apresenta baixa umidade, a atração face-aresta das partículas não é vencida pela energia aplicada, ficando o solo com uma estrutura floculada. Encontrando-se maiores umidades, a repulsão entre as partículas aumenta, sendo orientadas pela própria compactação, posicionando-se paralelamente, ficando com a sua estrutura dispersa. Para uma mesma umidade, quanto maior a energia aplicada, maior será o grau de dispersão. No entanto, trata-se de simplificação do modelo, uma vez que a estrutura dos solos compactados é bem mais complexa (PINTO, 2002).

FIGURA 12 – Estrutura de solos compactados, segundo proposição de Lambe



Fonte: Adaptado de PINTO, 2002. p. 74

2.3 Análises de distribuição das partículas do solo

A distribuição das partículas do solo fornece informações sobre a argila, o silte e a areia e as rochas que o compõem, permitindo a sua caracterização. A partir desses resultados, podem ser verificadas outras propriedades desse material, tais como: capilaridade, permeabilidade, porosidade, umidade, condutibilidade térmica e erosão. As análises da distribuição das partículas do solo e da sua textura estão entre os principais testes de caracterização desse material. As medidas e as quantificações podem ser realizadas a partir do uso de peneiras e ensaios por sedimentação, sendo que os resultados são apresentados a partir de relatórios estatísticos, contendo dados relativos a diâmetro dos grãos e coeficiente de uniformidade. Outros métodos de caracterização do solo também foram utilizados, em décadas passadas, tais como porosimetria de mercúrio e análises de imagens em diferentes escalas ou níveis de organização. Posteriormente, as investigações tendenciaram para o uso da geometria *fractal*, na busca de parâmetros fundamentais para a caracterização do solo, concluindo, a partir do uso de imagens de silte e areia, que esse recurso poderia ser usado no entendimento dos processos adjacentes atuantes na criação ou na destruição da estrutura do solo e em sua textura (GROUT et al, 1998; LI et al, 2010)¹.

¹ Texto original em inglês. Tradução nossa.

De acordo com a teoria de análise *fractal* e lei de potência, a geometria *fractal* é baseada na idéia de autossimilaridade, sendo a maneira pela qual as variações de um objeto são repetidas em outra escala. Geralmente é usada na tentativa de se compreender objetos que apresentem forma indefinida. Quando essa aparente irregularidade geométrica manifesta-se de forma similar, independente da escala na qual esse objeto é observado, a lei de potência pode ser usada para descrever as propriedades mensuráveis deste. Essa invariância, na escala ou no conceito de autossimilaridade, tornou-se amplamente usada em análises de diversas propriedades de solos naturais, sendo, uma delas, a distribuição de partículas do solo (GROUT et al, 1998).

No entanto, segundo Grout et al (1998), posteriormente, alguns estudos apontaram vários problemas com relação ao uso da análise da geometria *fractal*, ou da lei de potência, para se descrever a distribuição de massa em várias escalas, uma vez que o mesmo valor de dimensão *fractal* não pode ser aplicado em diferentes escalas em um mesmo solo.

Há estudos que sugerem que a distribuição de partículas de solo apresenta um comportamento *multifractal*, ou seja, a geração de processo multiplicativo no qual uma determinada medida varia sobre fração não uniforme, produzindo a distribuição *multifractal* dessa medida (GROUT et al, 1998).

Como alternativa, a distribuição de partículas do solo pode ser vista como medida que representa o conjunto de processos inter-relacionados, tais como: degradação, intemperismo, precipitação e agregação. Nesses casos, a medida (distribuição de partículas de solo) pode mostrar uma autossimilaridade referida como *multifractal* (GROUT et al, 1998. Tradução nossa).

Na pesquisa desenvolvida por Grout et al (1998) foi usado o aparelho de contagem por sensoriamento eletrônico, buscando a obtenção de dados sobre a distribuição de partículas de três amostras de solo, para permitir uma análise *multifractal*. A medida de autossimilaridade foi proposta nessa pesquisa devido ao fato de que a distribuição de partículas do solo pode mostrar tal característica. Sendo assim, possibilita descrever os dados obtidos como *multifractal*. Ainda de acordo com essa pesquisa, nota-se que a forma da distribuição de partículas do solo se mostra similar, em diferentes escalas de resolução, podendo fornecer dados suficientes para executar uma análise *multifractal* das medidas de massa, tanto como as de número.

O valor apresentado, a partir da dimensão de entropia, é um importante parâmetro da curva. Os valores obtidos nas três amostras refletem graus de vazios das irregularidades presentes nos conjuntos de dados, que são bem similares. Isso significa que esses valores,

obtidos por meio da distribuição do número de partículas das três amostras, são menores que aqueles obtidos a partir da distribuição de massa, indicando que a distribuição em número de partículas é mais concentrada do que a distribuição por massa. A dimensão de entropia pode ser uma estatística útil para comparar propriedades dos solos, sedimentos e suspensões. Sendo assim, pode-se concluir que a lei de potência não é susceptível de ser aplicada na produção de dados sobre distribuição de partículas do solo de vários sistemas naturais, como caso geral. Em vez disso, esses dados podem ser mais apropriadamente descritos como *multifractal* (GROUT et al, 1998).

2.4 Recomendações para execução de painéis em taipa de pilão de acordo com Djerbib e Hall

De acordo com Djerbib e Hall (2003)², o solo apropriado para a execução de amostras em taipa de pilão é o material encontrado na camada já considerada subsolo. O solo superficial, por conter matéria orgânica, que é degradável, absorve água tornando-se altamente compressível. O teor máximo admissível de material orgânico varia entre os valores de 1 a 2% na composição do solo a ser usado. O solo empregado na produção de amostras de taipa deve apresentar a mistura dos seus três componentes originais, sendo estes análogos aos materiais que compõem o concreto: a fração de cascalho e areia (fração grossa do solo) corresponde aos agregados inertes do concreto, e o silte e a argila (solos coesivos) correspondem a fração ligante.³ (DJERBIB e HALL, 2003. p. 282).

Ainda de acordo com os autores, a compactação deve ser realizada com o solo contendo teor de umidade ótimo. O solo muito seco não atingirá níveis de compactação desejáveis e, se o solo apresentar um nível maior de umidade, a água de capilaridade irá ocupar os vazios desse material, comprometendo a qualidade de sua compactação, aumentando a porosidade da amostra após a perda de umidade para o meio ambiente, durante o processo de secagem (DJERBIB e HALL, 2003).

Segundo os autores, as amostras apresentaram retração na fração ligante do solo de, aproximadamente, 2%, sendo considerada insignificante, já que o valor máximo permitido

² Texto original em inglês. Tradução nossa.

³ O solo utilizado na produção das amostras de taipa, na pesquisa dos autores, apresentava, em geral, as seguintes frações: Cascalho – 20 a 30%; Areia – 50%; Silte + Argila – 20 a 30%. (dados retirados a partir de média dos dados das amostras apresentadas pelos autores DJERBIB e HALL, 2003).

“The components of rammed earth material are analogous to those of concrete, the inert aggregate fraction is represented by granular soils (sand and gravel), and the binder fraction is represented by cohesive soils (silt and clay).” (DJERBIB e HALL, 2003. p. 282).

seria de 40% da massa total do solo utilizado. Em geral, em solos argilosos e siltosos, aparecem trincas de retração após o processo da cura. Os solos mais arenosos são mais estáveis, tendendo a demonstrar uma superfície relativamente lisa, com áreas granulares, devido a presenças dos grãos maiores e pedregulhos (DJERBIB e HALL, 2003).

A norma relativa à realização de testes de resistência, em amostras de materiais terrosos da Nova Zelândia, a NZS 4298:1998, pede, no mínimo, a execução de 5 corpos de prova e permite a aplicação de fator de correção de 0,7 ao valor da força compressiva. O valor numérico mínimo requerido para ruptura é de 1,3MPa, descrito pela NZS 4293 (Apud DJERBIB e HALL, 2003).

Os resultados dos testes realizados pelos autores Djerbib e Hall (2003) mostraram que a variação da umidade do solo não os influenciou diretamente. Ao que tudo indica, a fração ligante do solo foi um fator de influência na determinação dos valores de força de compressão de ruptura das amostras. Mas essas são hipóteses ainda não comprovadas. Pode ainda ser verificado que a distribuição de partículas do solo pode ser controlável e o nível de energia de compactação pode sofrer variação, dependendo do tipo de solo usado. Para boa compactação, a variação do teor de umidade, de acordo com o tipo de solo, não pareceu estar diretamente relacionada com a força de compressão aplicada nos testes de ruptura (DJERBIB e HALL, 2003).

2.5 Verificação de patologias a partir de ensaios não destrutivos

A preocupação com as estruturas que compõem os edifícios vai além da simples preocupação com o restauro, mas abrange, também, a conservação e a manutenção periódica daquelas. A prática da inspeção periódica é fator fundamental em sua conservação.

Para se planejar o desenvolvimento adequado da conservação e restauração de determinado bem, é necessário conhecer seu estado da maneira mais segura possível. Em geral, os ensaios realizados visando conhecer as características físicas e mecânicas da matéria que compõe essas estruturas são destrutivos, envolvendo a retirada de corpos de prova e consequentes danos relacionados a essa atividade.

Buscando resolver essas questões, a verificação do desempenho físico e mecânico de estruturas, por meio da realização de ensaios não destrutivos, vem, cada vez mais, sendo difundida.

Entende-se por avaliação não destrutiva o processo científico usado para a identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma amostra de determinado material,

sem a necessidade de recorrer à retirada de corpos de prova. Esse tipo de ensaio deixa, eventualmente, apenas pequenos danos facilmente reparáveis após os ensaios, sem causar perda na capacidade de resistência do material (EVANGELISTA, 2002; REZENDE, 2009).

Esses ensaios podem ser realizados tanto em estruturas novas como nas antigas. Nas estruturas novas, eles são empregados para monitorar a evolução da resistência dos materiais usados em sua execução. No caso das estruturas antigas, esses testes auxiliam na avaliação da sua capacidade de resistir às solicitações (EVANGELISTA, 2002).

Os primeiros testes não destrutivos foram realizados para avaliar e detectar defeitos em metais e ligas. Atualmente, estão sendo aplicados em materiais como o concreto, e já estão sendo realizados estudos para sua aplicação em madeiras (VALLE et al, 2004; BANDEIRA, 2009).

No Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, estão sendo realizados estudos, com enfoque no uso das técnicas não destrutivas, para estruturas de madeira. Entre as pesquisas desenvolvidas, encontra-se a aplicação de emissões ultrassônicas para o diagnóstico das condições de integridade de estruturas de madeira submetidas à deterioração por insetos xilófagos, e, também, para a caracterização mecânica das propriedades de peças desse material (VALLE et al, 2004).

Na Escola de Engenharia Civil da UFMG, Teixeira (2009) também realizou estudos buscando propor uma metodologia para determinar a integridade da madeira de edificações históricas por meio de ensaios ultrassônicos. Para isso, a autora realizou três tipos de ensaios: o primeiro visando apurar o método aplicado, o segundo, realizado “*in situ*” em estrutura de madeira de construção histórica e o terceiro, em uma peça estrutural de madeira da cobertura da Igreja do Pilar, em Ouro Preto, também outra construção de grande importância histórica. Os ensaios foram realizados com transdutores de frequência equivalente a 150kHz e 500kHz. Na primeira etapa, foram obtidos resultados válidos referentes ao uso dos transdutores de frequência equivalente a 500kHz. Na segunda etapa, os valores obtidos a partir das medições foram zero nas duas frequências utilizadas. Segundo a autora, um dos possíveis fatores para esses resultados seria o encontro de obstáculos, pelo pulso, ao longo do trajeto, ocasionando a sua reflexão, impossibilitando a sua propagação à outra face, não sendo, portanto, captado pelo receptor. Na terceira etapa, as medições na peça inteira também não produziram resultados. No entanto, essa peça foi submetida a um “fatiamento”, buscando possibilitar obtenção de resultados nos ensaios em ambas as frequências utilizadas (150 e 500kHz) (TEIXEIRA, 2009).

Há também estudos para emprego de testes não destrutivos em materiais como o solo. Inúmeras pesquisas estão sendo desenvolvidas com o intuito de conhecer melhor as propriedades físicas e mecânicas desse material, buscando melhorar seu emprego em diversas áreas do conhecimento tais como engenharia (seu uso em fundações, barragens, compactações), agricultura etc. Esse assunto tem sido estudado por diversos autores, dentre eles: Nesvijski, (2000); Yesiller et al, (2000); Wang et al, (2005) e D'orazio et al, (2007).

Nos países com maiores avanços tecnológicos, os ensaios não destrutivos estão sendo empregados na determinação das características físico-mecânicas dos materiais. Alguns dos métodos aplicados são: magnéticos, eletrônicos, radioativos, emissão acústica, eco-impacto, frequência de ressonância, termografia infravermelho, ensaios de permeabilidade, nucleares e RADAR (Radio Detection and Ranging) (EVANGELISTA, 2002).

Diversos materiais de construção (argamassas, cimento, tijolos de terra) e tipos de estruturas vêm sendo avaliados a partir do uso da tecnologia não apenas do ultrassom, mas também da combinação de ensaios destrutivos e não destrutivos.

Vantagens atribuídas aos testes não destrutivos em relação aos testes destrutivos segundo Rezende (2007) e Bandeira (2009):

- 1) realização dos testes de resistência em estruturas “*in loco*”;
- 2) redução do tempo de realização dos testes;
- 3) simplificação dos trabalhos na realização dos testes;
- 4) eliminação da necessidade de retirada de corpos de prova, com conseqüente 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.

Assim, com a aplicação do método do ultrassom é possível avaliar a integridade de uma estrutura, o comportamento físico e mecânico dos materiais que a compõem, a qualidade desse material e a sua resistência diante de esforços aos quais está submetido.

A correlação entre resistência à compressão e a velocidade ultrassônica pode ser avaliada a partir do coeficiente de correlação (r^2) e ser classificada qualitativamente.

TABELA 9

Classificação da qualidade entre resistência e velocidade ultrassônica

Valores de r_2	Classificação
1,00 a 0,81	Boa
0,80 a 0,50	Razoável
0,49 a 0,25	Baixa
0,24 a 0,00	Muito baixa

Fonte: Almeida, 1993; Apud. Bandeira, 2008

2.5.1 Aparelho de ultrassom

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

FIGURA 13 – Aparelho ultrassom



Fonte: adaptado ALMEIDA (1993) Apud. BANDEIRA (2009). p. 39

2.5.2 Descrição do método de ensaio

A velocidade das ondas ultrassônicas que atravessam o material depende da densidade e das propriedades elásticas desse material (PUNDIT Manual, 1994; EVANGELISTA, 2002).

O ensaio consiste na medição do tempo de propagação de ondas ultrassônicas através do material, entre o emissor e o receptor. Essa medição é realizada por meio eletrônico. A razão entre o comprimento percorrido entre os transdutores e o tempo de propagação da onda resulta na velocidade média de propagação da onda (MALHOTRA, 1984. Apud EVANGELISTA, 2002).

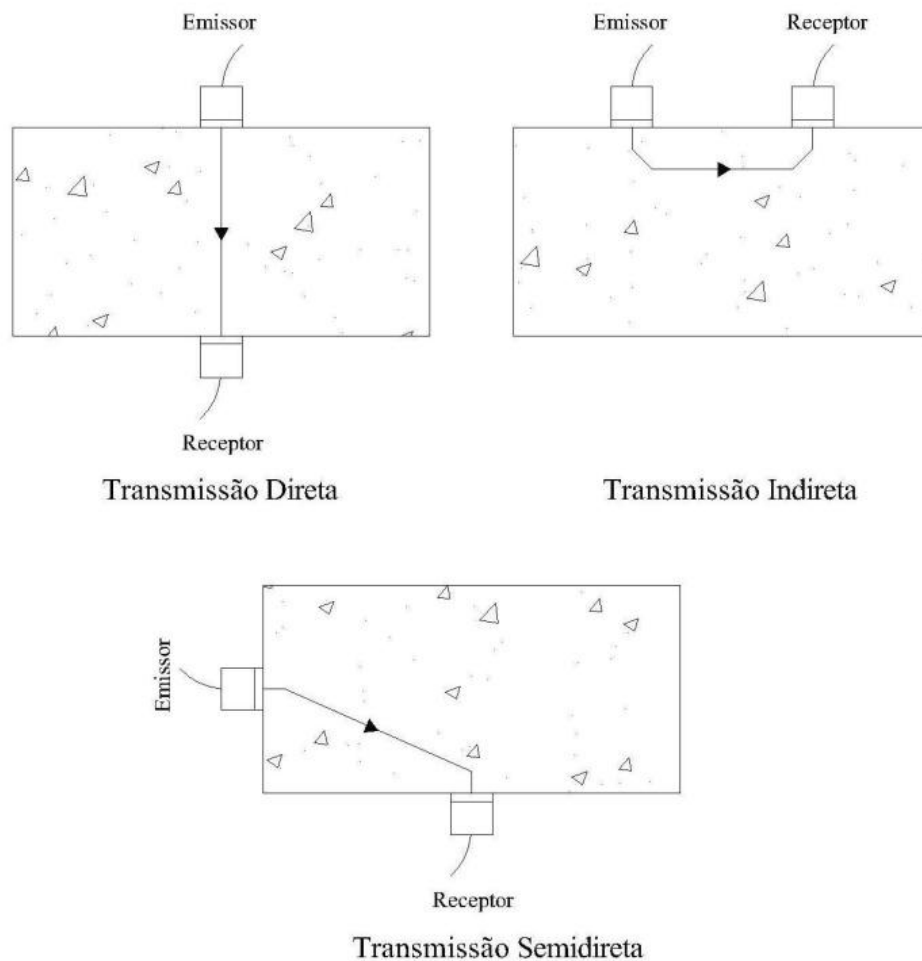
Principais fatores que interferem na velocidade da onda: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e massa específica do material (EVANGELISTA, 2002).

Para a transmissão e recepção do pulso, os transdutores devem estar inteiramente em contato com a superfície. A existência de alguma camada de ar introduzirá erro na leitura do tempo, uma vez que o ar consegue transmitir uma quantidade desprezível de pulso. Para evitar esse problema, deve-se usar um acoplante tipo óleo, gel, graxa ou vaselina. Em superfície de grande rugosidade é necessário empregar acoplante de alta viscosidade.

De acordo com a NBR 8802/1994, 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.

FIGURA 14: Tipos de transmissão no ensaio ultrassônico



Fonte: Adaptado de NBR 8802/1994

Os tipos de ondas ultrassônicas são as longitudinais (ondas de compressão), as transversais (ondas de cisalhamento) e as de superfície.

As ondas sonoras podem ser classificadas como audíveis e inaudíveis, dependendo do número de períodos que ocorram na unidade de tempo (frequência).

Os níveis de frequência típica de uma onda sonora são: som, infrassom e ultrassom

- som: ondas sonoras com frequência entre 20Hz e 20.000Hz, que são audíveis.
- infrassom: ondas sonoras com frequências inferiores a 20 Hz, que são inaudíveis.
- ultrassom: ondas sonoras com frequências superiores a 20.000Hz, que são, também, inaudíveis.

Nos ensaios de materiais com equipamentos de ultrassom, a faixa de frequência geralmente utilizada está entre 0,5MHz e 20MHz.

As principais características físicas das ondas sonoras são:

- comprimento de onda (λ): é a distância entre duas cristas ou dois vales de duas ondas consecutivas: $\lambda=v/f$;
- período (T): tempo necessário para que duas cristas consecutivas passem pelo mesmo ponto ou tempo que uma onda completa gasta para percorrer a distância “ λ ”;
- frequência (f): é o número de períodos por segundo. A unidade de frequência é o **Hertz (Hz)** que significa "um ciclo por segundo". A frequência depende, exclusivamente, do período não variando ao passar por meios diferentes: $f=1/T$;
- velocidade de propagação (v): é definida a partir da distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo. A velocidade de propagação é uma característica do meio. É uma constante, não dependendo da frequência: $v=d/t$;
- amplitude (a): é a distância média entre uma crista e um vale de uma onda sonora.

2.6 Normalização

A utilização do método de ultrassom para a verificação das características físicas e mecânicas de um material ainda está mais restrita ao concreto e aos metais. No entanto, como já se afirmou, estudos sobre a transferência do uso desta tecnologia para outros materiais, tais como madeira e solo, já estão sendo desenvolvidos. A normalização existente é restrita ao concreto. Portanto, serão apresentadas as normas nacionais e internacionais que estabelecem procedimentos para a execução desse tipo de ensaio nesse material.

Estas normas que serão estudadas descrevem os métodos de ensaios não destrutivos, procedimentos a serem executados para verificar a qualidade do concreto, indicar a presença de vazios e rachaduras, indicar mudanças nas propriedades do concreto e verificar a estrutura para estimar a severidade dos processos de deterioração ou quebras que possam estar ocorrendo.

2.6.1 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)

O objetivo dessa recomendação é o de produzir um guia de métodos não destrutivos para aumentar a acurácia da estimativa “*in situ*” da resistência à compressão do concreto. Nessa norma são detalhadas as informações necessárias para se combinar avaliação entre velocidade de propagação de onda ultrassônica e resistência do concreto.

O tempo de propagação da onda ultrassônica e o valor da velocidade não devem ser afetados pela distância percorrida pela onda e sua frequência que, em tese, é a mesma do transdutor. No entanto, na prática, observa-se que pequenas distâncias a serem atravessadas pela onda tendem a propiciar discreto aumento da velocidade de propagação da onda.

Recomendação da RILEM NDT 1 (1972) para a frequência mínima do transdutor emissor, de acordo com as dimensões da peça a ser ensaiada.

TABELA 10
Frequência mínima do transdutor

Distância a ser percorrida pela onda (mm)	Frequência natural do transdutor (kHz)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)
100 – 700	≥ 60	70
700 – 1500	≥ 40	150
> 1500	≥ 20	300

Fonte: RILEM NTD 1 (1972)

Fatores que podem influenciar na velocidade de propagação da onda ultrassônica:

- a presença de armadura no concreto, sendo este um dos principais fatores;
- temperatura.

A velocidade de propagação da onda no aço é maior que no concreto (1,2 a 1,9 vezes). No caso do concreto não apresentar armaduras, a onda sonora percorrerá o menor caminho entre os dois transdutores. No concreto armado, a velocidade de propagação poderá aumentar na proximidade das armaduras. Nesse caso, a onda poderá percorrer parte do caminho ao longo do concreto e outra parte ao longo do aço, alterando assim o tempo de propagação na peça, e, conseqüentemente, alcançando mais rapidamente o transdutor receptor. O aumento no valor de v pode sofrer variações em função da proximidade entre as barras de aço e a trajetória da onda, do diâmetro, do número e da direção das barras de aço em relação à trajetória das ondas.

A temperatura também configura-se como fator de influência sobre a velocidade da onda, caso aquela se apresente superior a 30°C e inferior a 5°C. Em temperaturas entre 40°C a 60°C, ocorre redução da velocidade da onda. Essa redução é causada por microfissuração interna do concreto, que não corresponde à redução na resistência à compressão do concreto. No caso de baixas temperaturas, a água congelada no interior do concreto propiciará o aumento da velocidade de propagação das ondas de ultrassom nesse corpo.

Os fatores de correção, recomendados pela norma britânica e pela RILEM levam em consideração apenas dois parâmetros básicos: a velocidade da onda ultrassônica no concreto ao redor da armadura e o caminho percorrido pela onda através do aço e do concreto.

Os valores estimados referentes à resistência à compressão do concreto (f_c) a partir da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (v) podem ser obtidos a partir de gráficos ou por meio de expressões analíticas, sendo os resultados gráficos mais confiáveis.

No caso de obtenção da correlação por expressões analíticas, os modelos normalmente utilizados são: potencial, logarítmico e polinomial.

Na impossibilidade de obtenção de um número mínimo de corpos de prova estabelecidos pela norma e quando não se conhece a composição do concreto, é possível estimar a resistência à compressão deste utilizando-se expressões analíticas cujas constantes são obtidas a partir de testemunhos retirados da estrutura. Estimativas da resistência à compressão por meio das expressões analíticas podem ser feitas nas seguintes circunstâncias:

- a) quando a composição do concreto *in situ* é conhecida e existem pelo menos três corpos de prova da mesma idade da estrutura ou se for possível a retirada de, no mínimo, três testemunhos da estrutura a ser avaliada;
- b) quando a composição do concreto *in situ* é conhecida e não existirem corpos de prova do concreto original, mas os materiais utilizados ainda estiverem disponíveis para moldar, pelo menos, três novos corpos de prova;
- c) quando a composição do concreto *in situ* é desconhecida, mas pelo menos três corpos de prova possam ser extraídos da estrutura;
- d) quando apenas a composição do concreto *in situ* é conhecida.

Em geral, a estimativa da resistência obtida a partir da correlação “a)” é mais confiável do que a obtida pela “b)” que, por sua vez, é mais confiável do que as obtidas pela “c)” e pela “d)”.

2.6.2 British Standards Institution – BSI 1881: Part 203:1986 – *Testing concrete – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete* (BSI, 1986)

Essa parte da norma estabelece recomendações para testes não destrutivos em corpos de prova de concreto liso reforçado e/ou protendido, componentes pré-moldados e estruturas por meio da medição da velocidade do pulso ultrassônico.

De acordo com essa norma, as medições de velocidade ultrassônica podem ter as seguintes aplicações:

- determinação da uniformidade do concreto;
- detecção de presença de fissuras, vazios ou outros defeitos;
- medição das mudanças ocorridas no material, ao longo do tempo;
- medição da qualidade do concreto, a partir da correlação entre velocidade de onda e resistência;

- determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson do concreto.

A resistência à compressão do concreto deve ser estimada num intervalo de confiança de 95%, com acurácia de ± 7 MPa, sendo que o ensaio deve ser realizado em condições consideradas ideais e com a utilização de uma curva de correlação adequada ao material a ser estudado.

A resistência de determinado concreto pode apresentar variações a partir da alteração de componentes, como, proporção entre água e cimento e/ou idade do ensaio. Para se obterem as curvas de correlação é imprescindível realizar ensaios para cada tipo de concreto, com as diversas faixas de resistência à compressão (baixa, média e alta).

De acordo com a norma, é recomendada a moldagem de, no mínimo, três corpos de prova para cada batelada. Em cada corpo de prova, devem ser feitas três medições entre seu topo e a base. A variação dos resultados em um único corpo de prova deve ser menor que $\pm 5\%$ do valor médio dessas três medições. As dimensões dos corpos de prova da leitura da velocidade devem ser determinadas com acurácia de $\pm 1\%$.

As curvas de correlação devem ser obtidas a partir dos pontos obtidos das médias dos resultados da velocidade de onda e da resistência à compressão. Deve ser testado um número de corpos de prova suficiente para toda a faixa de resistência esperada, a fim de propiciar uma estatística confiável.

2.6.3 American Society for Testing and Materials ASTM: C597-83/1991 – *Standard test method for pulse velocity through concrete* (ASTM, 1991)

Esse método deverá ser usado para estimar a uniformidade e a qualidade do concreto, para indicar a presença de vazios e trincas, para estimar a profundidade dessas trincas, para indicar mudanças nas propriedades do concreto, verificar o estado da estrutura e estimar o seu grau de deterioração ou colapso.

A relação entre velocidade de onda ultrassônica e a resistência à compressão pode ser estabelecida por meio da realização de testes em campo.

A composição do concreto deve ser analisada (tipo de cimento, tamanho e graduação dos agregados, relação água/cimento, grau de compactação, condições de cura e idade do material), uma vez que esse fator pode afetar a velocidade da onda ultrassônica. (ASTM, 1991; BANDEIRA,2009)

Para realização do procedimento, devem ser verificados fatores como:

- contato entre os transdutores e a amostra;
- posição dos transdutores;
- distância entre transdutores;
- teor de umidade da amostra;
- existência de armaduras;
- dimensões da peça;
- tempo de transmissão da onda.

Ao final dos testes, um relatório deve ser redigido contendo os seguintes tópicos:

- local do teste ou identificação da amostra;
- distância entre transdutores e posição em relação à transmissão do pulso;
- tempo de transmissão;
- velocidade da onda ultrassônica.

2.6.4 NBR 8802/1994 – *Concreto endurecido – Determinação da velocidade da propagação de onda ultrassônica* (ABNT, 1994)

Essa norma prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto, tendo como principais aplicações:

- verificação da homogeneidade do concreto;
- detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições;
- monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico), principalmente pela ação de sulfatos.

Procedimentos para execução do ensaio:

- os corpos de prova ou componentes de concreto para o ensaio devem ter as superfícies planas, lisas e isentas de sujeira;
- os corpos de prova devem ser ensaiados nas mesmas condições de composição e umidade relativa;
- calibrar o aparelho usando barra de referência ou dispositivo equivalente;

- verificar as superfícies de ensaio dos corpos de prova ou componentes do concreto;
- aplicar fina camada de acoplante nas faces dos transdutores ou no corpo de prova;
- posicionar os transdutores verificando o melhor arranjo, dependendo do local onde se encontra a amostra;
- verificar acoplamento e pressão entre as superfícies dos corpos de prova e transdutores, objetivando variação máxima de $\pm 1\%$ entre os resultados das leituras;
- a medida da distância entre os pontos onde devem ser acoplados os centros das faces dos transdutores deve ser determinada com precisão de até $\pm 1\%$.

A apresentação dos resultados deve conter as seguintes informações:

- localização na estrutura e identificação dos corpos de prova ou componentes de concreto ensaiados;
- distância entre as superfícies de contato dos transdutores durante o ensaio;
- direção de propagação de onda;
- indicação da posição relativa dos transdutores;
- velocidade de propagação;
- descrição sucinta da preparação das superfícies e condições de umidade do concreto.

Deve ser definido um sistema de pontos para cobrir uniformemente um volume apropriado de concreto na estrutura para se verificar a homogeneidade do concreto. O espaçamento entre os pontos individuais depende das dimensões da estrutura, da precisão requerida e da variabilidade do concreto. Em grandes estruturas e concreto uniforme, os pontos devem ser dispostos em uma malha de 1m^2 . Em pequenas peças ou em concreto com variação, é necessário espaçamento menor.

É possível expressar a homogeneidade do concreto em forma de parâmetros estatísticos, tais como o desvio-padrão (D_p) ou o coeficiente de variação (δ) das medidas de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no concreto, feitas em pontos da malha. Contudo, tais parâmetros só podem ser usados para comparar variações em componentes de concreto similares.

Os principais fatores que influenciam os resultados são:

- distância entre as superfícies de contato dos transdutores;
- presença de armadura;
- densidade do concreto, que depende do traço e das condições de concretagem;
- tipo, densidade e outras características dos agregados;
- tipo de cimento e grau de hidratação;
- direção de ensaio da peça;
- tipo de adensamento do concreto;
- idade do concreto.

2.6.5 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)

A NM 58 (COMITÉ MERCOSUR, 1996) estabelece normas para garantir precisão nos ensaios de verificação da velocidade ultrassônica. Esses ensaios devem ser realizados em superfície lisa e buscando garantir o perfeito contato entre os transdutores e o corpo de concreto a ser ensaiado. Dessa forma, evita-se erros na obtenção do valor da velocidade.

Pelo fato de o concreto se apresentar como material heterogêneo, a norma ressalta que é imprescindível que a onda ultrassônica percorra a maior distância possível no corpo de prova. Para o uso do transdutor com frequência igual a 54kHz, a norma faz a seguinte recomendação: 150mm para a transmissão direta e 400mm para a transmissão indireta. Em ambos os casos, deve ser levada em conta a dimensão máxima do agregado.

Foram realizados ensaios nos quais fica comprovado que a velocidade da onda é afetada quando tensão de ruptura alcança níveis entre 50 e 70%. Também foi demonstrado um acentuado decréscimo no valor de velocidade com o aumento progressivo da tensão.

A NM 58 (1996) define que a correlação entre a resistência e a velocidade deve ser feita obtendo-se, primeiramente, a velocidade em cada corpo de prova cilíndrico de 150mm x 300mm, moldado e curado, segundo procedimento padrão, sendo, em seguida, submetido ao ensaio de compressão. Para cada composição, devem ser ensaiados 10 corpos de prova, variando-se a relação água/cimento de 0,40 a 0,80, com incrementos de 0,05.

2.6.6 Quadro comparativo entre procedimento de normas para ensaio de ultrassom

TABELA 11
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 200kHz	20 a 150kHz	10 a 150kHz	Acima de 20kHz
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	-	-	-	1m 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; BANDEIRA, 2009

2.7 Ensaios realizados com a tecnologia do ultrassom em materiais terrosos – solos

Como já dito, anteriormente, o uso do ultrassom para monitoramento e análise de características físicas e mecânicas dos materiais construtivos, a princípio, foi empregado em metais e, depois, no concreto. Posteriormente, passou a ser empregado em materiais como madeiras, rochas e solos. Atualmente, diversas pesquisas vêm sendo realizadas buscando desenvolver metodologias para o emprego dessa tecnologia em materiais terrosos, sejam esses usados para atividades agrícolas ou nas diversas áreas da engenharia e da arquitetura. Com a intenção de obter maiores subsídios para o desenvolvimento desta pesquisa, nos tópicos abaixo estão descritos, em linhas gerais, alguns estudos realizados nessa área do conhecimento.

Yesiller et al (2000)⁴, desenvolveram um estudo com o intuito de investigar o uso de métodos ultrassônicos na determinação de características de compactação de solos argilosos. Trata-se de um estudo interessante, pois o solo utilizado para construir os minipainéis de taipa também será compactado.

⁴ Texto original em inglês. Tradução nossa.

Segundo os autores, a propagação das ondas ultrassônicas em um material terroso é afetada pelas propriedades e condições em que se encontra esse solo. Sheeran et al (1967) desenvolveram um estudo por meio do qual as velocidades das ondas longitudinais eram determinadas em três tipos de solos. Foi observado que a velocidade máxima e a densidade máxima seca ocorriam em amostras com teor de umidade na faixa de 0,5%. Foi demonstrado, também, 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 (YESILLER et al, 2000).

Wang et al (1991) conduziram estudo para determinar a variação da velocidade ultrassônica em amostra de solo de silte argiloso, relacionando pressão de compactação e teor de umidade do solo. Verificaram que a velocidade cresceu com o aumento da pressão de compactação. Com algumas exceções, as velocidades cresciam com a diminuição do teor de umidade, fato que se confirmará no capítulo de 4 do presente trabalho. Esse fenômeno foi atribuído ao alto valor do coeficiente de massa apresentado por solos com baixo teor de umidade (YESILLER et al, 2000; Apud WANG et al, 2000).

Os testes laboratoriais conduzidos por Yesiller et al (2000) consistiram em determinar a velocidade de onda longitudinal em solos compactados usando o método de transmissão direta e o de transmissão indireta. Foram analisadas as propriedades e as condições de compactação das amostras. Foram feitas, igualmente, comparações entre os testes tradicionais, relacionando densidade seca e teor de umidade e testes ultrassônicos, relacionando velocidade ultrassônica e teor de umidade. Verificou-se que a velocidade crescia com o aumento da umidade até o teor de umidade ótimo. Após esse ponto, a velocidade começava a decrescer com o aumento do teor de umidade. A velocidade máxima foi obtida próxima ao teor de umidade ótimo. A variação de velocidade, em relação ao teor de umidade, foi similar à variação da densidade total. A velocidade máxima foi obtida, aproximadamente, no ponto de densidade máxima e índice de vazios mínimo. Foi verificado, também, uma diminuição da velocidade ultrassônica com o aumento da porcentagem de argila no solo das amostras e, conseqüentemente, o aumento da sua plasticidade. O aumento desses dois últimos fatores relacionados, em um solo, contribui para o aumento da sua porosidade, acarretando uma diminuição de sua densidade e aumento do teor de umidade, resultando em uma diminuição da velocidade ultrassônica nesse meio.

Observa-se, também, que, na maioria dos casos, a velocidade obtida, a partir da transmissão direta, não é similar à obtida via transmissão indireta. Por isso, é sugerido um fator de correção para converter velocidade indireta em direta (YESILLER et al, 2000).

Na pesquisa, foi concluído que a variação da velocidade foi similar à variação da densidade, ambas em relação ao teor de umidade. A velocidade aumenta com maiores energias de compactação e diminuição da plasticidade do solo. O maior contato entre as partículas dos solos facilitou a transmissão da onda ultrassônica, resultando em menores tempos de transmissão e maiores velocidades. Por fim, de acordo com os autores, foi estabelecido que tanto o modo de transmissão direta quanto o de transmissão indireta podem ser usados em ensaios ultrassônicos, sendo que deve ser estabelecido fator de correção para os resultados obtidos a partir do modo de transmissão indireta (YESILLER et al, 2000).

Em outra pesquisa, Yesiller et al (2000)⁵ desenvolveram ensaios ultrassônicos em solos quimicamente estabilizados, a partir do uso de cimento, limão e cinzas, buscando verificar a qualidade obtida por esses solos com o processo de estabilização. Os testes de ultrassom foram realizados com o objetivo de determinar a velocidade de onda longitudinal nos solos estabilizados, logo após a sua compactação. Foi usado o método de transmissão direta. As amostras foram testadas três vezes, logo após serem moldadas, após sete e vinte e oito dias de cura. Foi usado, nas amostras, um solo argiloso de alta plasticidade. Esse solo recebeu água pulverizada, para apresentar um teor de umidade de 17%, sendo hidratado durante 24 horas. Os agentes de estabilização foram adicionados ao solo antes da compactação.

A partir dos resultados apresentados nos testes, pode-se observar que, há tendência de maiores velocidades com o aumento do tempo de cura, sendo que, do dia da compactação para o sétimo dia, o aumento foi maior que do sétimo dia para o vigésimo oitavo. O processo de cura e a adição de agentes estabilizantes permitem o aumento da dureza do solo. Notou-se também que, em geral, a velocidade aumentou com o aumento da resistência dos solos. No entanto, observou-se uma dispersão relevante nos dados das medições. Foi investigada, também, a variação da velocidade em relação ao módulo de elasticidade, verificando o aumento da velocidade com o aumento do módulo. É importante pontuar que esse dado é mais consistente em misturas com menor variação de material (YESILLER et al, 2000).

A transmissão de ondas ultrassônicas ocorre através do caminho mais rápido no solo, que é diretamente relacionado à dureza da massa do solo ou ao módulo de elasticidade deste. A resistência de um solo é afetada por mais fatores, além da sua dureza, incluindo vazios, imperfeições e defeitos. Desse modo, a resistência do solo não é diretamente relacionada à velocidade de onda, embora, geralmente, maiores velocidades são associadas a

⁵ Texto original em inglês. Tradução nossa.

maiores resistências. Verifica-se, também o aumento da velocidade com o aumento da densidade seca do solo, devido ao fato de que a transmissão de onda é mais rápida no sólido que nos vazios (YESILLER et al, 2000).

Nakano et al (1972)⁶ mediram, em um solo saturado, a velocidade da onda ultrassônica de dilatação e a velocidade de onda de cisalhamento, concluindo que existe forte relação entre o teor de água existente em um solo e a velocidade de onda de dilatação. Verificaram também que, em solos congelados, há uma tendência de decréscimo da velocidade de onda com o aumento de sua temperatura, mas o efeito da temperatura não é tão pronunciado quanto o da velocidade da onda ultrassônica de dilatação. Nakano e Arnold (1973) observaram que, em solo arenoso congelado, o aumento do seu teor de água acarreta um aumento da velocidade da onda ultrassônica de dilatação (NAKANO et al, 1972; Apud WANG et al, 2005).

Wang et al (2005)⁷ desenvolveram um estudo sobre velocidade da onda ultrassônica de dilatação e a velocidade de onda ultrassônica de cisalhamento em três diferentes tipos de solos congelados, sendo essas velocidades determinadas em função da temperatura. Os solos usados foram: argila, *loess* e areia. Foram feitas amostras cilíndricas desses materiais sob temperatura de congelamento diferente. Essas amostras dos solos apresentavam diferentes valores em seus limites de liquidez e de plasticidade, sendo eles, respectivamente, 35,5% e 22% na argila e 24,6% e 17,2% no *loess*. Às amostras foi adicionada água pulverizada e misturada, buscando obter um teor de umidade uniforme dessas. As amostras foram devidamente acondicionadas o tempo suficiente para obtenção da densidade desejada. O aparelho ultrassom usado foi devidamente calibrado, os transdutores corretamente posicionados e o método de transmissão usado foi o direto. A frequência utilizada foi de 500kHz, sendo que a vibração se propagou através do corpo da amostra, de uma extremidade a outra, gerando dados que foram transmitidos a um computador através de conversor. As altas frequências permitem maior acurácia nas medições. No entanto, sabe-se que os sinais de alta frequência que atravessam as amostras não são recebidos devido à grande atenuação relacionada aos solos congelados.

A velocidade da onda ultrassônica de dilatação e a velocidade de onda ultrassônica de cisalhamento são verificadas através de solos congelados, sendo que fatores como temperatura, tipo de solo e teor de água presente no material influenciam em seus valores. Quanto mais grossa é a granulometria do solo, maior será a velocidade de propagação

⁶ Texto original em inglês. Tradução nossa

⁷ Texto original em inglês. Tradução nossa

de onda. Essa velocidade aumenta na seguinte ordem: solo argiloso congelado, solo *loess* congelado e solo arenoso congelado. A velocidade ultrassônica tende a diminuir com o aumento da temperatura e o descongelamento do solo. Sendo assim, a variação da velocidade de onda ultrassônica de dilatação e de onda ultrassônica de cisalhamento está relacionada não apenas com a temperatura, mas também com a fase da água presente nesses solos (WANG et al, 2005).

D’Orazio et al (2007)⁸ verificam, em seu trabalho, as dificuldades encontradas para inspecionar compósitos usando a tecnologia do ultrassom. Segundo os autores, questões relacionadas aos problemas de realização de testes ultrassônicos em compósitos, buscando detectar defeitos internos nas amostras, vêm sendo discutidas atualmente.

A primeira questão colocada pelos autores refere-se à falta de normatização referente a diferentes espessuras de amostras. Outra questão refere-se à classificação das técnicas usadas para fazer a comparação dos sinais ultrassônicos e detectar pontos internos nas amostras. Sabe-se que, para cada ponto de um material, tem um sinal contínuo, que representa o montante de energia ultrassônica recebida em função do tempo. A forma de recebimento de sinais ultrassônicos depende da espessura da amostra, assim como a leitura das características apresentadas pelo material ao longo do caminho percorrido pelo sinal. O primeiro passo, em direção à implementação de um sistema automático de inspeção via ultrassom, é introduzir normatização referente a espessuras de amostras buscando minimizar esse problema. A normatização proposta consiste em definir procedimento capaz de suprimir amostras não significantes e que apresentem espessuras inadequadas ao comprimento de onda transmitido. É necessário, também, verificar se os materiais a serem testados apresentam espessuras iguais ou então realizar a fase de pré-processamento, durante a qual os sinais são normalizados, definindo-se frequências apropriadas às espessuras das amostras, permitindo a comparação entre diferentes sinais emitidos. Para materiais mais finos, recomenda-se usar frequências menores. Para materiais mais espessos, é necessário frequências maiores mas, essa medida pode acarretar perda de leitura de defeitos superficiais (D’ORAZIO et al, 2007).

Portanto, é importante definir normatização relacionando dimensões das amostras com faixa de frequência a ser utilizada nos ensaios, buscando obter resultados mais precisos com relação à velocidade de onda, no trajeto a ser percorrido, e à detecção da qualidade apresentada pelo material a ser testado (D’ ORAZIO et al, 2007).

A partir do trabalho acima descrito, pôde-se certificar que as conclusões dos autores são aplicáveis a esta pesquisa, uma vez que, como será verificado, no capítulo 4 desta

⁸ Texto original em inglês. Tradução nossa

dissertação, a frequência usada nos ensaios configurou-se como um dos principais fatores para produção de resultados inválidos, justamente por não ser adequada às dimensões dos painéis, podendo ser considerada baixa.

2.8 Conclusão

Ao longo deste capítulo foram estudados diversos aspectos que norteiam esta pesquisa, dentre eles: o material usado na execução das estruturas em taipa de pilão, os aspectos construtivos dessa técnica e o emprego dos ensaios ultrassônicos nesse material e em outros materiais usados em construções, tais como a madeira e o concreto, buscando verificar fatores positivos e negativos relacionados ao uso do ensaio de ultrassom na verificação de patologias em materiais usados nas construções antigas.

Pôde-se perceber, a partir das informações obtidas por meio dessa revisão da bibliografia, a existência de restrições com relação ao emprego dessa tecnologia de verificação de patologias em materiais que apresentem superfícies irregulares e dimensões maiores. Verificou-se êxito em ensaios realizados em corpos de provas desse tipo de material, por apresentarem dimensões reduzidas, e dificuldade de leituras em peças maiores, apresentando dimensões empregadas nas construções em geral, mesmo usando frequências maiores.

Portanto, tornou-se claro a necessidade de ser desenvolvida uma normatização para nortear ensaios em materiais que apresentem maior rugosidade e, também, maiores dimensões, tais como as madeiras usadas em estruturas de edificações e as construções com materiais terrosos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, 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 estruturas construídas em material terroso. Todos os ensaios necessários para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizados segundo as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Ressalta-se a inexistência de normatização referente a ensaios de ultrassom, em materiais terrosos. Por isso, será utilizada a referente a ensaios de ultrassom em estruturas em concreto.

3.1 Amostragem do solo para execução dos painéis de taipa de pilão

A idéia inicial era utilizar a mesma terra usada na pesquisa desenvolvida por Rosinete Fernandes Bandeira, por se tratarem de pesquisas que integram o mesmo projeto piloto para o desenvolvimento da metodologia de avaliação da integridade mecânica em estruturas construídas a partir da técnica da taipa de pilão.

Devido à impossibilidade de realizar a coleta do solo no Campo Experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) – Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, no estado de Minas Gerais, a aproximadamente 70km de Belo Horizonte, capital do estado, essa coleta foi realizada na área rural daquele município, buscando obtenção de solo de características bem similares. O solo do Campo Experimental da Embrapa, de acordo com Sans (1986), recebeu a seguinte classificação: latossolo vermelho distrófico típico, com predominância dos minerais de caulinita, gibsitita, hematita e goethita (Apud. BANDEIRA, 2009). Trata-se de um tipo de solo predominante nessa região e também no território brasileiro. Segundo Bandeira (2009), esse foi o motivo da escolha deste material na primeira fase da pesquisa.

FIGURAS 15 e 16 – Coleta do solo



Fonte: Autora

FIGURA 17 – Coleta e transporte do solo



Fonte: Autora

FIGURAS 18 e 19 – Primeira estocagem do solo coletado



Fonte: Autora

3.2 Ensaios de caracterização do solo

Os ensaios de caracterização do solo usado na execução dos painéis foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Via Test e no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG. Os resultados dos ensaios foram obtidos a partir da média aritmética de, no mínimo, três determinações.

3.2.1 Amostras de solo.

A amostragem foi 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 4,8mm, massa específica aparente e absorção de água dos grãos retidos na peneira de 4,8mm)” (ABNT, 1986).

3.2.2 Análise granulométrica

Os ensaios referentes à análise granulométrica foram 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.

3.2.3 Massa específica

Os ensaios referentes à determinação da massa específica dos grãos foram realizados segundo a norma **NBR 6509/1984 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – 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).

3.2.4 Limite de liquidez

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, amassando com auxílio de espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, apresentando consistência tal que, ao ser transferida para o aparelho de Casagrande, sejam necessários, no máximo, 35 golpes, para fechar a ranhura feita na massa (ABNT, 1984).

3.2.5 Limite de plasticidade

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, amassando com auxílio de 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 da amostra, nesse momento, corresponde ao limite de plasticidade (ABNT, 1984).

3.3 Ensaio de compactação da amostra do solo usado nos painéis

Os ensaios de compactação do solo foram realizados 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). A curva de compactação da amostra do solo utilizado nos painéis será apresentada no item **4.2 - Ensaio de compactação do solo**.

3.4 Local de desenvolvimento da pesquisa.

A parte prática da pesquisa foi toda desenvolvida na Fazenda Modelo da UFMG, na cidade de Pedro Leopoldo, Minas Gerais. Os locais usados para confecção das fôrmas e execução dos protótipos das paredes em taipa de pilão foram gentilmente cedidos pela administração da fazenda.

3.5 Execução das fôrmas dos painéis de taipa de pilão

As fôrmas foram feitas em um galpão de estocagem da fazenda e, posteriormente, foram transferidas para outro local, uma área coberta utilizada como garagem, próxima à sede.

Foram feitas quatro fôrmas para a execução dos painéis de taipa, com as seguintes dimensões internas: 2,0m de comprimento, 1,20m de altura e 0,44m de espessura (equivalente à medida de dois palmos, usada antigamente na arquitetura em taipa). As fôrmas usadas foram confeccionadas de modo semelhante a fôrmas de concreto, não sendo utilizado o taipal clássico, devido à falta de mão de obra especializada na execução desse tipo de fôrma e local adequado para a sua utilização. Os materiais usados para a execução das fôrmas foram painéis de madeirite e sarrafos para fazer o travejamento.

FIGURAS 20 e 21 – Execução das fôrmas dos painéis



Fonte: Autora

Posteriormente, verificou-se que a disposição dos sarrafos, para travar a fôrma e impedir seu abaulamento durante os trabalhos de compactação dos painéis, deu-se de maneira equivocada. Essas peças conferem maior resistência quando colocadas perpendicularmente ao

plano do madeirite. Nas figuras a seguir, pode-se perceber que os sarrafos foram pregados paralelamente ao madeirite. Constatada esta irregularidade e a falta de tempo para se refazerem as fôrmas, a solução encontrada foi o reforço com o arame, que ajudou durante a compactação, mas não evitou que a fôrma abrisse um pouco lateralmente. Esse reforço deu-se a partir da execução de pequenos furos em duas alturas nas fôrmas, por onde foram passados arames pg18, usados para amarrar fôrmas de concreto.

FIGURAS 22 e 23 – Execução das fôrmas dos painéis



Fonte: Autora

FIGURAS 24, 25 e 26 – Execução das fôrmas dos painéis



Fonte: Autora

FIGURA 27 – Local de construção dos painéis



Fonte: Autora

3.6 Execução dos painéis de taipa de pilão

Os protótipos das paredes em taipa de pilão foram executados a partir da compactação do solo dentro de fôrmas previamente trabalhadas.

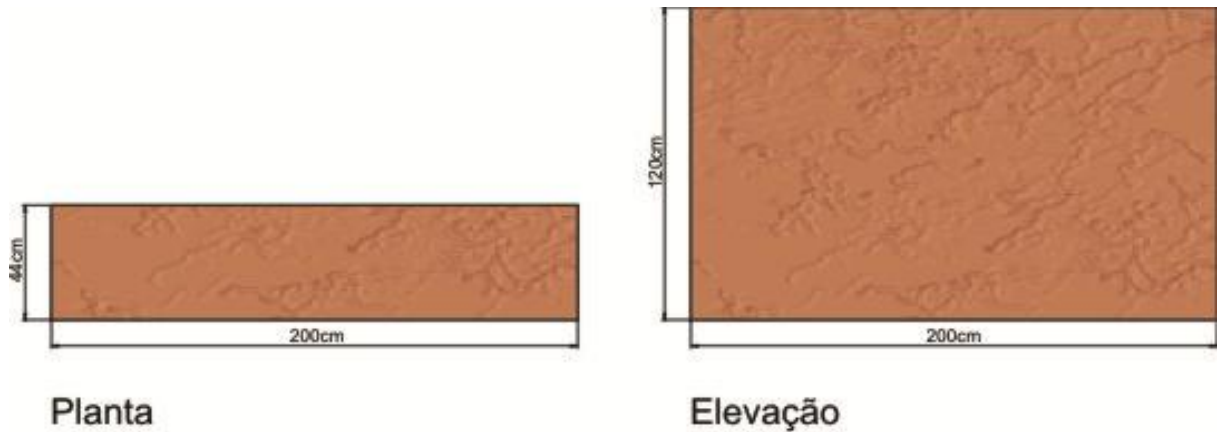
Foram construídas quatro paredes. A intenção inicial era executar os protótipos a partir da reprodução integral da técnica da taipa de pilão. No entanto, devido a limitações tais como a dificuldade de se encontrar carpinteiro apto a construir o taipal clássico e o pilão adequado e mão de obra devidamente qualificada para a compactação do solo, foram necessárias algumas adaptações nesse processo. Posteriormente, ficou comprovado que tais adaptações comprometeram a qualidade das paredes produzidas.

Durante os trabalhos, o solo foi sendo apiloado dentro da fôrma, por um homem usando ferramentas feitas a partir de pedaços de tronco de árvores, assemelhando-se a um pilão. O trabalho foi executado por duas pessoas: uma peneirava e jogava o material dentro da fôrma enquanto a outra apiloava a terra.

3.6.1 Projeto dos protótipos

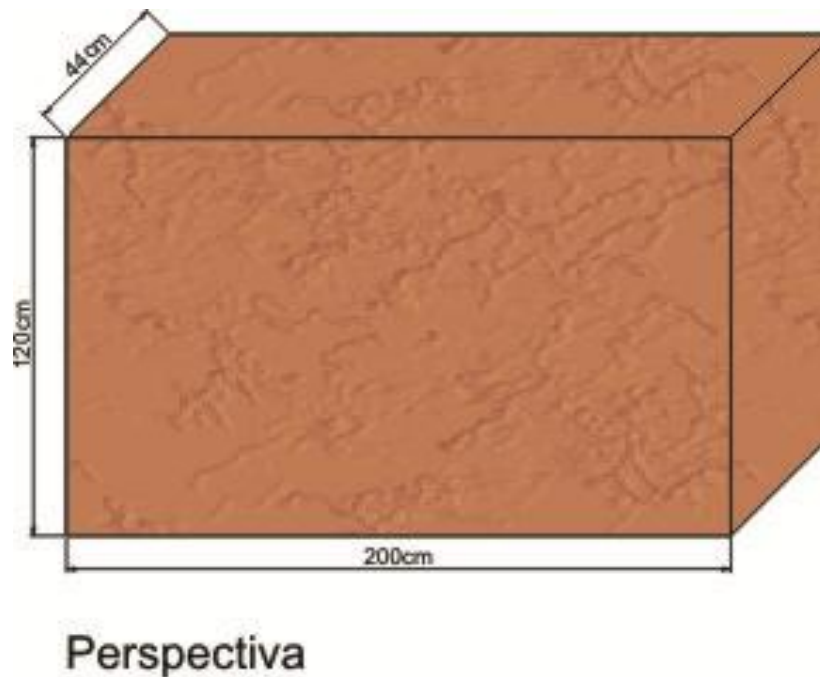
De maneira geral, as paredes das construções em taipa de pilão são caracterizadas por apresentarem grande espessura. Tendo em vista essa característica, as paredes previstas teriam as seguintes dimensões: 2,0m de comprimento, 1,20m de altura e 0,44m de espessura (equivalente a medida de dois palmos, usada antigamente na arquitetura em taipa).

FIGURA 28 – Projeto das paredes



Fonte: Autora

FIGURA 29 – Projeto das paredes - Perspectiva



Fonte: Autora

3.6.2 Painel defeituoso

Na técnica da taipa de pilão, o ideal é usar a terra mais seca, apresentando teor de umidade em torno de 7 a 10% (DJERBIB e HALL, 2003). O primeiro painel foi executado com o solo encharcado devido à água de chuva e sem qualquer tipo de manipulação (eliminação de cascalhos, a partir de peneiramento). Foi construído durante o período chuvoso, em novembro de 2010.

Para os trabalhos de compactação da terra, o ideal, seria adquirir um pilão. No entanto, essa ferramenta não foi encontrada para compra. Foram visitadas casas de materiais de construção e lojas de artesanato em madeira, sem sucesso. Portanto, para a sua compactação foram sendo usados pedaços de troncos de árvores em formato assemelhando ao de um pilão. A compactação do painel foi realizada em camadas de aproximadamente 20cm.

FIGURAS 30, 31 e 32 – Compactação do painel 1 – Painel defeituoso



Fonte: Autora

FIGURAS 33 e 34 – Compactação do painel 1 – Painel defeituoso



Fonte: Autora

FIGURA 35 – Compactação do painel 1 – Painel defeituoso



Fonte: Autora

3.6.3 Demais painéis

Para os demais painéis, como o solo se encontrava encharcado, foi necessário realizar uma secagem prévia da terra, uma vez que as paredes em taipa de pilão devem ser construídas com a terra mais seca. O material foi espalhado, em área próxima a de sua estocagem, e seco ao sol, sendo posteriormente guardado em bombonas para evitar novo contato com água de chuva, devido ao fato de que esse processo estava sendo realizado no final do período chuvoso (janeiro e fevereiro de 2011).

FIGURAS 36 e 37 – Secagem e nova estocagem da terra para execução dos demais painéis



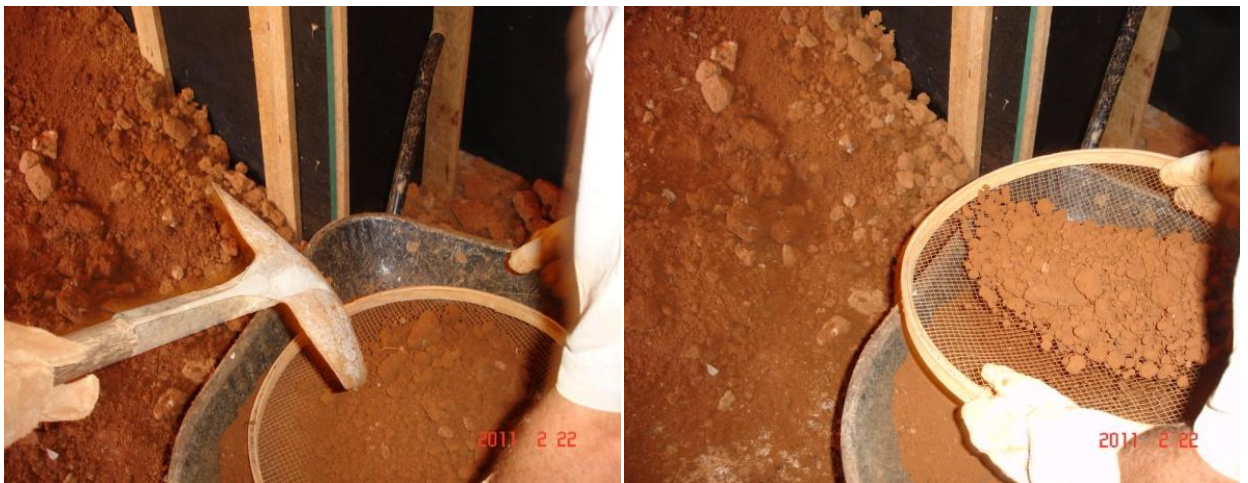
Fonte: Autora

Nesses painéis, pelo mesmo motivo do primeiro, também foi usada, na compactação do solo, uma ferramenta rudimentar, feita a partir de um pedaço de tronco de

árvore, pregado entre dois cabos de madeira, assim como as anteriores, usadas no painel 1, assemelhando-se a um pilão.

A terra foi manipulada, sendo passada por uma peneira com malha de 0,7mm, conhecida como peneira de café. Na parte central da peneira, essa malha foi manualmente alargada para aproximadamente 1,0cm. Como resultado, os cascalhos de maiores diâmetros foram retirados durante o processo de execução desses painéis. Assim como no primeiro, a compactação foi sendo realizada em sucessivas camadas de aproximadamente 20cm.

FIGURAS 38 e 39 – Peneiramento da terra para painel 2



Fonte: Autora

FIGURAS 40 e 41 – Compactação do painel 2



Fonte: Autora

FIGURAS 42 e 43 – Compactação do painel 2



Fonte: Autora

FIGURAS 44 e 45 – Compactação do painel 2



Fonte: Autora

FIGURAS 46 e 47 – Peneiramento e colocação da terra para painel 3



Fonte: Autora

FIGURAS 48, 49 e 50 – Compactação do painel 3



Fonte: Autora

FIGURAS 51 e 52 – Peneiramento e colocação da terra para painel 4



Fonte: Autora

FIGURAS 53 e 54 – Compactação do painel 4



Fonte: Autora

FIGURAS 55, 56 e 57 – Compactação do painel 4



Fonte: Autora

Importante: Apenas no painel 4 foi necessário utilizar um pilão de ferro no final de sua compactação. Desde o princípio da pesquisa, verificou-se a dificuldade de se conseguir um pilão adequado. Todas as ferramentas usadas no apiloamento, durante os trabalhos de compactação, foram feitas a partir de materiais obtidos na própria Fazenda Modelo da UFMG, a madeira. O ferro foi utilizado apenas no painel 4.

3.7 Retirada das fôrmas dos painéis

A retirada das fôrmas dos painéis foi realizada aproximadamente dois meses após a compactação do painel 4. Durante esse processo, todos os painéis sofreram avarias, tais como trincas e esfarelamento. Diferentemente do que seria esperado, o painel que menos apresentou problemas foi o painel 1, considerado defeituoso devido ao uso da terra muito úmida durante a sua compactação. Teoricamente, a terra sendo compactada, apresentando alto teor de umidade, tende a perder água para o ambiente externo, por meio da evaporação, causando o aparecimento de trincas. Esse problema de fato ocorreu. No entanto, os demais painéis também apresentaram trincas e esfarelamentos, principalmente nas áreas das laterais e das quinas.

FIGURAS 58 e 59 – Painei 1 – Painei defeituoso



Fonte: Autora

Nesse painel percebe-se, nitidamente, a porção compactada com terra úmida e a finalização da compactação com a terra mais seca. Em ambas as fases de compactação, o solo não foi peneirado. Verifica-se a ocorrência da falta de homogeneidade devido aos diferentes teores de umidade apresentados pelo material nas diferentes fases da compactação.

FIGURAS 60 e 61 – Painei 4



Fonte: Autora

FIGURAS 62 e 63 – Painel 4



Fonte: Autora

O painel acima (4) e os painéis 2 e 3 foram compactados com a terra mais seca e o solo usado foi peneirado. Também apresentam trincas e percebe-se a ocorrência de esfarelamento em diversos pontos, especialmente nas quinas.

3.8 Ensaio do ultrassom

Na primeira fase da pesquisa, que foi realizada em corpos de prova cilíndricos, o equipamento utilizado nos ensaios de ultrassom foi o *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* – PUNDIT (1994), fabricado pela CNS Eletronics, sendo esse mesmo equipamento utilizado nessa segunda etapa do trabalho. O aparelho mede o tempo de propagação da onda em microssegundos (μs). Ele apresenta uma fonte emissora de impulso ultrassonoro, com frequência de 54kHz. Em seu painel, verifica-se um registrador digital de tempo, um botão seletor de escala (escala inteiro ou decimal) e um botão de ajuste. Também é dotado de cabos coaxiais, dois transdutores de contato (emissor e receptor) e um cilindro calibrador metálico com as seguintes dimensões: 50mm de diâmetro e 160mm de comprimento.

FIGURA 64 – Equipamento utilizado nos testes – PUNDIT



Fonte: Autora

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, normatizada 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)**.

3.8.1 Calibração do aparelho de ultrassom

Esse procedimento tem como objetivo estabelecer a faixa de frequência da onda sonora a ser utilizada durante os ensaios. Para a calibração, acopla-se os transdutores nas extremidades do cilindro calibrador metálico, untando suas superfícies de contato com graxa ou vaselina para obtenção de perfeito acoplamento. Realizado o acoplamento, liga-se o aparelho e realiza-se a leitura do tempo em que a onda sonora gasta para atravessar o cilindro de referência. A calibração foi realizada em todas as frequências utilizadas em ensaios, sendo elas: 82kHz, 150kHz e 200kHz. Segundo o fabricante, a leitura padrão do tempo gasto pela onda para atravessar a barra é de 25,6 μ s (Apud BANDEIRA, 2009).

FIGURA 65 – Calibração do equipamento ultrassom



Fonte: Autora

3.8.2 O ensaio do ultrassom

Após a calibração do aparelho, ele é desligado. Na fase de realização de ensaios, foram usados transdutores de três diferentes frequências, buscando verificar qual delas seria mais adequada à realização dos procedimentos de leitura para a determinação do tempo necessário de propagação da onda sonora através de uma parede construída em material terroso. Os procedimentos de calibração continuam válidos para esta fase. Para os testes, foram utilizados transdutores de 82kHz, 150kHz e 200kHz. De acordo com a norma BSI 1881, devem ser realizadas três medidas, sendo que os resultados registrados devem apresentar variação máxima de 5% do valor mediano obtido.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo e dos ensaios de ultrassom. A princípio seriam apresentados, também, os resultados de testes de resistência à compressão simples. No entanto, devido a resultados inesperados dos ensaios de ultrassom, esses testes não foram realizados.

A partir dos resultados obtidos nos testes de ultrassom nos painéis, verificou-se a necessidade de alterar e readequar os procedimentos até então previstos, necessários à conclusão desta pesquisa.

4.1 Caracterização geotécnica do solo

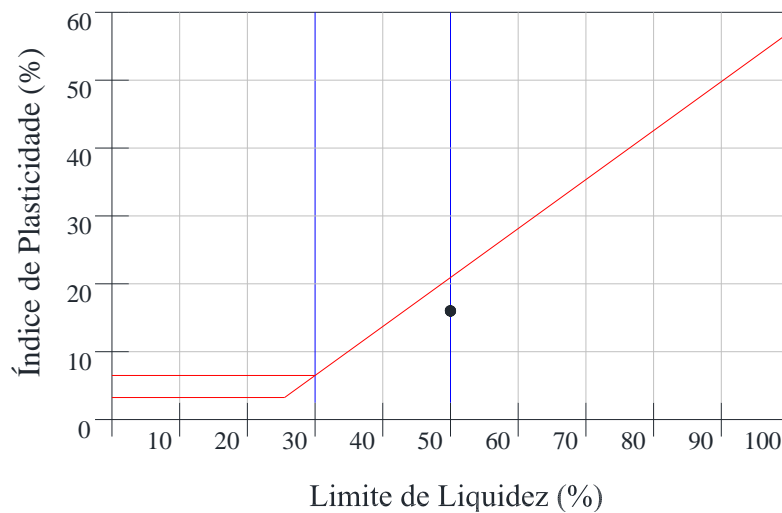
De acordo com os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização do solo utilizado neste trabalho, este poderá ser classificado, segundo a ABNT, como uma argila silto-arenosa com pedregulhos, de cor vermelha, medianamente plástica. Na tabela abaixo, encontra-se o resumo das propriedades físicas e das características geotécnicas do solo descrito acima.

TABELA 12
Resumo da caracterização do solo

Índices Físicos	
Massa específica dos solos (g/cm ³)	2,70
Teor de umidade (%)	4,6
Limite de liquidez (%)	51
Limite de plasticidade (%)	35
Índice de plasticidade (%)	15
Granulométrica (ABNT)	
Pedregulho (d > 2,0mm)	16,9
Areia (0,06 < d < 2,0mm)	23,1
Silte (0,002 < d < 0,06mm)	28,9
Argila (d < 0,002mm)	31,1

Compactação Proctor Normal	
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,684
Umidade ótima (%)	12,5
Classificação Geotécnica	
Textura	Argila silto-arenosa com pedregulhos
Plasticidade	Medianamente plástica
Laboratorista responsável pelos ensaios dos índices físicos: Denis Kiyoshi Furusho	
Laboratorista responsável pelos ensaios de granulometria: Alysson G. Santos – Laboratório ViaTest.	

FIGURA 66 – Gráfico Índice de Plasticidade x Limite de Liquidez.



Fonte: OLIVEIRA, (2011).

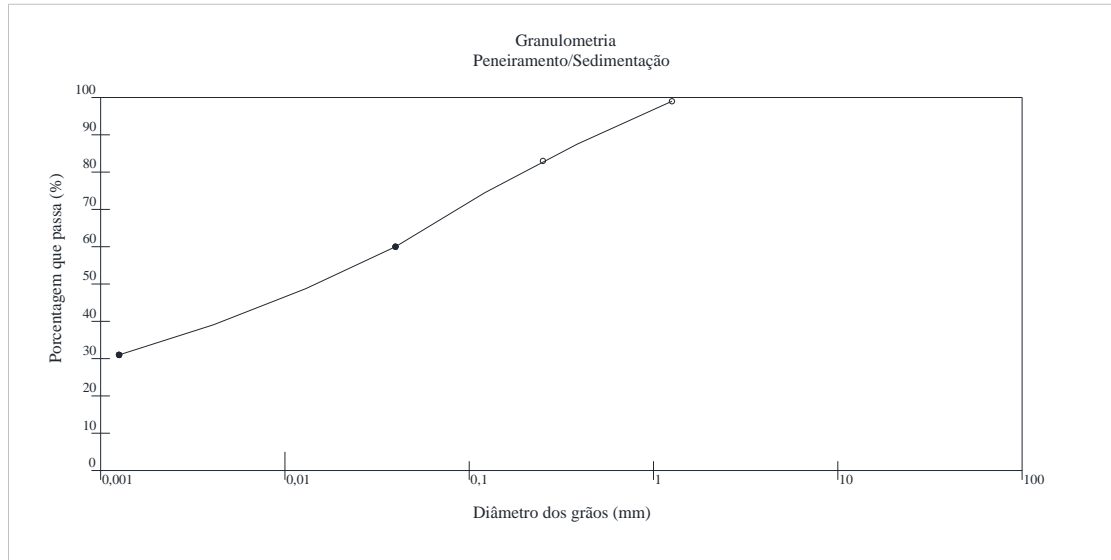
TABELA 13

Resumo da caracterização do solo após peneiramento para compactação dos painéis 2, 3 e 4

Granulométrica (ABNT)	
Pedregulho ($d > 2,0\text{mm}$)	0,0
Areia ($0,06 < d < 2,0\text{mm}$)	27,7
Silte ($0,002 < d < 0,06\text{mm}$)	34,6
Argila ($d < 0,002\text{mm}$)	37,7

Os valores apresentados foram obtidos a partir da média aritmética de, no mínimo, três determinações obtidas a partir das séries de ensaios. Sendo assim, esses valores tornam-se confiáveis.

FIGURA 67 – Curva de distribuição granulométrica do solo.



Fonte dos dados: ViaTest

Gráfico elaborado pela autora

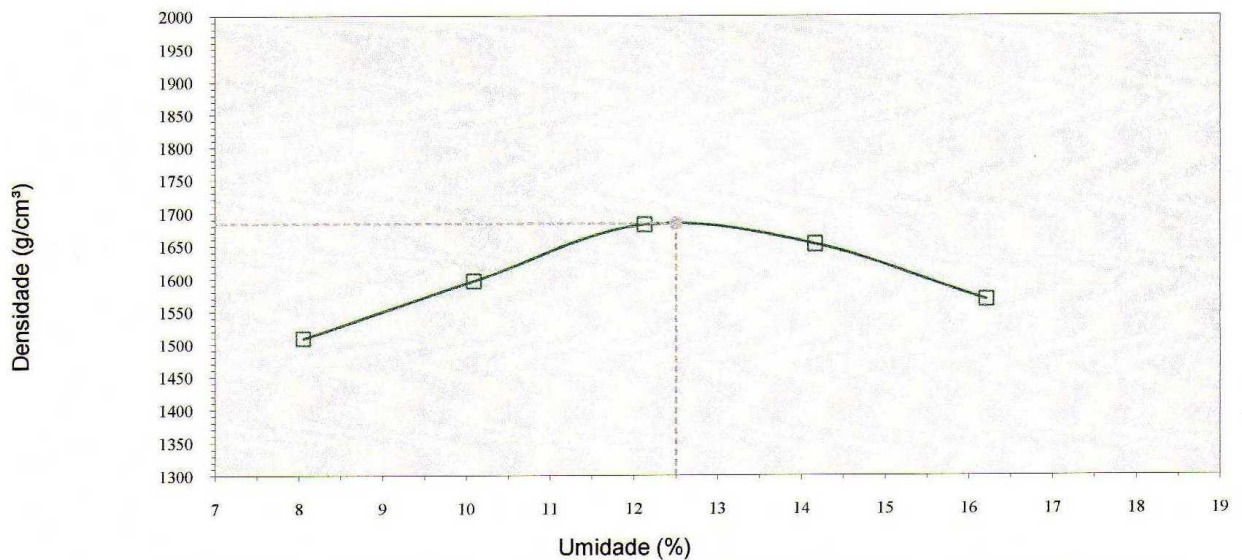
De acordo com as informações obtidas na pesquisa de Djerbib Hall (2003) e com os resultados dos ensaios de caracterização do solo escolhido, verificou-se a inadequabilidade desse solo para a execução dos painéis. Esse fato pôde ser devidamente comprovado na época da retirada das fôrmas, a partir dos problemas ocorridos, já citados anteriormente. Como já foi explicitado, sua escolha deu-se devido a constatação da necessidade da utilização de material semelhante ao empregado na primeira fase do projeto de pesquisa.

4.2 Ensaio de compactação do solo

A curva de compactação, apresentada no gráfico a seguir, determina a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo, quando compactado de acordo com processos especificados. Nesse caso, o ensaio de compactação do solo foi realizado obedecendo às prescrições da **NBR 7182/1986 – Solo – Ensaio de compactação**, sendo este compactado a partir da aplicação de energia de compactação normal, e o cilindro utilizado foi o de Proctor. Verifica-se que, até atingir o ponto de umidade máxima da curva, a

relação entre a densidade da amostra do solo e o seu teor de umidade é diretamente proporcional, tornando-se inversamente proporcional daquele ponto em diante, indicando que, a partir daí, a densidade desse material diminui com o aumento da umidade.

FIGURA 68 – Curva de compactação solo.



Fonte: ViaTest

Laboratorista responsável pelo ensaio de compactação: Alysson G. Santos

4.3 Moldagem dos painéis.

O ideal seria que os painéis fossem compactados levando-se em consideração aspectos históricos relacionados à técnica de execução de paredes em taipa de pilão. No entanto, de acordo com informações já descritas no item **3.6 - Execução dos painéis de taipa de pilão**, não foi possível atender a todas as especificações inerentes ao processo de execução de paredes em taipa de pilão.

Durante o processo, além das adaptações realizadas, descritas anteriormente no item supracitado, não foram medidos os valores correspondentes à massa específica seca e ao teor de umidade. No entanto, é sabido que a parede de taipa era construída com o solo apresentando baixo teor de umidade, abaixo do teor ótimo do solo utilizado, devendo, portanto, ser manipulado, em condição quase seca, para a realização deste trabalho.

4.4 Ensaios do ultrassom e resistência à compressão simples

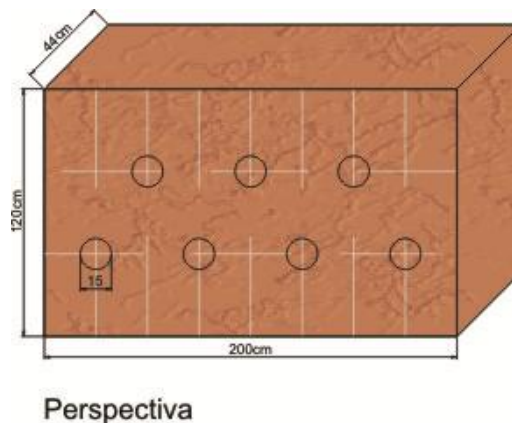
4.4.1 Ensaio do ultrassom nos painéis

Os ensaios de ultrassom realizados nos painéis produziram resultados insatisfatórios. Foram utilizados os transdutores de 82kHz, 150kHz e 200kHz. O sistema de medição utilizado foi o indireto. O aparelho não registrou nenhuma leitura nos painéis 2, 3 e 4. Apenas o painel 1, o painel defeituoso, apresentou leituras. No entanto, os dados gerados não foram considerados válidos.

4.4.2 Ensaio de resistência à compressão simples

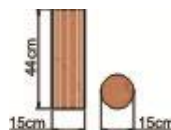
A princípio, uma malha seria desenhada, nas superfícies laterais dos protótipos, de forma a determinar os pontos onde seriam realizadas as leituras de ultrassom e, posteriormente, desses mesmos pontos, seriam retirados corpos de prova para ensaios de ruptura à compressão simples. O desenho da malha na superfície seria feito a partir da aplicação da antiga técnica do “barbante” tracionado, usando cal em pó para fazer as marcações.

FIGURA 69 – Malha para ensaios de ultrassom e retirada de corpos de prova



Fonte: Autora

FIGURA 70 – Corpos de prova para ensaios à compressão simples



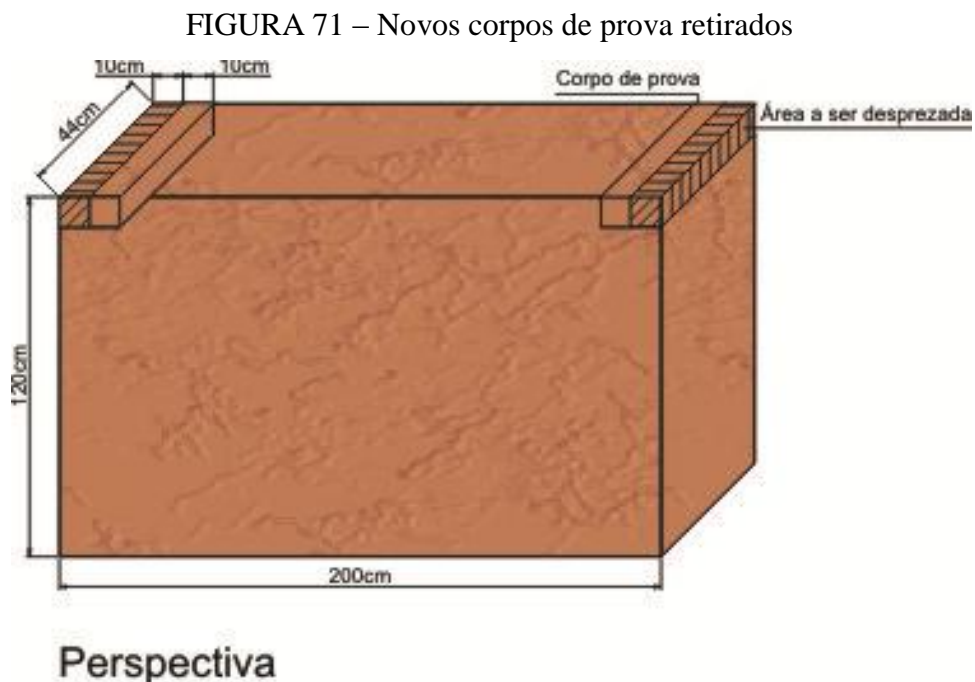
Fonte: Autora

Estava prevista a retirada de 28 corpos de prova, 7 em cada um dos painéis, de formato cilíndrico, com dimensões de acordo com as descritas na FIG. 70. Os corpos de prova seriam removidos a seco, usando a serra-copo.

Diante dos resultados apresentados pelo ensaio do ultrassom nos painéis, verificou-se a necessidade de readequar a metodologia anteriormente definida para esta pesquisa.

4.5 Nova metodologia proposta para os ensaios do ultrassom

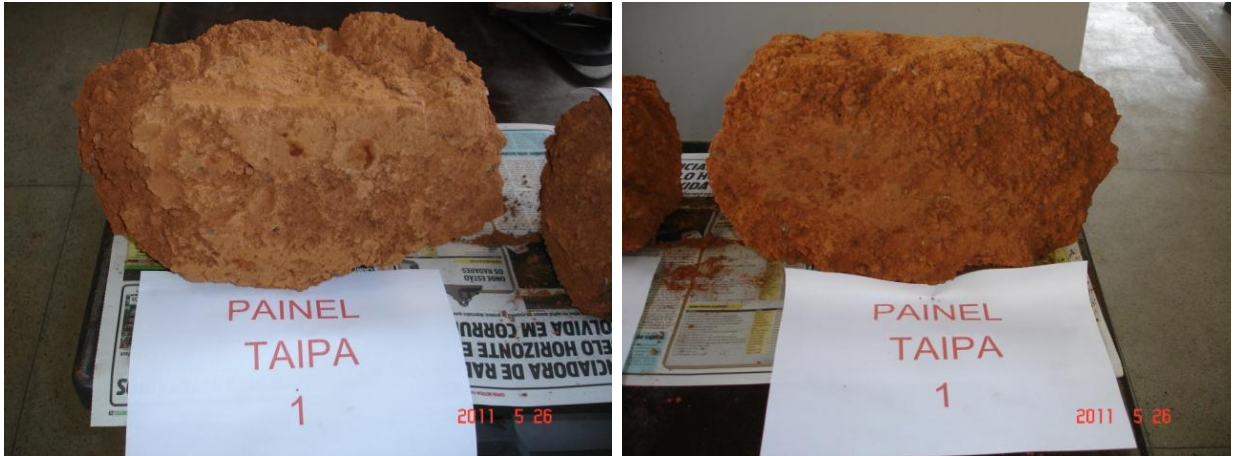
Verificada a incapacidade de obtenção de leituras pelo equipamento de ultrassom utilizado, propõe-se nova metodologia para a pesquisa, que consiste na retirada de corpos de prova na área próxima às quinas dos painéis, desprezando as regiões lesionadas devido à retirada das fôrmas. Essas amostras apresentam, aproximadamente, as seguintes dimensões: 10,0x10,0x44,0cm.



Fonte: Autora

Não foi possível retirar amostras em forma de paralelepípedos perfeitos devido à ausência de equipamento adequado e esfrelamento apresentado pelas paredes de taipa. Portanto, como pode ser verificado nas fotografias abaixo, essas amostras apresentam formas e superfícies irregulares.

FIGURAS 72 e 73 – Corpo de prova do painel 1 – Painel defeituoso



Fonte: Autora

FIGURAS 74 e 75 – Corpo de prova do painel 2



Fonte: Autora

FIGURAS 76 e 77 – Corpo de prova do painel 3



Fonte: Autora

FIGURAS 78 e 79 – Corpo de prova do painel 4



Fonte: Autora

4.5.1 Ensaio do ultrassom nos corpos de prova

Os ensaios foram realizados seguindo a norma BSI 1881 parte 206 – *Ultrasonic Test for Concrete*, utilizando o equipamento PUNDIT. Para esses ensaios de ultrassom, realizados nos corpos de prova retirados dos painéis, foram utilizados os transdutores de 82kHz, com 32mm de diâmetro. Como acoplante, na calibração, foi usada uma graxa. Nos ensaios nos corpos de prova foi usou-se a cola branca. O sistema de medição foi o indireto.

FIGURAS 80 e 81 – Ensaio no corpo de prova do painel 1 – Painel defeituoso



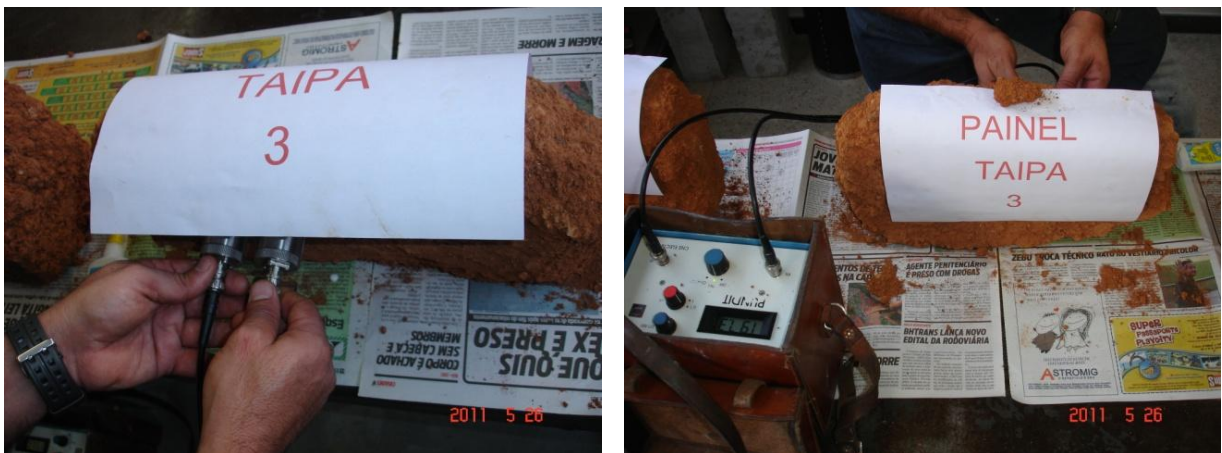
Fonte: Autora

FIGURAS 82 e 83 – Ensaio no corpo de prova do painel 2



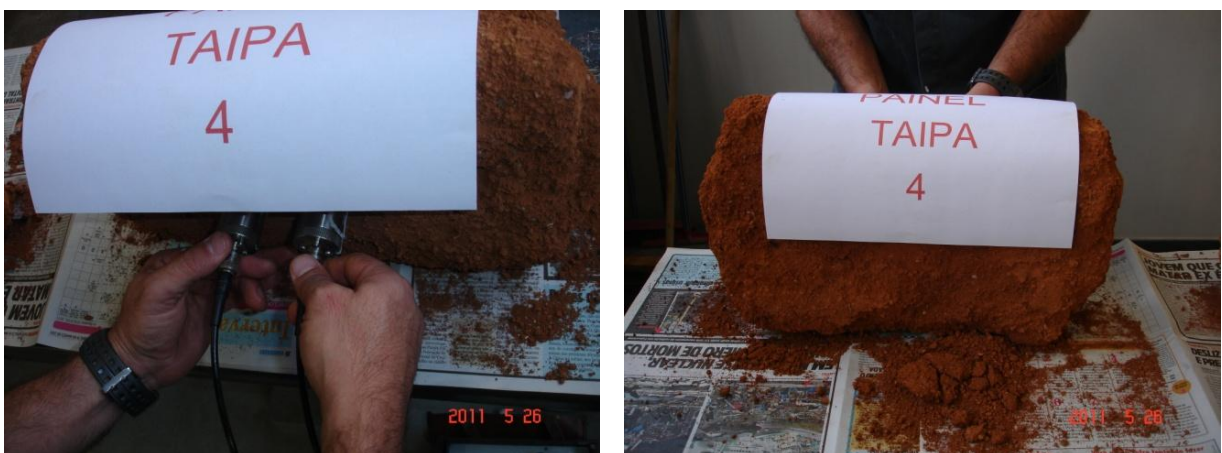
Fonte: Autora

FIGURAS 84 e 85 – Ensaio no corpo de prova do painel 3



Fonte: Autora

FIGURAS 86 e 87 – Ensaio no corpo de prova do painel 4



Fonte: Autora

A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios do ultrassom e o resumo da descrição estatística dos dados tabelados para o painel 1 – painel defeituoso.

TABELA 14

Resultados dos testes do ultrassom no corpo de prova retirado do painel 1

Ponto	Tempo de propagação ($\times 10^{-6}$ seg.)	Velocidade de propagação (km/s)	Velocidade média de propagação (km/s)
Amostra do painel de	126,1	0,40	
taipa 1 – Painel	127,8	0,39	
defeituoso	132,4	0,38	0,38
	125,2	0,40	
	142,4	0,35	
Resumo da Descrição Estatística			
Máximo	142,40	0,40	
Mínimo	125,20	0,35	
Média	130,78	0,384	
Amplitude	17,20	0,05	
Moda	-	0,40	
Desvio - padrão	6,318	0,018	
Variância	39,914	0,000	

Laboratorista responsável pelos ensaios do ultrassom: Marco Aurélio Araújo Morais

Segundo Bandeira (2009), quando o solo se aproxima da condição ótima, ocorre uma diminuição da variação dos parâmetros acima discutidos. A amostra do painel 1, apesar de ter sido construído com teor de umidade acima do desejado para a técnica da taipa, apresenta os seguintes valores de velocidade para os parâmetros discutidos: amplitude 0,05km/s, desvio-padrão 0,018km/s e variância igual a zero.

A Tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios do ultrassom e o resumo da descrição estatística dos dados tabelados para o painel 2.

TABELA 15

Resultados dos testes do ultrassom no corpo de prova retirado do painel 2

Ponto	Tempo de propagação ($\times 10^{-6}$ seg.)	Velocidade de propagação (km/s)	Velocidade média de propagação (km/s)
Amostra do painel de	114,8	0,43	
taipa 2	117,6	0,42	
	129,3	0,39	0,41
	130,1	0,39	
	115,5	0,43	
Resumo da Descrição Estatística			
Máximo	130,1	0,43	
Mínimo	114,8	0,39	
Média	121,46	0,412	
Amplitude	15,3	0,04	
Moda	-	-	
Desvio - padrão	6,795	0,018	
Variância	46,178	0,000	

Laboratorista responsável pelos ensaios do ultrassom: Marco Aurélio Araújo Morais

A amostra do painel 2 apresenta os seguintes valores de velocidade para os parâmetros discutidos: amplitude 0,04km/s, desvio-padrão 0,018km/s e variância igual a zero. Esse painel já foi construído com a terra no estado mais seco. No entanto, ocorre apenas uma pequena variação da amplitude, dos valores aqui destacados, em relação à amostra do painel 1.

A Tabela 16 apresenta os resultados dos ensaios do ultrassom e o resumo da descrição estatística dos dados tabelados para o painel 3.

TABELA 16

Resultados dos testes do ultrassom no corpo de prova retirado do painel 3

Ponto	Tempo de propagação ($\times 10^{-6}$ seg.)	Velocidade de propagação (km/s)	Velocidade média de propagação (km/s)
Amostra do painel de	118,6	0,42	
taipa 3	122,4	0,41	
	119,4	0,42	0,40
	130,8	0,38	
	133,1	0,38	
Resumo da Descrição Estatística			
Máximo	133,1	0,42	
Mínimo	118,6	0,38	
Média	124,86	0,402	
Amplitude	14,5	0,04	
Moda	-	-	
Desvio - padrão	5,97	0,018	
Variância	35,646	0,000	

Laboratorista responsável pelos ensaios do ultrassom: Marco Aurélio Araújo Morais

A amostra do painel 3 apresenta os seguintes valores de velocidade para os parâmetros discutidos: amplitude 0,04km/s, desvio-padrão 0,018km/s e variância igual a zero. Verifica-se que esses valores são idênticos aos da amostra do painel 2.

A Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios do ultrassom e o resumo da descrição estatística dos dados tabelados para o painel 4.

TABELA 17

Resultados dos testes do ultrassom no corpo de prova retirado do painel 4

Ponto	Tempo de propagação ($\times 10^{-6}$ seg.)	Velocidade de propagação (km/s)	Velocidade média de propagação (km/s)
Amostra do painel de	95,8	0,52	
taipa 4	98,3	0,50	
	120,4	0,42	0,46
	118,1	0,42	
	110,3	0,45	
Resumo da Descrição Estatística			
Máximo	120,4	0,52	
Mínimo	95,8	0,42	
Média	108,58	0,462	
Amplitude	24,6	0,1	
Moda	-	0,42	
Desvio - padrão	4,482	0,041	
Variância	20,092	0,002	

Laboratorista responsável pelos ensaios do ultrassom: Marco Aurélio Araújo Morais

A amostra do painel 4 apresenta os seguintes valores de velocidade para os parâmetros discutidos: amplitude 0,1km/s, desvio-padrão 0,041km/s e variância igual a 0,002km/s. Esse painel, assim como os painéis 2 e 3, também foi construído empregando-se terra com baixo teor de umidade. No entanto, nota-se um aumento dos valores que vêm sendo comparados, em relação aos demais painéis, inclusive em relação ao primeiro, que foi compactado com o solo bem úmido.

De acordo com os valores obtidos nos testes de ultrassom dos quatro painéis, verifica-se que os três primeiros demonstram comportamento praticamente igual, embora o painel 1 tenha sido executado em condições bem diversas aos outros dois. E o painel 4, que foi construído com a terra apresentando um teor de umidade mais próximo aos teores dos painéis 2 e 3, exibe diferença muito pequena.

No painel 1, foi verificado o maior tempo médio de propagação e a menor velocidade média de propagação, fatores que podem ser explicados 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, observando-se uma diminuição do tempo e um aumento da velocidade. Já o painel 4, compactado com a terra bem seca, mostra o menor tempo médio de propagação e a maior velocidade de propagação dentre todos. De acordo com esses dados, percebe-se que a umidade apresenta relação diretamente proporcional ao tempo de propagação da onda e inversamente proporcional à velocidade dessa ao percorrer o corpo de prova. No entanto, é necessário ressaltar que as variações demonstradas por esses corpos de prova, apesar de não serem grandes, podem configurar-se como um fator que influencia diretamente esses dados.

4.6 Resultado final

O objetivo principal deste trabalho era o de correlacionar velocidade ultrassônica e resistência mecânica a partir de ensaios em minipainéis em taipa de pilão, verificando a possibilidade de realização desses mesmos testes em estruturas de edificações construídas com o emprego dessa técnica.

Apesar de, na primeira fase deste projeto de pesquisa, a autora Bandeira(2009) ter comprovado uma relação entre resistência e velocidade ultrassônica, na segunda, essa relação não teve como ser verificada devido ao fato de que o único painel no qual o aparelho ultrassom registrou leituras foi o defeituoso, que apresentava um teor de umidade muito acima do considerado ideal para a taipa de pilão. Nos demais painéis, executados com o solo mais seco, portanto em acordo com o que pede a técnica, o aparelho não registrou leituras.

No entanto, nos corpos de prova retirados desses mesmos painéis e, posteriormente, submetidos a testes de ultrassom, foram obtidos resultados válidos.

Portanto, com os resultados obtidos, verificou-se a possibilidade da elaboração de gráficos, com base em equações desenvolvidas a partir dos gráficos de resultado final obtidos na pesquisa da autora Bandeira(2009), na qual ela desenvolve um estudo de correlação entre resistência mecânica e velocidade ultrassônica em materiais terrosos.

TABELA 18
Tensão de ruptura x velocidade ultrassônica

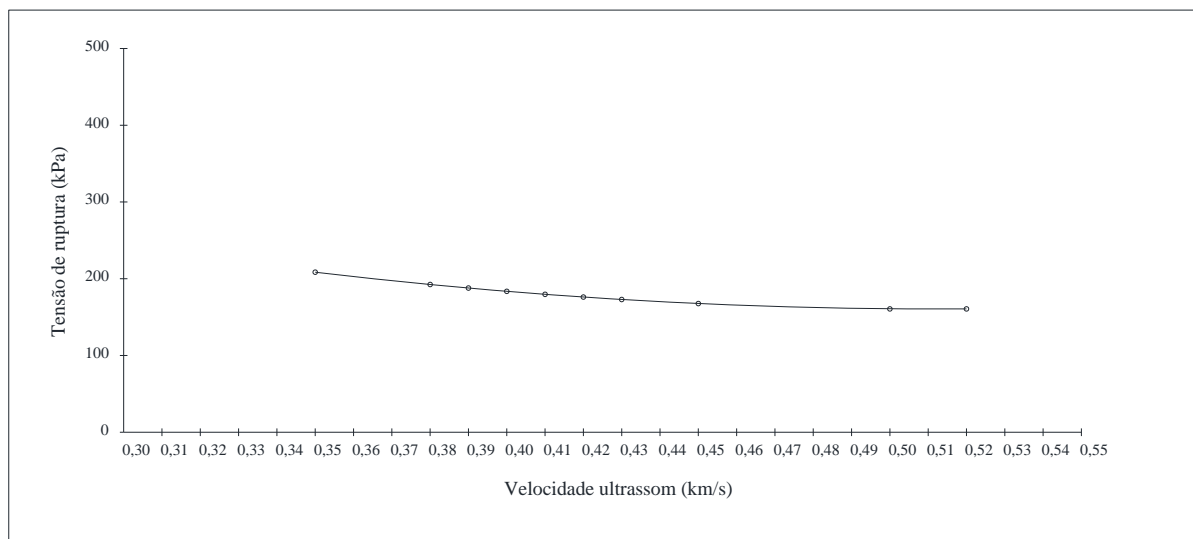
$$y = 1797,6x^2 - 1847x + 634,79$$

Painel 1		Painel 2		Painel 3		Painel 4	
x (km/s)	y (kPa)	x (km/s)	y (kPa)	x (km/s)	y (kPa)	x (km/s)	y (kPa)
0,40	183,61	0,43	172,96	0,42	176,15	0,52	160,42
0,39	187,87	0,42	176,15	0,41	179,70	0,50	160,69
0,38	192,50	0,39	187,87	0,42	176,15	0,42	176,15
0,40	183,61	0,39	187,87	0,38	192,50	0,42	176,15
0,35	208,55	0,43	172,96	0,38	192,50	0,45	167,65

Fonte: BANDEIRA, 2009. p. 74

Adaptado por: Autora

GRÁFICO 1 – Tensão de ruptura x velocidade ultrassônica



Fonte: BANDEIRA, 2009. p. 74

Adaptado por: Autora

O gráfico mostra que as menores velocidades de onda correspondem às maiores tensões de ruptura.

TABELA 19
Velocidade ultrassônica x densidade

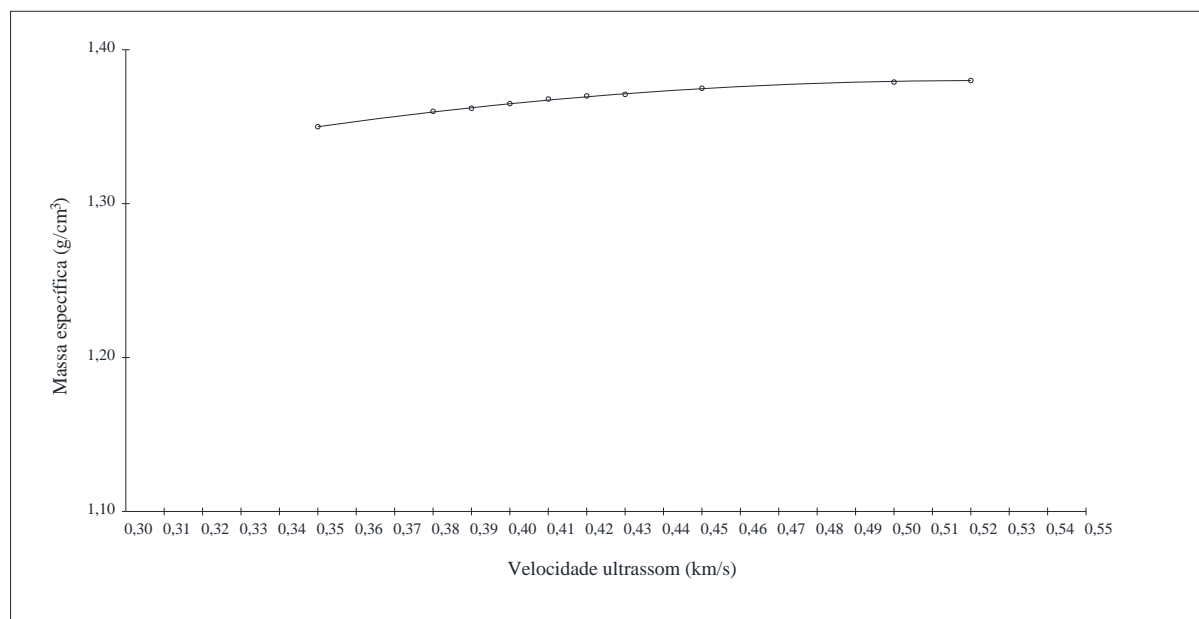
$$y = -1,0352x^2 + 1,0732x + 1,1014$$

Painel 1		Painel 2		Painel 3		Painel 4	
x (km/s)	y (g/cm ³)	x (km/s)	y (g/cm ³)	x (km/s)	y (g/cm ³)	x (km/s)	y (g/cm ³)
0,40	1,365	0,43	1,371	0,42	1,37	0,52	1,38
0,39	1,362	0,42	1,37	0,41	1,367	0,50	1,379
0,38	1,36	0,39	1,362	0,42	1,37	0,42	1,37
0,40	1,365	0,39	1,362	0,38	1,36	0,42	1,37
0,35	1,35	0,43	1,371	0,38	1,36	0,45	1,375

Fonte: BANDEIRA, 2009. p. 74

Adaptado por: Autora

GRÁFICO 2 – Velocidade ultrassônica x densidade



Fonte: BANDEIRA, 2009. p. 74

Adaptado por: Autora

De acordo com o gráfico, verifica-se que, quanto maior a massa específica seca apresentada pelo solo, maiores serão as velocidades de onda.

TABELA 20
Velocidade ultrassônica x teor de umidade

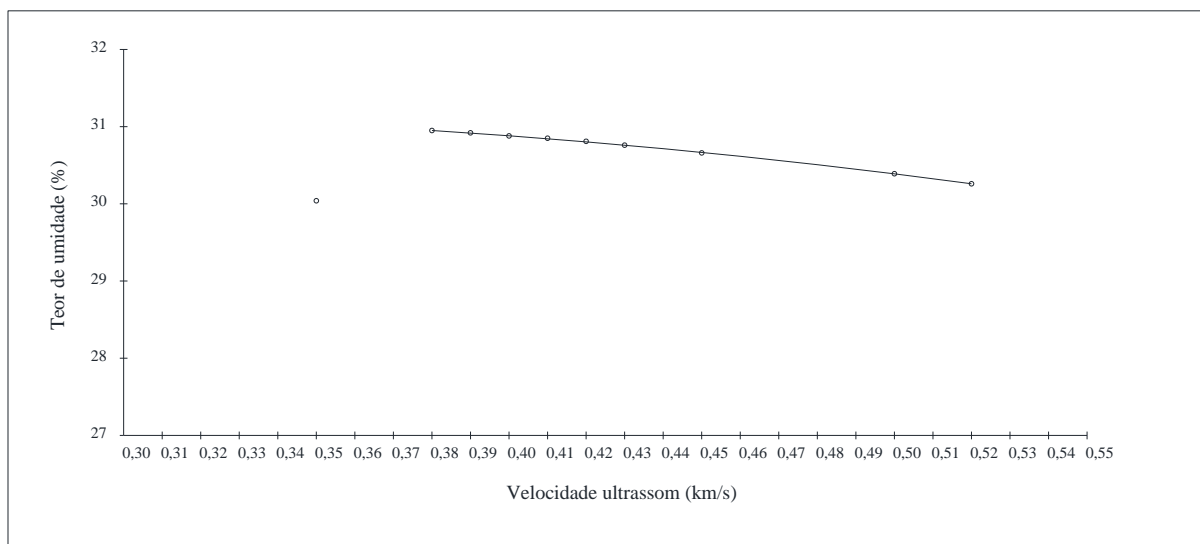
$$y = -12,479x^2 + 6,3151x + 30,354$$

Painel 1		Painel 2		Painel 3		Painel 4	
x (km/s)	y (%)	x (km/s)	y (%)	x (km/s)	y (%)	x (km/s)	y (%)
0,40	30,88	0,43	30,76	0,42	30,81	0,52	30,26
0,39	30,92	0,42	30,81	0,41	30,85	0,50	30,39
0,38	30,95	0,39	30,92	0,42	30,81	0,42	30,81
0,40	30,88	0,39	30,92	0,38	30,95	0,42	30,81
0,35	31,04	0,43	30,76	0,38	30,95	0,45	30,67

Fonte: BANDEIRA, 2009. p. 74

Adaptado por: Autora

GRÁFICO 3 – Velocidade ultrassônica x teor de umidade



Fonte: BANDEIRA, 2009. p. 74

Adaptado por: Autora

Ao analisar o gráfico, verifica-se que as maiores velocidades ocorrem em solos que apresentam menores teores de umidade.

Esses três gráficos apresentados nos resultados finais foram elaborados de acordo com gráficos apresentados por Bandeira (2009). Os gráficos de tensão de ruptura x velocidade ultrassônica e velocidade ultrassônica x densidade não apresentaram curvas semelhantes ao se inserir os valores das medidas dos blocos de taipa na equação desenvolvida a partir dos gráficos originais. Apenas o gráfico teor de umidade x velocidade ultrassônica apresentou curva semelhante ao gráfico original.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação foi elaborada com o objetivo de desenvolver metodologia para realização de testes de ultrassom em painéis de taipa de pilão, possibilitando a verificação da condição em que se encontra uma determinada estrutura nesse material.

Este trabalho está inserido dentro de um projeto de pesquisa. Em sua primeira fase, obteve-se êxito ao correlacionar resistência mecânica e velocidade ultrassônica em corpos de prova feitos em material terroso. Segundo a autora Bandeira (2009), “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”.

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa, há a hipótese de que, pela 2ª fase do projeto de pesquisa ter sido desenvolvida em campo, alguns fatores operacionais podem ter alterado o resultado esperado. A tabela abaixo faz um paralelo entre os ensaios da primeira fase do projeto de pesquisa, realizada em laboratório e a segunda, realizada em campo.

TABELA 21
Laboratório x Campo

Pesquisa		
	Laboratório	Campo
Corpos de prova	Pequeno volume de terra a ser trabalhado Dimensões reduzidas Acabamento em verniz Condições de umidade controladas Massa específica seca conhecida Volume controlado	Grande volume de terra a ser trabalhado Dimensões ampliadas Sem acabamento em verniz Condições de umidade não controladas Massa específica seca não conhecida Volume não controlado
Energia de compactação	92% Proctor normal	68% Proctor normal
Aparelho utilizado	PUNDIT	PUNDIT
Frequências utilizadas	82kHz	82kHz, 150kHz e 200kHz

Fonte: BANDEIRA (2009); GOMES (2011); Autora⁹

⁹ Fonte das informações da TABELA 21: BANDEIRA (2009) e prof. Dr. Abdias M. Gomes, sendo cedidas durante o desenvolvimento da pesquisa e dados produzidos pela própria autora, durante os trabalhos da pesquisa.

FIGURA 88 – Corpo de prova produzido em laboratório durante a primeira etapa do projeto de pesquisa desenvolvido pela autora Bandeira (2009)



Fonte: BANDEIRA, 2009, p. 53.

Alguns fatores que podem ter contribuído para o aparelho de ultrassom não registrar leituras:

- O tipo de solo escolhido não foi apropriado, apresentando porcentagens de silte e argila superiores ao recomendado;
- A forma de estocagem do solo (estocado em montes, coronamento excessivo);
- Tipo de fôrma escolhido (fôrma para concreto);
- Instrumento de compactação inadequado;
- Mão de obra não especializada;
- Transdutor utilizado (82kHz, 150kHz e 200kHz);
- Range de leitura do equipamento (0-999)

Apesar do resultado, ainda é cedo para se descartar totalmente a possibilidade do uso do ultrassom para a verificação de patologias em estruturas em terra.

Futuramente, algumas ações podem ser realizadas na tentativa de se verificar se a metodologia aplicada em concretos poderá ser transferida para as estruturas em terra, tais como:

- Alterar a forma de estocagem do solo, espalhando um pouco mais a terra;

- Escolha de um solo mais adequado, com percentuais de argila e silte menores, obedecendo a recomendações previamente estabelecidas por outros pesquisadores;
- Empregar mão de obra especializada na compactação das paredes (taipeiro);
- Utilizar o taipal clássico na execução das paredes, embora esse possa produzir paredes com rugosidade maior. O ideal é o uso do taipal construído com tábuas de maior espessura, contando com o cabodá, peça essencial para o travamento da fôrma, tornado-a mais resistente aos esforços produzidos durante a compactação ;
- Fazer uso do pilão tradicional, de forma mais cônica e os cantos da base arredondados;
- Utilizar transdutor com frequência de 500kHz, devido ao volume maior de terra a ser submetido ao teste do ultrassom;
- Usar gel acoplante de melhor qualidade durante a realização dos testes. Ex.: gel de ultrassonografia;
- Utilizar aparelho com range de leitura maior ou o próprio equipamento disponível conectado ao osciloscópio, instrumento de medida eletrônico, que amplifica as ondas, auxilia na medição de diferenças de potencial a partir da criação de gráficos bidimensionais, viabilizando o registro de leituras que o range do equipamento ultrassom usado não conseguiu registrar.

Portanto, é necessária a continuação dos estudos relacionados à aplicação de ensaios de ultrassom em estruturas de taipa de pilão.

REFERÊNCIAS

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

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.

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

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

DJERBIB, Youcef; HALL Matthew. Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18, p. 281-286, 2004. Disponível em www.elsevier.com/locate/conbuildmat. Acesso em 02/06/2009.

D'ORAZIO, T. et al. Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials, *NDT&E Internacional*, p. 145-154, 2007. Disponível em www.elsevier.com/locate/ndteint. Acesso em 02/06/2009.

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.

FRISTENSKY, A; GRISMER, M.E. A simultaneous model for ultrasonic aggregate stability assessment. *Catena*, 74, p. 153-164, 2008. Disponível em www.elsevier.com/locate/catena. Acesso em 02/06/2009.

GROUT, Helene; TARQUIS, Ana M.; WIESNER, Mark R. Multifractal Analysis of Particle Size Distributions in Soil. *Environmental Science & Technology*, v. 32, n. 9, p. 1176-1182, 1998.

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

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

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.

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.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. *Gráfico Índice de Plasticidade x Limite de Liquidez*. Salvador, 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.

PUNDIT, London, CNS Electronics Ltd. 1994. 37p.

QASRAWI, H.Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply e reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 739-746, 2000.

RÉUNION Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux – RILEM, NDT 1 – *Testing of concrete by the ultrasonic pulse method*. França, p. 43-49, 1972.

REZENDE, M.A.P & RODRIGUES, R – *Projeto Piloto*. Avaliação da Integridade Mecânica em Painéis de Taipa de Pilão Utilizando a Técnica do Ultra-som. 2007. 22f. Projeto de pesquisa (Mestrado em Ambiente Construído Patrimônio Sustentável) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, M.G., 2009.

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

TEIXEIRA, Amanda Rocha. *Metodologia para determinação da integridade da madeira de edificações históricas por meio de pulsos ultra-sônicos*. 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/dspace/handle/1843/PASA-875KH5>. Acesso em 16/06/2011.

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.

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

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 www.elsevier.com/locate/coldregions. Acesso em 02/06/2009.

Y, Li. et al. Single and Joint Multifractal Analysis of Soil Particle Size Distributions. *Pedosphere*, 21(1), p.75-83, 2010. Disponível em www.elsevier.com/locate/pedosphere. Acesso em 20/01/2010.

YESILLER, Nazli. et al. Ultrasonic Assessment of Stabilized Soils. *Soft Ground Technology*, p. 170-181, 2000. Disponível em www.ascelibrary.org. Acesso em 02/06/2009.

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 02/06/2009.

ANEXOS

ANEXO A – Ensaios de caracterização do solo – Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG



Massa Específica dos Grãos			Amostra nº:		
IT - 002			Início do Ensaio:		
			Término do Ensaio:		
Determinação nº	1	2	3	4	5
Picnômetro nº	16	12A	20	16	
$M_{\text{picnômetro}} = M_2$ (g)	703,51	686,23	713,62	704,08	
Temperatura - T (°C)	28,0	27,5	27,5	27,0	
$M_{\text{picnômetro}} \text{ a } T^{\circ}\text{C} = M_1$ (g)	673,27	656,03	683,49	673,27	
$\rho_w \text{ a } T^{\circ}\text{C}$ (g/cm ³)	0,9963	0,9964	0,9964	0,9965	
$M_{\text{picnômetro}}$ (g)	302,81	256,65	312,99	256,35	
$M_{\text{picnômetro}}$ (g)	254,95	208,86	265,19	208,60	
M_s (g)	47,86	47,79	47,80	47,75	
ρ_s (g/cm ³)	2,71	2,71	2,70	2,81	
Utilizar valor na média (s/n)	s	s	s	n	
ρ_s (para compor a média) (g/cm ³)	2,71	2,71	2,70	n utilizado	
ρ_s (médio) (g/cm ³)	2,70				

Teor de umidade do material

Determinação Nº	1	2	3	4	5
Cápsula Nº	181	138	178	21	195
$M_{\text{cápsula+w}}$ (g)	52,14	53,02	60,45	49,83	61,56
$M_{\text{cápsula}}$ (g)	50,90	51,71	58,92	48,52	60,03
M_c (g)	24,98	24,64	25,17	19,14	25,87
M_s (g)	25,92	27,07	33,75	29,38	34,16
M_w (g)	1,24	1,31	1,53	1,31	1,53
w (%)	4,8%	4,8%	4,5%	4,5%	4,5%
Utilizar valor na média (s/n)	s	s	s	s	s
w (para compor a média) (%)	4,8%	4,8%	4,5%	4,5%	4,5%
$w_{\text{médio}}$ (%)	4,8%				

Controle da massa de solo no picnômetro

M (no início do ensaio)	50,00				
M_s (calculado)	47,79				
Desvio entre a massa calculada para real:	0,14%	0,00%	0,02%	-0,09%	#VALORE
Método de secagem da amostra: Estufa	Método de remoção de ar: Bomba Vácuo				
<p>Considerar os ensaios satisfatórios quando os seus resultados não diferirem mais que 0,02 g/cm³.</p> <p>O resultado final é a média obtida de pelo menos dois ensaios considerados satisfatórios</p> <p>Deve ser expresso com três algarismos significativos em g/cm³.</p> <p>A massa de solo seco é obtida;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Antes Calculada com M e w, antes do ensaio. - Depois Obtida após a secagem do material do picnômetro no final do ensaio. 			$\rho_s = \frac{M_s}{M_1 - M_2 + M_s} \times \rho_w$ $w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \%$		
			Obs:		
			Solo dos painéis taipa de pilão		
			Operador: Denis Kiyoshi Furusho		



Limite de Liquidez - LL (Casagrande) Limite de Plasticidade - LP

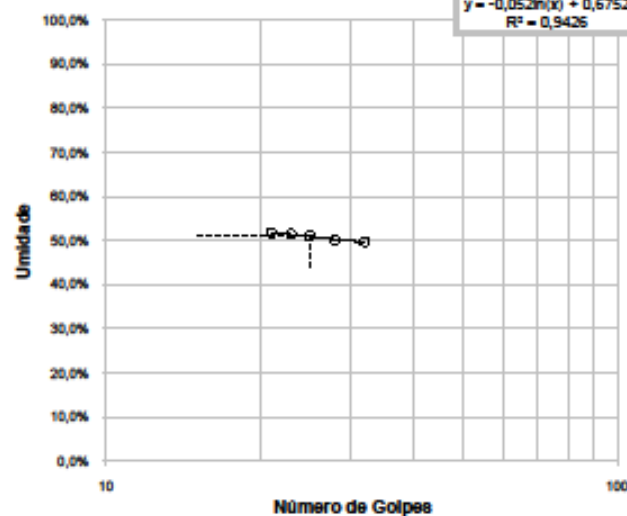
IT - 004 / IT - 006

Amostra nº:	sete lagoas
Início do Ensaio:	2/4/11
Término do Ensaio:	2/4/11

Limite de Liquidez

Determinação	1	2	3	4	5	6	7
Cápsula N°	228	338	552	338	445	334	339
M _{úmida} (g)	24,02	27,16	24,45	23,49	25,67	22,32	24,31
M _{seca} (g)	21,60	24,13	22,36	21,01	23,17	19,81	21,88
M _c (g)	16,86	18,07	18,09	16,11	18,15	14,96	17,16
M _s (g)	4,74	6,08	4,27	4,90	5,02	4,85	4,72
M _w (g)	2,42	3,03	2,09	2,48	2,50	2,51	2,43
w (%)	51,1%	50,0%	48,9%	50,6%	49,8%	51,8%	51,5%
Número de Golpes	25	28	29	22	32	21	23
Utilizar valor (s/n)	s	s	n	n	s	s	s

51,1% 25



Resultados do Ensaio

Equação da Retra: $w = a \ln(N) + b$

a = -0,0516

b = 0,6752

Dados Satisfatórios (s/n): s

LL = 51%

Limite de Liquidez

O número de golpes deve estar compreendido entre 15 e 35;

O gráfico é traçado com pelo menos 5 (cinco) pontos.

Limite de Plasticidade

O resultado final é a média de pelo menos três valores de umidade considerados satisfatórios;

O valor da umidade é considerado satisfatório quando não diferir mais de 5% da média.

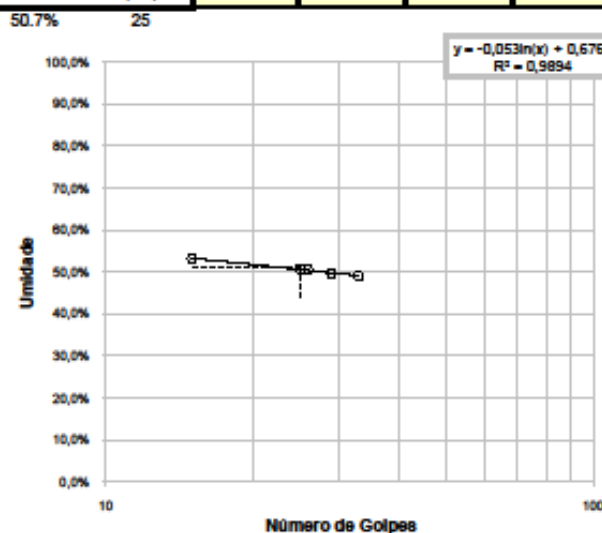
Determinação	1	2	3	4	5	6	
Cápsula N°	(-)	82	124	4	118	55	93
M _{úmida} (g)		17,54	16,55	20,15	17,10	20,87	20,10
M _{seca} (g)		17,32	16,25	19,82	16,63	20,57	19,79
M _c (g)		16,73	15,44	18,89	15,34	19,63	18,84
M _s (g)		0,59	0,81	0,83	1,29	0,94	0,95
M _w (g)		0,22	0,30	0,33	0,47	0,30	0,31
w (%)		37,3%	37,0%	35,5%	36,4%	31,9%	32,6%
Utilizar valor na média (s/n)		s	s	s	s	n	n
w (para compor a média) (%)		37,3%	37,0%	35,5%	36,4%	ñ utilizado	ñ utilizado
LP (médio) (%)		37%					
RESUMO		LL= 51%	LP= 37%	IP= 14%			
Obs:	secagem das amostras em estufa a 110°C					Operador: Denis Kiyoshi Furusho	

Limite de Liquidez - LL (Casagrande)
Limite de Plasticidade - LP
 IT - 004 / IT - 006

Amostra nº:	sete lagoas
Início do Ensaio:	2/4/11
Término do Ensaio:	2/4/11

Limite de Liquidez

Determinação	1	2	3	4	5	6	7
Cápsula Nº	550	666	440	335	449	331	555
M_{otensw} (g)	25,82	25,38	19,75	22,06	20,90	26,66	24,85
M_{ota} (g)	23,31	22,52	16,83	19,76	18,82	23,71	21,71
M_c (g)	18,36	16,87	10,95	15,28	14,80	17,69	15,81
M_b (g)	4,95	5,65	5,88	4,48	4,02	6,02	5,90
M_w (g)	2,51	2,86	2,92	2,30	2,08	2,95	3,14
w (%)	50,7%	50,6%	49,7%	51,3%	51,7%	49,0%	53,2%
Número de Golpes	25	26	29	28	27	33	15
Utilizar valor (s/n)	s	s	s	n	n	s	s



Resultados do Ensaio

Equação da Retra: $w = a \ln(N) + b$

$a = -0,0531$

$b = 0,6769$

Jados Satisfatórios (s/n): s

LL = 51%

Limite de Plasticidade

O número de golpes deve estar compreendido entre 15 e 35;

O gráfico é traçado com pelo menos 5 (cinco) pontos.

Limite de plasticidade

O resultado final é a média de pelo menos três valores de umidade considerados satisfatórios;

O valor da umidade é considerado satisfatório quando não diferir mais de 5% da média.

Determinação	1	2	3	4	5	6
Cápsula Nº	(-)	96	342	343	77	16
M_{otensw} (g)		19,36	12,77	13,00	19,95	20,59
M_{ota} (g)		19,15	12,52	12,71	19,88	20,28
M_c (g)		18,53	11,79	11,89	18,88	19,39
M_b (g)		0,62	0,73	0,82	0,80	0,89
M_w (g)		0,21	0,25	0,29	0,27	0,31
w (%)		33,9%	34,2%	35,4%	33,7%	34,8%
Utilizar valor na média (s/n)		s	s	s	s	n
w (para compor a média) (%)		33,9%	34,2%	35,4%	33,7%	34,8%
LP (médio) (%)		34%				
RESUMO		LL= 51%	LP= 34%	IP= 17%		
Obs:	secagem das amostras em estufa a 110°C					Operador: Denis Kiyoshi Furusho

ANEXO B – Ensaios de compactação e caracterização do solo – Laboratório ViaTest

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Solo - Ensaio de Compactação - NBR 7182/1986			
Interessado:	Professor Abdias	Material:	Cascalho argiloso
Obra:		Furo:	
Trecho:		Prof.:	
		Data:	26/5/2011
		Amostra:	1
		Registro:	160/2011

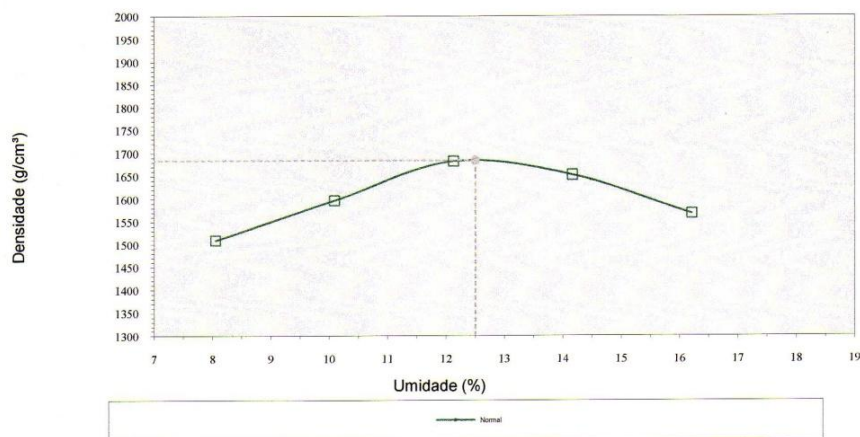
UMIDADE HIGROSCÓPICA		
Cápsula:	51	52
Peso da Cápsula (g):	49,30	46,26
Cáp + solo + água (g):	263,96	329,68
Cápsula + solo (g):	260,11	324,00
Água (g):	3,85	5,68
Solo seco (g):	210,81	277,74
Umidade (%):	1,8	2,0
Média:	1,9	

AMOSTRA
Peso da amostra úmida (g):
2500,0
Peso da amostra seca (g):
2452,5
% retida na peneira nº 4
20,3

CARACTERÍSTICAS
Energia de compactação:
Normal
Cilindro:
<input checked="" type="checkbox"/> Proctor <input type="checkbox"/> CBR

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	CILINDRO			Peso Amostra + Tara (g)	Densidade Úmida (g/dm³)	Água Adicionada (%)	Resultados	
	Número	Tara (g)	Volume (dm³)				Umidade (%)	Densidade (kg/m³)
	2	1890	1018				3550	1631
3	1845	1018	3635	1758	8,0	10,1	1597	
1	1890	1018	3810	1886	10,0	12,1	1682	
2	1890	1018	3810	1886	12,0	14,2	1652	
3	1845	1018	3700	1822	14,0	16,2	1568	
Densidade Máxima	1684							
Umidade Ótima	12,5							

CURVA DE COMPACTAÇÃO



Belo Horizonte, 26 de maio de 2011

Laboratorista responsável: Alysso G.santos



VIATEST - Indústria e Comércio de Equipamentos Ltda.
 Rua Guimarães, 899 - bairro São Francisco - Belo Horizonte - MG
 Tel: 31-3492-9514 - 31-3441-1883 - 3491-8155 - Fax: 3441-8714

LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - MASSA ESPECÍFICA - EQUIVALENTE DE AREIA



INTERESSADO: **Professor Abdias**

OBRA:

TRECHO:

SUB-TRECHO:

FIRMA:

FASE:

Registro **162**

Amostra: **1**

Estaca:

Furo:

Início: **26/5/2011**

Fim:

27/5/2011

UMIDADE HIGROSCÓPICA		
Cápsula Nº	1	2
Cáp. + solo + água g	78,38	76,33
Cáp. + solo g	71,46	69,55
Água g	6,92	6,78
Peso da Cápsula g	16,44	16,39
Solo g	55,02	53,16
Umidade %	12,6	12,8
MEDIA	12,7	

AMOSTRA TOTAL SECA	
Amostra total úmida g	1000,00
Pedregulho g	153,31
Passando # 10 úmida g	846,69
Água g	95,18
Passando # 10 seca g	751,51
Amostra total seca - P ₁ g	904,82
K ₁ = 1/P ₁	

PENEIRAÇÃO DA AMOSTRA TOTAL

PENEIRAS A S T M	ABERTURA EM mm	MATERIAL RETIDO			PORC. QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL
		Peso g	Porc. Amostra Parc.	Porc. Acumulada	
1 1/2"	38,1	0,00	0,0	0,0	100,0
1	25,4	0,00	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,1	0,00	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5	26,72	3,0	3,0	97,0
4	4,8	47,49	5,2	8,2	91,8
10	2,0	79,10	8,7	16,9	83,1

PENEIRAÇÃO DA AMOSTRA PARCIAL

PESO DA AMOSTRA PARCIAL ÚMIDA (g): 200,00		PESO DA AMOSTRA PARCIAL SECA P ₂ (g): 177,52			K = % Passa # 10 = g	
PENEIRAS A S T M	ABERTURA EM mm	MATERIAL RETIDO			PORC. QUE PASSA DA AMOSTRA PARCIAL	PORC. QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL
		Peso g	Porc. Amostra Parc.	Porc. Acumulada		
Nº 40	0,42	13,07	7,4	7,4	92,6	76,9
Nº 200	0,072	12,49	7,0	14,4	85,6	71,1

a/b =

EQUIVALENTE DE AREIA		
Proveia Nº		
Topo da Argila		
Ascensão		
Constante		
Topo da Areia		
E A		
MÉDIA		

MASSA ESPECÍFICA REAL	
Temperatura °C	
Picnômetro Nº	
Picnômetro + água	
Picnô. + solo + água	
Solo	
Água deslocada	
Massa específica real	

ANEXO C – Testes de ultrassom dos corpos de prova

Testes do ultrassom – painel 1

Ponto	Tempo de propagação (x10 ⁻⁶ seg.)	Velocidade de propagação (km/s)	Velocidade média de propagação (km/s)
Amostra do painel de taipa 1 – Painel defeituoso	126,1	0,40	0,38
	127,8	0,39	
	132,4	0,38	
	125,2	0,40	
	142,4	0,35	

Laboratorista responsável pelos ensaios do ultrassom: Marco Aurélio Araújo Morais

Testes do ultrassom – painel 2

Ponto	Tempo de propagação (x10 ⁻⁶ seg.)	Velocidade de propagação (km/s)	Velocidade média de propagação (km/s)
Amostra do painel de taipa 2	114,8	0,43	0,41
	117,6	0,42	
	129,3	0,39	
	130,1	0,39	
	115,5	0,43	

Laboratorista responsável pelos ensaios do ultrassom: Marco Aurélio Araújo Morais

Testes do ultrassom – painel 3

Ponto	Tempo de propagação (x10 ⁻⁶ seg.)	Velocidade de propagação (km/s)	Velocidade média de propagação (km/s)
Amostra do painel de taipa 3	118,6	0,42	0,40
	122,4	0,41	
	119,4	0,42	
	130,8	0,38	
	133,1	0,38	

Laboratorista responsável pelos ensaios do ultrassom: Marco Aurélio Araújo Morais

Testes do ultrassom – painel 4

Ponto	Tempo de propagação (x10 ⁻⁶ seg.)	Velocidade de propagação (km/s)	Velocidade média de propagação (km/s)
Amostra do painel de taipa 4	95,8	0,52	
	98,3	0,50	
	120,4	0,42	0,46
	118,1	0,42	
	110,3	0,45	

Laboratorista responsável pelos ensaios do ultrassom: Marco Aurélio Araújo Morais