

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL**

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE  
RESISTÊNCIA MECÂNICA E  
VELOCIDADE ULTRASSÔNICA  
PARA UM MATERIAL TERROSO**

**ROSINETE FERNANDES BANDEIRA**

BELO HORIZONTE  
2009

**ROSINETE FERNANDES BANDEIRA**

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE  
RESISTÊNCIA MECÂNICA E VELOCIDADE  
ULTRASSÔNICA PARA UM MATERIAL TERROSO**

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.

Orientador: Prof. Marco Antonio Penido de Rezende

Coorientador: Abdias Magalhães Gomes.

Escola de Arquitetura  
Belo Horizonte  
2009

**ROSINETE FERNANDES BANDEIRA**

ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA MECÂNICA E VELOCIDADE  
ULTRASSÔNICA PARA UM MATERIAL TERROSO.

Belo Horizonte, ...11... de .....maio..... de 2009.

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. DSc Mário Mendonça de Oliveira – (UFBA).

---

Prof. DSc Judy Norka Rodo Mantilha – (EEUFMG)

---

Prof. DSc Marco Antonio Penido de Rezende – Orientador (EAUFMG)

---

Prof. DSc Abdias Magalhães Gomes – Coorientador (EEUFMG)

Ao Senhor Jesus,  
por estar presente em todos os momentos da minha vida  
e pela certeza de que somente Ele  
pode ser verdadeiramente reconhecido como o Consolador,  
Conselheiro e Príncipe da Paz.

Ao Prof. Abdias Borges Magalhães,  
por me lembrar que ainda temos profissionais  
que são dignos de serem chamados de Educadores neste país.

Ao Prof. Marco Antônio Penido de Rezende,  
pela leveza e paciência.

Ao amigo Ezequiel, o “*Oleiro*”,  
pela perfeição da moldagem dos corpos de prova.

Para mim, você é como Jeremias 18:6 fala:

*“...Como o barro na mão do oleiro,  
assim sois vós na minha mão, ó casa de Israel”.*

Assim foi o barro na sua mão, perfeitamente moldado.

Ao amigo, esposo e educador, Paulo Augusto,  
pela dedicação de sempre estar pronto a ajudar  
e nunca medir esforços para ensinar.

Obrigada pela sua paciência.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao CEFET-Goiás, por sempre acreditar e respeitar os seus servidores que buscam o conhecimento.

Aos Macgyver's do Laboratório de Geotecnia da UFMG.

À minha mãe e ao meu pai (in memoriam), pelo esforço e credibilidade na minha formação educacional.

Aos amigos da Escola de Arquitetura, em especial a Marilene e Waltinho.

*“Pois em parte conhecemos e em parte profetizamos”* ou entendemos.

I Coríntios 13:9

## RESUMO

Esta dissertação apresenta os estudos sobre a verificação da aplicabilidade do ultrassom como método de avaliação não-destrutiva das condições estruturais de terra destinada à confecção da taipa de pilão. Para tal, definiu-se como proposta da utilização do método não-destrutivo, o ultrassom, na verificação da correlação da resistência mecânica do material terroso e a propagação da velocidade ultrassônica. O objetivo deste trabalho foi verificar a existência da correlação entre a resistência à compressão simples de um material terroso (solo) e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, empregando-se o método do ultrassom. A fim de alcançar o objetivo proposto, estrategicamente desenvolveu-se o trabalho em dois eixos. Um eixo se empenhou em fazer testes geotécnicos, tais como: caracterização, compactação e compressão simples, para entender o comportamento do material. E outro se dedicou a utilizar o ultrassom para verificar a correlação entre a propagação da velocidade ultrassônica e a resistência do material (tensão *versus* deformação). Deseja-se que os estudos realizados sirvam de elementos de orientação para elaboração de um protocolo metodológico capaz de avaliar a integridade mecânica de estruturas de terra a partir do emprego do ultrassom.

**Palavras-chave:** Ultrassom. Avaliação não-destrutiva. Taipa de pilão. Velocidade ultrassônica. Compressão simples.

## ABSTRACT

This dissertation presents the studies carried out on the applicability of ultrasound as a non-destructive evaluation method of the structural conditions of earth structures designed to building rammed earth. To this purpose the ultrasound was defined as a proposal for utilization of a non-destructive method on the evaluation of the relation of earthy material mechanical resistance and the propagation of the ultrasonic velocity. This paper purpose was to check the existence of the co-relation between the resistance to the compression strength of an earthy material (soil) and the velocity of the ultrasonic wave, applying the ultrasound method. To accomplish the proposed objective, the work was developed strategically into two axis. One axis was engaged in doing geotechnical tests, such as: characterization, compacting and regular compression, in order to understand the material behavior. The other was designed to use the ultrasound to check the co-relation between the propagation of the ultrasonic velocity and the material resistance (tension *versus* deformation). The conclusion: there is strong relation between the rupture tension and the velocity of the ultrasonic wave propagation. May these studies carried out be the orientation elements for elaboration of a methodologic protocol able to evaluate the earth structures mechanical integrity through the ultrasound application.

**Key-words:** Ultrasound. Non-destructive evaluation. Rammed earth. Ultrasonic velocity. Compression strength.

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> .....	<b>57</b>
<b>Resumo da caracterização do solo</b> .....	<b>57</b>
<b>TABELA 2</b> .....	<b>61</b>
<b>Limites inferiores e superiores admissíveis para os pontos do estudo</b> .....	<b>61</b>
<b>TABELA 3</b> .....	<b>64</b>
<b>Resumo dos resultados do ensaio de resistência e ultrassom (Ponto 2)</b> .....	<b>64</b>
<b>TABELA 4</b> .....	<b>67</b>
<b>Resumo dos resultados do ensaio de resistência e ultrassom (Ponto 3)</b> .....	<b>67</b>
<b>TABELA 5</b> .....	<b>69</b>
<b>Resumo dos resultados do ensaio de resistência e ultrassom (Ponto 4)</b> .....	<b>69</b>
<b>TABELA 6</b> .....	<b>74</b>
<b>Intervalos dos valores representativos</b> .....	<b>74</b>

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 .....	25
Classificação granulométrica brasileira (ABNT, 1995).....	25
QUADRO 2 .....	29
Classificação quanto ao índice de plasticidade (Vargas, 1981).....	29
QUADRO 3 .....	29
Classificação quanto ao índice de liquidez (Vargas, 1981).....	29
QUADRO 4 .....	29
Classificação quanto ao índice de contração (Vargas, 1981) .....	29
QUADRO 5 .....	37
Classificação da qualidade entre resistência e velocidade ultrassônica (Almeida, 1993) .....	37
QUADRO 6 .....	42
Comparação entre procedimentos de normas para ensaio de ultrassom .....	42
QUADRO 7 .....	46
Escolha da frequência natural do transdutor RILEM NTD 1 (1972).....	46

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Distribuição granulométrica do solo .....	58
GRÁFICO 2 – Curva de compactação do solo .....	59
GRÁFICO 3 – Identificação dos pontos para o estudo de correlação .....	59
GRÁFICO 4 – Amostragem inicial .....	60
GRÁFICO 5 – Exemplares com características de moldagem válidas – Ponto 2 .....	62
GRÁFICO 6 – Exemplares com características de moldagem válidas – Ponto 3 .....	62
GRÁFICO 7 – Exemplares com características de moldagem válidas – Ponto 4 .....	63
GRÁFICO 8 – Tensão x deformação (Ponto 2 – exemplar 2.23).....	64
GRÁFICO 9 – Resistência de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 2) .....	66
GRÁFICO 10 – Tensão x deformação (Ponto 3 – exemplar 3.24).....	67
GRÁFICO 11 – Resistência de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 3) .....	69
GRÁFICO 12 – Tensão x deformação (Ponto 4 – exemplar 4.21).....	71
GRÁFICO 13 – Resistência de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 4) .....	72
GRÁFICO 14 – Tensão de ruptura x velocidade ultrassônica – Pontos 2, 3 e 4 .....	73
GRÁFICO 15 – Velocidade x densidade (a) e velocidade x teor de umidade (b) .....	73
GRÁFICO 16 – Tensão de ruptura x densidade (a) e tensão de ruptura x teor de umidade (b).....	74
GRÁFICO 17 – Resultado final: curva de compactação (a); curva de resistência (b); e curva de velocidade ultrassônica (c) .....	75

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Principais técnicas de terra crua .....	20
FIGURA 2 – Técnicas construtivas com terra .....	23
FIGURA 3 – Diagrama de fase do sistema solo, em termos de massa e volume .....	24
Fonte: autora.....	24
FIGURA 4 – Estados de consistência do solo .....	26
Fonte: autora.....	26
FIGURA 5 – Curva de distribuição granulométrica .....	27
Fonte: autora.....	27
FIGURA 6 – Exemplo de gráfico do limite de liquidez .....	28
FIGURA 7 – Curva de compactação típica .....	30
FIGURA 8 – Curvas de compactação de um solo com diferentes energias .....	31
FIGURA 9 – Correlação entre tensão cisalhante e tensão normal.....	32
Fonte: autora.....	32
FIGURA 10 – Representação gráfica do ensaio de compressão simples .....	33
Fonte: autora.....	33
FIGURA 11 – Modos de rupturas: cisalhamento simples (a) e cisalhamento generalizado (b).....	34
Fonte: adaptado de Vargas (1981) .....	34
FIGURA 12 – Curva de compactação x curva de resistência .....	35
FIGURA 13 – Aparelho típico de ultrassom .....	38
Fonte: adaptado Almeida (1993).....	38
FIGURA 14 – Funcionamento do ultrassom.....	39
Fonte: adaptado Ferreira (2003).....	39
FIGURA 15 – Modos de transmissão dos pulsos .....	40
Fonte: adaptado ABNT NBR 8802 (1994) .....	40
FIGURA 16 – Campo de audibilidade das vibrações mecânicas .....	40
Fonte: autora.....	40
FIGURA 17 – Localização da coleta da amostragem.....	48
FIGURA 18 – Detalhe da operação da moldagem (a) e corpo de prova (b) .....	52
Fotos: autora .....	52
FIGURA 19 – Equipamento para o ensaio de compressão simples. Prensa mecânica, (a) anel dinamométrico (b) e extensômetro (c) .....	53
Fotos: autora.....	53
FIGURA 20 – Visão geral do apparatus (a) e detalhe da superfície de ruptura do corpo de prova (b).....	53
FIGURA 21 – Equipamento PUNDIT .....	54
Fotos: autora .....	54
FIGURA 22 – Calibração do equipamento do ultrassom .....	55
Fotos: autora.....	55
FIGURA 23 – Operação para determinar o tempo de propagação de ondas ultrassônicas em corpos de prova de material terroso .....	56
Fotos: autora .....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS

$\mu$	Coeficiente de Poisson dinâmico
$\phi$	Ângulo de atrito do material ao longo da superfície de ruptura
$\gamma$	Massa específica do solo
$\tau$	Tensão cisalhante
$\sigma$	Tensão de ruptura
$\varepsilon$	Deformação
$\Delta\varepsilon$	Variação da deformação linear
$\Delta\sigma$	Variação de tensão para um intervalo adotado
$\varepsilon(\gamma)$	Erro relativo da massa específica seca
$\varepsilon(h)$	Erros relativos referentes ao teor de umidade
$\gamma_0$	Massa específica seca desejada
$\gamma_i$	Massa específica seca do corpo de prova
$\gamma_s$	Massa específica seca
$\mu s$	Mícron por segundo
$\gamma_s \text{ máx}$	Massa específica seca máxima
<b>a</b>	Amplitude
<b>A<sub>0</sub></b>	Área inicial do copo de prova
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ASMT</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>BS</b>	<i>British Standards Institution</i>
<b>C</b>	Coesão ao longo do plano de ruptura
<b>CRATERre</b>	<i>Centre International de la Construction en terre</i>
<b>d</b>	Comprimento do corpo
<b>Dp</b>	Desvio-padrão
<b>e</b>	Índice de vazios
<b>E</b>	Módulo de elasticidade
<b>Embrapa</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>F</b>	Carga

aplicada

<b>f</b>	Frequência da onda de ultrassom
<b>f<sub>c</sub></b>	Resistência à compressão do concreto
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gramas por centímetro cúbico
<b>h</b>	Teor de umidade
<b>h<sub>0</sub></b>	Teor de umidade desejado;
<b>h<sub>i</sub></b>	Teor de umidade do corpo de prova
<b>h<sub>ótima</sub></b>	Teor de umidade ótima
<b>Hz</b>	Hertz
<b>IP</b>	Índice de plasticidade
<b>kPa</b>	Quilo Pascal
<b>l<sub>0</sub></b>	Comprimento original antes de qualquer carga ser aplicada
<b>LC</b>	Limite de contração
<b>l<sub>i</sub></b>	Comprimento do corpo de prova depois da aplicação da carga
<b>LL</b>	Limite de liquidez
<b>LP</b>	Limite de plasticidade
<b>M<sub>ar</sub></b>	Massa do ar
<b>MPa</b>	Mega pascal
<b>M<sub>s</sub></b>	Massa dos sólidos
<b>M<sub>t</sub></b>	Massa total
<b>M<sub>w</sub></b>	Massa da água
<b>NBR</b>	Normas brasileiras
<b>NDT</b>	<i>Non-Destructive Testing</i>
<b>NM</b>	<i>Comité Mercosur de Normalización</i>
<b>PUNDIT</b>	<i>Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester</i>
<b>r<sup>2</sup></b>	Coeficiente de correlação
<b>RILEM</b>	<i>Rèunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>

$S$	Grau de saturação
$T$	Período
$t$	Tempo
<b>UFMG</b>	Universidade Federal de Minas Gerais
$v$	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas
$V_{ar}$	Volume do ar
$V_f$	Volume final do solo seco
$V_t$	Volume total
$V_w$	Volume da água
$\Delta$	Coefficiente de variação
$\lambda$	Comprimento de onda
$\sigma_c$	Tensão de compressão
$\sigma$	Tensão normal

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1 Objetivo</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2 Escopo do trabalho</b> .....	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 Arquitetura de terra</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 Conceitos Básicos de Mecânica dos Solos</b> .....	<b>24</b>
2.2.1 Identificação dos solos por meio de ensaios .....	26
2.2.2 Compactação dos solos .....	29
2.2.3 Resistência do solo .....	32
<b>2.3 Avaliação não-destrutiva dos materiais</b> .....	<b>35</b>
2.3.1 Aparelho de ultrassom .....	37
<b>2.4 Normalização</b> .....	<b>41</b>
2.4.1 NBR 8802/1994 – Concreto endurecido – determinação da velocidade da propagação de onda ultrassônica (ABNT, 1984f) .....	42
2.4.2 Comité Mercosur de Normalización, NM 58/1996 – hormigón endurecido – determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos (COMITÉ MERCOSUR, 1996) .....	43
2.4.3 American Society for Testing and Materials ASTM: C597/1991 – standard test method for pulse velocity through concrete (ASTM, 1991) .....	44
2.4.4 British Standards Institution – BS 1881: Part 203:1986 – recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete (BS, 1986) .....	45
2.4.5 Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux – RILEM NDT 1/1972 – testing of concrete by the ultrasonic pulse method (RILEM, 1972) .....	45
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>48</b>
<b>3.1 Amostragem de solo</b> .....	<b>48</b>
<b>3.2 Ensaios de caracterização</b> .....	<b>49</b>
3.2.1 Preparação da amostragem .....	49
3.2.2 Análise granulométrica .....	49
3.2.3 Limite de plasticidade .....	49
3.2.4 Limite de liquidez .....	50
3.2.5 Limite de contração .....	50
3.2.6 Massa específica dos grãos .....	50
<b>3.3 Ensaios de compactação</b> .....	<b>51</b>
3.3.1 Moldagem dos corpos de prova .....	51
<b>3.4 Resistência à compressão simples</b> .....	<b>52</b>
<b>3.5 Ensaio do ultrassom</b> .....	<b>54</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>57</b>
<b>4.1 Caracterização geotécnica do solo</b> .....	<b>57</b>
<b>4.2 Estudo de compactação</b> .....	<b>58</b>
<b>4.3 Moldagem dos corpos de prova</b> .....	<b>59</b>
<b>4.4 Resistência à compressão simples e velocidade ultrassom</b> .....	<b>63</b>
4.4.1 Ponto 2 .....	63
4.4.2 Ponto 3 .....	66
4.4.3 Ponto 4 .....	69
<b>4.5 Resultado final</b> .....	<b>72</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>78</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>82</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A universalidade das construções com terra a torna uma das mais significativas formas de expressões arquitetônicas da história da humanidade.

No Brasil, as técnicas de construção com terra foram trazidas pelos portugueses no início da colonização e adotadas durante todo o Período Colonial. As cidades de Ouro Preto em Minas Gerais, Parati no Rio de Janeiro e outros estados, como São Paulo e Goiás, são exemplos da representatividade deste legado.

As técnicas construtivas utilizadas, em geral, são vinculadas ao material de construção encontrado na região, sendo comum o uso do solo como o principal ou até como o único material de construção. No Brasil, o adobe, taipa de pilão e pau-a-pique foram os mais empregados.

Apesar dessas construções exibirem significativa durabilidade, elas não são isentas da degradação ao longo do tempo, necessitando de medidas de intervenções para sua conservação e preservação.

Leal (1977) afirma que conhecer as técnicas construtivas das edificações históricas é fundamental para a escolha dos procedimentos adequados a serem utilizados na conservação e restauração das edificações construídas com o emprego da taipa de pilão.

Além da preocupação com a conservação e a durabilidade das estruturas de terra, Valle, Terezo e Teles (2004) afirmam que é preciso também contemplar a manutenção da edificação como um todo. A prática de inspeção periódica é uma ferramenta indispensável para a conservação das edificações, pois possibilita que as medidas de reparos sejam tomadas a tempo. Para qualquer obra de restauro de edificação ou adequação a novos usos, é necessária cuidadosa inspeção, que deve conter também detalhado estudo preliminar.

Logo, para planejar a conservação, restauro ou adequação de uso de uma edificação, faz-se necessário conhecer seu estado físico. Para obtenção deste conhecimento, muitas vezes são necessários ensaios que avaliem as características físicas e mecânicas dos materiais da construção. Os ensaios que envolvem a retirada de um corpo de prova e uma prova mecânica são denominados destrutivos e, em grande parte dos casos, não é possível aplicá-los a uma estrutura em serviço sem causar danos à mesma. Outra opção mais viável é o uso de ensaios não-destrutivos. A determinação das condições físicas e mecânicas das

estruturas é feita sem a retirada de corpos de prova, portanto, não causa prejuízo à estrutura investigada.

Estes últimos tipos de ensaios, os não-destrutivos, são bastante utilizados e existe grande variedade de métodos: acústicos ou ultrassônicos, magnéticos, eletrônicos, radioativos, ecoimpacto, frequência de ressonância, termografia infravermelho, ensaios de permeabilidade, radar e métodos combinados.

Em Portugal, Varum *et al.* (2006) vêm realizando pesquisas do comportamento estrutural de edificações construídas com alvenaria de adobe, empregando a técnica do ultrassom e determinando a resistência do módulo de rigidez das estruturas em questão.

No Brasil, os trabalhos que tratam da utilização do ultrassom para avaliar a qualidade estrutural de materiais de construção têm se restringido à aplicação desta técnica em materiais de concretos, cerâmicos, madeiras, pedras e argamassas.

A técnica do ultrassom constitui-se em um ensaio não-destrutivo, utilizado para avaliar a qualidade estrutural, geralmente para os materiais: concretos, aços e rochas. O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultrassônicas em um corpo material. A distância percorrida entre os transdutores dividida pelo tempo de propagação resulta na velocidade média de propagação da onda. A velocidade das ondas é influenciada pela composição mineralógica, estrutura cristalina, massa específica, bem como pela presença de vazios, fissuras e rachaduras, as quais promovem variações na velocidade como resultado da absorção e dispersão do pulso ultrassônico. Uma vez determinada a velocidade, tem-se ideia sobre a qualidade, uniformidade e resistência do material (CNS ELETRONICS, 1995). Esta técnica, pelo menos no Brasil, encontra-se em alguns estudos, principalmente nos que observam o efeito da incorporação ao solo de estabilizantes químicos (cal e cimento) e que tiveram suas características físico-mecânicas determinadas em laboratório e seu comportamento tecnicamente avaliado por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos, método do ultrassom. Mais detalhes sobre esses estudos são descritos por Ferreira (2003), Milani (2005) e Silva (2005). Mas esta técnica ainda encontra-se indisponível para a aplicação em material de construção cuja matriz é o solo, principalmente para diagnóstico e perícia em edifícios antigos.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como proposta elaborar um estudo para verificar a aplicabilidade do ultrassom como método de avaliação não-destrutiva das condições estruturais de estruturas de terra elaborados com taipa de pilão.

## **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo verificar a existência da correlação entre a resistência à compressão simples de um material terroso (solo) e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, empregando-se o método do ultrassom, na intenção de que sirva de elementos de orientação para a elaboração de um protocolo metodológico capaz de avaliar a integridade mecânica de estruturas de terra e taipa de pilão, a partir do referido método.

## **1.2 Escopo do trabalho**

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos.

O capítulo 1 – Introdução – apresenta breve relato da dimensão e importância da manutenção e conservação dos edifícios antigos, mencionando-se a importância da avaliação da integridade dessas estruturas a partir da investigação pelos métodos não-destrutivos.

No capítulo 2 – Revisão bibliográfica – transcreve-se resumidamente o arcabouço teórico e experimental referente ao sistema construtivo da taipa de pilão, aos estudos geotécnicos para caracterização dos solos e ao emprego do método do ultrassom como uma potencial técnica para avaliação de estruturas de terras, abordando-se as principais recomendações de algumas normas que tratam do assunto.

O capítulo 3 – Metodologia – traça a metodologia empregada, descrevendo-se o caminho percorrido para chegar ao objetivo proposto. Foram utilizados procedimentos normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e/ou metodologias afins.

No capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados – é descrita a análise dos resultados da caracterização dos solos, do estudo de compactação, da resistência à compressão simples, da velocidade de propagação da onda ultrassônica e da correlação entre resistência *versus* velocidade.

O capítulo 5 – Conclusão – expõe as conclusões do estudo e aponta, em caráter introdutório, a possibilidade de o método do ultrassom ser empregado na avaliação indireta de estruturas construídas com materiais terrosos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente capítulo transcreve resumidamente o arcabouço teórico que serviu de fundamentação para o desenvolvimento deste trabalho, sem a preocupação de esgotar o assunto que será apresentado, limitando tão-somente ao objetivo da pesquisa.

### **2.1 Arquitetura de terra**

A terra crua vem sendo utilizada pelo homem desde os tempos mais remotos, nos mais diferentes recantos do planeta. Dethier (1986) relata que a terra crua caracteriza-se como um dos principais materiais de construção. É conhecida há aproximadamente 10 mil anos, com vestígios arqueológicos, em todo o mundo, que comprovam a existência de várias cidades da Antiguidade construídas com esse material, entre as quais Jericó na Palestina, Catal Hoyuk na Turquia, Akhet-Aton no Egito, Babilônia no Iraque e Chan Chan no Peru. O autor destaca que, hoje, mais de um terço da população mundial vive em habitações construídas com terra.

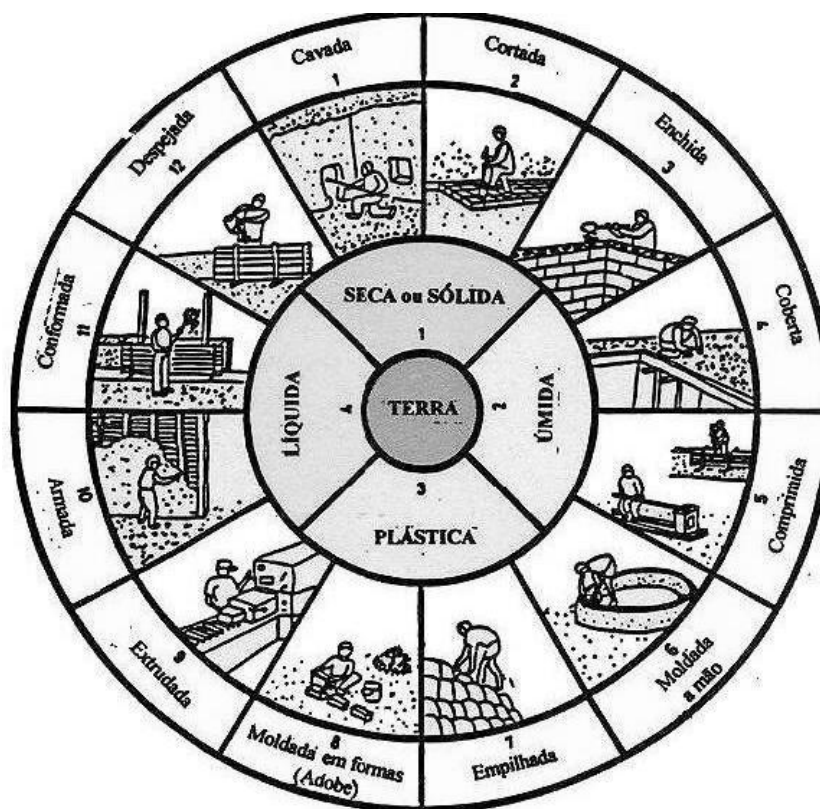
Houben e Guillaud (1994) afirmam que a terra crua é, sem dúvida, um dos materiais de construção mais usados no mundo, desde que o homem aprendeu a construir casas e cidades, sendo difícil encontrar um país que não possua herança de edifícios em terra crua.

Conforme Lopes (1998), nas Américas a construção com terra já era praticada pelas civilizações inca e asteca muito antes da chegada dos colonizadores.

No Brasil, antes da chegada dos portugueses, os índios não usavam a terra para construir. Seus abrigos eram estruturas de paus roliços e vedações de palha e folhagens, sendo, certamente, os portugueses que aqui introduziram as técnicas construtivas de terra crua. Os escravos africanos também contribuíram para a difusão do uso da terra crua, uma vez que eles faziam uso dessas técnicas no seu país de origem (MILANEZ, 1958).

Existe grande variedade de técnicas construtivas com terra, as quais recebem denominações particulares a região ou país que as adotam.

Numa tentativa de sistematizar as inúmeras soluções de construção com terra, o *Centre International de La Construction en Terre* – CRAterre apresentou um diagrama contendo 12 técnicas construtivas, tal como apresentado na FIG. 1.



**FIGURA 1 – Principais técnicas de terra crua**

Fonte: adaptado de CraTerre (HOUBEN; GUILLAUD, 1994).

Essas técnicas foram organizadas e agrupadas em três categorias ou sistemas construtivos, tais como: alvenaria, monolítico e misto.

- sistema de alvenaria: composição de tijolos organizados, empilhados de tal maneira que formam uma estrutura de terra. O tijolo do tipo adobe é o mais empregado nessas construções;
- sistema monolítico: confeccionado com terra compactada em moldes, formando uma peça monolítica. Esta técnica é mais conhecida como taipa de pilão;
- sistema misto: utiliza a madeira ou material pétreo como estrutura portante e a terra como material de vedação ou enchimento dos entramados.

Do diagrama, as técnicas empregadas são distinguidas de acordo com a quantidade de água adicionada ao material terroso. A saber, são elas:

- a) estado sólido – o material é trabalhado com mínima quantidade possível de água. As técnicas de terra escavada, torrões de terra e blocos cortados são representantes deste estado;
- b) estado seco – o material é trabalhado com certa quantidade de água, emprestando-lhe uma consistência para ser prensado, apiloado e compactado;
- c) estado plástico – estado físico cuja quantidade de água é a ideal para moldar, trabalhar um material terroso. O adobe manual moldado é fabricado neste estado físico;
- d) estado líquido – compreende as técnicas de terra de enchimento. A quantidade de água presente no material torna-o semelhante a um líquido viscoso.

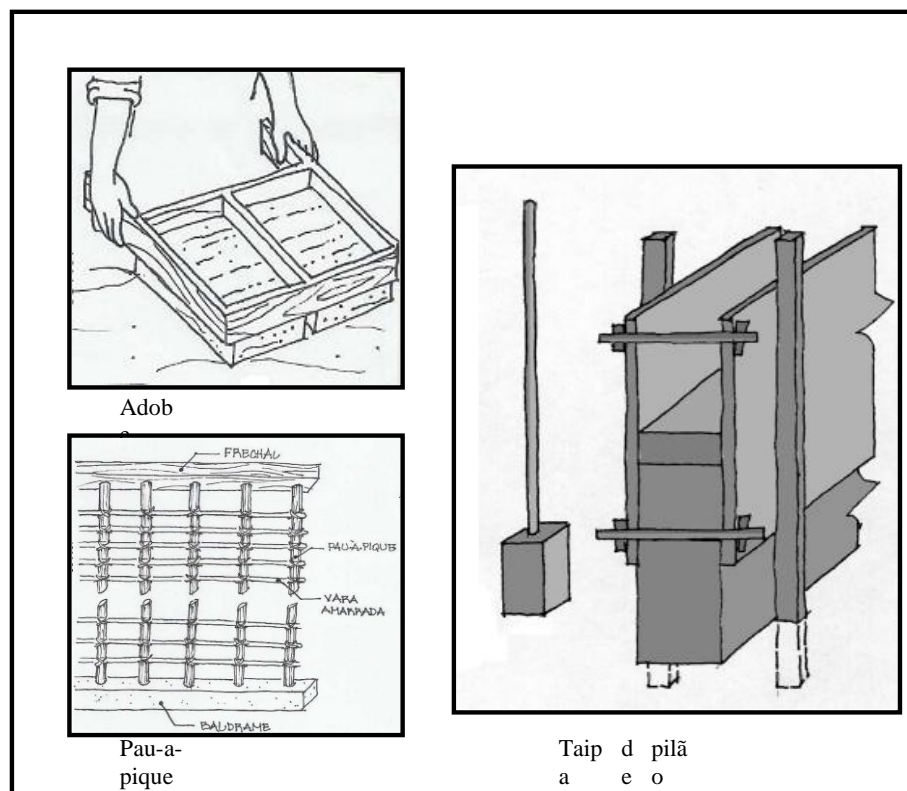
Conforme mencionado anteriormente, as técnicas de construção de terra mais empregadas no Brasil foram o adobe, pau-a-pique e taipa de pilão, que, em linhas gerais, podem ser descritas da seguinte maneira:

- a) **Adobe:** sistema construtivo da classe de alvenaria, construído basicamente por substratos de tijolos de barro assentados com argamassa do mesmo material. O tijolo do tipo adobe é o mais empregado nessas construções. O termo adobe deriva da língua árabe *attob* e da egípcia *thobe* e significa tijolo seco ao sol. Os tijolos são confeccionados a partir da mistura de terra e água. O tipo de solo usado na sua fabricação é, preferencialmente, uma areia argilosa, isto é, um solo cuja proporção de areia é maior do que da argila. Na mistura geralmente é adicionada palha picada ou outras fibras, para melhorar sua resistência à tração no processo de secagem. O amassamento é feito tradicionalmente com os pés ou por animais e moldados em fôrmas de madeira ou metálicas, deixando-os secar sob o sol ou à meia-sombra.
- b) **Pau-a-pique:** também conhecido como taipa de sopapo. Essa técnica construtiva pertence à família dos entramados. Na sua estrutura empregam-se peças de madeira, serradas ou roliças, ou em bambu, trançadas com varas finas de madeira, bambus, esteira de palha afixada, sisal, buriti, tucum, tiras de couro, arame, prego, etc. O preenchido da trama é feito com mistura de solo e água no estado líquido.

O entramado funciona como uma malha interna de sustentação do barro. Trata-se de uma técnica muito difundida no Brasil e em diversas partes do globo terrestre, por sua versatilidade (LOPES, 1998).

- c) **Taipa de pilão:** as edificações de taipa de pilão têm paredes maciças, monolíticas, feitas de terra socada. Esta técnica, originalmente, utilizava um sistema de fôrmas de madeira dotado de uma placa de fechamento ou fundo de fôrma, que permitia a realização de uma amarração, a prumo, das seções de parede ou do muro. Dentro delas era colocada uma mistura do solo e água no estado seco que, em seguida, era apiloada utilizando-se pilão ou os pés. Vasconcellos (1979) explica que os taipais, após a primeira camada preenchida, 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, subia, concomitantemente, em toda sua dimensão. A espessura das paredes variava de 40 a 100 cm, dependendo da carga e da altura final da construção.

Corona e Lemos (1989) observaram que no Estado de São Paulo, com exceção da arquitetura litorânea, a qual empregou, frequentemente, as alvenarias de pedra, a técnica construtiva predominante foi a taipa de pilão. Esta técnica marcou a arquitetura do estado, desde a sua fundação até meados do século XIX, e se propagou para os estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Paraná. Geralmente, as construções com essa técnica são executadas pelos mestres de ofício, que procuram desenvolver seus métodos e transmitir suas experiências para as gerações seguintes. A FIG. 2 apresenta as técnicas utilizadas no Brasil.



**FIGURA 2 – Técnicas construtivas com terra**

Fonte: adaptado de Lopes (1998).

Entretanto, apesar dessas construções exibirem grande durabilidade, avançando nos séculos, elas não são isentas da degradação ao longo do tempo. A conservação e preservação dos edifícios antigos exigem um elenco de procedimentos para resgatar a tipologia arquitetônica, a técnica construtiva, a identificação dos tipos de materiais ali empregados, na tentativa de realizar uma intervenção consistente. Construir e conservar uma arquitetura de terra, seja para salvaguardar, preservar a história de uma técnica ou restaurar patrimônios, requer a colaboração de diversas áreas do conhecimento, tais como: Arquitetura, Engenharia, Artes Plásticas, entre outras.

Sendo assim, um programa de investigação de campo e de laboratório é necessário para adoção de procedimentos e seleção de materiais aquedados para uma boa intervenção no edifício que se pretende restaurar ou conservar.

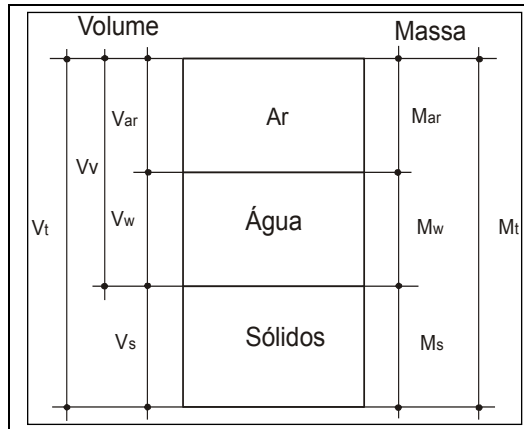
Oliveira (2002) afirma que “[...] para enfrentar o problema da conservação do patrimônio edificado em terra, o especialista deve estar preparado com uma boa fundamentação teórico-crítica, ao lado de excelente capacitação técnica e científica”.

Diante do exposto e comungando com a afirmação do último autor, as próximas seções são uma tentativa de sistematizar os conhecimentos que serviram de fundamentação teórica para o desenvolvimento deste trabalho.

## 2.2 Conceitos Básicos de Mecânica dos Solos

Os solos são materiais originários da decomposição física e química das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre. Sua composição mineralógica depende da composição da rocha matriz, sendo comum a presença dos minerais de quartzo, feldspato, mica, gibsitita, calcita, caulinita, ilita e esmectita, sendo os três últimos exclusivos dos materiais argilosos.

Na visão de Engenharia, o solo é visto como um meio poroso constituído por uma matriz sólida e por seus espaços vazios. A matriz sólida é formada por partículas minerais e orgânicas de variada composição, tamanho e arranjo. Parte do volume do espaço vazio deixado pelo arranjo poroso é ocupada por uma fase líquida que se constitui da solução do solo, cujo solvente principal é a água, e o restante é ocupado pela fase gasosa, o ar atmosférico. As propriedades e características do solo dependem da quantidade relativa entre elas. O diagrama ilustrado na FIG. 3 define, a partir das relações entre massa e volume, os parâmetros elementares do sistema, sendo os mais importantes:



**FIGURA 3 – Diagrama de fase do sistema solo, em termos de massa e volume**

Fonte: autora

sendo  $M_t$  a massa total;  $M_s$  a massa dos sólidos;  $M_w$  a massa da água;  $M_{ar}$  a massa do ar (desprezada);  $V_t$  o volume total;  $V_{ar}$  o volume do ar e  $V_w$  o volume da água. De imediato, obtém-se:  $M = M_s + M_w$ ;  $V_t = V_s + V_{ar} + V_w$  e  $V_v = V_{ar} + V_w$ .

Os principais parâmetros ou índices físicos são apresentados a seguir.

- **Massa específica do solo ( $\gamma$ ):** ou simplesmente densidade do solo - é definida pela razão

entre a massa total e o volume total de uma amostra de solo, ou seja:

$$\gamma = \frac{M}{V} = \frac{M_s + M_w}{V_s + V_{ar} + V_w} \quad (1)$$

Caso o solo se apresente totalmente seco, a densidade do solo seco será:

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V} = \frac{M_s}{V_s + V_{ar} + V_w} \quad (2)$$

- **Teor de umidade ( $h$ ):** quantificador mais básico da quantidade de água presente numa amostra de solo:

$$h = \frac{M_w}{M_s} \quad (3)$$

- **Índice de vazios ( $e$ ):** é definido como a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos, tal como:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{(V_{ar} + V_w)}{V_s} \quad (4)$$

- **Grau de saturação ( $S$ ):** definido pela razão entre o volume de água que preenche o volume de vazios.

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{(V_{ar} + V_w)} \quad (5)$$

A primeira característica que diferencia os solos é o tamanho das partículas que os compõem. Numa primeira aproximação, pode-se identificar que alguns solos possuem grãos perceptíveis a olho nu, chamados de solos grossos, e que os outros têm grãos tão finos que não é possível percebê-los a olho nu, chamados de solos finos. Denominações específicas são empregadas para as diversas faixas de tamanho de grãos. Pela norma brasileira (NBR) 6502/1995 da ABNT (1995), as partículas dos solos são identificadas como: pedregulhos, areias, siltes e argilas. O QUADRO 1 apresenta a classificação granulométrica adotada no Brasil.

#### QUADRO 1

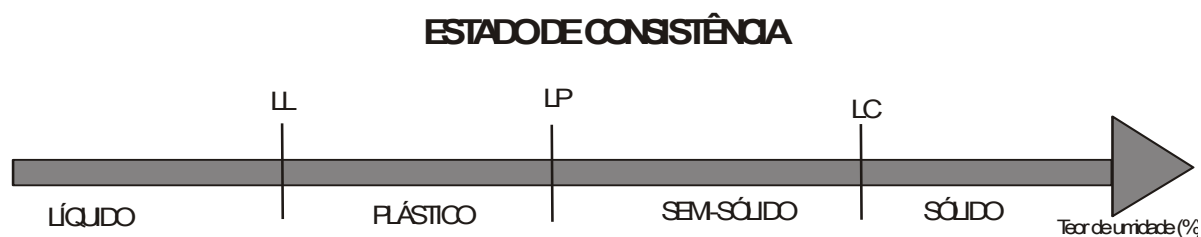
##### Classificação granulométrica brasileira (ABNT, 1995)

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

Outra característica fundamental dos solos é a sua habilidade de mudar de estado de consistência física de acordo com a quantidade de água nele presente. Um solo pode admitir estados de consistência líquida, plástica, semissólida e sólida, cujo desempenho mecânico e hidráulico do solo será relativo ao estado em que ele se encontra.

Quando o aspecto da resistência permite imaginar que um solo está com consistência líquida, este deverá comportar-se como um líquido viscoso, sendo a sua resistência diminuída no nível semelhante ao da água. Caso contrário, é imaginável que um solo com consistência sólida ou semissólida será aquele que apresentará maior resistência. Entretanto, a realidade mostra que esta consistência torna o material quebradiço e pouco moldável, conseqüentemente, não apto para formar corpos sólidos como tijolos de adobe e painéis de taipa de pilão. Sendo assim, a consistência que confere as condições ideais para o trabalho com um material terroso é aquela que lhe empreste plasticidade e consistência plástica.

Plasticidade pode ser definida como a propriedade dos corpos sólidos serem moldados, deformados, sem se romper em resposta à aplicação de uma força. A quantificação da habilidade do solo em mudar de estado físico é definida pelos limites de liquidez, de plasticidade e de contração. Tais limites são indicadores qualitativos do comportamento mecânico e hidráulico de um solo apresentando certa quantidade de água.



**FIGURA 4 – Estados de consistência do solo**

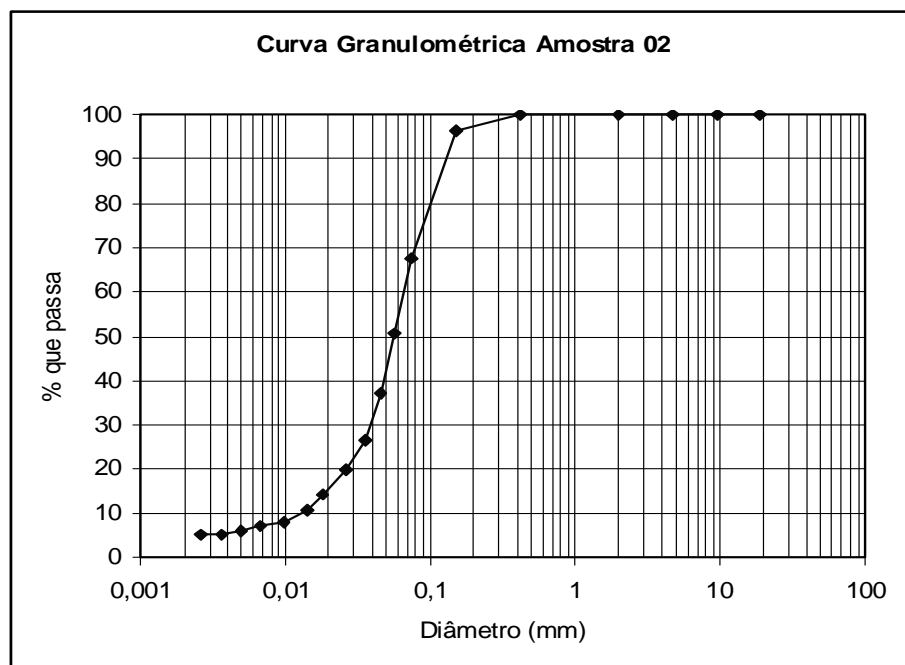
Fonte: autora

### 2.2.1 Identificação dos solos por meio de ensaios

A identificação e caracterização dos solos são feitas por meio de ensaios laboratoriais, análise granulométrica e limites de consistência, normalizados pela ABNT.

### a) Análise granulométrica

A composição granulométrica do solo é representada no gráfico denominado curva granulométrica, que expressa a relação entre a quantidade, em termos percentual, e a correspondente dimensão da partícula presente numa amostra. Para materiais granulares, areias e pedregulhos, emprega-se o método de ensaio por peneiramento, utilizando-se peneiras de graduações padronizadas, enquanto para os materiais argilosos, siltes e argilas, adota-se o procedimento do ensaio de sedimentação, valendo-se da lei de Stokes. Geralmente, num solo convivem partículas de tamanhos diversos, sendo sua composição granulométrica determinada pela combinação dos dois procedimentos metodológicos mencionados anteriormente. Esses procedimentos são normalizados pela NBR 7181/1984 (ABNT, 1984a). A FIG. 5 apresenta um exemplo de curva granulométrica.



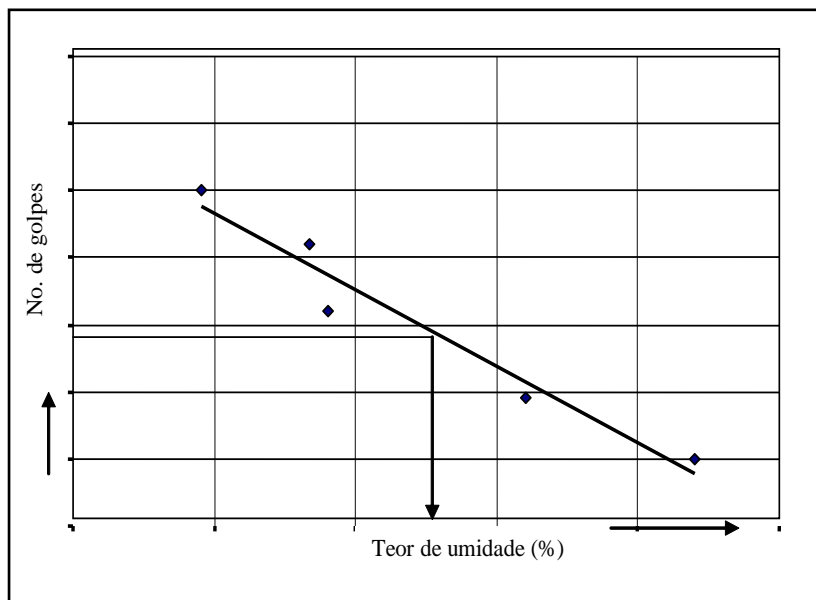
**FIGURA 5 – Curva de distribuição granulométrica**

Fonte: autora

### b) Limites de consistência

Os limites de consistência estão baseados no conceito de que um solo de granulação fina pode existir em qualquer dos quatro estados físicos, dependendo do seu teor de umidade. Adicionando, gradualmente, água num solo inicialmente seco, pode-se verificar que sua consistência variará do estado sólido, passando pelo plástico e atingindo o estado líquido. Os teores de umidade correspondentes às mudanças de estado são definidos como limite de liquidez, limite de plasticidade e limite de contração.

O limite de liquidez (*LL*) é conceituado como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele requer 25 golpes para fechar na concha do aparelho Casagrande, correspondendo à passagem do estado líquido para o plástico. Os procedimentos de ensaio são normalizados pela NBR 6459/1984 (ABNT, 1984b). A FIG. 6 mostra o limite de liquidez.



**FIGURA 6 – Exemplo de gráfico do limite de liquidez**

Fonte: autora

O limite de plasticidade (*LP*) é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, correspondendo à passagem do estado plástico para o semissólido. Este ensaio é feito de acordo com a NBR 7180/1984 (ABNT, 1984c).

O limite de contração (*LC*) corresponde ao 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 normalizados pela NBR 7183/1984 (ABNT, 1984d).

Estes limites servem para classificar e descrever algumas características do solo quanto aos seus estados de consistência e, ainda, possibilitam fazer, em primeira aproximação, inferências sobre o seu comportamento mecânico. Para tal, os limites são relacionados com os índices de plasticidade, de liquidez e de contração, os quais são definidos pelas expressões:

**Índice de plasticidade (IP):**

$$IP = LL - LP$$

## QUADRO 2

### Classificação quanto ao índice de plasticidade (Vargas, 1981)

Classificação	Índice de Plasticidade
Francamente plásticos	$1 < IP < 7$
Mediamente plásticos	$7 < IP < 15$
Altamente plástico	$IP > 15$

### Índice de liquidez (IL):

$$IL = \frac{LP - h}{IP} \quad (7)$$

## QUADRO 3

### Classificação quanto ao índice de liquidez (Vargas, 1981)

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

### Índice de contração (IC):

$$IC = \frac{V_i - V_f}{V_f} \quad (8)$$

sendo  $V_i$  o volume inicial do solo úmido e  $V_f$  o volume final do solo seco.

## QUADRO 4

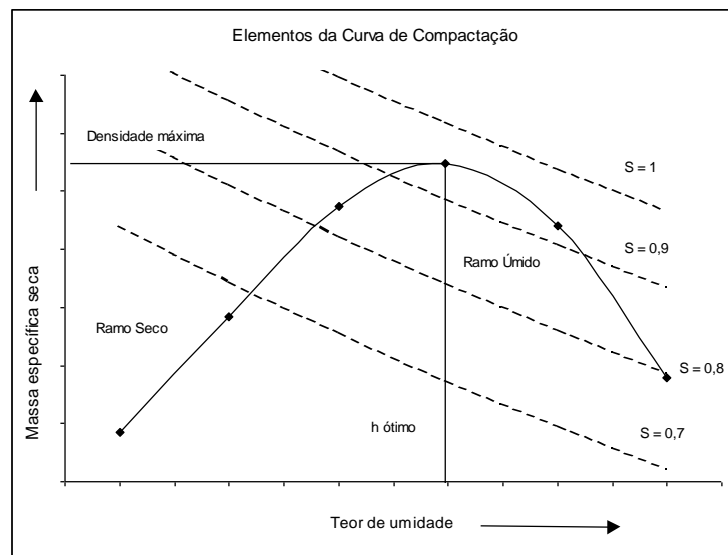
### Classificação quanto ao índice de contração (Vargas, 1981)

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

### 2.2.2 Compactação dos solos

Denominam-se compactação dos solos os processos manuais ou mecânicos pelos quais o índice de vazios do solo é reduzido, acarretando aumento de sua massa específica. A compactação é uma técnica que visa à melhoria da qualidade mecânica do solo a partir do rearranjo de sua matriz sólida.

Foi Ralph Proctor, em 1933, quem, pela primeira vez, estabeleceu a correlação entre os parâmetros: teor de umidade e massa específica do solo ou simplesmente densidade do solo. Este autor verificou que um solo, quando compactado com maiores quantidades de água, tem sua densidade aumentada devido ao rearranjo de sua matriz sólida. De certa forma, a água funciona como lubrificante, aproximando as partículas, permitindo melhor entrosamento e ocasionado, assim, redução do volume de vazios da massa compactada. Num determinado ponto, atingia-se uma densidade máxima a partir do qual, ainda que se adicionasse mais água, o volume de vazios passava a aumentar. A explicação desse fato reside em que quantidades adicionais de água, após o ponto citado, em vez de facilitarem a aproximação dos grãos, fazem com estes se afastem, aumentando novamente o volume de vazios e causando decréscimo nas densidades correspondentes. A FIG. 7 demonstra a relação entre a massa específica em função do teor de umidade.

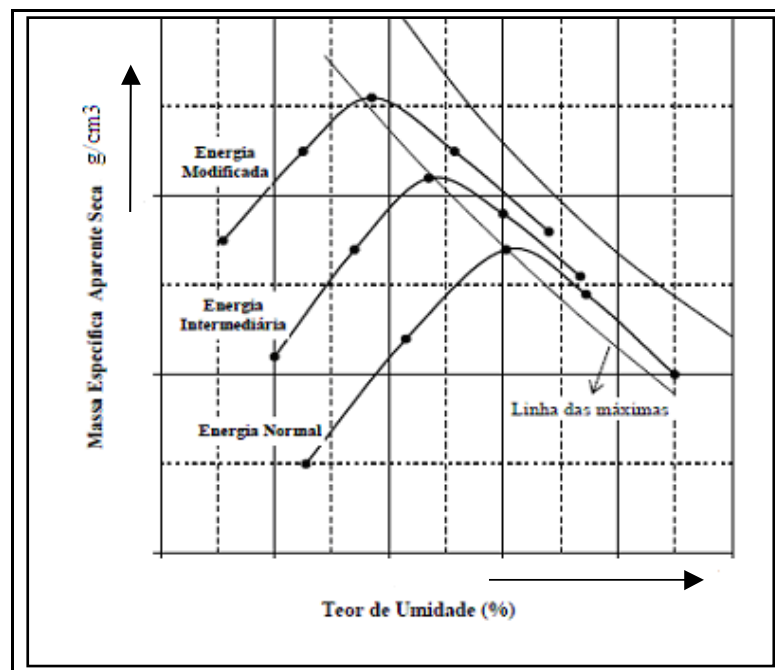


**FIGURA 7 – Curva de compactação típica**  
**Fonte: autora**

Acompanhando o que se passa na FIG. 7, pode-se entender o que o referido autor verificou, tal como descrito: inicialmente, a densidade seca cresce com o aumento do teor de umidade até atingir um ponto máximo. Depois deste ponto, sua massa começa a decrescer para valores ainda crescentes do teor de umidade. A ordenada do ponto correspondente ao ponto de máximo da curva é denominada massa específica seca máxima ( $\gamma_{smáx}$ ) ou densidade

seca máxima que este solo poderá atingir, para uma energia de compactação. A abcissa correspondente a esse ponto é o valor de teor de umidade, denominado de teor de umidade ótimo ( $h_{ótima}$ ). Estes valores só poderão ser alterados variando-se a energia aplicada.

Um mesmo solo, quando compactado com energias diferentes, apresentará valores mais altos de densidade seca máxima e teores mais baixos de umidade ótima para valores crescentes dessa energia. O efeito da energia de compactação, para um mesmo solo, é ilustrado na FIG. 8.



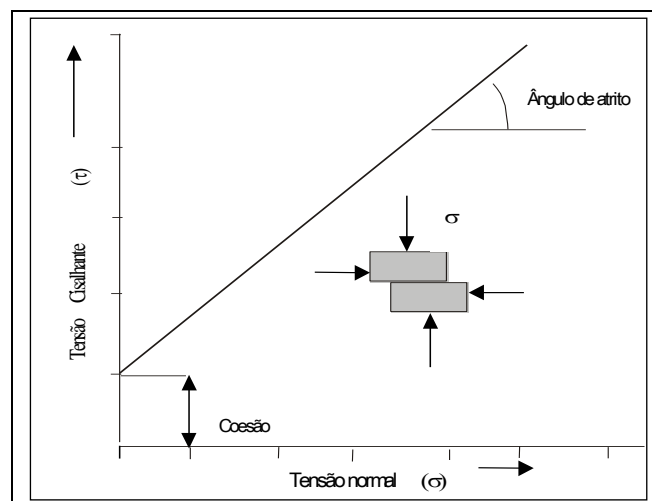
**FIGURA 8 – Curvas de compactação de um solo com diferentes energias**

Fonte: adaptado de Vargas (1981).

A ABNT (1986a) estabeleceu, pela NBR 7182/1986, os procedimentos para a execução do ensaio de compactação que, em linhas gerais, consiste em compactar uma amostra de solo em um recipiente cilíndrico de  $1.000 \text{ cm}^3$  em três camadas, uniformemente distribuídas, que recebem 25 golpes de um soquete pesando 2,5 kgf, caindo em queda livre de uma altura de 30 cm, desprendendo nesta operação uma energia igual a  $6 \text{ kgf cm/cm}^3$ .

### 2.2.3 Resistência do solo

Define-se, qualitativamente, como resistência do solo a capacidade deste material em resistir a forças sem experimentar ruptura. Em termos quantitativos, a resistência do solo pode ser definida como a máxima tensão que um solo admite sem causar o seu colapso. Na grande maioria dos casos, a ruptura dos solos se dá em tensão cisalhante, cujos mecanismos de ruptura são condicionados por uma região ou por uma superfície de ruptura. A resistência ao cisalhamento envolve os fenômenos da coesão e do ângulo de atrito e pode ser entendida a partir da FIG. 9.



**FIGURA 9 – Correlação entre tensão cisalhante e tensão normal**

Fonte: autora

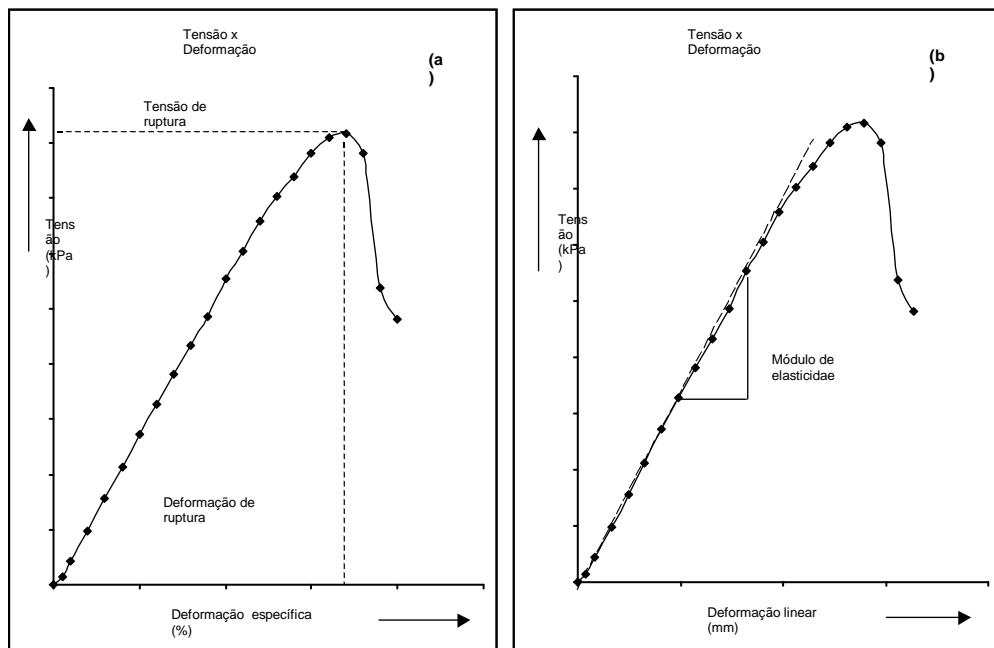
Da FIG. 9 entende-se que a tensão cisalhante necessária para provocar um deslizamento aumenta com o acréscimo da tensão normal; a inclinação da linha que relaciona as duas tensões (normal e cisalhante) define o ângulo de atrito. Se a superfície entre os dois corpos for selada, quando a tensão normal for igual a zero será necessário determinado valor da tensão cisalhante para provocar movimentação e seu valor inicial define a coesão. Para a maioria dos solos a relação básica entre a tensão cisalhante e a tensão normal é dada pela expressão:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (9)$$

sendo  $\tau$  a tensão cisalhante;  $c$  a coesão ao longo do plano de ruptura;  $\sigma$  a tensão normal e  $\phi$  o ângulo de atrito do material ao longo da superfície de ruptura.

### a) Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples, também conhecido como ensaio de compressão uniaxial, é aquele em que o esforço é aplicado numa única direção, dando liberdade de o corpo de prova deformar-se nas outras duas direções, sem qualquer restrição. O ensaio consiste em submeter um corpo de prova a um carregamento axial levando-o até sua ruptura, registrando a deformação ocorrida em cada estágio do carregamento. O resultado é expresso graficamente pelos pares ordenados tensão *versus* deformação, de onde se extrai o valor da tensão e da deformação correspondente à ruptura e o módulo de elasticidade do solo. Este ensaio é normalizado pela NBR 12770/1984 (ABNT, 1984e). A FIG. 10 apresenta o gráfico resultante do ensaio de compressão simples, evidenciando os parâmetros de resistência e de elasticidade.



**FIGURA 10 – Representação gráfica do ensaio de compressão simples**

Fonte: autora

Dos gráficos apresentados, são determinados os parâmetros de resistência: tensão e deformação específica de ruptura e o módulo de elasticidade do solo.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (10)$$

onde  $\sigma$  é a tensão de ruptura,  $F$  é a carga aplicada e  $A_0$  é a área inicial do corpo de prova.

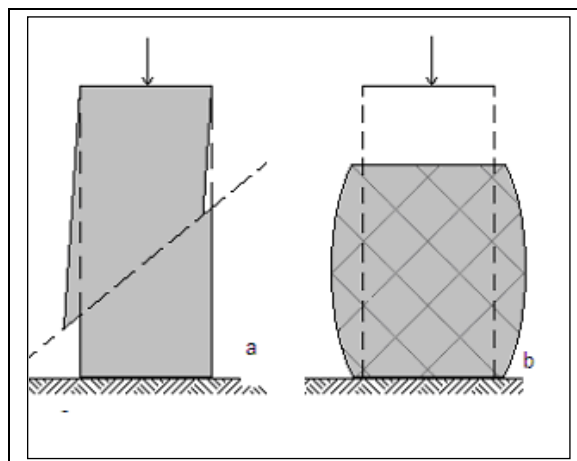
$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (11)$$

sendo  $\varepsilon$  a deformação;  $l_i$  é o comprimento do corpo de prova depois da aplicação da carga; e  $l_0$  é o comprimento original antes de qualquer carga ser aplicada.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (12)$$

sendo  $E$  o módulo de elasticidade;  $\Delta\sigma$  a variação de tensão para um intervalo adotado; e  $\Delta\varepsilon$  a variação da deformação linear.

Um corpo de prova submetido ao ensaio de compressão simples pode experimentar dois modos de rompimento: por cisalhamento simples, ao longo de um plano definido; ou por cisalhamento generalizado, ao longo de vários planos paralelos. A FIG. 11 mostra os modos de rupturas típicos.



**FIGURA 11 – Modos de rupturas: cisalhamento simples (a) e cisalhamento generalizado (b)**

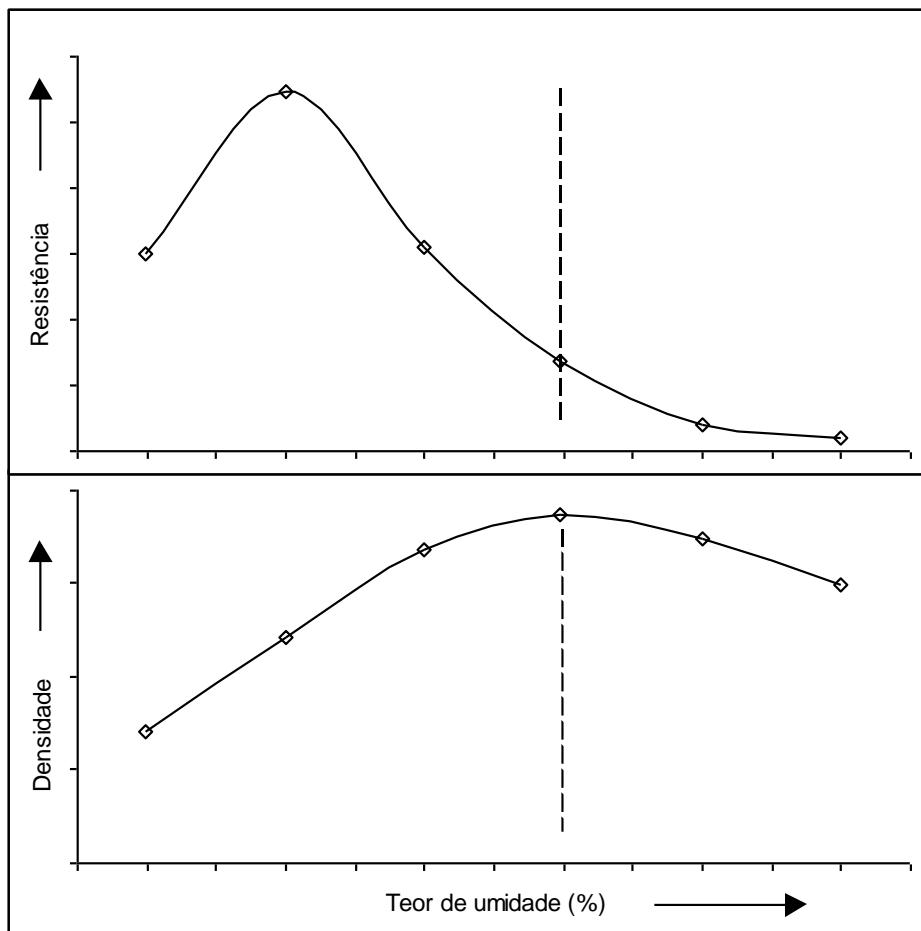
Fonte: adaptado de Vargas (1981)

#### **b) Resistência dos solos compactados**

É consideração experimental que a resistência dos solos decresce com o aumento da umidade. Colocando em correspondência a curva de compactação e a curva de resistência de um solo compactado, tal como mostrado na FIG. 12, pode-se verificar que o nível de resistência dado pelo teor de umidade ótimo não coincide com o valor máximo da resistência alcançado pelo material numa dada energia de compactação. Este desempenho mecânico pode ser visto como uma controvérsia, pois é comum em outros tipos de materiais que a resistência seja tão maior quanto mais denso se apresente o material. Porém, sabe-se que um solo nas condições ditas ótimas exibe um nível de resistência mais estável às condições ambientais. Isto quer dizer que a condição de densidade máxima e teor de umidade ótimo traduz ao solo

mais estabilidade mecânica perante as alternâncias climáticas (ciclos de molhamento e secamento) e não necessariamente um nível de resistência maior. Mais detalhes sobre o assunto são encontrados em Barata (1984), Caputo (1985), Fredlund e Raharjo (1993) e Vargas (1981), entre outros.

Não é, portanto, verdade que a melhor compactação seja aquela de que se consegue a maior resistência, porém, as construções bem compactadas não serão necessariamente as que apresentem grande resistência, mas aquelas cuja resistência é estável às mudanças climáticas (resistentes aos ciclos de molhamento e secamento).



**FIGURA 12 – Curva de compactação x curva de resistência**

**Fonte: autora**

### 2.3 Avaliação não-destrutiva dos materiais

A avaliação não-destrutiva é definida como sendo a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material, sem alterar suas capacidades de uso. Os ensaios considerados não-destrutivos são aqueles que não causam

dano ao elemento ensaiado ou deixam pequenos danos para serem reparados após o ensaio, pois eles não provocam perda na capacidade resistente do elemento. Ross, Brashwa e Pellerin (1994) descrevem que várias técnicas podem ser consideradas não-destrutivas, desde o exame visual até os ensaios químicos, os testes mecânicos e o uso de técnicas de vibração, propagação de ondas, emissões acústicas, raio-X, etc.

Os testes não-destrutivos foram primeiramente utilizados para avaliar e detectar defeitos em metais e suas ligas. Jones (1967) sugere que os resultados obtidos são geralmente reprodutíveis e as diferenças porventura encontradas devem-se à presença de defeitos internos como, por exemplo, fissuras.

Na maioria dos países nos quais esses métodos são bastante utilizados e a tecnologia está mais avançada para determinar as características mecânicas de diferentes materiais, os testes não-destrutivos podem se diferenciar de acordo com sua origem e suas aplicações. Entre eles, podem ser citados os métodos acústicos ou ultrassônicos, magnéticos, eletrônicos, radioativos, ecoimpacto, frequência de ressonância, termografia infravermelho, ensaios de permeabilidade, radar e métodos combinados.

Esses ensaios podem ser utilizados em estruturas novas ou antigas. No caso de estruturas novas, eles podem ser empregados para monitoramento da evolução da resistência ou para esclarecer dúvidas sobre a qualidade do material. Os ensaios em estruturas já existentes visam a avaliar a sua integridade e capacidade de resistir às solicitações.

Para Beraldo (1994), o método acústico do ultrassom vem sendo utilizado há vários anos em concretos e madeiras, para a determinação de diversos parâmetros, tais como: resistência à compressão simples e módulo de elasticidade dinâmico; além de detectar anormalidades e defeitos, como, por exemplo, fissuras e trincas; avaliar a homogeneidade do material; e fazer a verificação adicional de controle de estruturas já prontas.

Recentemente, o uso do ultrassom tem sido relacionado à avaliação da qualidade técnica de diferentes materiais de construção, por exemplo, cerâmica, metal e argamassas. Da mesma forma, métodos de avaliação de qualidade de materiais a partir da combinação de ensaios destrutivos e não-destrutivos estão em constante desenvolvimento.

Outras vantagens atribuídas aos testes não-destrutivos, comparadas aos testes destrutivos, são ressaltadas por Qasrawi (2000):

- a) Redução do tempo e trabalho para a realização dos testes;
- b) ausência de danos em estruturas durante os testes;
- c) possibilidade de teste de resistência *in loco* em estruturas;

- d) uso de equipamentos de baixo custo.

O método acústico do ultrassom também vem sendo usado para avaliar o comportamento mecânico de materiais de construção submetidos a estresses mecânicos. Segundo Ferreira (2003), o método de ultrassom é um teste promissor para avaliar a integridade de materiais e seus mecanismos de fraturas durante ensaios de compressão simples, fornecendo informações úteis a respeito de sua resistência e estrutura.

De acordo com Almeida (1993), a correlação entre resistência à compressão e velocidade ultrassônica pode ser avaliada pelo coeficiente de correlação ( $r^2$ ) e classificada qualitativamente conforme apresentado na QUADRO 5.

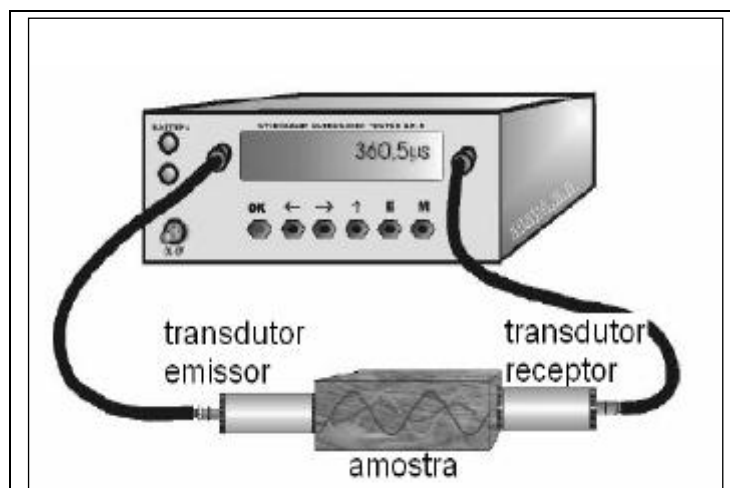
#### QUADRO 5

##### Classificação da qualidade entre resistência e velocidade ultrassônica (Almeida, 1993)

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

#### 2.3.1 Aparelho de ultrassom

O aparelho de ultrassom é composto de um módulo dotado de uma fonte geradora de impulsos elétricos, circuitos eletrônicos e de um registrador de tempo, munido de dois transdutores piezoelétricos de contato, sendo um emissor e outro receptor. A FIG. 13 apresenta um típico aparelho de ultrassom.

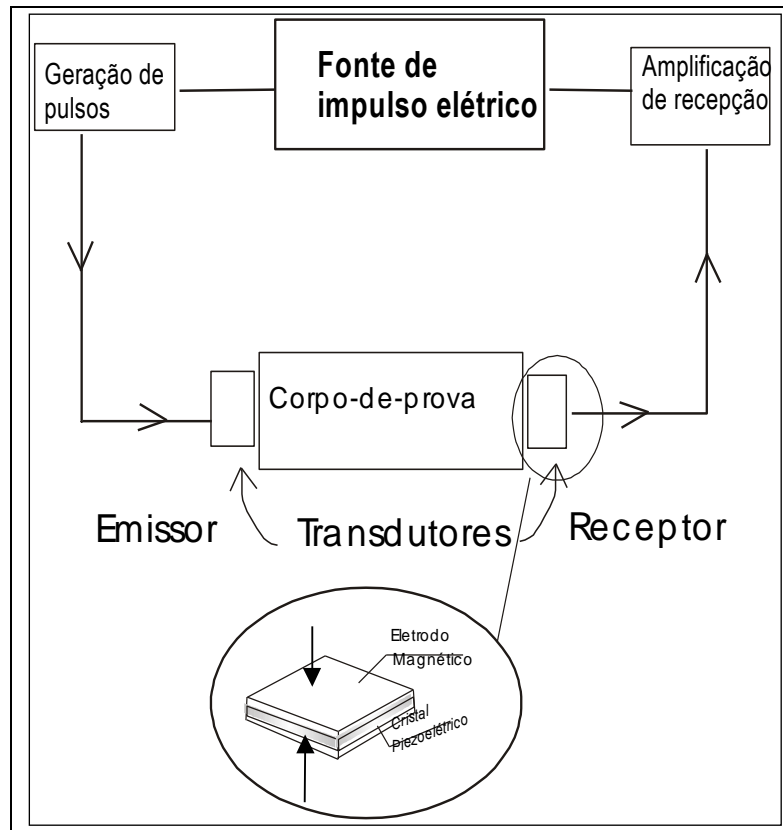


**FIGURA 13 – Aparelho típico de ultrassom**

Fonte: adaptado Almeida (1993).

O método do ultrassom permite avaliar as propriedades elásticas dos materiais levando em consideração alguns fatores, tais como: idade, composição e condicionamento após fabricação, etc., podendo acompanhar as mudanças ocorridas ao longo do tempo ou estudar a heterogeneidade das amostras a partir de medições efetuadas em diferentes direções do material ensaiado.

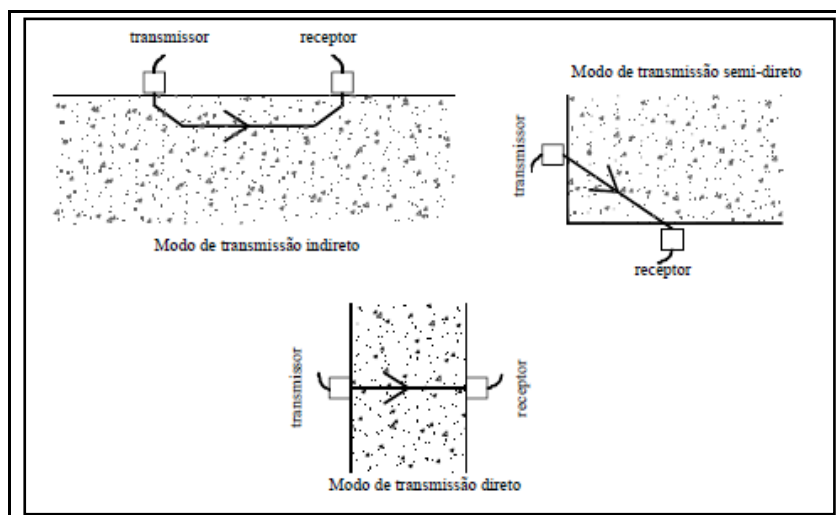
Em linhas gerais, o funcionamento do aparelho pode ser descrito da seguinte maneira: os transdutores baseiam-se na propriedade piezoelétrica do cristal de quartzo que, quando deformado elasticamente, gera um potencial elétrico em seus terminais por meio de certo plano cristalográfico. Quando um impulso elétrico chega num terminal da célula piezoelétrica localizada no transdutor emissor, a célula é excitada e, como resposta, produz ondas mecânicas numa frequência de ultrassom. A onda transmitida é amortecida pelo corpo de prova durante a sua travessia, atingindo o transdutor receptor e produzindo uma deformação da célula piezoelétrica, a qual responde com impulsos elétricos. O resultado do ensaio é dado pelo tempo gasto para que a onda realize esse trajeto. A FIG. 14 reproduz o esquema de funcionamento do aparelho de ultrassom.



**FIGURA 14 – Funcionamento do ultrassom.**

Fonte: adaptado Ferreira (2003).

Para a transmissão e recepção do pulso, os transdutores devem estar completamente em contato com a superfície, caso contrário, a camada de ar existente introduzirá um erro na leitura do tempo. Este erro surgirá pelo fato de que somente uma quantidade desprezível de pulso pode ser transmitida pelo ar. Segundo a NBR 8802/1994, os transdutores - um transmissor de ondas e outro receptor - podem ser dispostos em: modo de transmissão direta, quando os pulsos são gerados por tradutores em faces opostas; transdutores semidiretos, quando estão perpendiculares entre si; transmissão indireta, quando os transdutores estão no mesmo plano. A FIG. 15 mostra as disposições dos transdutores.



**FIGURA 15 – Modos de transmissão dos pulsos**

Fonte: adaptado ABNT NBR 8802 (1994)

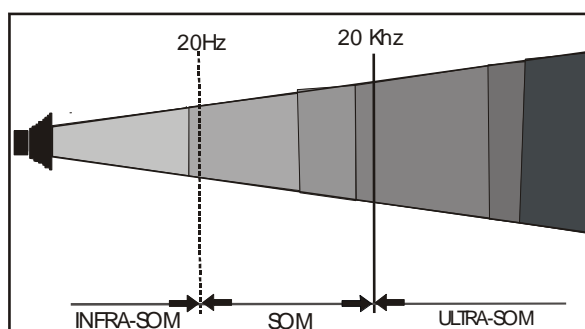
Os tipos de ondas são geralmente conhecidos como longitudinal (compressão), transversal (cisalhamento) e de superfície, cujas principais características físicas das ondas sonoras são: frequência, período, amplitude, velocidade e comprimento de onda.

- a) **Frequência ( $f$ ):** as ondas acústicas são classificadas de acordo com suas frequências e medidas em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam por segundo pelos nossos ouvidos. A unidade “ciclos por segundos” é conhecida por Hertz, cuja abreviatura é  $Hz$ . As frequências acima de 20 kHz são inaudíveis, denominadas frequência ultrassônica.

$$f = \frac{1}{T} \tag{13}$$

sendo  $f$  a frequência e  $T$  o período (tempo necessário para que duas cristas consecutivas passem pelo mesmo ponto).

A FIG. 16 ilustra os níveis de frequência típica de uma onda sonora.



**FIGURA 16 – Campo de audibilidade das vibrações mecânicas**

Fonte: autora

- b) Velocidade de propagação ( $v$ ):** define-se velocidade de propagação como a distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo. É importante lembrar que a velocidade de propagação é uma característica do meio, sendo uma constante, independentemente da frequência, e é dada pela expressão:

$$v = \frac{d}{t} \quad (14)$$

em que  $v$  é a velocidade de propagação da onda (m/s);  $d$  é o comprimento do corpo (m); e  $t$  é o tempo (s).

- c) Comprimento de onda ( $\lambda$ ):** quando uma pedra é atirada num lago de águas calmas, o ponto atingido por ela é perturbado, formando ondas superficiais circulares que se propagam sobre a superfície da água. A distância entre duas cristas ou dois vales de duas ondas consecutivas é denominada comprimento da onda.
- d) Amplitude ( $a$ ):** é distância média entre uma crista e um vale de uma onda.
- e) Relação entre velocidade, comprimento de onda e frequência:** a relação entre a velocidade de propagação da onda sonora ( $v$ ), a frequência ( $f$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) pode ser dada pela expressão:

$$v = \lambda f \quad (15)$$

## 2.4 Normalização

Serão apresentadas as normas nacionais e internacionais e os seus procedimentos para a utilização do ultrassom no concreto, pois não existem normas para utilização dessa técnica para o solo. Essas normas expostas aqui são as que prescrevem o método de ensaio não-destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, a partir de um componente de concreto cujas principais aplicações são: verificar a homogeneidade do concreto, detectar eventuais falhas internas de concretagem e monitorar a variação no concreto, ao longo do tempo. O QUADRO 6 exhibe um resumo dos procedimentos adotados em algumas normas para o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

## QUADRO 6

### Comparação entre procedimentos de normas para ensaio de ultrassom

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

#### 2.4.1 NBR 8802/1994 – Concreto endurecido – determinação da velocidade da propagação de onda ultrassônica (ABNT, 1984f)

Esta norma prescreve o método de ensaio não-destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, por meio de um componente de concreto, e tem como principais aplicações:

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

Na execução, deve-se preparar os corpos de prova ou componentes de concreto para o ensaio; eles devem ter as superfícies planas, lisas e isentas de sujeira e as mesmas condições de composição e umidade relativa. 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 da onda, indicação da posição relativa dos transdutores, velocidade de propagação, descrição sucinta da preparação das superfícies e condições de umidade do concreto.

É possível expressar a homogeneidade do concreto em forma de parâmetros estatísticos, tais como o desvio-padrão ( $Dp$ ) ou o coeficiente de variação ( $\delta$ ) 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 e idade do concreto.

#### **2.4.2** *Comité Mercosur de Normalización, NM 58/1996 – hormigón endurecido – determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos (COMITÉ MERCOSUR, 1996)*

A NM 58 (COMITÉ MERCOSUR, 1996) estabelece que a superfície onde são efetuadas as medições devem ser lisas, para garantir o perfeito contato entre os transdutores e o concreto a ser ensaiado, evitando-se, desta forma, erros na obtenção do valor da velocidade ( $v$ ), conforme mencionado no subitem 1.3.1. Devem ser evitadas superfícies rugosas ou que receberam acabamento, pois as propriedades do concreto da camada superficial não são necessariamente as mesmas das do concreto no interior da peça. De acordo com esta norma, é essencial que a distância a ser percorrida pela onda ultrassônica seja a maior possível, devido à heterogeneidade do concreto. Caso se utilize transdutor com frequência igual a 54 kHz, esta norma recomenda as seguintes distâncias mínimas: 150 mm para a transmissão direta e 400 mm para a transmissão indireta. Em ambos os casos deve ser levada em conta a dimensão máxima do agregado.

Ensaio realizados comprovaram que a velocidade da onda é afetada quando a tensão alcança entre 50 e 70% de ruptura, além de mostrarem acentuado decréscimo no valor de velocidade à medida que a tensão aumenta. A correlação entre resistência e a velocidade deve ser feita obtendo-se primeiramente a velocidade em cada corpo de prova cilíndrico de

150 mm x 300 mm, moldado e curado segundo procedimento padrão, que, em seguida, é submetido ao ensaio de compressão. Devem ser ensaiados 10 corpos de prova para cada composição, variando-se a relação água/cimento de 0,40 a 0,80, com incrementos de 0,05 (COMITÉ MERCUSUR, 1996).

**2.4.3 American Society for Testing and Materials ASTM: C597/1991 – standard test method for pulse velocity through concrete (ASTM, 1991)**

A correlação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão do concreto pode ser estabelecida experimentalmente e utilizada na avaliação da resistência à compressão de elementos estruturais *in situ*, desde que sejam observados os fatores que interferem na velocidade da onda ultrassônica, podendo ser divididos em duas categorias:

- a) **Fatores que acometem tanto as propriedades do concreto quanto as medições da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas:** tipo, teor, tamanho e graduação do agregado graúdo, tipo de cimento, relação água-cimento, uso de aditivos, grau de compactação e condições de cura e idade do concreto.
- b) **Fatores que acometem somente as medições de velocidade, não interferindo nas propriedades do concreto:** contato entre os transdutores e o concreto, temperatura do concreto, condições de umidade do concreto, comprimento de propagação da onda, tamanho e forma das amostras, nível de tensão e a presença de armaduras.

Esta correlação pode ser estabelecida a partir da determinação da velocidade e da resistência, em um número adequado de amostras de um concreto. Desta forma, futuras estimativas da resistência à compressão deste concreto poderão ser efetuadas utilizando-se a correlação previamente estabelecida.

**2.4.4 British Standards Institution – BS 1881: Part 203:1986 – recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete (BS, 1986)**

As principais aplicações desta norma consistem nas determinações da uniformidade do concreto, existência de fissuras, estimativa da resistência à compressão do concreto, monitoramento da evolução da resistência e avaliação da deterioração do concreto, sendo possível estimar a resistência à compressão do concreto, num intervalo de confiança de 95%, com acurácia de  $\pm 7$  MPa, desde que o ensaio seja realizado em condições ideais e se utilize uma curva de correlação adequada ao concreto a ser estudado. A curva de correlação é feita com os pontos obtidos das médias dos resultados da velocidade e da resistência à compressão, o conjunto de três corpos de prova ou usando testemunhos.

As curvas de correlação devem ser estabelecidas experimentalmente para cada tipo de concreto, exibindo resistências baixas, médias e altas (estes níveis de resistências são obtidos variando a relação água/cimento e/ou a idade do ensaio).

Recomenda-se a moldagem de no mínimo três corpos de prova para cada batelada de concreto (volume de concreto produzido). Em cada corpo de prova devem ser feitas três medições entre seu topo e a base, sendo que a variação dos resultados num único corpo de prova deve ser menor que +5% do valor médio das três medições. E que as dimensões dos corpos de prova da leitura da velocidade sejam determinadas com acurácia de  $\pm 1$  %.

**2.4.5 Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux – RILEM NDT 1/1972 – testing of concrete by the ultrasonic pulse method (RILEM, 1972)**

O objetivo desta recomendação é providenciar um guia de métodos não-destrutivos para aumentar a acurácia da estimativa *in situ* da resistência à compressão do concreto. Em particular, detalha as informações necessárias para combinações de avaliação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência do concreto.

A distância percorrida pela onda ultrassônica e a sua frequência, que é a mesma do transdutor, não deve afetar o seu tempo de propagação e, conseqüentemente, o valor da velocidade. Entretanto, o que se observa na prática é que distâncias pequenas tendem a aumentar discretamente o valor da velocidade. No QUADRO 7 encontram-se as

recomendações da RILEM NDT 1 (1972) para a escolha da frequência natural do transdutor, de acordo com as dimensões do elemento a ser ensaiado.

### QUADRO 7

#### Escolha da frequência natural do transdutor **RILEM NDT 1 (1972)**

Distância a ser percorrida pela onda (mm)	Frequência natural do transdutor (kHz)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)
100 – 700	≥ 60	70
200 – 1500	≥ 40	150
> 1500	≥ 20	300

A presença de armadura é um dos principais fatores que influenciam a velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto. No caso do concreto não apresentar armaduras, fissuras ou vazios, as ondas sonoras percorrem o menor caminho, isto é, uma linha reta entre os dois transdutores.

No caso de concreto armado, o valor de  $v$  obtido próximo das armaduras é superior ao que é obtido num concreto simples de igual composição, pois a onda pode percorrer uma parte do caminho através do concreto e outra parte através do aço. Como a velocidade de propagação da onda no aço é maior do que no concreto (1,2 a 1,9 vezes), esta onda alcança mais rapidamente o transdutor receptor no concreto armado do que no concreto simples. O aumento no valor de  $v$  depende 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.

Os fatores de correção comumente utilizados na Europa, recomendados pela norma britânica e pela RILEM, levam em conta somente 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.

A estimativa da resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ) a partir da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas ( $v$ ) pode ser obtida por soluções gráficas ou utilizando-se expressões analíticas. Geralmente, os resultados gráficos são mais confiáveis.

Para obtenção da correlação gráfica, deve-se ensaiar pelo menos 30 corpos de prova de mesma dimensão, cujo resultado é obtido pelo valor médio da velocidade e da resistência à compressão para cada conjunto de três corpos de prova submetidos às mesmas condições de ensaio. Devem ser efetuadas três medições do tempo de percurso da onda entre o topo e a base de cada corpo de prova. A diferença entre cada uma das três medições e o valor médio não deve ultrapassar  $\pm 5\%$ , pois, caso contrário, o corpo de prova ou o conjunto

deverá ser rejeitado. A correlação obtida a partir do emprego de modelos matemáticos ou expressões analíticas, normalmente, utilizam os modelos: potencial, logaritmo e polinomial.

Quando não existem corpos de prova disponíveis e não se conhece a composição do concreto, é possível estimar a resistência à compressão do concreto com expressões analíticas cujas constantes são obtidas a partir de testemunhos retirados da estrutura. Estimativas de resistência à compressão podem ser feitas usando-se expressões analíticas nas seguintes circunstâncias:

- a) quando a composição do concreto *in situ* é conhecida e existem pelo menos três corpos de prova com a mesma idade da estrutura ou existe a possibilidade da retirada de pelo menos três testemunhos da estrutura em questão;
- b) quando a composição do concreto *in situ* é conhecida e não existem corpos de prova do concreto original, porém os materiais utilizados ainda estão disponíveis para a moldagem de pelo menos três novos corpos de prova;
- c) quando a composição do concreto *in situ* é desconhecida, mas pelo menos três testemunhos possam ser extraídos da estrutura;
- d) quando somente a composição do concreto *in situ* é conhecida.

Em geral, a estimativa da resistência à compressão obtida com base na opção a) é mais confiável do que a obtida pela opção b) que, por sua vez, é mais confiável do que as obtidas pelas outras.

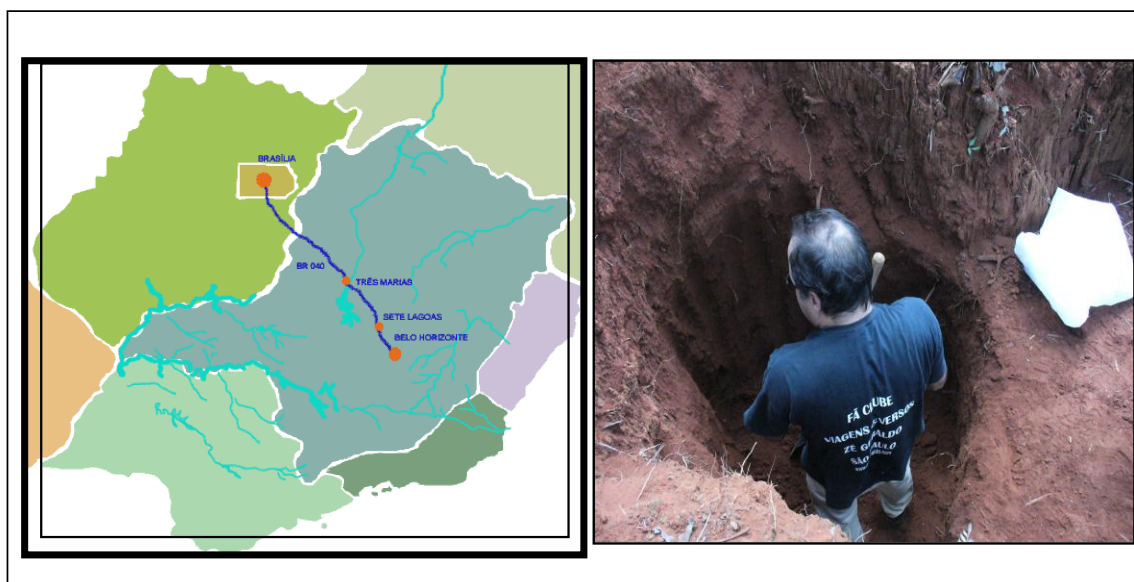
Enfim, deseja-se que os conteúdos aqui apresentados sejam suficientes e sirvam de fundamentação para o entendimento do presente trabalho.

### 3 METODOLOGIA

O presente capítulo traça a metodologia utilizada, descrevendo o caminho percorrido para chegar aos objetivos propostos. Procurou-se realizá-los de acordo com os procedimentos normalizados pela ABNT e, na ausência de uma metodologia específica para determinado ensaio, buscou-se orientação em metodologias afins.

#### 3.1 Amostragem de solo

A amostragem do material terroso tomada para a realização dos estudos foi coletada no Campo Experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) – Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, no estado de Minas Gerais, distante 70 km da capital. A escolha desse local deu-se, principalmente, pelo fato desse tipo de solo ser representativo em todo o território brasileiro e pelos diversos estudos já realizados com ele (EMBRAPA, 2002). De acordo com Sans (1986), este solo recebe a seguinte classificação: latossolo vermelho distrófico típico, com predominância dos minerais de caulinita, gibsitita, hematita e goethita. A FIG. 17 apresenta a localização da referida cidade e o local da coleta da amostragem.



**FIGURA 17 – Localização da coleta da amostragem**

Fonte: Desvendar (Modificado 2008).

## 3.2 Ensaio de caracterização

A bateria de ensaios destinados à caracterização dos solos foi realizada no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG. Os resultados dos ensaios laboratoriais foram obtidos a partir da média aritmética de pelo menos três determinações.

### 3.2.1 Preparação da amostragem

A amostragem foi preparada conforme a NBR 6457/1986 (ABNT, 1986b): **Solo amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Esta norma prescreve o método para a preparação de amostras de solos para os ensaios de compactação e de caracterização (análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm e massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos grãos retidos na peneira 4,8 mm).

### 3.2.2 Análise granulométrica

Os ensaios de análise granulométrica foram executados segundo a NBR 7181/1984 (ABNT, 1984a) – **Solo – análise granulométrica**. O método consiste em quantificar os diferentes diâmetros das partículas sólidas presentes numa amostra de solo a partir de uma série de peneiras com malhas de aberturas padronizadas e/ou empregando a técnica da sedimentação.

### 3.2.3 Limite de plasticidade

A determinação do limite de plasticidade foi feita conforme a NBR 7180/1984 (ABNT, 1984c) – **Solo – determinação do limite de plasticidade**. A técnica consiste em

variar o estado físico do solo, do plástico ao semissólido, a partir da modelagem de um pequeno cilindro com a pasta de solo. Quando esse cilindro de solo começar a fissurar (aparecimento de trincas), o teor de umidade correspondente a esse momento equivale ao limite de plasticidade. O resultado é obtido pela média aritmética das determinações.

#### 3.2.4 Limite de liquidez

A determinação do limite de plasticidade foi feita de acordo com a NBR 6459/1984 (ABNT, 1984b) – **Solo – determinação do limite de liquidez**. A técnica consiste em variar o estado físico de uma amostra de solo, do plástico para o líquido, correlacionando os teores de umidade com os números de golpes do aparelho Casagrande. O resultado do ensaio é o teor de umidade correspondente ao golpe de número 25 determinado no gráfico (números de golpes *versus* teor de umidade).

#### 3.2.5 Limite de contração

Os ensaios para a determinação do limite de contração foram efetuados segundo a NBR 7183/1984 (ABNT, 1984d) - **Determinação do limite e relação de contração de solos**. Tais procedimentos consistem na determinação do teor de umidade correspondente à passagem do estado plástico para o estado sólido de uma amostra de solo.

#### 3.2.6 Massa específica dos grãos

Os ensaios para a determinação da massa específica dos agregados foram efetuados segundo a NBR 6509/1984 (ABNT, 1984g) - **Grãos de solos que passa, na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica**. Os procedimentos consistem em determinar a relação entre a massa das partículas sólidas de uma amostra de solo e o volume que esta massa preenche.

### 3.3 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo a NBR 7182/1986 (ABNT, 1986a) – **Solo – ensaio de compactação**. O método consiste em submeter a amostra de solo com diferentes teores de umidade à ação de uma energia de compactação, determinando a massa específica seca ( $\gamma_s$ ) da amostra de solo em cada teor de umidade ( $h$ ). Com um conjunto dos valores dos pares ordenados é obtida a curva de compactação. O resultado final extraído dessa curva é o par ordenado do valor de massa específica seca máxima ( $\gamma_{smáx}$ ) e o teor de umidade ótimo ( $h_{ótimo}$ ). A energia de compactação utilizada nos ensaios foi de Proctor Normal, a qual é feita utilizando um cilindro metálico de volume igual a 1.000 cm<sup>3</sup>, onde a amostra é compactada em três camadas, sendo que em cada uma delas recebe 26 golpes de um soquete pesando 2,5 kg, caindo de uma altura igual a 30,5 cm.

#### 3.3.1 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados utilizando-se uma miniprensa e um molde cilíndrico de dimensões iguais a 35 mm de diâmetro e 87 mm de altura. A moldagem dos corpos de prova foi feita em cinco camadas distribuídas uniformemente e prensadas estaticamente, resultando em um corpo cujas características de massa específica seca e teor de umidade referem-se àquelas obtidas no estudo de compactação. Para o estudo da correlação entre resistência à compressão e velocidade de propagação da onda sonora, estabeleceu-se que os corpos de prova a serem utilizados tenham as mesmas características de moldagem dos pontos obtidos no estudo de compactação – curva de compactação. Na FIG. 18 são mostrados detalhes da moldagem e do corpo de prova.



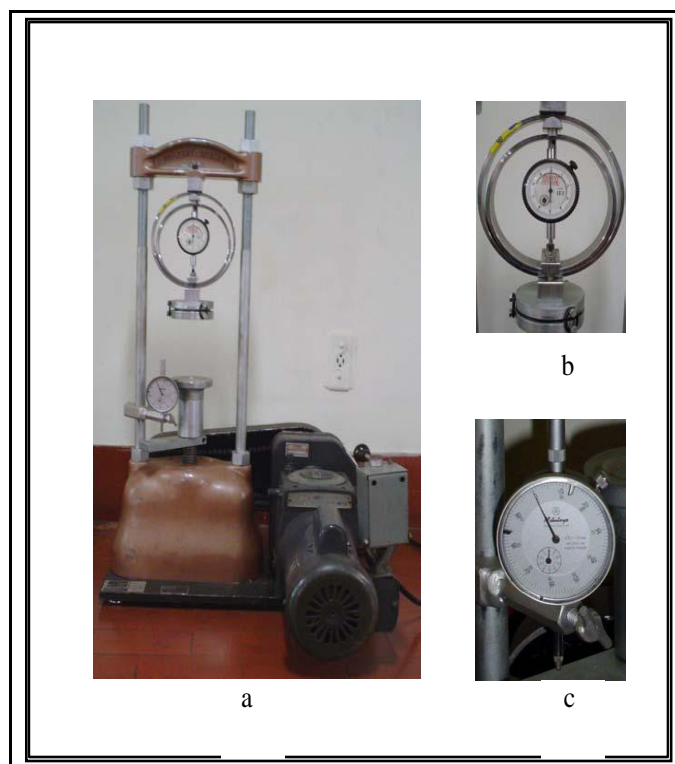
**FIGURA 18 – Detalhe da operação da moldagem (a) e corpo de prova (b)**

Fotos: autora

Depois de moldados, os corpos de prova seguiam para uma câmara úmida (equipamento responsável pela conservação da umidade dos objetos ali depositados), aguardando o momento de serem ensaiados – submetidos aos ensaios de resistência e do ultrassom.

### **3.4 Resistência à compressão simples**

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados segundo a NBR 12770/1984 (ABNT, 1984e) – **Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada**. O método consiste em submeter o corpo de prova a um carregamento axial levando-o até a sua ruptura, registrando-se a deformação ocorrida em cada estágio do carregamento. O resultado deste ensaio é expresso graficamente pelos pares ordenados tensão *versus* deformação, cujo parâmetro de interesse, tensão e deformação de ruptura é abstraído. Foi utilizada uma prensa hidráulica dotada de um anel dinanométrico e um extensômetro, com resolução de 0,01 mm para medir a deformação. As FIG. 19 e 20 apresentam o equipamento utilizado e alguns detalhes da execução do ensaio.



**FIGURA 19 – Equipamento para o ensaio de compressão simples. Prensa mecânica, (a) anel dinamométrico (b) e extensômetro (c)**  
**Fotos: autora**



**FIGURA 20 – Visão geral do *aparatus* (a) e detalhe da superfície de ruptura do corpo de prova (b)**

### 3.5 Ensaio do ultrassom

O ensaio do ultrassom foi realizado com o equipamento *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* – PUNDIT (1994), dotado de uma fonte emissora de impulso ultrassonor, com frequência igual a 54 kHz, munido de dois transdutores de contato (emissor e receptor) e de uma barra de calibração (barra metálica de dimensões iguais a 50 mm de diâmetro e 160 mm de comprimento – denominada aqui de barra referência). O painel do aparelho contém um registrador digital do tempo, um botão seletor de escala (escala inteiro ou decimal) e um botão de ajuste. A FIG. 21 apresenta o aparelho utilizado neste trabalho, mostrando seus referidos componentes.



**FIGURA 21 – Equipamento PUNDIT**

Fotos: autora

Conforme mencionado no início do capítulo, a metodologia empregada para a realização deste ensaio baseou-se em metodologias afins, tal como a NBR 8802/1994 (ABNT, 1984f) – **Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**, visto que ainda não foi publicada uma norma específica destinada à aplicação deste equipamento em materiais terrosos, como é o caso deste estudo. Sendo assim, julga-se que os procedimentos adotados neste trabalho são adequados ao propósito do ensaio em questão.

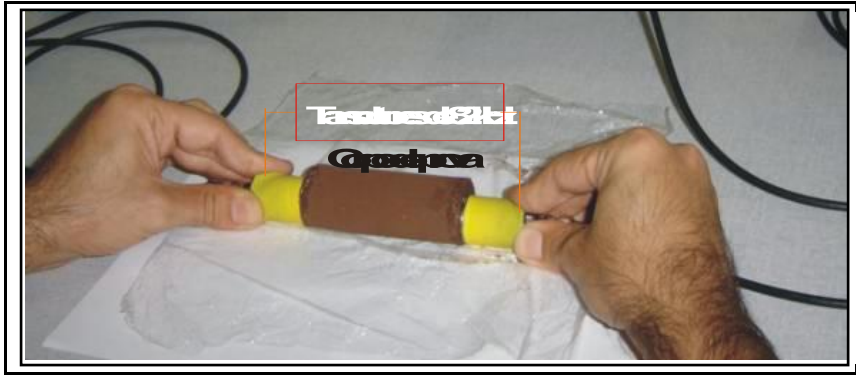
- a) **Calibração do aparelho de ultrassom:** este procedimento tem como objetivo estabelecer a faixa de frequência da onda sonora que será utilizada nos ensaios – faixa de frequência de trabalho. Com o aparelho munido com os transdutores de 54 kHz e de diâmetro de 50 mm, acoplam-se estes nas extremidades da barra

padrão. Para um perfeito acoplamento entre as superfícies, deve-se untar tais superfícies com uma porção de vaselina ou gel. Com o aparelho ligado, são feitas leituras do tempo gasto para a onda sonora atravessar a barra de referência. De acordo com o fabricante do aparelho, a leitura padrão do tempo gasto para atravessar a referida barra é igual a 25,6  $\mu$ s. A calibração do aparelho é satisfatória quando este parâmetro é alcançado. Na FIG. 22 é apresentado um detalhe da operação de calibração do referido aparelho.



**FIGURA 22 – Calibração do equipamento do ultrassom**  
Fotos: autora

- b) **Ensaio do ultrassom propriamente dito:** após os procedimentos de calibração, o aparelho é desligado e é feita a troca dos transdutores de 54 kHz para os transdutores 82 kHz com 32 mm de diâmetro, devido ao tamanho dos corpos de prova (diâmetro de 35mm e 87mm de altura). Julgou-se que estes últimos transdutores são mais adequados para a realização do serviço, isto é, para determinar o tempo da propagação da onda sonora atravessando um corpo de prova constituído de material terroso ou simplesmente de solo, sendo que todos os corpos de prova, as leituras foram feitas na transmissão direta. Realizadas estas operações, os demais procedimentos mencionados na fase da calibração são, também, válidos para esta fase. Com o arranjo, corpo de prova e transdutores já preparados, são feitas as medições do tempo até que a diferença entre três determinações não ultrapasse  $\pm 1\%$  das leituras registradas. O resultado final é dado pela média entre as leituras. Na FIG. 23 são mostradas as medições do tempo de percurso da onda através do solo.



**FIGURA 23 – Operação para determinar o tempo de propagação de ondas ultrassônicas em corpos de prova de material terroso**

Fotos: autora

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios da caracterização geotécnica do solo, da resistência à compressão simples e da determinação da velocidade da propagação da onda sonora (ensaio do ultrassom), bem como são tecidas as principais considerações a eles pertinentes.

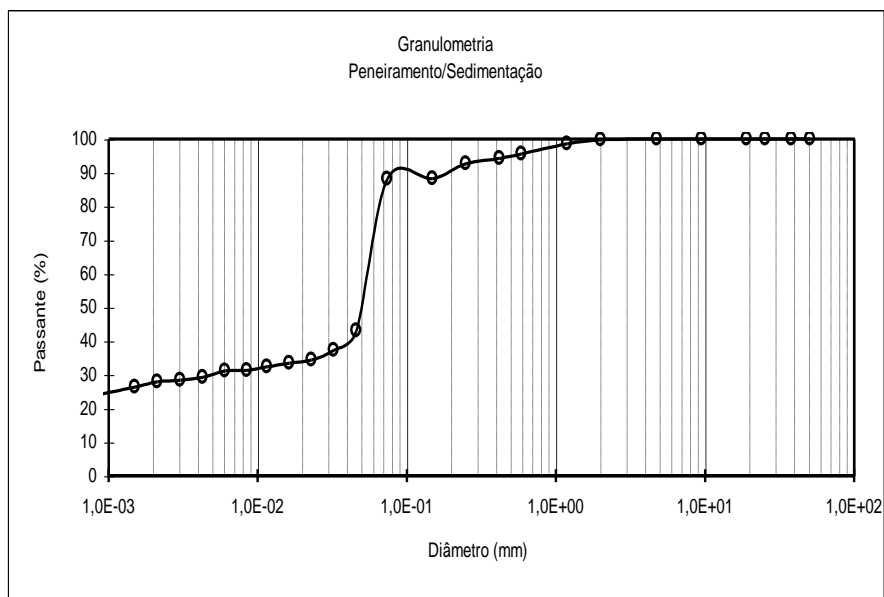
### 4.1 Caracterização geotécnica do solo

A partir do estudo de caracterização geotécnica, foi revelado que o solo utilizado neste trabalho é classificado, segundo a ABNT, como uma argila areno siltosa de cor vermelha, exibindo alta plasticidade. A TAB. 1 resume as propriedades e características geotécnicas do solo em questão

**TABELA 1**  
**Resumo da caracterização do solo**

<b>Índices Físicos</b>	
Massa específica dos sólidos ( $\text{g/cm}^3$ )	2,68
Limite de liquidez (%)	54
Limite de plasticidade (%)	34
Índice de plasticidade (%)	20
Índice de contração (%)	1,5
<b>Granulométrica (ABNT)</b>	
Pedregulho ( $d > 2,0$ mm)	0 %
Areia ( $0,06 < d < 2,0$ mm)	10 %
Silte ( $0,002 < d < 0,06$ mm)	3 %
Argila ( $d < 0,002$ mm)	87 %
<b>Compactação Proctor Normal</b>	
Massa específica seca máxima ( $\text{g/cm}^3$ )	1,373
Umidade ótima (%)	31
<b>Classificação Geotécnica</b>	
Textura	Argila areno siltosa, cor vermelha
Plasticidade	Altamente plástica

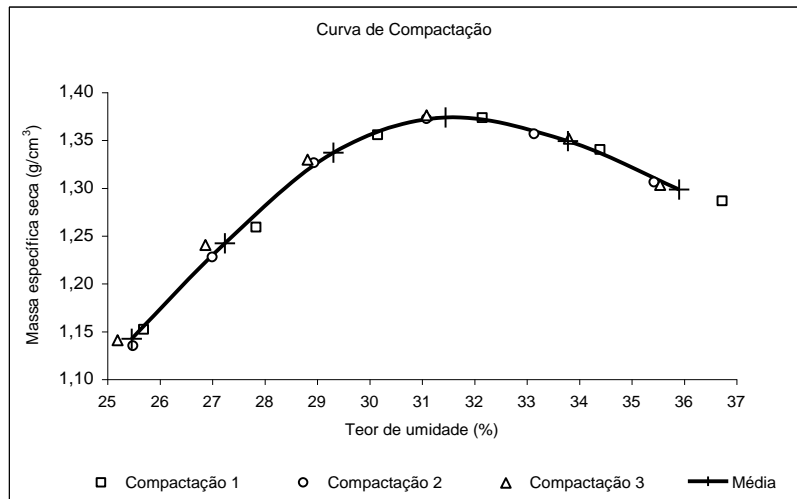
Vale lembrar que esses índices apresentados são valores médios de três determinações. Isto quer dizer que, para obtenção de cada um deles, foram realizados, no mínimo, três ensaios, sendo adotado como resultado final a média aritmética dos valores obtidos pela série de ensaios. Esse procedimento atesta a confiabilidade dos índices (valores) aqui apresentados. No GRÁF. 1 é apresentada a curva de distribuição granulométrica do solo em questão.



**GRÁFICO 1 – Distribuição granulométrica do solo**

#### 4.2 Estudo de compactação

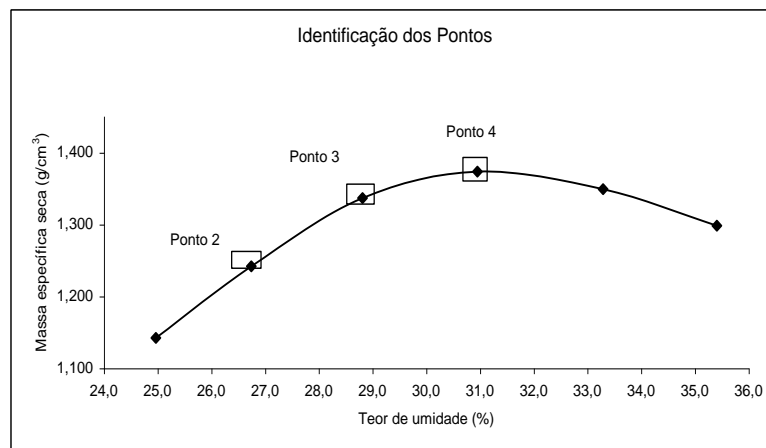
O GRÁF. 2, denominado curva de compactação, expressa a relação entre o teor de umidade e massa específica seca alcançada a partir da aplicação de um esforço de compactação cuja energia é a Proctor Normal. Pode-se verificar que a densidade da amostra do solo é diretamente proporcional ao teor de umidade presente nela, até atingir o ponto máximo da curva. A partir deste, a relação entre densidade e teor de umidade torna-se inversamente proporcional, isto é, para um dado acréscimo de umidade a densidade torna-se menor. Este estudo é de grande utilidade para a engenharia de obras de terra, pois é de se esperar que as estruturas, pavimentação rodoviárias, aterros, etc. tenham mais estabilidade e durabilidade quando construídas com um teor de umidade ótimo, sujeita a uma energia de compactação tal que a massa específica máxima seja alcançada.



**GRÁFICO 2 – Curva de compactação do solo**

### 4.3 Moldagem dos corpos de prova

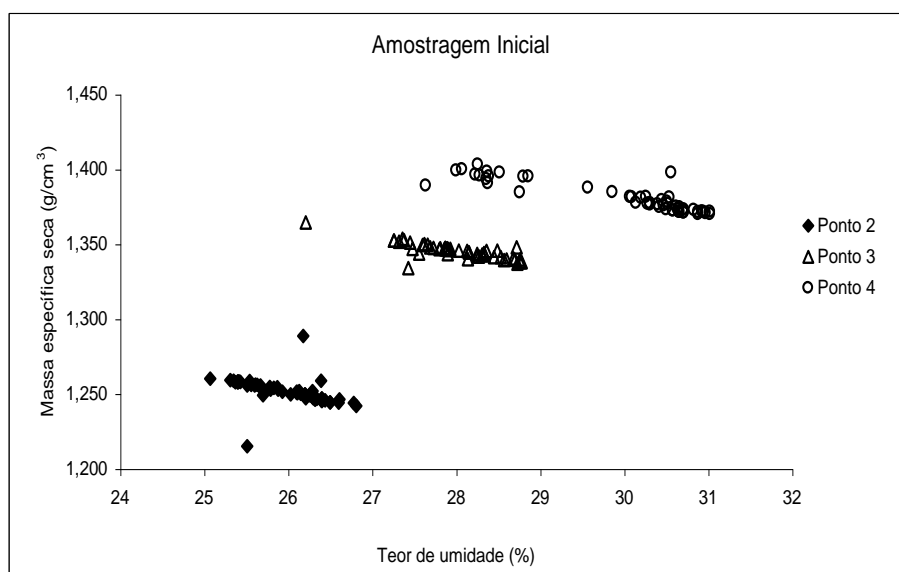
Neste trabalho, um dos objetivos é subsidiar a construção de estruturas de taipas de pilão com os conhecimentos geotécnicos. Sendo assim, os corpos de prova constituem-se em modelos físicos, representando uma estrutura de terra. Sabendo que as estruturas de taipa de pilão são, comumente, construídas com o material terroso numa condição quase seca, isto é, abaixo do teor de umidade ótimo do solo, estabeleceu-se que os corpos de prova representativos da condição desta prática fossem aqueles moldados com base nas características dos pontos 2, 3 e 4 obtidos na curva de compactação, tal como identificado no GRÁF. 3.



**GRÁFICO 3 – Identificação dos pontos para o estudo de correlação**

O GRÁF. 3 auxilia a identificação e localização dos pontos na curva de compactação. O ponto 2, representando o segundo ponto antes da umidade ótima (condição mais seca), apresenta massa específica seca ( $\gamma_s$ ) igual a 1,247 g/cm<sup>3</sup> e teor de umidade ( $h$ ) igual a 26,6%. O ponto 3, localizado um ponto antes da umidade ótima, exibe massa específica seca igual a 1,339 g/cm<sup>3</sup> e teor de umidade igual a 28,7%. Já no ponto 4, localizado no ponto de máximo da curva, a massa específica seca é igual a 1,373 g/cm<sup>3</sup> e o teor de umidade igual a 31%.

Para a realização dos trabalhos, foram moldados 170 corpos de prova, sendo 65 exemplares representando o ponto 2; 52 exemplares representando o ponto 3; e 53 exemplares representando o ponto 4. O GRÁF. 4 apresenta as características de massa específica de teor de umidade de moldagem dos 170 exemplares – amostragem inicial.



**GRÁFICO 4 – Amostragem inicial**

O conjunto de dados (identificação dos corpos de prova, comprimento, diâmetro, teor de umidade e massa específica) que gerou o GRÁF. 4 é encontrado nos APÊNDICES A, B, C.

Para avaliar a qualidade da moldagem dos corpos de prova, definiu-se que os exemplares considerados satisfatórios são aqueles que apresentam características de massa específica e teor de umidade iguais àquelas desejadas (obtidas na curva de compactação), acrescida de um erro relativo de  $\pm 2\%$ . Este valor adotado para erro relativo é comumente usado no tratamento de dados desta natureza e pode ser dado pelas seguintes expressões:

$$\left| \frac{h - h_0}{h_0} \right| \leq 0,02 \quad (16)$$

$$\left| \frac{\gamma_i - \gamma_0}{\gamma_0} \right| \leq \varepsilon(\gamma) \quad (17)$$

sendo  $\varepsilon(h)$  e  $\varepsilon(\gamma)$  os erros relativos referentes ao teor de umidade e da massa específica seca, respectivamente:  $h_i$  o teor de umidade do corpo de prova;  $h_0$  o teor de umidade desejado;  $\gamma_i$  a massa específica seca do corpo de prova; e  $\gamma_0$  a massa específica seca da desejada.

Na TAB. 2 apresentam-se os intervalos do teor de umidade e da massa específica seca admissíveis para os pontos em questão.

**TABELA 2**

**Limites inferiores e superiores admissíveis para os pontos do estudo**

Pontos	Parâmetro desejado		h (%)		$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	
	h (%)	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	inferior	superior	inferior	superior
2	26,6	1,247	26,1	27,1	1,222	1,272
3	28,7	1,339	28,1	29,3	1,312	1,366
4	31,0	1,373	30,1	31,6	1,345	1,400

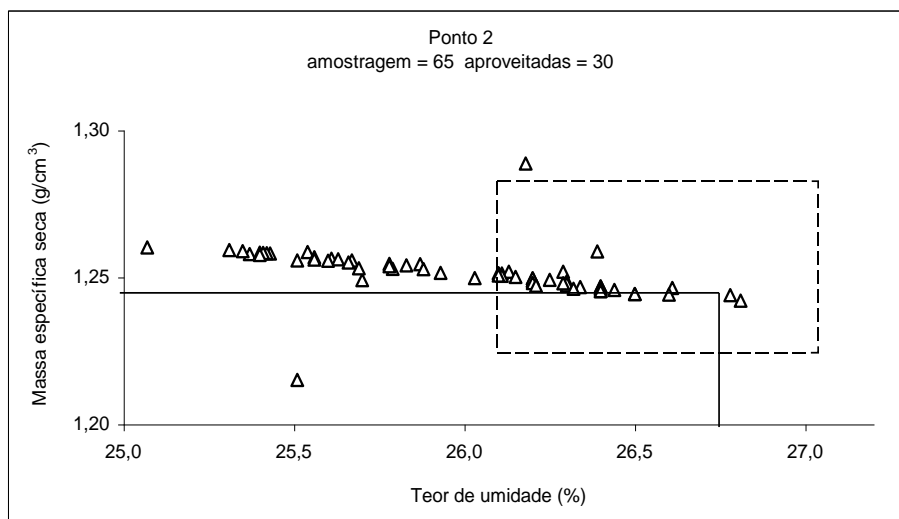
Do total de 170 exemplares da amostragem inicial restaram apenas 84 exemplares depois que o conjunto de dados foi analisado pelo critério de aceitabilidade aqui adotado, formado os subconjuntos de dados para os pontos:

- a) ponto 2: a quantia de 30 exemplares;
- b) ponto 3: a quantia de 25 exemplares;
- c) ponto 4: a quantia de 29 exemplares.

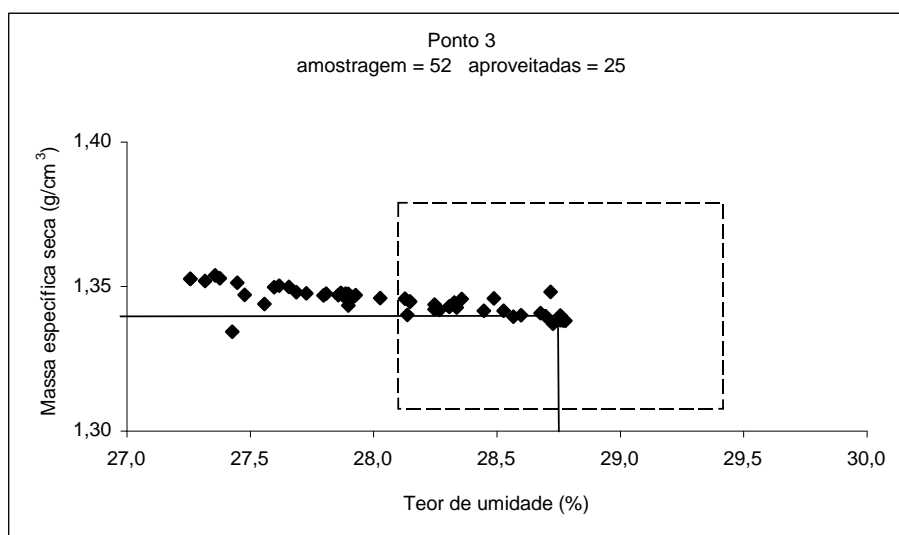
É atribuída como principal fator dos erros ocorridos na moldagem a ineficiência da câmara úmida utilizada para conservar a umidade dos corpos de prova. Isto foi constatado depois de realizar-se uma série de moldagem de corpos de prova e submetê-los imediatamente aos ensaios de resistência e de ultrassom, eliminando-se a permanência destes na câmara úmida. Sendo assim, detectado o vetor causador do erro, os experimentos passaram a ser realizados sem a utilização da referida câmara.

Os GRÁF. 5 e 6 mostram a seleção dos exemplares considerados válidos, ou seja, aqueles que apresentaram características de moldagem dentro do intervalo de aceitabilidade. As linhas tracejadas delimitam a região cujos valores são aceitos e as linhas contínuas indicam o valor do par ordenado da massa específica seca e do teor de umidade desejado na

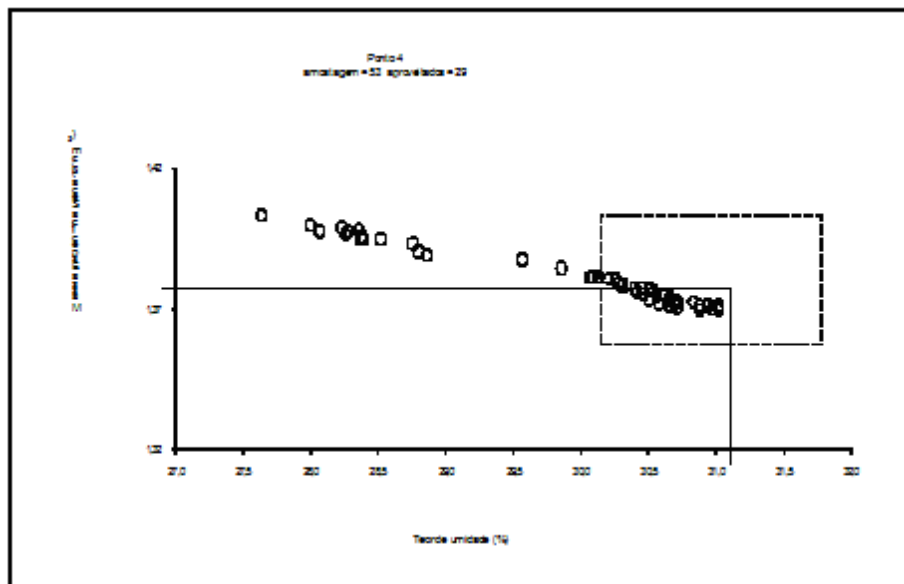
moldagem dos corpos de prova. Os dados que originaram os GRÁF. 5, 6 e 7 estão contidos no APÊNDICE A, B e C.



**GRÁFICO 5 – Exemplos com características de moldagem válidas – Ponto 2**



**GRÁFICO 6 – Exemplos com características de moldagem válidas – Ponto 3**



**GRÁFICO 7 – Exemplos com características de moldagem válidas – Ponto 4**

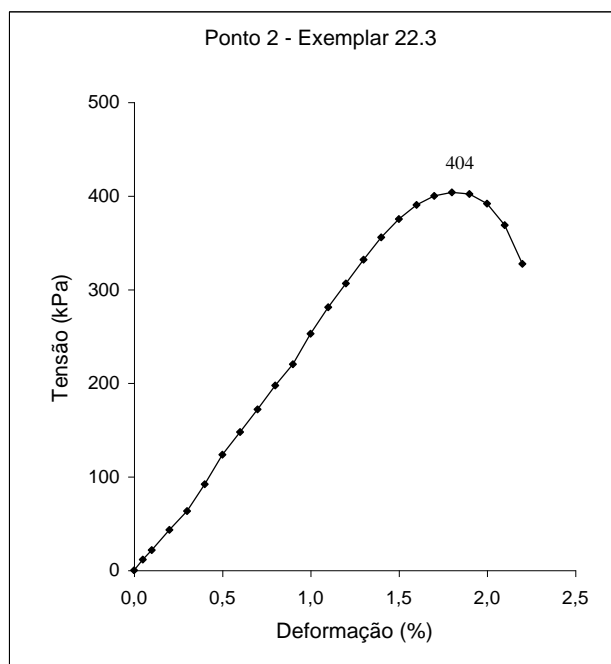
#### **4.4 Resistência à compressão simples e velocidade ultrassom**

Pode-se considerar que esta seção é a mais importante deste trabalho, pois nela será explorada a correlação entre os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão simples e pelo ensaio do ultrassom. Os parâmetros aqui envolvidos são: a tensão de ruptura e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, cada qual determinada, direta e indiretamente, pelos respectivos aparelhos. Vale lembrar que foi realizado um total de 84 ensaios de resistência e de ultrassom, sendo 30, 25 e 29 de ambos os ensaios para os pontos 2, 3 e 4, respectivamente.

##### **4.4.1 Ponto 2**

O ponto 2 representa a característica de massa específica e teor de umidade na condição mais seca, condição esta a mais próxima daquela que é geralmente empregada na construção das estruturas de taipa de pilão. O GRÁF. 8 mostra um exemplo do resultado

obtido no ensaio de resistência à compressão simples, do qual é determinada a resistência de ruptura e a correspondente deformação.



**GRÁFICO 8 – Tensão x deformação (Ponto 2 – exemplar 2.23)**

A TAB. 3 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e do ultrassom referentes ao ponto 2, bem como o sumário estatístico dos dados tabelados.

**TABELA 3**

**Resumo dos resultados do ensaio de resistência e ultrassom (Ponto 2)**

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
1	2Dd	82,5	34,9	26,29	1,252	0,943	489	1,80
2	2G	81,6	35,0	26,61	1,246	0,904	444	2,20
3	2.1	82,8	35,0	26,40	1,247	0,899	393	1,70
4	2,2	82,0	35,0	26,78	1,244	0,892	409	1,70
5	2.3	82,0	34,9	26,20	1,250	0,896	404	1,80
6	2.4	82,0	34,9	26,11	1,250	0,889	379	1,60
7	2.6	82,0	34,9	26,25	1,249	0,899	464	1,80
8	2.7	82,0	34,9	26,15	1,250	0,871	384	1,40
9	2.8	81,1	35,0	26,30	1,248	0,883	432	1,90
10	2.9	82,4	35,1	26,40	1,246	0,843	362	1,50
11	2.11	82,5	35,0	26,20	1,249	0,839	361	1,50
12	2.12	82,0	34,9	26,20	1,249	0,860	404	1,70

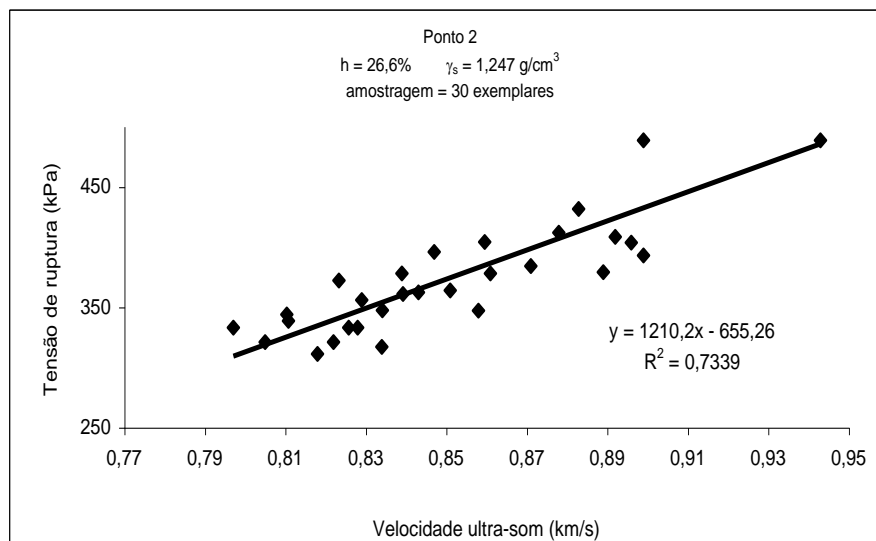
Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
13	2.13	83,0	35,1	26,20	1,250	0,811	339	1,40
14	2.14	83,9	35,1	26,30	1,249	0,823	372	1,50
15	2.15	83,5	35,0	26,30	1,247	0,810	344	1,50
16	2.16	82,3	34,9	26,20	1,248	0,834	348	1,30
17	2.17	84,2	35,1	26,10	1,251	0,797	333	1,40
18	2.19	84,5	35,1	26,60	1,244	0,822	321	1,00
19	2.20	83,1	35,0	26,40	1,247	0,826	333	1,20
20	2.21	83,3	35,0	26,40	1,246	0,826	333	1,10
21	2.22	84,7	35,2	26,30	1,248	0,858	347	1,10
22	2.26	82,0	34,9	26,29	1,248	0,870	396	1,10
23	2.27	83,9	35,0	26,40	1,245	0,818	311	1,10
24	2.28	82,3	34,9	26,50	1,244	0,851	364	1,20
25	2.29	83,0	35,0	26,21	1,247	0,878	412	1,30
26	2.30	83,1	35,0	26,40	1,245	0,805	321	1,20
27	2.31	82,9	34,9	26,50	1,244	0,834	317	1,20
28	2.32	82,8	34,9	26,34	1,247	0,829	356	1,30
29	2.33	83,3	35,0	26,32	1,246	0,861	378	1,30
30	2.34	82,4	34,9	26,44	1,246	0,839	378	1,50
Resumo da Descrição Estatística								
Máximo		84,7	35,2	26,78	1,252	<b>0,943</b>	<b>489</b>	2,20
Mínimo		81,2	34,9	26,10	1,244	<b>0,797</b>	<b>311</b>	1,00
Média		82,8	35,0	26,34	1,247	<b>0,854</b>	<b>374</b>	1,44
Amplitude		3,5	0,30	0,68	0,008	<b>0,146</b>	<b>178</b>	1,20
Moda		82	35,0	26,40	1,246	<b>0,899</b>	<b>321</b>	1,50
Desvio-padrão		0,9	0,08	0,16	0,002	<b>0,036</b>	<b>44</b>	0,29
Variância		0,74	0,007	0,024	0,000	<b>0,001</b>	<b>1971</b>	0,08

No resumo da descrição estatística da TAB. 3, vale chamar a atenção para os conjuntos de valores representando os parâmetros de resistência e da velocidade da onda ultrassônica. De imediato, verifica-se que o parâmetro de resistência apresentou significativa variação, exibindo amplitude de 178 kPa, desvio-padrão igual a 44 kPa e variância igual a 1971 kPa<sup>2</sup>. O contrário é observado em relação ao parâmetro representando a velocidade, cujos valores da amplitude, desvio-padrão e variância foram 0,146 km/s, 0,036 km/s e 0,001 (km/s)<sup>2</sup>, respectivamente. Este comportamento de variação, aqui registrado para as duas variáveis, é semelhante àquele encontrado nos trabalhos de Evangelista (2002), Ferrarri e Padaratz (2003), Machado (2005) e Popovics (2001).

A variação do parâmetro de resistência é esperada e é uma característica nos ensaios de resistência de materiais, até mesmo naqueles cujos comportamentos mecânicos são bem mais homogêneos do que o material terroso, como, por exemplo, materiais metálicos. Tal parâmetro tende a variar mais que os parâmetros físicos, como: geometria da peça, densidade, etc.

Jennings e Burland (1962), *apud* Fredlund; Rahardjo, (1993) verificaram, experimentalmente, que a variação da resistência em um solo numa condição não saturada é mais pronunciada quanto mais seco o solo estiver. Os autores atribuem esta variação à influência da sucção mátrica, a qual afeta, adversamente, o comportamento mecânico dos solos nessas condições. Porém, à medida que o solo se aproxima da sua umidade ótima, esta variação vai-se tornando menos pronunciada.

O GRÁF. 9 apresenta a correlação entre a resistência de ruptura e a velocidade de onda ultrassônica, cujo valor do coeficiente de correlação é igual a 0,73, sendo considerado regular, de acordo com Almeida (1993).



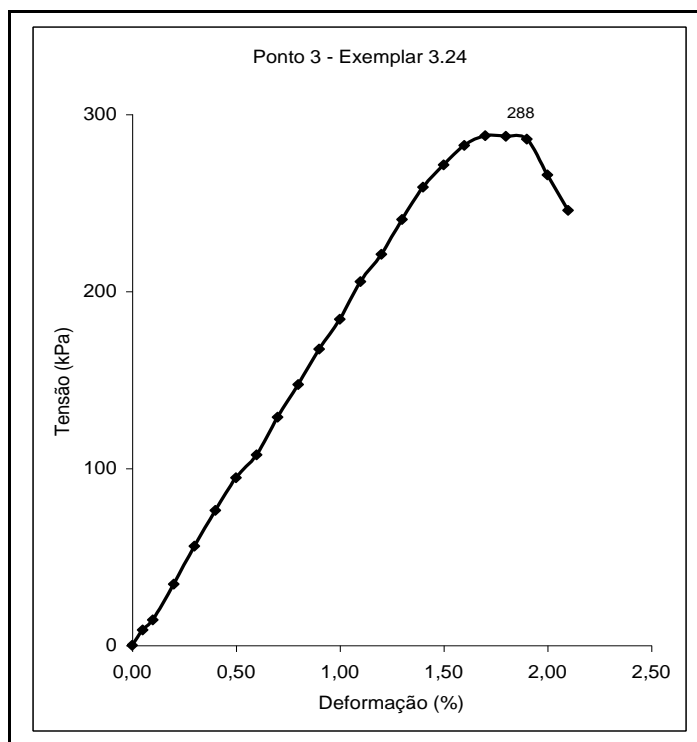
**GRÁFICO 9 – Resistência de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 2)**

#### 4.4.2 Ponto 3

O ponto 3 representa a condição intermediária entre a mais seca e a dita ótima. A apresentação dos resultados obedecerá à mesma seqüência da seção anterior, ou seja, será dado um exemplo de um ensaio de resistência à compressão simples, uma tabela dos resultados finais dos ensaios de resistência do ultrassom e o sumário estatístico dos conjuntos

de dados e, finalmente, é apresentado o gráfico com o resultado da correlação entre as variáveis em questão.

O GRÁF. 10 exemplifica o resultado obtido no ensaio de resistência à compressão simples, do qual são determinados o valor da tensão de ruptura e a sua deformação correspondente.



**GRÁFICO 10 – Tensão x deformação (Ponto 3 – exemplar 3.24)**

A TAB. 4 disponibiliza os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e do ultrassom referentes ao ponto 3 e sumário estatístico dos dados tabelados.

**TABELA 4**

**Resumo dos resultados do ensaio de resistência e ultrassom (Ponto 3)**

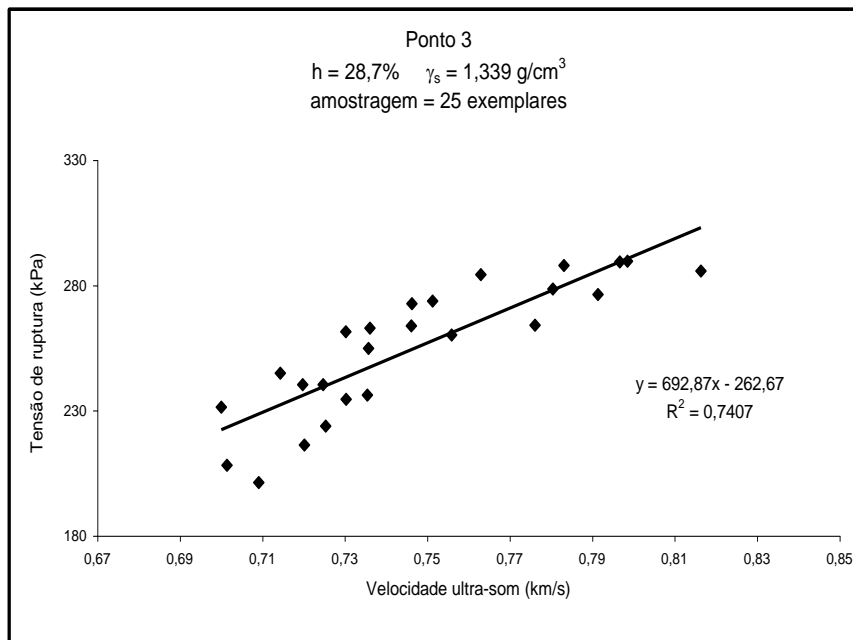
Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
1	3Q	85,8	34,9	28,15	1,345	0,816	286	1,50
2	3.1	86,3	35,1	28,72	1,348	0,736	255	1,90
3	3.2	85,9	35,0	28,14	1,340	0,720	216	1,40
4	3.3	86,0	35,0	28,15	1,345	0,740	273	1,60
5	3.4	86,7	35,2	28,13	1,346	0,701	208	1,20
6	3.5	86,2	35,1	28,36	1,345	0,736	263	1,50
7	3.6	86,3	35,1	28,27	1,342	0,799	290	1,60

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
8	3.7	86,4	35,1	28,60	1,340	0,780	279	1,50
9	3.8	87,5	35,2	28,49	1,346	0,791	276	1,30
10	3.9	86,2	35,0	28,68	1,341	0,751	274	1,70
11	3.10	86,4	35,0	28,70	1,340	0,746	264	1,70
12	3.11	86,2	35,0	28,76	1,340	0,756	260	1,50
13	3.12	84,4	34,8	28,53	1,341	0,700	231	1,60
14	3.13	86,0	35,0	28,25	1,342	0,730	262	1,50
15	3.14	86,2	35,1	28,57	1,339	0,714	245	1,30
16	3.15	86,4	34,9	28,73	1,337	0,709	201	1,10
17	3.16	85,8	35,0	28,78	1,338	0,720	240	1,40
18	3.17	86,2	35,0	28,34	1,343	0,725	224	1,20
19	3.18	85,2	34,9	28,25	1,343	0,763	284	1,50
20	3.19	85,4	35,0	28,77	1,338	0,730	235	1,50
21	3.20	85,3	35,0	28,76	1,338	0,725	240	1,40
22	3.21	86,0	35,1	28,31	1,343	0,735	236	1,40
23	3.22	85,4	34,9	28,45	1,341	0,776	264	1,60
24	3.23	84,9	34,8	28,33	1,344	0,797	289	1,70
25	3.24	85,0	35,0	28,31	1,343	0,783	288	1,70

#### Resumo da Descrição Estatística

Máximo	87,50	35,2	28,78	1,348	<b>0,816</b>	<b>290</b>	1,90
Mínimo	84,40	34,8	28,13	1,337	<b>0,700</b>	<b>201</b>	1,10
Média	85,92	35,0	28,46	1,342	<b>0,748</b>	<b>255</b>	1,49
Amplitude	3,10	0,40	0,65	0,011	<b>0,116</b>	<b>84</b>	0,80
Moda	86,20	35,0	28,13	0,003	<b>0,033</b>	<b>240</b>	1,50
Desvio-padrão	0,65	0,10	0,23	0,000	<b>0,001</b>	<b>26</b>	0,18
Variância	0,424	0,01	0,053	1,340	<b>0,000</b>	<b>693</b>	0,034

Os valores registrados da amplitude, do desvio-padrão e da variância foram 88 kPa, 26 kPa 693 kPa<sup>2</sup>, respectivamente. Tais valores são significativamente inferiores aos apresentados pelo ponto 2. O GRÁF. 11 mostra a correlação entre a resistência de ruptura e a velocidade de onda ultrassônica, cujo valor do coeficiente de correlação é igual a 0,74, sendo considerado regular, de acordo com Almeida (1993).



**GRÁFICO 11 – Resistência de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 3)**

#### 4.4.3 Ponto 4

O ponto 4 representando as características de teor de umidade ótimo e de massa específica seca máxima foi aquele que, em termos de resistência, apresentou menor valor de tensão de ruptura (TAB. 5). Este comportamento é demonstrado na seção 2.2.3. A TAB. 5 exhibe os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e do ultrassom, referentes ao ponto 4 e sumário estatístico dos dados tabelados.

**TABELA 5**

**Resumo dos resultados do ensaio de resistência e ultrassom (Ponto 4)**

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca ( $\text{g/cm}^3$ )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
1	4Aa	84,7	34,7	30,47	1,376	0,451	187	1,80
2	4 <sup>O</sup>	87,3	35,0	30,56	1,375	0,444	172	1,60
3	4P	87,2	35,0	30,42	1,376	0,450	179	1,60
4	4R	87,4	35,1	30,51	1,377	0,449	175	1,40
5	4T	87,8	35,1	30,45	1,378	0,446	180	1,60
6	4W	87,8	35,1	30,54	1,377	0,450	196	1,60
7	4X	88,0	35,1	30,40	1,377	0,443	169	1,40

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
8	4.1	87,9	35,0	30,71	1,371	0,449	199	1,70
9	4.2	87,8	35,0	30,88	1,370	0,444	159	1,60
10	4.3	88,5	35,1	30,71	1,371	0,449	187	1,50
11	4.4	88,1	35,1	30,58	1,372	0,443	160	1,60
12	4.5	87,9	35,0	30,58	1,372	0,444	160	1,70
13	4.6	88,0	35,1	30,52	1,377	0,446	179	1,60
14	4.7	87,8	35,0	30,83	1,373	0,446	169	1,60
15	4.8	87,7	35,0	30,88	1,371	0,447	177	1,90
16	4.9	88,0	35,0	31,02	1,370	0,449	182	1,60
17	4.10	87,8	35,0	30,50	1,373	0,441	150	2,00
18	4.11	87,8	35,0	30,66	1,375	0,436	145	1,70
19	4.12	88,0	35,0	30,93	1,372	0,441	148	1,70
20	4.13	88,0	35,0	30,97	1,371	0,444	163	1,80
21	4.14	88,0	35,0	31,02	1,372	0,450	186	1,70
22	4.15	88,0	35,0	30,65	1,372	0,449	175	1,60
23	4.16	88,2	35,1	30,95	1,372	0,432	126	1,70
24	4.17	88,4	35,1	30,70	1,373	0,443	152	1,70
25	4.18	87,9	35,0	30,71	1,373	0,443	155	1,70
26	4.19	88,0	35,0	30,64	1,373	0,443	160	1,70
27	4.20	88,0	35,0	30,62	1,375	0,446	180	1,90
28	4.21	87,9	35,0	30,66	1,371	0,444	160	1,60
29	4.22	87,9	35,0	30,65	1,373	0,450	183	1,90

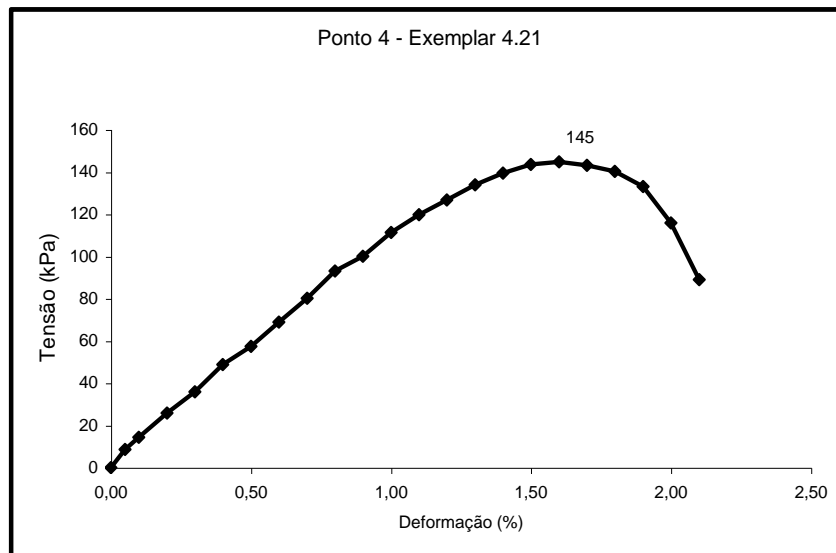
#### Resumo da Descrição Estatística

Máximo	88,5	35,0	31,02	1,378	<b>0,451</b>	<b>199</b>	2,00
Mínimo	84,5	35,1	30,40	1,370	<b>0,432</b>	<b>126</b>	1,40
Média	87,8	34,7	30,66	1,373	<b>0,445</b>	<b>169</b>	1,67
Amplitude	3,8	0,4	0,620	0,008	<b>0,019</b>	<b>73</b>	0,600
Moda	88,0	35,0	30,71	1,371	<b>0,444</b>	-	1,60
Desvio- padrão	0,652	0,079	0,184	0,002	<b>0,004</b>	<b>16</b>	0,139
Variância	0,425	0,006	0,030	0,00	<b>0,000</b>	<b>275</b>	0,019

Mais uma vez, os conjuntos de valores em destaque mostram que a variação dos parâmetros aqui discutidos vai diminuindo à medida que o solo se aproxima da condição ótima. A TAB. 5 traz os registros dos parâmetros:

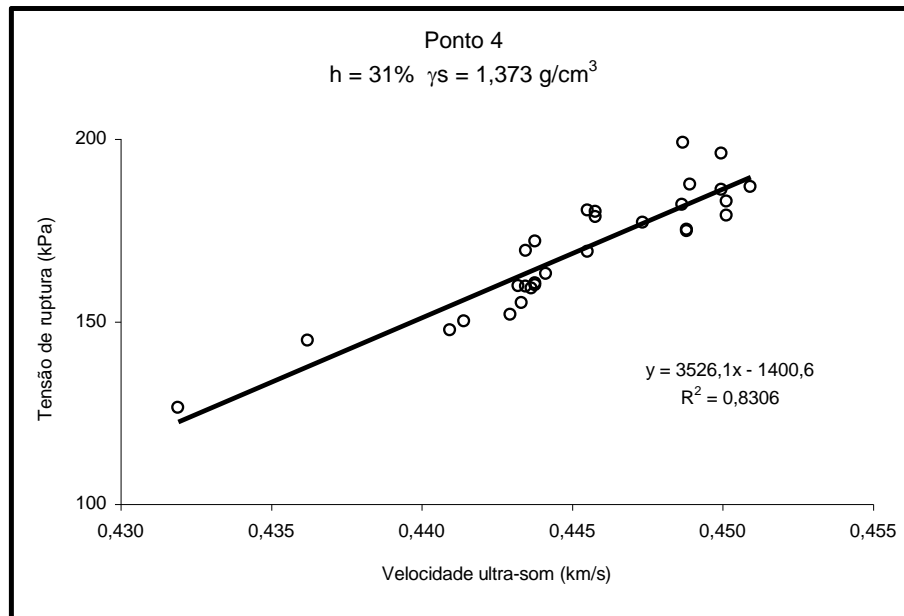
- a) de resistência: amplitude 73 kPa, desvio-padrão 16 kPa e variância igual a 275 kPa<sup>2</sup>;
- b) de velocidade: amplitude 0,19 km/s, desvio-padrão 0,004 km/s e variância igual a zero (km/s)<sup>2</sup>.

O GRAF. 12 mostra um exemplo do resultado obtido no ensaio de resistência à compressão simples, do qual são determinadas a resistência de ruptura e sua deformação correspondente.



**GRÁFICO 12 – Tensão x deformação (Ponto 4 – exemplar 4.21)**

O GRÁF. 13 apresenta a correlação entre a resistência de ruptura e a velocidade de onda ultrassônica, cujo valor do coeficiente de correlação é igual a 0,83, sendo considerado bom, de acordo com Almeida (1993).

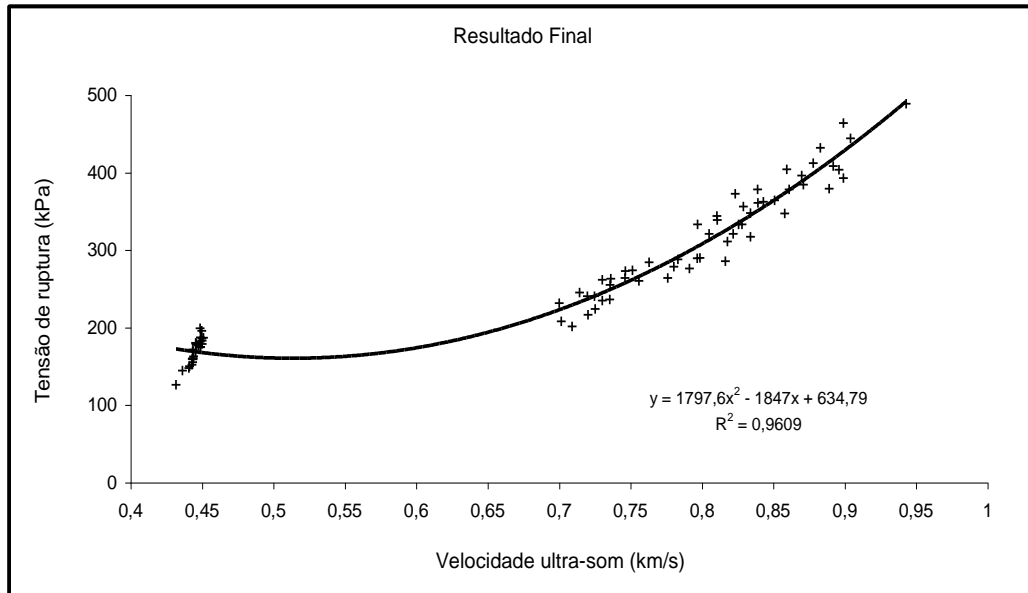


**GRÁFICO 13 – Resistência de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 4)**

#### 4.5 Resultado final

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo da correlação entre resistência à compressão simples de um material terroso – solo – e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, na intenção de subsidiar a elaboração de um protocolo metodológico capaz de avaliar a integridade estrutural de estruturas de taipa de pilão, empregando-se o método do ultrassom.

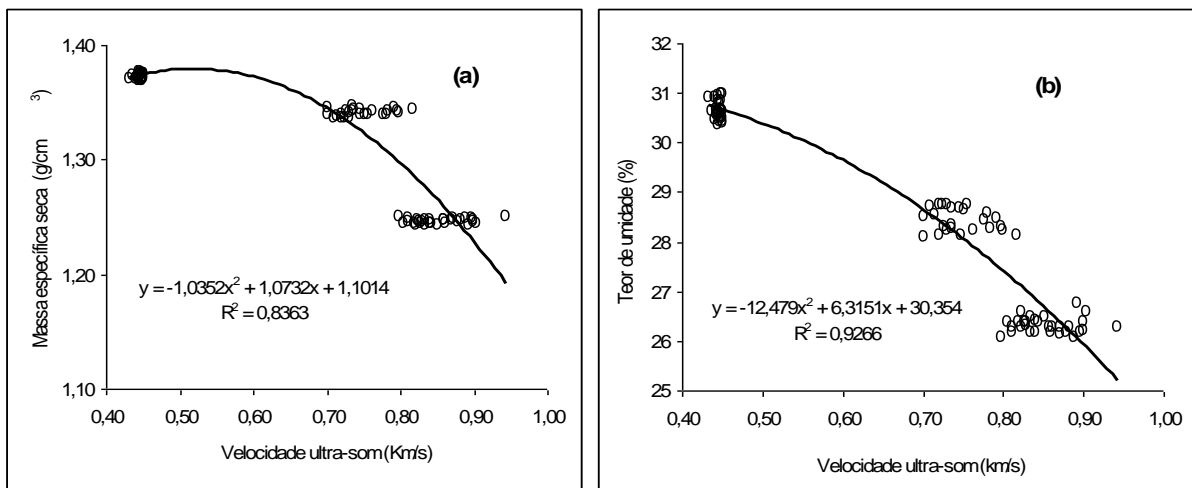
O resultado final desta pesquisa é apresentado no GRÁF. 14, o qual não deixa dúvidas sobre a existência de uma relação entre resistência e velocidade da onda ultrassônica. O ajuste foi obtido pela regressão polinomial de grau 2, exibindo coeficiente de correlação igual a 0,96, valor este considerado bom de acordo com a classificação de Almeida, 1993.



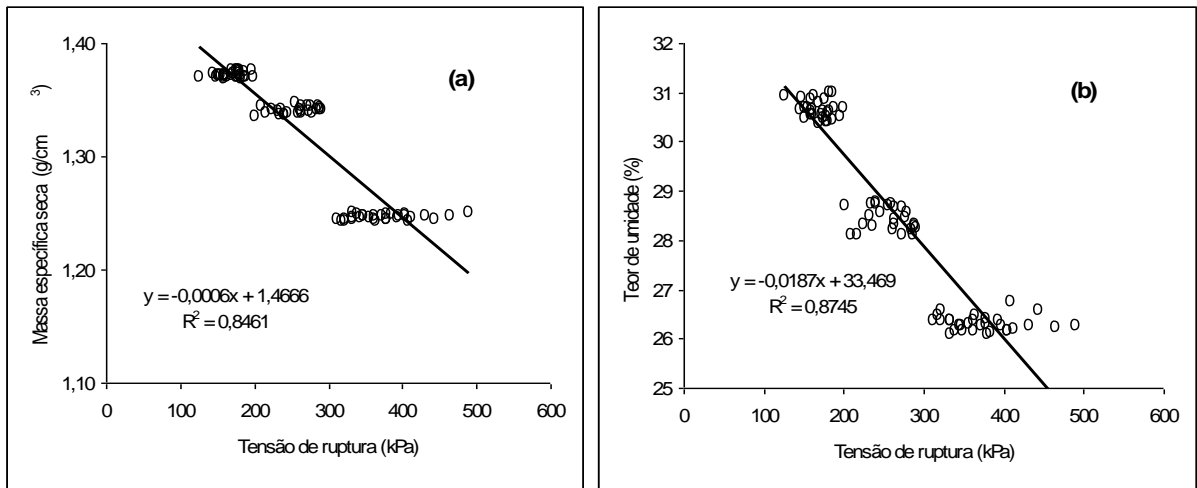
**GRÁFICO 14 – Tensão de ruptura x velocidade ultrassônica – Pontos 2, 3 e 4**

Nos GRÁF. 15 e 16 são exploradas outras relações entre as variáveis: velocidade, densidade, a teor de umidade e tensão, respectivamente. Vale frisar que as conclusões a seguir são válidas para os pontos aqui estudados, não devendo ser extrapoladas para os demais pontos da curva de compactação:

- a) a velocidade de propagação da onda ultrassônica é inversamente proporcional ao teor de umidade presente no solo e à densidade do mesmo;
- b) a tensão de ruptura do solo é inversamente proporcional ao teor de umidade e à densidade do solo em questão.



**GRÁFICO 15 – Velocidade x densidade (a) e velocidade x teor de umidade (b)**



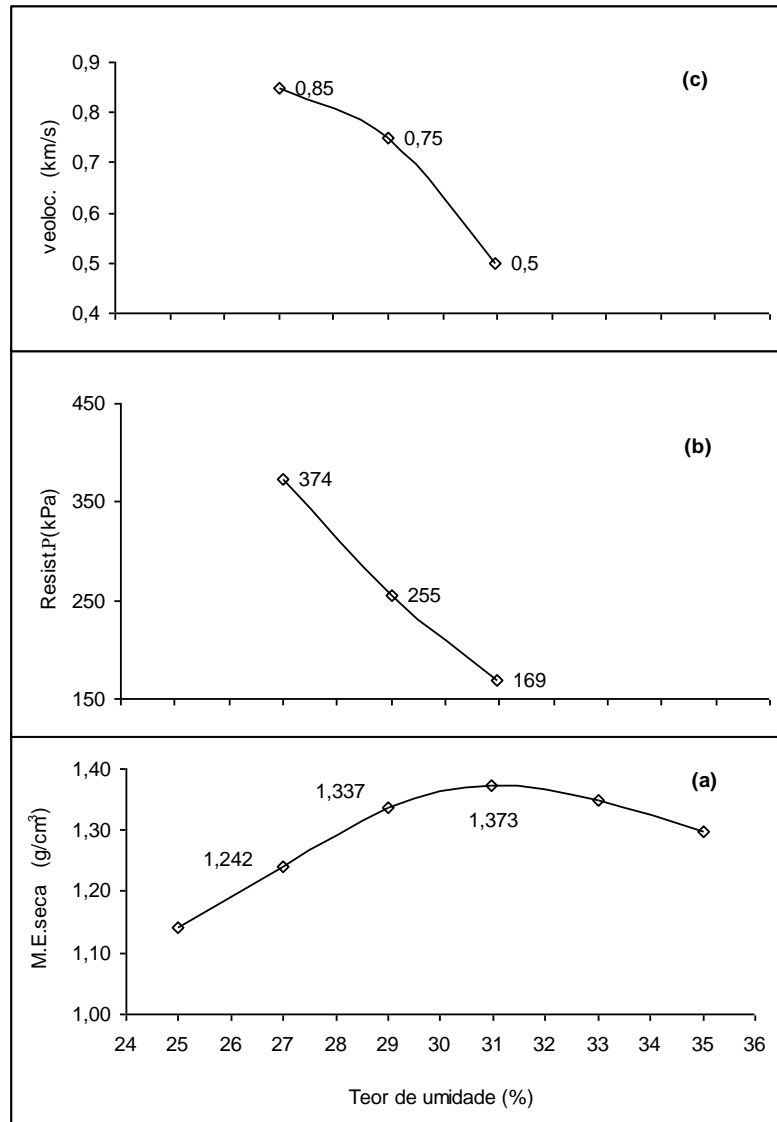
**GRÁFICO 16 – Tensão de ruptura x densidade (a) e tensão de ruptura x teor de umidade (b)**

Enfim, pode-se concluir que a metodologia aqui empregada aponta, em caráter introdutório, a possibilidade de o método do ultrassom ser empregado na avaliação indireta de estruturas construídas com materiais terrosos. Porém, sua aplicação definitiva como método de avaliação não-destrutivo exige mais pesquisas, levando-se em conta outros tipos e natureza de solos e escalas diferentes (escala piloto e real). O resultado final desta pesquisa pode ser apresentado agrupando-se os valores representativos das variáveis em questão, tal como apresentado na TAB. 6 e no GRÁF. 17.

**TABELA 6**

**Intervalos dos valores representativos**

<b>Velocidade (km/s)</b>	<b>Tensão de ruptura (kPa)</b>
0,40 a 0,45	120 a 190
0,70 a 0,85	210 a 300
> 0,85	310 a 500



**GRÁFICO 17 – Resultado final: curva de compactação (a); curva de resistência (b); e curva de velocidade ultrassônica (c)**

## 5 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como proposta elaborar um estudo que servisse como o primeiro passo para verificar-se a aplicabilidade do ultrassom como método de avaliação não-destrutiva das condições estruturais de estruturas de terra destinadas à confecção da taipa de pilão. As principais conclusões e sugestões para futuras pesquisas são enumeradas a seguir.

### 1) Quanto ao resultado final, pode-se chegar às conclusões:

- Que existe forte correlação entre a tensão de ruptura e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, cujo coeficiente de correlação foi igual a 0,96;
- que, apesar deste resultado, ainda é cedo para generalizar a aplicação do método do ultrassom em materiais terrosos. Fica como sugestão para futuras pesquisas a aplicação deste método utilizando-se outros tipos de solos e escalas diferentes à de laboratório.

### 2) Quanto os ensaios laboratoriais, pode-se concluir:

- Que os resultados laboratoriais, em particular os parâmetros de resistência encontrados, têm seus valores coerentes com o típico comportamento mecânico de um material terroso. Isto quer dizer que é correto encontrar um nível de resistência menor estando um solo na condição de teor de umidade ótimo;
- que é próprio do parâmetro de resistência ser aquele que apresente maior variação quando comparado aos parâmetros físicos, tais como: geometria do corpo de prova, densidade e umidade;
- que o aparelho PUNDIT utilizando transdutores de 82 kHz foi adequado para a determinação da velocidade da onda ultrassônica nos corpos de prova. Esse fato pode ser verificado pelo valor do desvio-padrão e da variância desta variável;
- que a metodologia aplicada, os materiais e métodos mostraram-se adequados aos propósitos da pesquisa. A qualidade dos resultados dos ensaios laboratoriais é atribuída ao emprego de métodos normalizados e à experiência da equipe de trabalho.

Portanto, conclui-se que os estudos realizados servem de elementos de orientação para elaboração inicial de um protocolo metodológico capaz de avaliar a integridade mecânica de estruturas de terra a partir do emprego do ultrassom.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, I.R. *Emprego do esclerômetro e do ultrassom para efeito de avaliação qualitativa dos concretos de alto desempenho*. 1993. Tese (Concurso de Professor Titular Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 597. *Standard test method for pulse velocity through concrete*. Philadelphia, 1991. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 7181 – *Solo – Análise granulométrica*, São Paulo, SP, 1984a 15p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 6459 – *Determinação do limite de liquidez*. São Paulo, SP, 1984b. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 7180 – *Determinação do limite de plasticidade*. São Paulo, SP, 1984c. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 7183 – *Determinação do limite e relação de contração de solos*. São Paulo, SP, 1984d. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 12770 – *Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada*. São Paulo, SP, 1984e. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 08802 – *Concreto endurecido*. Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro, RJ, 1984f. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 6509 – *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*, São Paulo, SP, 1984g. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 7182 *Solo – Ensaio de compactação*, São Paulo, SP, 1986a. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 6457 – *Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. São Paulo, SP, 1986b. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT – NBR 6502 – *Rochas e solos: terminologia*. Rio de Janeiro, 1995. 18p.
- BARATA, F.E. *Propriedades mecânicas dos solos*. Rio de Janeiro, RJ: Ed. LCT. 1984. 150p.
- BERALDO, A.L. *Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétale-ciment à variation dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l'humidité*. PhD These. École Engenhier. Université de Nancy I, Nancy, 1994. 230p.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 1881: Part 201. *Guide to the use of non – destructive methods of test for hardened concrete*. London, 1986. 16p.

CAPUTO, H.P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1985. 218p.

CNS Eletronics Manual ERUDITE MKII: Resonant frequency test system. *CNS Eletronics*, 1995. 67p.

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

CORONA, E.; LEMOS, C.A.C. *Dicionário de arquitetura brasileira*. São Paulo: Edart, 1972.

DESVENDAR. *Revista Eletrônica*. Disponível em: <[www.desvendar.com/cidades/setelagoas/belohorizonte.asp](http://www.desvendar.com/cidades/setelagoas/belohorizonte.asp)>. Acesso em: 02 maio 2008.

DETHIER, J. *Des architectures de terre: l'avenir d'une tradition milénaire*. Paris: Centre Pompidou, 1986. 224p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 5 – Solos do Campo Experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro*, Rio de Janeiro. CD-ROM, 2002.

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.

FERRARI, V.J.; PADARATZ I.J. Aplicação de ondas ultrassônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v. 25, n. 2, p. 185-191, 2003.

FERREIRA, R.C. Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e minipainéis de terra crua tratada com aditivos químicos. 2003. 204f. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003.

FREDLUND, D.G.; RAHARJO, H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1993. 517p.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. *Earth construction: A comprehensive guide*. CRATerre: Intermediate Technology Publications. 1994. Disponível em: <[www.craterre.archi.fr/craterre/fraçais/diffusion/librairie/](http://www.craterre.archi.fr/craterre/fraçais/diffusion/librairie/)>. Acesso em: 01 fev. 2007.

JONES, R. Les essais non destructifs du béton. *Cement and Concrete Research*. v. 29, Editions Eyrolles, 1967. 165p.

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

LOPES, W.G.R. *Taipa de mão no Brasil: levantamento e análise de construções*. 1998. 232f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, área de concentração: Tecnologia do Ambiente Construído) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1998.

MACHADO, M.D. *Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não-destrutivos*. 2005. 265f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2005.

MILANEZ, A. *Casa de terra: as técnicas de estabilização do solo a serviço do homem do campo*. Rio de Janeiro: Serviço Especial de Saúde Pública – Ministério da Saúde, 1958.

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, Campina, SP. 2005.

OLIVEIRA, M.M. A conservação do patrimônio edificado em terra. *In: SEMINÁRIO Ibero-Americano de Construção com Terra – Bahia, Anais...* p. 215-224, 2002.

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.

ROSS, R.J.; BRASHWA, B.K.; PELLERIN, R.F. Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, v. 48, n. 1, p. 14-19, 1994.

SANS, L.M.A. *Estimativa do regime de umidade, pelo método de Newhall, de um latossolo vermelho-escuro álico da região de Sete Lagoas*, MG. 1986. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.

SILVA, S.R. *Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira*. 2005. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2005.

VALLE, A.; TEREZO, R.F.; TELES, C.D.M. Uso de técnicas não-destrutivas no diagnóstico de patologias em estruturas de madeira. *Revista de Ciências e Tecnologias de Materiais de Construção Civil*, v. 1, n. 2, p. 148-157, 2004. Disponível em: <<http://www.antac.org.br/emat/e-MAT-V1-N2/e-MAT-V1-N2-p148-157.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2008.

VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo, SP: USP, 1981. 509p.

VARUM, H. *et al.* Ensaios de caracterização do comportamento estrutural de construções existentes em adobe. *In: V SIACOT – SEMINÁRIO Ibero-Americano de Construção com Terra e I Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción con Tierra*, Mendoza, Argentina, 2006. *Anais...* p. 48-51, 2006. CD-ROOM.

VASCONCELLOS, S. *Arquitetura no Brasil: sistemas construtivos*. Belo Horizonte, MG: UFMG, p. 186, 1979.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE A – Características dos corpos de prova moldados no ponto 2**

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
1	2Aa	84,7	35,1	26,18	1,289	0,919	624	2,20
2	2Cc	83,1	35,0	26,39	1,259	0,940	522	1,90
3	2Dd	82,5	34,9	26,29	1,252	0,943	489	1,80
4	2Ee	82,5	35,0	25,87	1,254	0,929	555	2,10
5	2Ff	83,5	35,0	26,10	1,251	0,901	532	1,90
6	2Gg	82,0	35,0	26,11	1,251	0,953	568	2,00
7	2Hh	79,0	34,9	26,13	1,252	1,067	883	2,70
8	2A	84,1	35,2	25,51	1,215	0,844	355	1,50
9	2B	81,0	35,0	25,51	1,215	0,841	420	1,90
10	2C	82,2	35,0	25,61	12,56	0,895	523	2,10
11	2D	84,0	35,0	25,67	12,56	0,859	467	1,90
12	2E	82,7	34,8	25,63	1,256	0,875	478	1,90
13	2F	83,4	34,8	25,66	1,255	0,872	516	2,10
14	2G	81,6	35,0	26,61	1,246	0,904	444	2,20
15	2H	83,0	35,0	25,78	1,255	0,865	486	1,80
16	2I	83,6	35,0	25,83	1,254	0,861	493	1,90
17	2J	82,5	34,9	25,54	1,259	0,896	578	2,30
18	2K	82,7	35,0	25,70	1,249	0,858	467	1,90
19	2L	82,5	35,0	25,78	1,254	0,854	443	1,80
20	2M	82,0	34,8	25,51	1,256	0,916	575	2,30
21	2N	82,1	34,9	25,60	1,256	0,889	469	2,00
22	2O	82,6	35,0	25,56	1,257	0,894	484	1,90
23	2P	81,5	34,9	25,56	1,256	0,906	580	2,10
24	2Q	83,0	35,1	25,43	1,258	0,882	533	2,00
25	2R	83,9	34,8	25,37	1,258	0,852	543	2,30
26	2S	81,5	34,8	25,40	1,258	0,909	552	2,20
27	2T	81,4	34,9	25,42	1,258	0,931	622	2,30
28	2U	82,0	35,0	25,41	1,258	0,901	601	2,50
29	2V	81,5	34,9	25,31	1,259	0,899	649	2,40
30	2W	84,9	35,1	25,40	1,258	0,851	544	2,40
31	2X	80,5	34,8	25,35	1,259	0,939	629	2,40
32	2.1	82,8	35,0	26,40	1,247	0,899	393	1,70
33	2.2	82,0	35,0	26,78	1,244	0,892	409	1,70
34	2.3	82,0	34,9	26,20	1,250	0,896	404	1,80
35	2.4	82,0	34,9	26,11	1,250	0,889	379	1,60

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
36	2.5	79,7	34,7	26,81	1,242	0,939	567	2,20
37	2.6	82,0	34,9	26,25	1,249	0,899	464	1,80
38	2.7	82,0	34,9	26,15	1,250	0,871	384	1,40
39	2.8	81,1	35,0	26,30	1,248	0,883	432	1,90
40	2.9	82,4	35,1	26,40	1,246	0,843	362	1,50
41	2.10	82,8	35,0	25,07	1,260	0,829	323	1,70
42	2.11	82,5	35,0	26,20	1,249	0,839	361	1,50
43	2.12	82,0	34,9	26,20	1,249	0,860	404	1,70
44	2.13	83,0	35,1	26,20	1,250	0,811	339	1,40
45	2.14	83,9	35,1	26,30	1,249	0,823	372	1,50
46	2.15	83,5	35,0	26,30	1,247	0,810	344	1,50
47	2.16	82,3	34,9	26,20	1,248	0,834	348	1,30
48	2.17	84,2	35,1	26,10	1,251	0,797	333	1,40
49	2.18	83,5	35,0	25,88	1,253	0,807	369	1,50
50	2.19	84,5	35,1	26,60	1,244	0,822	321	1,00
51	2.20	83,1	35,0	26,40	1,247	0,826	333	1,20
52	2.21	83,3	35,0	26,40	1,246	0,826	333	1,10
53	2.22	84,7	35,2	26,30	1,248	0,858	347	1,10
54	2.23	82,3	34,7	26,03	1,250	0,844	274	1,20
55	2.24	82,5	34,7	25,93	1,251	0,836	275	1,30
56	2.25	81,6	34,7	25,69	1,253	0,877	300	1,30
57	2.26	82,0	34,9	26,29	1,248	0,870	396	1,10
58	2.27	83,9	35,0	26,40	1,245	0,818	311	1,10
59	2.28	82,3	34,9	26,50	1,244	0,851	364	1,20
60	2.29	83,0	35,0	26,21	1,247	0,878	412	1,30
61	2.30	83,1	35,0	26,40	1,245	0,805	321	1,20
62	2.31	82,9	34,9	26,50	1,244	0,834	317	1,20
63	2.32	82,8	34,9	26,34	1,247	0,829	356	1,30
64	2.33	83,3	35,0	26,32	1,246	0,861	378	1,30
65	2.34	82,4	34,9	26,44	1,246	0,839	378	1,50

**APÊNDICE B – Características dos corpos de prova moldados no ponto 3**

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
1	3Aa	85,1	35,0	27,73	1,347	0,900	420	1,70
2	3Bb	85,3	35,0	27,56	1,344	1,024	488	2,00
3	3Cc	85,5	35,1	27,92	1,346	1,006	483	1,80
4	3Ee	85,3	35,0	27,69	1,348	0,985	496	2,00
5	3Ff	85,3	35,0	27,36	1,354	0,982	518	1,90
6	3Gg	87,0	35,0	27,38	1,353	0,963	492	2,00
7	2A	85,6	35,0	27,43	1,334	0,895	437	1,70
8	3B	86,0	35,1	27,48	1,347	0,880	388	1,80
9	3C	86,0	35,1	27,86	1,347	0,888	451	1,80
10	3D	86,5	35,1	26,21	1,364	0,901	435	2,00
11	3E	85,2	35,0	27,26	1,352	0,920	467	1,90
12	3F	84,5	34,9	27,60	1,350	941	479	2,10
13	3G	86,0	35,0	27,45	1,351	0,869	415	1,80
14	3H	85,6	35,0	27,90	1,347	0,883	419	1,90
15	3I	85,2	35,0	27,32	1,352	0,887	411	1,70
16	3J	86,0	35,1	27,88	1,347	0,880	363	1,70
17	3K	84,3	34,9	27,90	1,343	0,910	443	1,90
18	3L	85,3	35,0	27,87	1,347	0,840	338	1,50
19	3M	86,4	35,2	27,26	1,352	0,832	358	1,90
20	3N	86,1	35,2	27,81	1,347	0,815	308	1,60
21	3O	85,9	34,9	27,80	1,347	0,831	324	1,50
22	3P	86,0	35,0	27,89	1,347	0,822	320,1	1,70
23	3Q	85,8	34,9	28,15	1,345	0,816	286	1,50
24	3R	85,0	34,9	27,66	1,350	0,908	382	1,90
25	3S	84,9	34,9	27,87	1,347	0,870	380	1,80
26	3T	83,5	34,8	27,93	1,347	0,901	394	2,20
27	3U	83,5	34,8	27,62	1,350	0,901	431	2,00
28	3V	84,8	34,9	28,03	1,346	0,856	356	1,70
29	3.1	86,3	35,1	28,72	1,348	0,736	255	1,90
30	3.2	85,9	35,0	28,14	1,340	0,720	216	1,40
31	3.3	86,0	35,0	28,15	1,345	0,740	273	1,60
32	3.4	86,7	35,2	28,13	1,346	0,701	208	1,20
33	3.5	86,2	35,1	28,36	1,345	0,736	263	1,50
34	3.6	86,3	35,1	28,27	1,342	0,799	290	1,60
35	3.7	86,4	35,1	28,60	1,340	0,780	279	1,50

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
36	3.8	87,5	35,2	28,49	1,346	0,791	276	1,30
37	3.9	86,2	35,0	28,68	1,341	0,751	274	1,70
38	3.10	86,4	35,0	28,70	1,340	0,746	264	1,70
39	3.11	86,2	35,0	28,76	1,340	0,756	260	1,50
40	3.12	84,4	34,8	28,53	1,341	0,700	231	1,60
41	3.13	86,0	35,0	28,25	1,342	0,730	262	1,50
42	3.14	86,2	35,1	28,57	1,339	0,714	245	1,30
43	3.15	86,4	34,9	28,73	1,337	0,709	201	1,10
44	3.16	85,8	35,0	28,78	1,338	0,720	240	1,40
45	3.17	86,2	35,0	28,34	1,343	0,725	224	1,20
46	3.18	85,2	34,9	28,25	1,343	0,763	284	1,50
47	3.19	85,4	35,0	28,77	1,338	0,730	235	1,50
48	3.20	85,3	35,0	28,76	1,338	0,725	240	1,40
49	3.21	86,0	35,1	28,31	1,343	0,735	236	1,40
50	3.22	85,4	34,9	28,45	1,341	0,776	264	1,60
51	3.23	84,9	34,8	28,33	1,344	0,797	289	1,70
52	3.24	85,0	35,0	28,31	1,343	0,783	288	1,70

**APÊNDICE C – Características dos corpos-de-prova moldados no ponto 4**

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
1	4Aa	84,7	34,7	30,47	1,376	0,451	187	1,80
2	4Bb	83,1	34,6	30,20	1,381	0,782	220	1,80
3	4Cc	82,5	34,6	30,07	1,382	0,800	214	1,60
4	4Dd	82,5	34,7	30,09	1,381	0,816	254	2,00
5	4Ee	83,5	34,9	29,57	1,388	0,803	237	1,80
6	4Gg	79,0	34,5	29,86	1,385	0,803	227	1,70
7	4A	88,0	35,0	28,76	1,393	0,858	368	1,80
8	4B	87,9	35,0	28,36	1,396	0,917	251	1,60
9	4C	87,5	35,0	28,37	1,395	0,897	279	1,90
10	4D	87,0	35,0	28,39	1,395	0,869	288	2,00
11	4E	87,0	35,0	28,80	1,391	0,910	406	1,90
12	4F	87,3	35,0	28,38	1,396	0,890	279	1,70
13	4G	88,2	35,2	28,28	1,396	0,864	254	1,50
14	4H	88,3	35,2	28,52	1,395	0,840	230	1,50
15	4I	88,0	35,0	28,86	1,389	0,837	310	1,80
16	4J	88,2	35,2	27,64	1,403	0,863	274	1,70
17	4K	87,8	35,2	28,26	1,396	0,896	279	1,90
18	4L	88,0	35,2	28,23	1,399	0,899	300	1,90
19	4M	87,8	35,2	28,00	1,400	0,895	289	1,90
20	4N	87,5	35,1	28,07	1,398	0,889	306	2,00
21	4O	87,3	35,0	30,56	1,375	0,444	172	1,60
22	4P	87,2	35,0	30,42	1,376	0,450	179	1,60
23	4Q	87,1	35,0	30,31	1,376	0,689	168	1,50
24	4R	87,4	35,1	30,51	1,377	0,449	175	1,40
25	4S	88,0	35,2	30,28	1,379	0,698	201	1,60
26	4T	87,8	35,1	30,45	1,378	0,446	180	1,60
27	4U	88,2	35,1	30,14	1,382	0,693	180	1,70
28	4V	88,0	35,0	30,26	1,381	0,703	181	1,50
29	4W	87,8	35,1	30,54	1,377	0,450	196	1,60
30	4X	88,0	35,1	30,40	1,377	0,443	169	1,40
31	4Z	88,6	35,2	30,31	1,379	0,737	159	1,40
32	4.1	87,9	35,0	30,71	1,371	0,449	199	1,70
33	4.2	87,8	35,0	30,88	1,370	0,444	159	1,60
34	4.3	88,5	35,1	30,71	1,371	0,449	187	1,50
35	4.4	88,1	35,1	30,58	1,372	0,443	160	1,60

Ordem	ID	Comp. (mm)	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resultados finais dos ensaios		
						Velocidade (km/s)	Tensão (kPa)	Deformação (%)
36	4.5	87,9	35,0	30,58	1,372	0,444	160	1,70
37	4.6	88,0	35,1	30,52	1,377	0,444	160	1,70
38	4.7	87,8	35,0	30,83	1,373	0,446	179	1,60
39	4.8	87,7	35,0	30,88	1,371	0,447	177	1,90
40	4.9	88,0	35,0	31,02	1,370	0,449	182	1,60
41	4.10	87,8	35,0	30,50	1,373	0,441	150	2,00
42	4.11	87,8	35,0	30,66	1,375	0,436	145	1,70
43	4.12	88,0	35,0	30,93	1,372	0,441	148	1,70
44	4.13	88,0	35,0	30,97	1,371	0,444	163	1,80
45	4.14	88,0	35,0	31,02	1,372	0,450	186	1,70
46	4.15	88,0	35,0	30,65	1,372	0,449	175	1,60
47	4.16	88,2	35,1	30,95	1,372	0,432	126	1,70
48	4.17	88,4	35,1	30,70	1,373	0,443	152	1,70
49	4.18	87,9	35,0	30,71	1,373	0,443	155	1,70
50	4.19	88,0	35,0	30,64	1,373	0,443	160	1,70
51	4.20	88,0	35,0	30,62	1,375	0,446	180	1,90
52	4.21	87,9	35,0	30,66	1,371	0,444	160	1,60
53	4.22	87,9	35,0	30,65	1,373	0,450	183	1,90