

Estudo da Correlação Entre Resistência Mecânica e Velocidade Ultrassônica em Arquitetura de Terra

Rosinete Fernandes Bandeira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil. rosinete.bandeira@gmail.com

Abdias Magalhães Gomes

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. abdias@demc.ufmg.br/abdiasmg@terra.com.br

Paulo Augusto Diniz Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Goiânia, Goiânia, Goiás, Brasil. pad.ifg@gmail.com

RESUMO: Este artigo apresenta um estudo a fim de verificar a existência da correlação entre a resistência à compressão simples de um material terroso e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, empregando-se o método do ultrassom. O material terroso escolhido foi um solo típico brasileiro denominado Latossolo vermelho distrófico coletado no campo experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa - Milho e Sorgo), localizado no município de Sete Lagoas, no estado de Minas Gerais, Brasil. As avaliações da integridade mecânica dos modelos reduzidos representando uma estrutura de terra do tipo taipa de pilão utilizou-se o aparelho de ultrassom da marca PUNDIT 1994 com frequência de 54 kHz e uma prensa hidráulica dotada de um anel dinamométrico – prensa de compressão simples. Foram realizados os ensaios de caracterização física e mecânica do solo e resistência à compressão simples baseados na ABNT e o ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica baseou-se em metodologias afins, visto que ainda não foi publicada uma norma específica destinada à aplicação deste equipamento em materiais terrosos. Os resultados mostram claramente que existe uma correlação entre a resistência a velocidade ultrassônica e que o método do ultrassom tem potencial para avaliação da integridade das estruturas de terras, haja vista que é um método não destrutivo e capaz de verificar a resistência *in loco* das estruturas sem causar nenhum dano no elemento ensaiado.

PALAVRAS CHAVE: arquitetura de terra, resistência à compressão simples, velocidade ultrassônica, modelagem física

1. INTRODUÇÃO

A universalidade das construções com terra a torna uma das mais significativas formas de expressões arquitetônicas da história da humanidade e que no Brasil, essas 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, sendo os mais conhecidos: o adobe, a taipa de pilão e o pau-pique.

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).

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.

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.

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.

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.

O trabalho de Bandeira (2009) estuda a correlação entre a resistência mecânica e a velocidade ultrassônica para um específico material terroso. Nele é apresentado um 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, bem como, uma transcrição, resumida, do arcabouço teórico e experimental referente ao sistema construtivo da taipa de pilão, os estudos geotécnicos para caracterização dos solos e o emprego do método do ultrassom para avaliação da resistência dos solos.

A representação da estrutura de taipa de pilão utilizou-se modelos físicos reduzidos - corpos de prova confeccionados na condição seca, abaixo do teor de umidade ótimo do solo, na tentativa de simular as condições de campo.

A técnica do ultrassom é tradicionalmente utilizada para avaliação da qualidade estrutural de materiais cerâmicos e metálicos. O ensaio é simples e consiste na medição do tempo de

propagação das ondas ultrassônicas que atravessam um corpo material. Quanto maior o tempo gasto para a onda percorrer um corpo maior será sua qualidade estrutural. 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 devido à absorção e/ou dispersão do pulso ultrassônico.

2. METODOLOGIA E RESULTADOS

O solo utilizado foi coletado no campo experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa - Milho e Sorgo), localizado no município de Sete Lagoas, no estado de Minas Gerais, Brasil, denominado como Latossolo vermelho distrófico típico de acordo com Sans (1986). Os principais resultados da caracterização física do solo feita por Bandeira (2009) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo da caracterização do solo

Índices Físicos	
Massa específica dos sólidos (g/cm^3) ABNT- NBR 6509/1984	2,68
Limite de liquidez (%) ABNT- NBR 6459/1984	54
Limite de plasticidade (%) ABNT- NBR 7180/1984	34
Limite de contração (%) ABNT-NBR 7183/1984	1,5
Índice de plasticidade (%)	20
Granulométrica ABNT- NBR 7181/1984	
Pedregulho ($d > 2,0 \text{ mm}$)	0 %
Areia ($0,06 < d < 2,0 \text{ mm}$)	10 %
Silte ($0,002 < d < 0,06 \text{ mm}$)	3 %
Argila ($d < 0,002 \text{ mm}$)	87 %
Compactação Proctor Normal - ABNT- NBR 7182/1986	
Massa específica seca máxima (g/cm^3)	1,373
Umidade ótima (%)	31
Classificação Geotécnica	
Textura	Argila areno siltosa, cor vermelha
Plasticidade	Altamente plástica

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 na Figura 1.

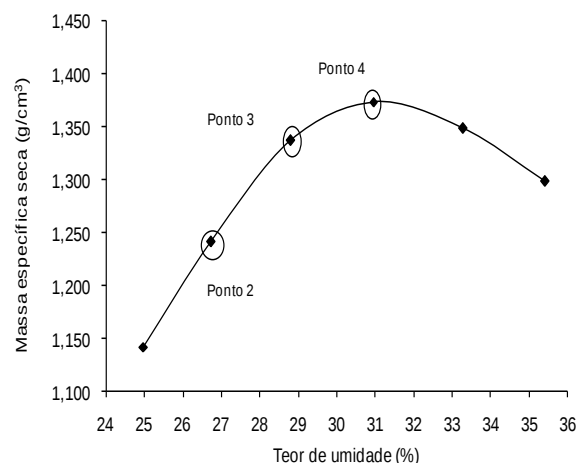


Figura 1 – Identificação dos pontos para o estudo de correlação

O ponto 2 representa o segundo ponto antes da umidade ótima (condição mais seca), o ponto 3, localizado um ponto antes da umidade ótima e o ponto 4, localizado no ponto máximo da curva, correspondente ao teor de umidade ótimo e a máxima massa específica seca.

Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões iguais a 35 mm de diâmetro e 87 mm de altura e moldados estaticamente, cuja amostragem contou com um total de 170 exemplares, sendo: 65 exemplares para representar o ponto 2; 52 exemplares para representar o ponto 3 e 53 exemplares para representar o ponto 4, tal como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos parâmetros de compactação e moldagem

Compactação – Proctor Normal		
Massa específica seca (g/cm^3)		1,373
Teor de umidade (%)		31
Parâmetros de moldagem		
Pontos	Massa específica seca (g/cm^3)	Teor de umidade (%)
2	1,247	26,6
3	1,339	28,7
4	1,373	31,0

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão simples foram realizados conforme a norma ABNT NBR 12770/1984. 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 dinamométrico e um extensômetro, com resolução de 0,01 mm para medir a deformação.

Já os ensaios de ultrassom utilizou-se o aparelho ultrassom da marca PUNDIT 1994 (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*) com frequência de 54 kHz. Este aparelho 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. Os testes foram executados sob orientação da ABNT-NBR 8802/19994 e pelas normas estrangeiras: ASTM: C597/1991, BS 1881: Part 203:1986 e RILEM NDT 1/1972. A Figura 2 apresenta um painel do aparato utilizado na pesquisa.

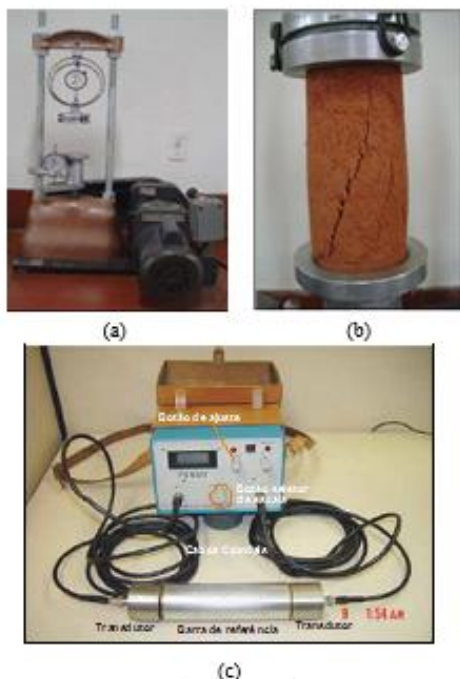


Figura 2 – Prensa mecânica (a), espécime (b), aparelho de ultrassom (c)

Na sequência, as Figuras 2, 3 e 4 apresentam as correlações entre a resistência de ruptura e a velocidade de onda ultrassônica nos pontos 2, 3 e 4, cujos valores dos coeficientes de correlação foram 0,79; 0,74 e 0,83, respectivamente.

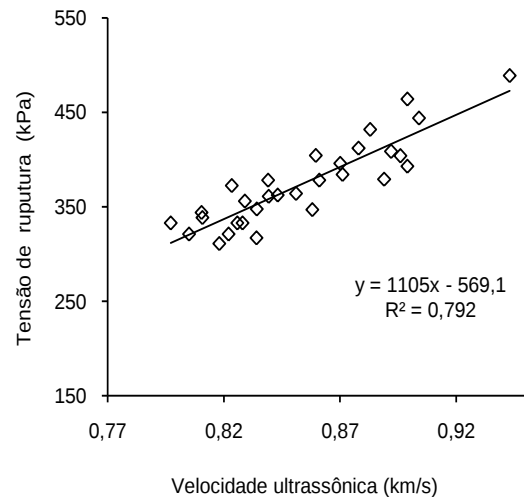


Figura 2 – Tensão de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 2)

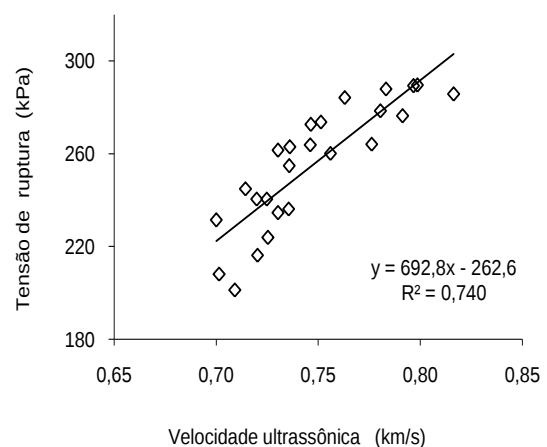


Figura 3 – Tensão de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 3)

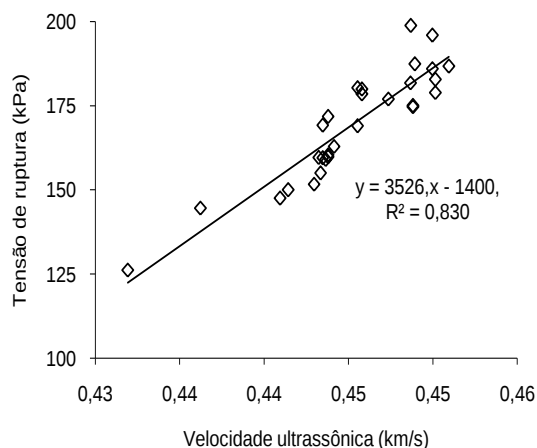


Figura 4 – Tensão de ruptura x velocidade da onda ultrassônica (Ponto 4)

A Figura 5 reúne os pontos aqui considerados. Pode-se verificar que quanto maior o teor de umidade das amostras, menor a resistência mecânica delas. Esse fato pode ser explicado pela natureza não saturada dos solos, os quais adquirem resistência segundo o nível de sucção mátrica presente no corpo de prova.

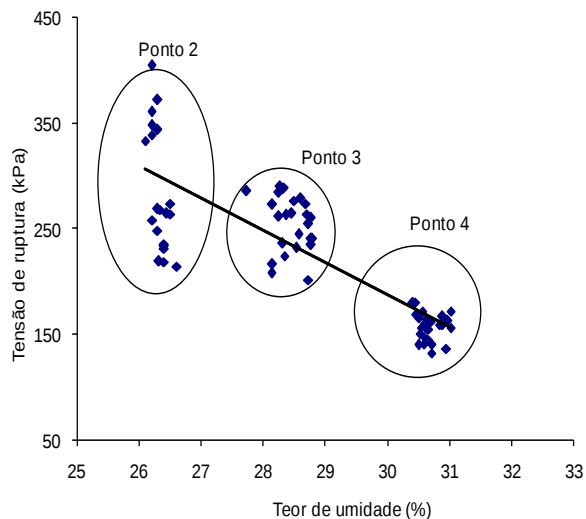


Figura 5 – Tensão de ruptura x teor de umidade

Por fim, os resultados anteriores são organizados em apenas um resultado global onde um ajuste polinomial de 2 grau exibe um coeficiente de correlação igual a 0,96. Este valor é considerado bom de acordo com a classificação de Almeida, 1993. A Figura 6 não deixa dúvidas sobre a existência de uma

relação entre resistência e velocidade da onda ultrassônica.

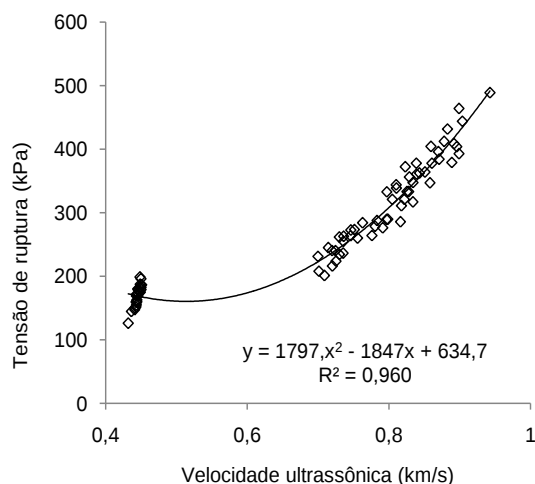


Figura 5 – Resultado final - tensão de ruptura x velocidade ultrassônica

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 Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado da tensão de ruptura e velocidade ultrassônica

Velocidade ultrassônica (km/s)	Tensão de ruptura (kPa)
0.40 - 0.45	120 - 190
0.70 - 0.85	210 - 300
> 0.85	310 - 500

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados pode-se concluir que existe uma forte correlação entre a tensão de ruptura e a velocidade de propagação da onda ultrassônica, cujo coeficiente de correlação foi no mínimo igual a 0,96. E que apesar deste resultado, ainda é cedo para generalizar a

aplicação do método do ultrassom em materiais terrosos, bem como, os resultados laboratoriais, em particular os parâmetros de resistência encontrados, têm seus valores coerentes com o típico comportamento mecânico de um material terroso.

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 12770 – Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. São Paulo, SP, 1984. 4p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT – NBR 6459 – Determinação do limite de liquidez. São Paulo, SP, 1984. 6p.
- 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, 1984. 8p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT – NBR 7180 – Determinação do limite de plasticidade. São Paulo, SP, 1984. 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT – NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica, São Paulo, SP, 1984 15p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT – NBR 7182 Solo – Ensaio de compactação, São Paulo, SP, 1986. 10p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT – NBR 7183 – Determinação do limite e relação de contração de solos. São Paulo, SP, 1984. 6 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT – NBR 8802 – Concreto endurecido. Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 8p.
- Bandeira, R. F.. Estudo da Correlação Entre Resistência Mecânica e Velocidade Ultrassônica para um Material Terroso. Dissertação de Mestrado. UFMG. Minas Gerais, 2009.
- British Standards Institution. BS 1881: Part 201. Guide to the use of non – destructive methods of test for hardened concrete. London, 1986. 16p.
- Dethier, J. (1986). Des architectures de terre: l'avenir d'une tradition milénaire. Paris: Centre Pompidou, 224p.
- Houben, H.; Guillaud, H. (1994). Earth construction: A comprehensive guide. CRATerre: Intermediate Technology Publications. Disponível em: <www.craterre.archi.fr/craterre/fraçais/diffusion/librairie/>. Acesso em: 01 fev. 2007
- Milanez, A. (1958). 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.
- PUNDIT, London, CNS Electronics Ltd. 1994. 37p.
- Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux – RILEM, NDT 1 – Testing of concrete by the ultrasonic pulse method. França, p. 43-49, 1972.
- 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.