

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO

ENGENHARIA CIVIL

PEDRO LORENSET

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E
MECÂNICAS DE DIVERSOS MATERIAIS ATRAVÉS DE
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Bragança

2026



PEDRO LORENSET

**AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS
DE DIVERSOS MATERIAIS ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO
DESTRUTIVOS**

Dissertação de mestrado submetida à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança como requisito para obter o Grau de Mestre em Engenharia Civil do programa de Dupla Diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Dr. Eduarda Cristina Pires Luso.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Giovanni Bonfim Corelhano.

Bragança

2026

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me concedido resiliência, sabedoria e força para superar os obstáculos encontrados ao longo deste processo.

Agradeço aos meus pais, Dirlei Lorensen e Rosane Ermínia Lorensen, e à minha irmã, Daniela Lorensen, por serem a base fundamental da minha vida e por, mesmo à distância, terem me oferecido apoio incondicional, incentivo e força durante esta importante etapa.

À minha orientadora, Professora Doutora Eduarda Luso, expresso minha profunda gratidão pela dedicação, apoio e orientação ao longo do mestrado. Em diversos momentos, sua ajuda foi essencial para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Giovanni Corelhan, agradeço o apoio, disponibilidade e direcionamento fornecidos durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho.

À equipe do Laboratório de Materiais de Construção, Sr. João Augusto e Sr. Octávio Manuel, deixo meu agradecimento por toda a ajuda prestada durante a campanha experimental.

Agradeço também aos bons e velhos amigos no Brasil, que, mesmo à distância, permaneceram presentes, oferecendo apoio, motivação e forças para que eu pudesse seguir em frente e concluir este desafio.

Por fim, agradeço às amizades construídas em Portugal, que se tornaram minha segunda família e tornaram esta jornada mais leve, especial e inesquecível.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à memória de meu avô, Angelin Lorensen, cuja vida foi para mim um exemplo de força, perseverança e sabedoria. Com ele, aprendi a seguir em frente diante das adversidades e, sobretudo, a valorizar as pequenas coisas da vida. Sou profundamente grato a Deus pela oportunidade de ter sido seu neto e por ter compartilhado ao seu lado momentos e ensinamentos que levarei para sempre em minha memória.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT.....	XI
 1 Introdução	 1
1.1 Contextualização	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivos do trabalho	2
1.4 Estrutura da tese.....	3
 2. Revisão bibliográfica	 5
2.1 Equipamento de ultrassom	5
2.2 Fundamentos físicos do ultrassom.....	6
2.3 Métodos de medição	11
2.4 Modelos de correlação e estimativas de resistência	14
2.5 Utilização do equipamento ultrassons em diferentes materiais.....	16
2.5.1 Betão.....	16
2.5.2 Madeira.....	19
2.5.3 Rocha	20
2.6 Ensaaios não destrutivos	22
2.6.1 Esclerometria	22

2.6.2	Pull-Off.....	23
2.7	Identificação de anomalias via NDT	25
3.	Metodologia Experimental	26
3.1	Considerações iniciais	27
3.2	Equipamentos e instrumentação	28
3.3	Utilização do Equipamento de Ultrassons em Betão.....	30
3.3.1	Caracterização dos traços e identificação dos provetes.....	30
3.3.2	Ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (UPV)	32
3.3.3	Medições de ondas S via Eco pulse.....	33
3.3.4	Ensaio esclerométrico.....	34
3.3.5	Estimativa da resistência a compressão via modelos de conversão	35
3.3.6	Ensaio com vigas	36
3.3.7	Ensaio de resistência a compressão axial	37
3.4	Programa experimental para caracterização física e mecânica da madeira	37
3.4.1	Preparação e identificação dos provetes.....	37
3.4.2	Controle de umidade.....	38
3.4.3	Ensaio de ultrassom na madeira	39
3.4.4	Ensaio de compressão.....	40
3.5	Caracterização da rocha granítica.....	41
3.5.1	Identificação e preparação das amostras	41
3.5.2	Protocolo de condicionamento térmico	42

3.5.3	Ensaio de ultrassom	42
3.5.4	Ensaio de esclerometria em rocha	43
4.	Resultados e discussões	45
4.1	Cubos de betão	45
4.1.1	Relação entre UPV direto e resistência a compressão real dos provetes cúbicos de betão	45
4.1.2	Relação da UPV semidireta vs. f_c	47
4.1.3	Análise multivariada e formulação via método SonReb	49
4.1.4	Correlação com curvas da literatura	51
4.1.5	Análise das ondas transversais via Pulso Eco	53
4.1.6	Estimativa do módulo de elasticidade via Software PL-Link.	55
4.2	Vigas de betão	56
4.2.1	Correlação entre velocidade superficial e resistência a tração - Pull- Off.....	56
4.2.2	Correlação entre UPV direta e f_{ctm} estimada através do Eurocódigo 2	57
4.2.3	Estimativa de profundidade de fendas.....	58
4.3	Madeira – <i>Pinus pinaster</i>	60
4.3.1	Limitações geométricas do ensaio de UPV em provetes cúbicos e prismáticos.....	60
4.3.2	Correlação entre UPV e f_c em prismas e cubos.	61
4.3.3	Análise triaxial no grupo Pmc e efeito de confinamento.....	63
4.4	Rocha	64

4.4.1	Caracterização física e sensibilidade ao condicionamento térmico	64
4.4.2	Análise comparativa entre os métodos de medição nos cubos de 15cm	66
4.4.3	Correlações mecânicas nos cubos de 10cm.....	67
4.4.4	Metodologia SonReb aplicada à rocha	68
5.	Conclusões	70
5.1	Eficácia dos NDT aplicados em betão.....	70
5.2	Caracterização física e mecânica da madeira	71
5.3	Caracterização do granito e fatores de influência.....	72
5.4	Análise e discussão comparativa dos materiais.....	72
5.5	Sugestão para trabalhos futuros.....	73
6.	Referências	75

LISTA DE ABREVIATURAS

CoV – Coeficiente de variação (%).

E – Módulo de Elasticidade.

f_c – Resistência a compressão.

GPa – Gigapascal.

In loco – realizado no local.

MPa – Megapascal.

NDT – Non-destructive Testing.

R^2 - Coeficiente de determinação.

UCS – Ultrasonic concrete Strength.

UPV – Ultrasonic Pulse Velocity.

ρ – Densidade.

ν – Coeficiente de *Poisson*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aparelho de ultrassom com transdutores do tipo PUNDIT.....	6
Figura 2. Direções das ondas ultrassônicas nos sólidos.....	7
Figura 3. Funcionamento do aparelho tipo scanner na funcionalidade de Pulso Eco.	10
Figura 4. Transmissão direta com transdutores.	11
Figura 5. Transmissão semidireta com transdutores.	12
Figura 6. Transmissão indireta com transdutores.....	12
Figura 7. Esquema de obtenção de velocidade superficial pela transmissão indireta com transdutores.....	13
Figura 8. Reta de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica utilizando o método indireto.	13
Figura 9. Equipamento caroteador.	24
Figura 10. Estimativa da profundidade de fendas com transdutores.....	26
Figura 11. Martelo Schmidt do Tipo NR.....	29
Figura 12. Equipamento DY-216 para ensaio Pull-Off.....	30
Figura 13. Equipamento Universal de Compressão.	30
Figura 14. Medição semidireta com $d=10,6\text{cm}$ e $d=17,7\text{cm}$.	32
Figura 15. Medição de velocidade em cilindro com $d=30\text{cm}$.	33
Figura 16. Ilustração de medição de Pulso Eco nos cubos de betão.....	33
Figura 17. Representação dos golpes com Martelo Schmidt nos cilindros.	34
Figura 18. Corte transversal nas vigas de betão.	36
Figura 19. Representação de medição perpendicular no plano radial.	40

Figura 20. Representação da medição perpendicular no plano tangencial.	40
Figura 21. Posição dos golpes com o martelo Schmidt nos provetes de granito de 15cm.	43
Figura 22. Distribuição dos golpes com o Martelo Schmidt nos provetes graníticos de 10 cm.	43
Figura 23. Gráfico do UPV direto vs. f_c – Regressão polinomial e de 2º grau.	45
Figura 24. Relação polinomial da velocidade semidireta vs. f_c real.	47
. Figura 25. Relação exponencial da velocidade semidireta vs. f_c real.	48
Figura 26. Comparativo da resistência estimada com a resistência real....	53
Figura 27. Relação entre a UPV superficial e a resistência a tração do betão (f_{ctm}) em valores médio.	56
Figura 28. Relação entre UPV direta e resistência estimada através do Eurocódigo 2.	58
Figura 29. Aproximação do UPV entre diferentes geometrias de madeira.	61
Figura 30. Relação entre o UPV e o f_c para os três grupos de provetes de madeira e suas respectivas equações exponenciais.	62
Figura 31. Relação entre UPV e f_c na direção tangencial às fibras.	63
Figura 32. Deformação de provete cúbico devido ao efeito de confinamento.	64
Figura 33. Comparativo da UPV entre granitos em estado natural e secos em estufa.	65
Figura 34. Comparação das UPV pelo método semidireto em diferentes distâncias – provetes cúbicos de 15cm.	66

Figura 35. Comparação das UPV pelos métodos direto e semidireto com d=10,6cm – provetes cúbicos de 10cm.	67
--	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Equações de correlação entre f_c e UPV para os autores citados.	15
Tabela 2. Relação entre a velocidade de pulso e a qualidade do betão.....	16
Tabela 3. Limitação do ensaio UPV pelo tamanho do provete.....	28
Tabela 4. Detalhamento dos traços de betão.	32
Tabela 5. UPV direta vs. f_c real do Betão estudado.	46
Tabela 6. Comparativo de f_c real vs. f_c estimada pelo SonReb.....	50
Tabela 7. Erro de estimativas de resistência e resistência real do betão.	52
Tabela 8. Pulso Eco nos provetes de betão.	54
Tabela 9. Resultados de UPV, Pulso Eco e Módulo de Elasticidade.....	55
Tabela 10. Comparativo de profundidade de fendas - Real vs. estimado. ..	59
Tabela 11. UPV direto médio nos 3 grupos de provetes de madeira.	60
Tabela 12. Valores de f_c estimados pela Equação 13 (SonReb) e erros em relação à resistência real.	69

RESUMO

A garantia da segurança estrutural e da eficiência econômica na construção civil impulsiona a adoção de Ensaios Não Destrutivos (NDT) para a monitorização e avaliação da homogeneidade de componentes sem comprometer a sua integridade. O presente estudo tem como objetivo principal avaliar a aplicabilidade da técnica de Velocidade de Pulso Ultrassônico (UPV), recorrendo a transdutores de 54 kHz e transdutor tipo scanner, dotado da tecnologia de pulso eco, na caracterização física e mecânica de três materiais distintos: betão, madeira e rocha granítica. A campanha experimental combinou medições ultrassônicas, unindo resultados de transmissões diretas, semidiretas e indiretas, com esclerometria, ensaios de arrancamento e estimativa de fendas, sendo todos os provetes submetidos à rutura por compressão axial para validação dos modelos. No betão, a transmissão direta revelou uma elevada fiabilidade preditiva, com $R^2 = 0,9408$ para regressões polinomiais, e o método SonReb obteve um erro médio de estimativa para 6,64%, demonstrando a eficácia da combinação de dois métodos não destrutivos na predição da resistência à compressão do betão. Relativamente à madeira, mapeou-se o seu comportamento anisotrópico através de varreduras triaxiais. Por fim, a caracterização do granito evidenciou as limitações dos NDT perante a influência da orientação dos cristais, registando coeficientes de determinação menores que 0,3 na relação entre UPV e f_c , e erro médio de 13,97% na metodologia SonReb.

Palavras-chave: Ensaios não Destrutivos; Velocidade de Pulso Ultrassônico; Betão; Madeira; Granito.

ABSTRACT

The assurance of structural safety and economic efficiency in civil construction has encouraged the adoption of Non-Destructive Testing (NDT) techniques for the monitoring and assessment of material homogeneity without compromising their integrity. The main objective of this study is to evaluate the applicability of the Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) technique, using 54 kHz transducers and a scanner-type transducer equipped with pulse-echo technology, for the physical and mechanical characterization of three distinct materials: concrete, wood, and granite rock. The experimental campaign combined ultrasonic measurements, including direct, semi-direct, and indirect transmission methods, with rebound hammer testing, pull-out tests, and crack depth estimation. All specimens were subsequently subjected to axial compression failure tests in order to validate the proposed models. For concrete, direct transmission demonstrated high predictive reliability, with an $R^2 = 0.9408$ for polynomial regressions, while the SonReb method achieved an average estimation error of 6.64%, demonstrating the effectiveness of combining two non-destructive techniques in predicting the compressive strength of concrete. Regarding wood, its anisotropic behavior was mapped through triaxial scanning procedures. Finally, the characterization of granite highlighted the limitations of NDT techniques due to the influence of crystal orientation, with coefficients of determination lower than 0.3 in the relationship between UPV and compressive strength, and an average error of 13,97% for the SonReb methodology.

Keywords: Non-Destructive Testing; Ultrasonic Pulse Velocity; Concrete; Wood; Granite.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A exigência por estruturas que conciliem segurança, sustentabilidade e eficiência econômica tem impulsionado a construção civil para a adoção de metodologias de controle de qualidade cada vez mais rigorosas (Pereira, 2014). Neste cenário, o betão armado e materiais de origem biológica, como a madeira, permanecem como pilares fundamentais da engenharia, embora a sua performance a longo prazo seja condicionada por uma complexa rede de variáveis, que vão desde a dosagem e relação água/cimento até às condições de cura e exposição a ambientes agressivos (Abreu, 2020; Jedidi & Benjeddou, 2018; Oliveira, 2001).

A necessidade de avaliar o estado de conservação e a integridade interna destes materiais, sem comprometer a sua funcionalidade consolidou os Ensaio Não Destrutivos (*Non-Destructive Testing* – NDT) como ferramentas essenciais na engenharia moderna (Sampaio, 2010). Diferente dos métodos destrutivos convencionais, os NDT permitem a monitorização contínua e a avaliação da homogeneidade dos elementos estruturais, tanto na fase de execução, quanto durante a vida útil, apoiando decisões estratégicas de manutenção e reabilitação (Abreu, 2020; Andrade et al., 2021; Carvalho et al., 2013).

Dentre as técnicas de NDT, o ensaio de ultrassom destaca-se pela sua versatilidade na determinação da Velocidade de Pulso Ultrassônico (Ultrasonic Pulse Velocity - UPV). Através da propagação de ondas longitudinais e transversais, é possível inferir sobre a compacidade, a presença de descontinuidades internas e as propriedades elásticas de diferentes matrizes (Abreu, 2020). No entanto, a interpretação destes dados exige uma calibração precisa, correlacionando parâmetros como a umidade interna e a resistência à compressão, especialmente sob a ótica das normativas europeias, como o Eurocódigo 2 e a Norma Portuguesa 12504-4 (European Committee for Standardization, 2004; Norma Portuguesa European Norm 12504-4, 2007).

Este trabalho propõe-se a aprofundar a caracterização mecânica de materiais estruturais através da tecnologia ultrassônica, analisando a sensibilidade do método frente às variações intrínsecas dos materiais e validando o uso do ultrassom como um preditor eficaz da qualidade e da capacidade resistente em ambiente laboratorial.

1.2 Justificativa

A escolha pelos NDT, especificamente a técnica de ultrassom, fundamenta-se na necessidade de obter um diagnóstico interno da estrutura sem a necessidade de execução de ensaios destrutivos, a fim de obter-se correlações físicas, com o ultrassom, com a mecânica dos materiais. Segundo a NP EN 12504-4 (2007), a propagação de ondas ultrassônicas permite caracterizar a homogeneidade do betão de forma integral, identificando variações de densidade que são invisíveis à inspeção visual direta (NP EN 12504-4, 2007).

Sob a ótica da eficiência operacional, os NDT apresentam uma viabilidade económica superior em comparação com os métodos destrutivos convencionais. A agilidade na obtenção dos resultados e a fácil portabilidade do equipamento otimizam os processos de inspeção, minimizando custos com reparações estruturais e permitindo uma amostragem significativamente maior da estrutura em um intervalo de tempo reduzido (Abreu, 2020).

A segurança preventiva é outro pilar que justifica esta abordagem. O acompanhamento sistemático do desempenho estrutural possibilita a detecção precoce de patologias, como fissuração interna ou zonas de segregação (bicheiras), antes que estas evoluam para estados limites de serviço ou de utilização. A International Atomic Energy Agency (IAEA, 2002) enfatiza que a utilização da UPV como ferramenta de triagem permite classificar qualitativamente o betão, direcionando as intervenções de manutenção de forma preditiva e menos onerosa para os gestores das infraestruturas (IAEA, 2002).

Por fim, a literatura técnica sugere que a eficácia diagnóstica atinge o seu ápice através da correlação de dados, como a UPV e a Resistência à Compressão (f_c). A integração entre ensaios não destrutivos e destrutivos, como a carotagem para calibração de curvas de resistência, representa uma estratégia de custo-benefício equilibrada. Esta metodologia mista reduz a incerteza estatística nas tomadas de decisão, garantindo que as intervenções de reabilitação sejam assertivas (Abreu, 2020).

1.3 Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a aplicabilidade e o desempenho de métodos de ensaios não destrutivos (NDT) na caracterização de materiais utilizados na construção civil, com ênfase na utilização do equipamento de ultrassons PUNDIT

200. Para isso, será analisada a capacidade do ultrassom em determinar parâmetros físicos e mecânicos em diferentes materiais, nomeadamente betão, madeira e rocha.

De forma específica, pretende-se:

- Realizar ensaios ultrassônicos nos materiais selecionados, determinando a velocidade de propagação das ondas e correlacionando esses valores com o comportamento mecânico observado.
- Proceder à rotura dos provetes ensaiados, de modo a determinar a resistência à compressão efetiva e verificar a coerência entre os resultados destrutivos e não destrutivos.
- Complementar a caracterização das rochas e do betão por meio de outros NDT, como o ensaio esclerométrico com o martelo Schmidt, possibilitando a comparação entre diferentes metodologias de avaliação da resistência superficial e da integridade dos materiais.
- Estabelecer relações entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos de ensaio, de forma a contribuir para a compreensão das potencialidades e limitações dos ensaios não destrutivos na avaliação rápida, fiável e não invasiva de materiais de construção

1.4 Estrutura da tese

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos principais, que descrevem desde a fundamentação teórica até à análise dos resultados obtidos na campanha experimental e as conclusões relacionadas, conforme descrito nos parágrafos subsequentes.

No Capítulo 1, é apresentada a contextualização do tema, destacando a importância dos NDT na engenharia civil como ferramenta preditiva de anomalias e de propriedades mecânicas dos materiais. Define a justificativa para a utilização da tecnologia de ultrassom, os objetivos gerais e específicos, além da presente descrição da estrutura do trabalho.

No capítulo 2, é descrito o Estado da Arte, onde se encontra o embasamento teórico necessário para a compreensão dos fundamentos físicos do ultrassom, do funcionamento dos equipamentos e ensaios, bem como das características intrínsecas de cada material estudado. Este capítulo aborda, de forma específica, os métodos de medição, modelos de correlação para estimativa de resistência e a aplicação do ultrassom em diferentes materiais, como betão,

Madeira e Rocha Granítica. Também são explorados outros NDT complementares, como a esclerometria e o ensaio de arrancamento (Pull-Off), além da análise de anomalias.

No capítulo 3 é descrita a metodologia adotada na campanha experimental, a qual detalha os procedimentos adotados, descrevendo os equipamentos e instrumentação utilizada. Apresenta a preparação dos provetes de betão, Madeira e Rocha, os protocolos de ensaio para medição da UPV e os ensaios destrutivos de compressão axial para validação dos dados e criação de curvas de correlação entre UPV e f_c .

No capítulo 4 apresenta-se os resultados obtidos na fase experimental, bem como a discussão e análise dos dados, estabelecendo correlações entre a UPV e a f_c para cada material, inclui a avaliação de curvas de conversão da literatura, a calibração de modelos específicos através do método SonReb, a análise de ondas S e a estimativa de profundidade de fendas em vigas de betão. Ademais, discute as limitações geométricas e o efeito da anisotropia na madeira.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, avaliando a eficácia do ultrassom como preditor da qualidade dos materiais e propondo recomendações para investigações futuras no campo dos NDT.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Equipamento de ultrassom

O desenvolvimento do ensaio de ultrassom na engenharia civil remonta à década de 1940, consolidando-se como um dos métodos não destrutivos que mais evoluiu e ganhou espaço no mercado devido à sua eficácia na caracterização mecânica e avaliação da integridade interna dos materiais (Bungey & Grantham, 2006; Evangelista, 2002).

Historicamente, a técnica evoluiu dos antigos testes de batida de martelo, onde o som produzido pelo material denunciava a presença de falhas, para a medição eletrônica precisa de ondas sonoras, impulsionada por estudos simultâneos de investigadores no Canadá e na Inglaterra (Andreucci, 2024; Meneghetti, 1999; Oliveira, 2001).

Um marco fundamental para a aplicação prática ocorreu no início da década de 1970 com o surgimento do PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), o primeiro aparelho portátil, leve e com mostrador digital, que permitiu o acompanhamento das mudanças internas e do desenvolvimento das propriedades de um material ao longo do tempo (Meneghetti, 1999; Naik et al., 2003).

Atualmente, a aparelhagem de ultrassom destaca-se pela sua elevada portabilidade e facilidade de operação, sendo equipamentos leves e de custo acessível que permitem a recolha rápida de dados *in situ* como em laboratório (Evangelista, 2002). Estes dispositivos oferecem versatilidade na configuração dos transdutores, possibilitando medições por transmissão direta, semidireta ou indireta, o que viabiliza o ensaio mesmo quando há acesso a apenas uma face da estrutura (Bungey & Grantham, 2006).

Pela sua característica inerente de ser totalmente não invasivo, o aparelho de ultrassom tornou-se uma ferramenta indispensável para estimar a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a uniformidade de diversas matrizes, abrangendo desde o betão convencional e de alto desempenho até materiais como madeira e rochas ornamentais (Abreu, 2020; Candian & Sales, 2009; Irrigaray, 2012; Sampaio, 2010).

A Figura 1 apresenta um equipamento de ultrassom PUNDIT com transdutores de ondas P e ondas S.



Figura 1. Aparelho de ultrassom com transdutores do tipo PUNDIT.

2.2 Fundamentos físicos do ultrassom

A configuração fundamental de um sistema de ultrassom contemporâneo é composta por um circuito eletrônico responsável pela geração de pulsos, transdutores eletroacústicos que realizam a conversão de energia elétrica em ondas ultrassônicas (e vice-versa), e uma unidade de processamento e visualização de dados, encarregada da interpretação e apresentação dos sinais obtidos (Silva Júnior & Marques, 2006 citado por Irrigaray, 2012).

A velocidade de propagação de uma onda ultrassônica é uma característica intrínseca do meio e depende diretamente de suas propriedades elásticas e da densidade. Em materiais sólidos e elásticos, quanto maior a coesão e a resistência mecânica do material, maior será a velocidade de propagação da onda (ASTM, 2000a).

Fisicamente, as ondas ultrassônicas são definidas como perturbações mecânicas que se propagam através de um meio, seja ele sólido, líquido ou gasoso (Medeiros, 2007). Durante este processo, a energia é transmitida através da oscilação das partículas do meio em torno de uma posição de equilíbrio, sem que ocorra o transporte efetivo de matéria (Oliveira, 2001). A velocidade com que esta energia percorre a matriz ensaiada funciona como uma constante cuja magnitude permite inferir parâmetros estruturais específicos, como o módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de Poisson (Bungey & Grantham, 2006).

No contexto de ultrassom aplicado em sólidos, destacam-se as ondas longitudinais (ondas P), as ondas Transversais (ondas S) e ondas Superficiais (ondas de Rayleigh), como mostra a Figura 2 (Meneghetti, 1999).

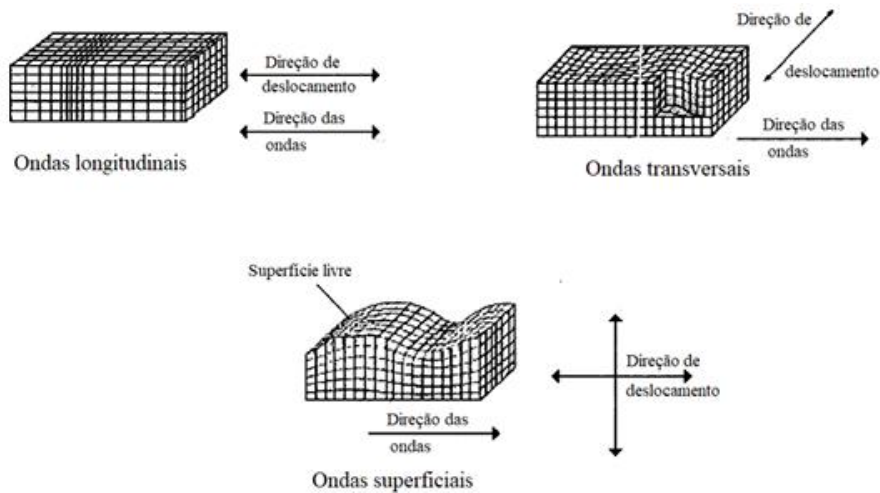


Figura 2. Direções das ondas ultrassônicas nos sólidos.

Nota: Retirado de “Avaliação da Resistência à Compressão do Betão nas Primeiras Idades Através do Ultrassom”, de Meneghetti (1999).

As ondas P chegam a ser até duas vezes mais rápidas que as ondas S, sendo mais atrativas para a realização de ensaios. Ondas S e de Rayleigh são inevitavelmente geradas durante ensaios longitudinais, porém não afetam os resultados. De um modo geral, o intuito principal é obter a velocidade longitudinal do pulso ultrassônico, dado pela Equação 1 (IAEA, 2002).

$$UPV = \frac{d}{t} \quad (1)$$

Onde:

- UPV é a velocidade do pulso;
- d é a distância entre os transdutores; e
- t é o tempo que o pulso leva para percorrer o sólido.

As ondas ultrassônicas, por sua vez, têm seu comprimento de onda determinado pela frequência dos transdutores e pela velocidade do pulso em um determinado meio. O

comprimento de onda é a distância percorrida pela onda sonora durante um ciclo completo de vibração (Pedrosa, 2013).

Matematicamente, o comprimento de onda é determinado pela razão entre a velocidade de propagação da onda no material e a sua frequência, conforme a Equação 2:

$$\lambda = \frac{UPV}{f} \quad (2)$$

Onde:

- λ é o Comprimento da onda (m);
- UPV é a Velocidade da onda (m/s);
- f é a frequência dos transdutores (Hz).

A compreensão desse parâmetro é importante para NDT por três razões principais:

- Capacidade de detecção de falhas: O comprimento de onda está relacionado com o tamanho do defeito que se pretende encontrar. Como exemplo, a menor descontinuidade detectável pelo ultrassom num material deve ter um diâmetro próximo da metade do comprimento da onda (Andreucci, 2024).
- Dimensão do provete: Para obter-se resultados fiáveis, as dimensões dos provetes devem ser superiores ao comprimento de onda (Trinca & Gonçalves, 2009).
- Interação com agregado grosso: No caso do betão, a dimensão máxima do agregado grosso deve ser inferior ao comprimento de onda para evitar dispersão excessiva de energia e a perda de sinal por parte do receptor (Andrade, et al., 2021).

Em geral, a escolha da frequência do transdutor define o comprimento de onda. Frequências mais elevadas geram comprimentos de onda menores, o que permite a detecção de defeitos de menor escala (NP EN 12504-4, 2007).

Além da composição interna do material, a geometria e as dimensões do provete exercem influência direta na propagação das ondas ultrassônicas. Quando uma onda é emitida em um meio sólido de dimensões limitadas, ela tende a se expandir lateralmente à medida que se afasta da fonte emissora, divergindo o feixe de som. Tal fenômeno é denominado como efeito de borda (Kohlhauser & Hellmich, 2013).

Se as dimensões transversais do provete forem reduzidas em relação ao comprimento de onda, as frentes de onda atingem as superfícies laterais do material antes de alcançarem o transdutor receptor. Essa interação resulta em fenômenos de reflexão e conversão de modo, onde parte da energia da onda longitudinal é convertida em ondas transversais ao atingir a borda do material (Bungey & Grantham, 2006).

O efeito prático dessa interação é a dispersão de energia e a alteração no tempo de percurso. Em provetes excessivamente estreitos, a velocidade medida pode ser inferior à velocidade real do material no estado de uso, onde as dimensões laterais são maiores. Isso ocorre porque o pulso detectado pode ser o resultado de múltiplas reflexões internas que percorrem um caminho ligeiramente maior (Proceq, 2017; Wiciak et al., 2017; Zima & Moll, 2023).

A relação entre as dimensões do provete e o comprimento de onda é crucial para a precisão dos ensaios. Para que a propagação ocorra de forma predominantemente longitudinal e para que o efeito de borda seja minimizado, é fundamental que a menor dimensão lateral do provete seja o dobro do comprimento de onda, calculado pela Equação 2. Consequentemente, comprimentos de onda maiores exigem provetes com seções transversais proporcionalmente maiores para evitar a interferência das superfícies laterais no primeiro tempo de chegada do pulso (IAEA, 2002; NP EN 12504-4, 2007).

A caracterização ultrassônica através de ondas S é frequentemente realizada por equipamentos do tipo scanner, os quais operam com transdutores de contato a seco. Ao contrário dos transdutores convencionais de ondas P, que exigem uso de acoplantes líquidos, como gel ou vaselina, estes dispositivos utilizam pontas cerâmicas e molas independentes para garantir a transmissão do sinal mesmo em superfícies rugosas ou irregulares (Proceq, 2017; Roque, 2014).

O princípio físico fundamental deste equipamento reside na técnica de pulso eco, em que o pulso ultrassônico é emitido e o seu reflexo é captado pela mesma face de aplicação, como apresentado na Figura 3.

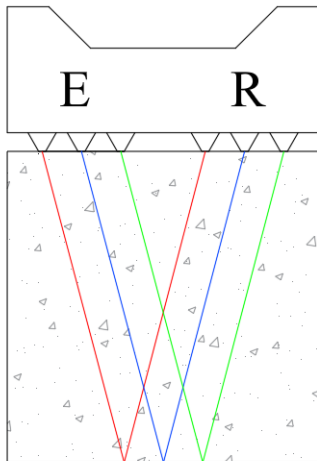


Figura 3. Funcionamento do aparelho tipo scanner na funcionalidade de Pulso Eco.

Fisicamente, a onda viaja através da espessura do material, incide na face oposta ou numa descontinuidade interna e retorna ao transdutor receptor. Devido a este percurso de ida e volta, a UPV nesta configuração é calculada pela relação entre o dobro da distância e o tempo de percurso, conforme Equação 3 (Andreucci, 2024):

$$UPV = \frac{2 \cdot d}{T} \quad (3)$$

Onde:

- UPV é a velocidade de pulso ultrassônico (m/s);
- d é a distância até a face oposta (m);
- T é o tempo de percurso da onda (s).

A grande vantagem prática da funcionalidade de pulso eco é a viabilidade de realizar o ensaio com acesso a apenas uma face do elemento estrutural, sendo uma ferramenta indispensável para a inspeção de lajes, pavimentos, barragens ou túneis onde a transmissão direta é fisicamente impossível (IAEA, 2002; Proceq, 2017).

Adicionalmente, sob o ponto de vista físico, a utilização de ondas S via scanner oferece uma sensibilidade distinta na detecção de anomalias:

- Independência da umidade: Diferente das ondas P, as ondas S não se propagam em meios líquidos ou gasosos. Isto significa que o teor de umidade interna do betão não interfere na medição da velocidade, permitindo uma avaliação mais fiel da rigidez da matriz sólida (Abreu, 2020; Proceq, 2017).
- Detecção de Singularidades: O scanner é altamente eficaz na localização de vazios, ninhos de brita e tubagens, permitindo ainda a geração de imagens transversais do tipo B-Scan. Estas imagens facilitam a interpretação visual de descontinuidades que poderiam ser omitidas ou mascaradas num ensaio convencional de ondas P (Abreu, 2020; IAEA, 2002; Roque, 2014).

2.3 Métodos de medição

O método ultrassônico é amplamente utilizado no betão, uma vez que fornece uma apresentação praticamente instantânea de dados, cuja leitura é rápida e de fácil interpretação. O aparelho de ultrassom, munido por um transdutor emissor e um receptor, é capaz de estimar a resistência à compressão e módulo de elasticidade do betão por meio da velocidade que o pulso ultrassônico atravessa o provete (Abreu, 2020; Andrade et al., 2023).

Para tal, é possível realizar a medição de 3 formas: direto, semidireto e indireto (Bungey & Grantham, 2006). A medição direta é realizada quando ambos os transdutores são postos em faces opostas paralelas entre si, como mostra a Figura 4.

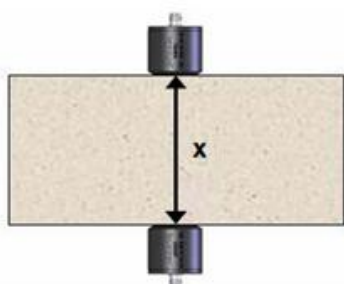


Figura 4. Transmissão direta com transdutores.

Nota: Retirado de “Manual de Operação do Pundit 200”, da Proceq (2017).

Esse método é mais aconselhável, dado que a energia emitida e recebida pelos transdutores E e R, respectivamente, é máxima (Bungey & Grantham, 2006).

A medição semidireta é realizada com os transdutores postos em faces perpendiculares, isto é, dispostas com 90° de rotação entre si, como mostrado na Figura 5.

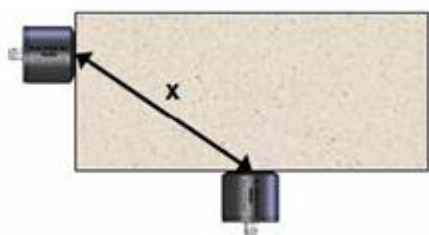


Figura 5. Transmissão semidireta com transdutores.

Nota: Retirado de “Manual de Operação do Pundit 200”, da Proceq (2017).

Esse arranjo apresenta resultados semelhantes ao de transmissão direta e é aconselhado quando há a necessidade de desviar os pulsos da concentração de armaduras, quando a medição é realizada em betão armado. Todavia, é necessário que os transdutores não sejam afastados em demasia com o intuito de evitar que o pulso não seja detectado (Bungey & Grantham, 2006).

O método de medição indireta, apresentado na Figura 6, apresenta resultados significativamente inferiores comparando-os com os métodos diretos e semidiretos, uma vez que o pulso ultrassônico realiza uma curva, saindo do emissor em direção ao receptor. Dessa maneira, quanto maior for a distância entre os transdutores, maior será a imersão das ondas ultrassônicas no material, resultando em um maior percurso e, conseqüentemente, perdas de velocidade (Sampaio, 2010).

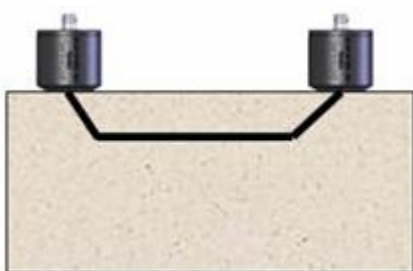


Figura 6. Transmissão indireta com transdutores.

Nota: Retirado de “Manual de Operação do Pundit 200”, da Proceq (2017).

Para determinar a velocidade do pulso pelo método indireto, é necessário realizar diversas medições, mantendo a distância entre transdutores equidistantes em cada medição, como apresentado na Figura 7 (Bungey & Grantham, 2006).

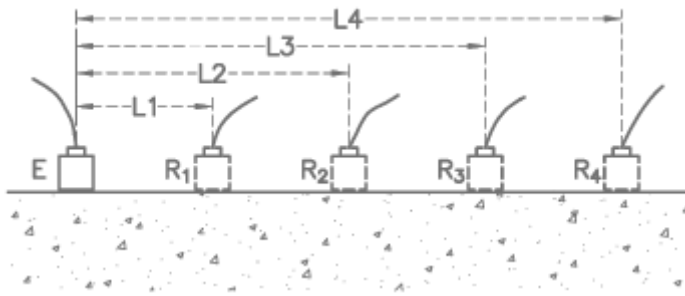


Figura 7. Esquema de obtenção de velocidade superficial pela transmissão indireta com transdutores.

Nota: Adaptado de ABNT 8802 (2019).

Após a coleta de dados, estes são postos em um gráfico que correlaciona a distância entre as medições no eixo Y e o tempo efetivo que o pulso leva para percorrer entre o emissor e o receptor, no eixo X, como apresentado na Figura 8.

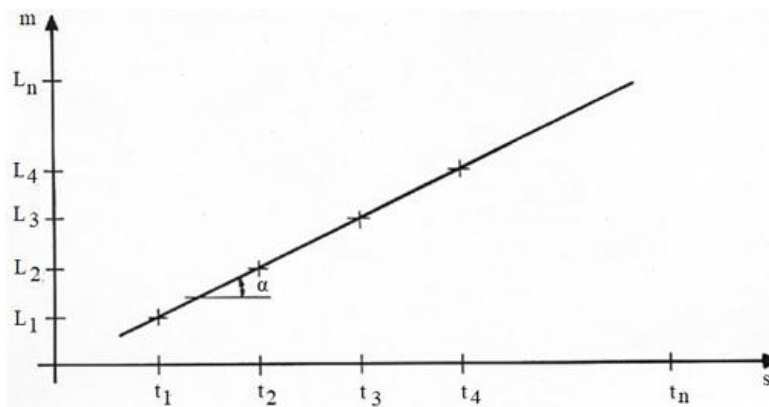


Figura 8. Reta de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica utilizando o método indireto.

Nota: Adaptado de ABNT 8802 (2019).

Dessa forma, obtêm-se uma reta, em que a sua inclinação fornece a velocidade de propagação das ondas do pulso ultrassônico, seguindo as Equações 4 e 5 (Associação Brasileira de Normas Técnicas 8802, 2019).

$$UPV = tg \alpha \quad (4)$$

ou

$$UPV = \frac{\delta d}{t} \quad (5)$$

Onde: α é a inclinação da reta, d é a distância entre os transdutores e t é o tempo de propagação da onda ultrassônica.

2.4 Modelos de correlação e estimativas de resistência

A conversão da velocidade de pulso ultrassônico em valores de resistência à compressão não é direta, uma vez que a velocidade é influenciada pela rigidez dinâmica e densidade, enquanto a resistência depende da coesão da matriz e da porosidade (NP EN 12504-4, 2007). Para transpor esta barreira, a literatura técnica desenvolveu curvas de correlação empíricas, muitas das quais estão integradas nos equipamentos de diagnóstico modernos (Proceq, 2017).

Essencialmente, enquanto a UPV mede a facilidade com que uma onda mecânica se propaga através do meio, a resistência à compressão é uma propriedade mecânica de ruptura. Esta distinção fundamental explica por que a correlação não é linear. A velocidade das ondas longitudinais está intrinsecamente ligada ao módulo de elasticidade dinâmico do material, o qual responde de forma diferente a mudanças microestruturais (Kim, Jeong, Choi, et al., 2022).

Modelos como o de Turgut (2004) são utilizados para determinar a relação entre a resistência do betão e a UPV em estruturas reais onde as proporções da mistura original são desconhecidas. Turgut propôs uma fórmula geral baseada na análise de testemunhos extraídos de diversas estruturas, visando mitigar a influência do traço ao focar apenas na velocidade longitudinal para estimativas práticas de resistência (Turgut, 2004).

Além do betão, em materiais anisotrópicos como a madeira ou heterogêneos como o granito, a interpretação da UPV torna-se mais complexa. Na madeira, a velocidade de propagação varia drasticamente consoante a direção das fibras, exigindo que os modelos de correlação considerem o ângulo de incidência da onda (Faktorová, Stanciu, Krbata, et al., 2024). No caso de rochas graníticas, a presença de microfissuras e o grau de alteração mineralógica são os fatores que mais ditam a velocidade, muitas vezes sobrepondo-se à influência da densidade bruta (Vasconcelos, Lourenço, Alves, et al., 2008).

Da mesma forma, as investigações de Di Leo e Pascale (1994) estabelecem modelos que buscam reduzir a influência das variáveis externas e são, por vezes, integradas em

equipamentos modernos de diagnóstico, como o ultrassom (Di Leo, 1994; Santini, Forte, Sguerri, 2020).

Já as recomendações da RILEM NDT4 focam na sistematização de curvas que combinam a UPV com o número de rebote (N) obtido pelo ensaio esclerométrico, denominado como método SonReb, visando reduzir o erro estatístico associado ao uso de um único ensaio (Internacional Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, 1993).

Por outro lado, autores como Raouf e Ali (1983) exploraram estas correlações em condições específicas de cura e umidade, os quais alteram significativamente a impedância acústica do material (Raouf, 1983), ou seja, as suas resistências com a passagem das ondas de ultrassom.

A presença de água nos poros do material tende a aumentar a velocidade de propagação, uma vez que a água é menos compressível que o ar, podendo, assim, mascarar uma resistência real inferior, levando a sob estimações em avaliações estruturais se o fator umidade não for devidamente calibrado (Wang, Lu, Yuan, et al., 2017).

A Tabela 1 apresenta as respectivas equações de correlação entre f_c e UPV para cada um dos 4 autores.

Tabela 1. Equações de correlação entre f_c e UPV para os autores citados.

Autor	Equação de correlação
Turgut (2004)	$Fc = 1,146 \cdot e^{0,77 \cdot UPV}$
Raouf e Ali (1983)	$Fc = 2,016 \cdot e^{0,61 \cdot UPV}$
RILEM NDT4 (1993)	$Fc = 0,00486 \cdot UPV^{2,6} \cdot N^{1,4}$
Di Leo e Pascale (1994)	$Fc = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot UPV^{2,446} \cdot N^{1,058}$

Nota: Equações obtidas nas literaturas “Research into the correlation between concrete strength and UPV values”, de Turgut (2004), “Assessment of concrete characteristics at an early age by ultrasonic pulse velocity”, de Raouf e Ali (1983), “Recommendations for In Situ concrete strength determination by combined non-destructive methods” de RILEM (1993), “Prove non distruttive sulle costruzioni in c.a.”, de Di Leo e Pascale (1994).

Onde UPV deve ser expresso em km/s e N é o valor de rebote com o Martelo Schmidt.

Contudo, a aplicação destas curvas pré-programadas exige cautela, pois nenhum modelo de correlação pode ser totalmente generalizado devido à alta sensibilidade da velocidade à composição específica de cada traço. Conforme salienta a bibliografia, uma curva gerada para um betão específico pode não ser diretamente transponível para outro traço de betão, para a madeira ou para o granito sem um ajuste de calibração (Di Leo, 1994; Santini et al., 2020).

2.5 Utilização do equipamento ultrassons em diferentes materiais

2.5.1 Betão

Um betão de excelente qualidade, isto é, caracterizado por um adensamento adequado, mistura homogênea e proporção correta de materiais, apresenta velocidades de pulso superiores a 4,5km/s. Em contrapartida, valores de velocidade inferiores a 2km/s indicam um betão de qualidade muito baixa, associado a falhas de execução, adensamento ou porosidade excessiva (IAEA, 2002). A Tabela 2 apresenta a relação entre a velocidade de pulso e a qualidade do betão para provetes com densidade de 2400kg/m³, conforme classificação estabelecida por Whitehurst (citado em IAEA, 2002).

Tabela 2. Relação entre a velocidade de pulso e a qualidade do betão.

Velocidade de pulso (km/s)	Qualidade do betão
>4,5	Excelente
3,5 a 4,5	Boa
3 a 3,5	Questionável
2 a 3	Baixa
<2	Muito Baixa

Nota: Adaptado de “Guidebook on non-destructive testing of concrete structures” (IAEA, 2002).

Velocidades mais altas especificam uniformidade e qualidade do betão, enquanto velocidades mais baixas podem indicar betão com fissuras ou vazios (American Society for Testing and Materials, 2016). Contudo, ressalta-se que valores de velocidade de pulso superiores a 4,5 km/s não garantem, por si só, um betão de elevada resistência. Tal limitação decorre da inexistência de uma correlação consistente entre a variabilidade dos resultados dos

ensaios de compressão, sejam eles realizados em provetes cúbicos ou cilíndricos, e a variabilidade das medições de velocidade de pulso ultrassônico (IAEA, 2002).

A sensibilidade do método ultrassônico às propriedades do betão reside na relação direta entre a UPV e as constantes elásticas do material. Em termos teóricos, a velocidade longitudinal em um meio sólido e finito é delineado pelo Módulo de Elasticidade Dinâmico, pelo Coeficiente de Poisson e pela Densidade, conforme a Equação 6 (ASTM, 2016):

$$UPV = \sqrt{\frac{E_d \cdot (1-\nu)}{\rho \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad (6)$$

Onde:

- UPV é a velocidade longitudinal (m/s);
- E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (Pa);
- ν é o coeficiente de Poisson;
- ρ é a densidade do material em análise (kg/m³).

Adicionalmente, a caracterização ultrassônica pode ser expandida através do recurso de ondas S. A relação entre ondas P e S permite isolar as propriedades elásticas, sendo as variações intrínsecas dadas pelo coeficiente de Poisson, conforme Equação 7 (Crawford, 1997).

$$\frac{UPV_p}{UPV_s} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (7)$$

Onde UPV_s é a velocidade de Ondas S expressa em m/s.

Desta forma, qualquer alteração na microestrutura do material que comprometa a sua rigidez apresenta-se na variação do tempo de percurso do pulso ultrassônico e, conseqüentemente, da UPV (Irrigaray, 2012). A comparação entre ondas P e S apresentam-se de forma útil na detecção de anomalias, uma vez que as ondas transversais apresentam sensibilidades distintas às fendas, vazios e segregações em comparação com as ondas longitudinais (Proceq, 2017).

Contudo, a interpretação da qualidade do betão via UPV exige cautela perante fatores extrínsecos. A presença de armaduras metálicas pode induzir a leituras de velocidade superior à real qualidade do Betão, dado que a velocidade no aço é significativamente mais elevada (Bungey & Grantham, 2006; Naik et al., 2003). Da mesma forma, o teor de umidade nos poros influencia os resultados, onde um betão saturado tende a apresentar velocidades superiores à um betão seco, visto que a água facilita a transmissão da onda em comparação com o ar (ACI, 2003).

Neste contexto, a literatura técnica e normativa recomenda o uso de métodos combinados para aumentar a fiabilidade da estimativa da resistência à compressão. O método SonReb, que cruza a UPV com o valor de rebote, destaca-se por mitigar as incertezas individuais de cada ensaio, permitindo uma correlação mais robusta e representativa da realidade estrutural e individual para cada traço e idade de betão (ACI, 2003; Amini et al., 2016; Breysse, 2012).

O método SonReb, por sua vez, é uma das técnicas de NDT mais difundidas para a estimativa de resistência do betão, baseando-se na combinação dos resultados da UPV e do valor de rebote, obtido pelo Martelo Schmidt, apresentado na Figura 11. O princípio fundamental é a combinação de dois parâmetros físicos distintos que permite uma caracterização material mais completa do que o uso isolado de apenas uma das técnicas. Sua evolução baseia-se na recolha dos dados de UPV, que avalia a integridade interna do material, e as leituras esclerométricas, que medem a dureza superficial (Breysse, 2012; RILEM, 1993).

Em sequência, aplica-se os dados obtidos em curvas de correlação ou fórmulas analíticas pré-estabelecidas, sendo a expressão genérica apresentada na Equação 8.

$$f_c = a \cdot UPV^b \cdot N^c \quad (8)$$

Onde f_c é a resistência à compressão do betão e os valores de a , b e c são coeficientes experimentais que dependem das características específicas do betão analisado.

2.5.2 *Madeira*

A madeira é reconhecida na literatura como um material heterogêneo e ortotrópico, cujas propriedades físicas e mecânicas variam significativamente em relação aos seus três eixos principais: longitudinal, radial e tangencial (Moura & Padilha, 2024). Essa anisotropia é o fator determinante na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, sendo a velocidade no sentido paralelo às fibras significativamente superior à observada nas direções perpendiculares (Keinert, 1998). Estudos recentes reforçam que a estrutura anatômica da madeira dita a eficiência da transmissão da energia acústica, tornando o ultrassom uma ferramenta sensível para identificar a orientação dos tecidos lenhosos (Candian & Sales, 2009).

Um ponto crítico na caracterização da madeira refere-se ao efeito das dimensões das peças na precisão das medições. Oliveira et al. (2006) demonstraram que a velocidade ultrassônica longitudinal sofre variações em função do comprimento da peça, evidenciando a necessidade de adequar a frequência do transdutor à distância percorrida pela onda. Complementarmente, Trinca & Gonçalves (2009) observaram que a seção transversal também exerce influência na propagação, o que implica que a geometria do provete deve ser considerada para evitar erros na estimativa das propriedades físicas e mecânicas.

Para materiais de alta atenuação como a madeira, a seleção da frequência de operação é determinante, sendo recomendado utilizar transdutores até 1MHz (Bucur, 1983; citado por Oliveira, 2001). Frequências mais baixas são geralmente preferidas por garantirem uma melhor penetração do sinal em peças com maiores dimensões ou densidades elevadas. A estabilidade do sinal recebido depende, ainda, da qualidade do acoplamento entre os transdutores e a superfície do material, sendo necessário assegurar uma interface que minimize a perda de energia e garanta a repetibilidade das leituras de tempo de percurso (Moura & Padilha, 2024; Oliveira, 2001).

Nesse sentido, o emprego do ultrassom permite a estimativa do módulo de elasticidade dinâmico através da correlação entre a velocidade de propagação e a densidade do material. Esta metodologia é eficaz não apenas para a classificação mecânica, mas também para a detecção de descontinuidades internas. A presença de nós, fendas, bolsas de resina ou zonas de degradação biológica interrompe ou desvia a trajetória da onda, resultando em quedas de velocidade ou alterações na amplitude do sinal, o que possibilita um mapeamento da integridade

estrutural sem comprometer a peça (Candian & Sales, 2009; Moura & Padilha, 2024; Oliveira, 2001).

Em suma, a caracterização da madeira por meio de ensaios não-destrutivos consolida-se como uma resposta eficaz à heterogeneidade e à ortotropia intrínsecas a este material orgânico. A viabilidade de estimar propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade dinâmico, fundamenta-se na correlação entre a velocidade de propagação e a densidade, permitindo a classificação mecânica de peças individuais de forma muito mais célere e menos danosa que os métodos destrutivos tradicionais (Bucur, 1995; Candian & Sales, 2009; Oliveira, 2001).

Por fim, fatores ambientais e intrínsecos, como o teor de umidade e a temperatura, devem ser monitorados e corrigidos, uma vez que influenciam diretamente a rigidez da parede celular e, por consequência, a eficiência da transmissão acústica. Assim, o emprego do ultrassom emerge como uma ferramenta diagnóstica eficiente para a detecção de descontinuidades e patologias internas, assegurando a confiabilidade técnica necessária para o aproveitamento estrutural seguro da madeira (ASTM, 2022; Candian & Sales, 2009).

2.5.3 Rocha

As rochas desempenham um papel fundamental na engenharia e na construção civil, tendo sido amplamente utilizadas no passado com funções estruturais e, atualmente, predominantemente em aplicações decorativas (Pedrosa, 2013). A caracterização precisa de suas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão uniaxial (UCS), é uma etapa crítica para determinar a estabilidade de obras de engenharia e garantir a segurança das estruturas (Fener et al., 2005).

Assim como na madeira, as rochas apresentam uma variabilidade natural intrínseca que desafia a padronização. A anisotropia presente nas rochas é caracterizada pela heterogeneidade, possuindo interfaces naturais em sua estrutura interna e comportamentos físicos que variam conforme a direção considerada (Vasconcelos et al., 2008).

Além disso, a integridade das rochas é frequentemente afetada pela presença de descontinuidades, como fissuras e fraturas internas. Essas falhas ocultas, muitas vezes não visíveis na superfície dos blocos, representam um fator de risco estrutural significativo, pois podem comprometer a coesão do material e sua capacidade de suporte de carga (Pedrosa, 2013).

A presença de poros e microfissuras atua como barreira à passagem do som, uma vez que a impedância acústica do ar – ou a resistência que um meio oferece à passagem de uma onda ultrassônica - contido nesses vazios é muito baixa em comparação à matriz sólida da rocha. Dessa forma, o aumento da porosidade total em granitos causa uma diminuição proporcional na velocidade das ondas longitudinais. Além disso, a perda de intensidade da onda, ou seja, a atenuação, é proporcional ao volume do grão e à porosidade, sendo que materiais de grão grosseiro causam maior dispersão do feixe sonoro (ASNT, 1981; Pedrosa, 2013).

Diversos fatores ambientais e estruturais podem alterar as leituras de velocidade no ensaio de ultrassom (Vasconcelos et al., 2008).

- **Intemperismo:** Rochas alteradas apresentam velocidades significativamente menores devido à micro fissuração interna e alteração mineralógica.

- **Teor de Umidade:** A saturação aumenta a velocidade das ondas longitudinais, pois a água preenche os poros e microfissuras, facilitando a transmissão da energia acústica em comparação ao ar.

- **Anisotropia Planar:** A orientação de minerais ou a presença de planos de foliação e planos de pedreira influencia a velocidade. Geralmente, a propagação é mais rápida na direção paralela a esses planos em comparação à perpendicular.

- **Tamanho do Grão:** Em materiais de grão grosseiro, como certos granitos, pode ocorrer a dispersão da onda se o comprimento de onda for comparável ao tamanho do grão, sendo recomendado o uso de frequências mais baixas para garantir a penetração do feixe (ASNT, 1981).

Embora não exista uma relação matemática teórica direta, a literatura estabelece que a velocidade ultrassônica é uma ferramenta eficaz para a estimativa preliminar de propriedades estáticas (ASTM, 2000a). A obtenção de curvas de correlação entre a UPV e a UCS é feita de forma empírica, ajustando-se modelos matemáticos a nuvens de pontos experimentais (Freitas et al., 2017).

Para o granito, estudos indicam correlações lineares e não lineares razoáveis para prever a resistência. Foi observado que granitos de alta resistência estão associados a altas velocidades de onda. Todavia, deve-se observar variações intrínsecas da UPV devido à anisotropia presente

nas rochas, uma vez que afeta o percurso da onda e, conseqüentemente, a UPV (Vasconcelos et al., 2008).

2.6 Ensaios não destrutivos

A Engenharia Civil, ao consolidar-se como uma ferramenta de inovação e ao implementar novas metodologias para atender às crescentes demandas da sociedade contemporânea, acabou por enfrentar desafios significativos no que concerne à manutenção e à reabilitação das suas construções (Sousa et al., 2021). Diante dessa realidade, torna-se imperativo adotar estratégias de prevenção e controle tecnológico que assegurem a qualidade e a durabilidade das edificações, garantindo que estas cumpram as funções para as quais foram concebidas durante toda a sua vida útil (Abreu, 2020; Carvalho et al., 2013).

Tais medidas de vigilância são essenciais para edifícios expostos ao longo de décadas ao envelhecimento natural e a agentes agressivos, tanto de origem ambiental como intempéries, como resultantes da atividade humana (Roque, 2014).

Assim, destaca-se a importância do estado de conhecimento técnico-científico acerca da estimativa da vida útil e durabilidade estética e funcional das edificações, onde é possível saber por meio de uma avaliação não invasiva à estrutura. Nesse sentido, os NDT configuram-se como alternativa a fim de não danificar a estrutura, seja visual ou mecanicamente (Abreu, 2020; Crawford, 1997; Roque, 2014).

2.6.1 Esclerometria

Como ferramenta de avaliação das propriedades mecânicas do betão in situ, a área de patologia das construções dispõe do martelo Schmidt, também denominado esclerômetro. Este instrumento é utilizado na execução do ensaio de esclerometria, o qual fornece estimativas da resistência superficial à compressão e do módulo de elasticidade do betão endurecido (American Concrete Institute, 2003).

O uso do esclerômetro é amplamente difundido por sua natureza não destrutiva, permitindo a obtenção de informações sobre a integridade e o desempenho do betão sem comprometer a estrutura e com mínima geração de resíduos. Trata-se, portanto, de uma ferramenta eficiente para diagnósticos preliminares e avaliações em campo (Aquino et al., 2019).

A execução do ensaio é regida internacionalmente por normas como a ASTM C805 e a EN 12504-2, que estabelecem critérios rigorosos para a preparação da superfície e a realização dos impactos. O procedimento requer, primeiramente, o preparo da superfície por meio de alisamento com pedra abrasiva, a fim de garantir a regularidade e uniformidade da área de impacto. Em seguida, são demarcados os pontos de ensaio. No caso da prática nacional brasileira, preconizam-se 16 pontos distintos e afastados em 30 mm entre si, garantindo uma amostragem estatística representativa da zona ensaiada.(ABNT 7584, 2012).

Após a coleta dos valores de índice de ressalto, realiza-se o cálculo da média aritmética dos resultados obtidos. Valores considerados discrepantes, ou seja, que afastam-se em 10% da média, são desconsiderados. A partir da média obtida, estima-se a resistência à compressão do betão, expressa em MPa, com base em tabelas de correlação ou curvas de calibração específicas do equipamento.

Em conformidade com a norma europeia (NP EN 12504-2, 2012), as principais diferenças em relação à norma ABNT 7584 (2012) dizem respeito ao número de impactos e ao tratamento estatístico dos resultados. No que se refere ao número de impactos, a norma europeia estabelece um mínimo de nove medições por provete. Quanto ao refinamento estatístico, determina-se que, caso mais de 20% dos valores obtidos apresentem desvios iguais ou superiores a 30% em relação à média aritmética inicial, o conjunto de resultados deve ser descartado.

2.6.2 *Pull-Off*

O ensaio Pull-Off, tradicionalmente usado a fim de avaliar a resistência a tração do betão, consiste na retirada de um testemunho com um aparelho gerador de tração. O ensaio consiste na criação de um corte circular recorrendo à utilização de um equipamento caroteador, como mostrado na Figura 9, com diâmetro igual ao do disco, com a finalidade de evitar interferências das condições da superfície e obter um arrancamento exato da camada de betão (Pereira & Medeiros, 2012).



Figura 9. Equipamento caroteador.

Após isso, é aplicado um material colante, como uma cola epóxi, entre o disco e a região pré-determinada para o ensaio. A depender do tipo do material colante, é necessário esperar um tempo determinado pela fabricante para a cura correta da cola com a finalidade de se obter arrancamento do betão, e não da superfície disco-cola. Então, aplicando uma força axial de tração, é analisada a zona de rompimento. Esta pode ser adesiva ou coesiva, ocorrendo o rompimento da resina e no betão, respectivamente (Sampaio, 2010).

No caso do rompimento adesivo, será possível observar poucos vestígios de betão no disco metálico, sendo um teste descartável. Já para o caso do rompimento coesivo será possível observar uma porção de betão no disco com espessura variável, cujo valor de tração pode ser considerado no ensaio (Abreu, 2020).

Para a determinação da resistência à compressão da peça de betão a partir do tracionamento axial, é utilizada a Equação 9 (Sampaio, 2010).

$$f_{cm,cubo} = \left(\frac{f_{ctm,p}}{0,18} \right)^{3/2} \quad (9)$$

Onde $f_{cm,cubo}$ é o valor médio da resistência à compressão do betão em provetes cúbicos e $f_{ctm,p}$ é o valor médio da resistência a tração obtida no ensaio Pull-Off. Todos os valores postos na Equação 9 devem ser expressos em MPa.

2.7 Identificação de anomalias via NDT

A manutenção e reabilitação das construções dedica-se ao estudo dos sintomas, mecanismos e causas das falhas que comprometem o desempenho das edificações (Braga, 2010). Embora cada material possua suas particularidades, como a heterogeneidade do betão e anisotropia da madeira e da rocha, todos estão sujeitos a um processo contínuo de envelhecimento e deterioração que pode reduzir a sua capacidade resistente e vida útil (Pedrosa, 2013; RILEM, 1993; Roque, 2014). O surgimento de anomalias, sejam elas defeitos naturais em materiais biológicos ou danos induzidos em matrizes artificiais, alerta para o comprometimento da segurança estrutural e da funcionalidade estética (Braga, 2010; Candian & Sales, 2009; Trinca & Gonçalves, 2009).

As trincas e fissuras são as manifestações patológicas mais recorrentes em edificações, originando-se quando as tensões internas superam a capacidade resistente dos materiais (Souza, 2019). Tecnicamente, essas aberturas são classificadas pela sua magnitude. As fissuras possuem aberturas finas, com até 0,5mm de espessura, afetando apenas, normalmente, a estética. As trincas classificam-se por serem mais acentuadas e profundas, com espessura entre 0,5 e 1,5 mm. Já as rachaduras superam os 1,5mm, representando gravidade elevada e risco à estabilidade estrutural (Braga, 2010).

A natureza dessas anomalias varia conforme o material:

- Betão: as anomalias no betão podem ser precoces, mas nem sempre comprometedoras estruturalmente, como é o caso de retração plástica devido à rápida perda de água por evaporação antes do endurecimento, causando pequenas fissuras superficiais (Souza, 2019).
- Madeira: as anomalias manifestam-se na madeira por meio de fendas de retração provocadas por variações no teor de umidade e ciclos de secagem, além de defeitos naturais como nós, os quais interrompem a continuidade fibrosa (Oliveira, 2001).
- Rochas: apresentam microfissuras internas ou planos de clivagem que são, muitas vezes, invisíveis à superfície, que prejudicam a coesão da matriz rochosa e sua atividade mecânica (Pedrosa, 2013).

O diagnóstico por ultrassom é fundamental para detetar essas anomalias internas e, por vezes, estimar a profundidade de fendas, uma vez que a onda ultrassônica se propaga de

diferentes formas quando comprometida à meios sólidos e gasosos (Andreucci, 2024; Sampaio, 2010).

Adotando-se de transdutores de ondas P, é possível estimar a profundidade de fendas realizando medições sucessivas e equidistantes em relação à fenda por meio da Equação 10, como apresentado na Figura 10.

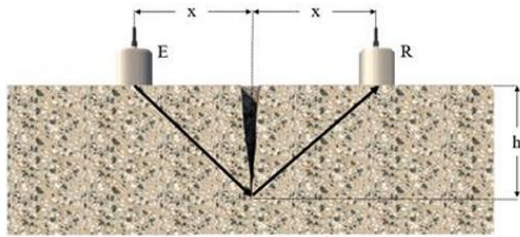


Figura 10. Estimativa da profundidade de fendas com transdutores.

Nota: Retirado de “A utilização de equipamento ultrassônico na caracterização mecânica de elementos em betão armado”, de Abreu Filho (2020).

Conhecendo os valores de X e os tempos de propagação de onda em um betão com patologia e outro sem patologia, porém semelhantes, é possível estimar a profundidade da fenda utilizando a Equação 10.

$$h = \frac{X}{T_2} \times \sqrt{T_1^2 - T_2^2} \quad (10)$$

Onde h representa a profundidade da fenda, X a distância entre os transdutores e a posição da fenda, e T_1 e T_2 os tempos de propagação da onda ultrassônica em uma peça de betão com patologia e em uma peça de betão sem patologia, respectivamente. Para que a estimativa de h seja válida, as duas peças de betão devem apresentar características semelhantes, de forma que a diferença entre T_1 e T_2 se deva predominantemente à presença da fenda e não a variações intrínsecas do material. Contudo, caso a fenda não se encontre completamente vazia, isto é, preenchida apenas com ar, o pulso ultrassônico poderá apresentar tempos de propagação incompatíveis com aqueles previstos para o ensaio, impossibilitando a determinação confiável do valor de h (Abreu, 2020)

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

O presente capítulo detalha o programa experimental desenvolvido para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas de três materiais distintos: betão, madeira e rocha. Para tal, foi aplicada uma abordagem integrada, combinando ensaios não destrutivos com ensaios destrutivos complementares.

A investigação fundamenta-se na utilização da técnica de velocidade de pulso ultrassônico visando analisar a correlação entre a UPV e a f_c dos materiais estudados. A escolha destes materiais justifica-se pela sua elevada heterogeneidade (com exceção do betão), ampla aplicação no setor da construção civil e relevância técnica no contexto da engenharia de materiais.

No que diz respeito aos equipamentos utilizados, os transdutores de 54 kHz, acoplados ao equipamento de ultrassom disponível no Laboratório de Materiais da Construção (LMC), está alinhada com as recomendações do fabricante, sendo estes dispositivos especificamente concebidos para a caracterização de materiais como betão, madeira e rocha (Proceq, 2017).

A campanha experimental foi dividida em três eixos principais:

1 - Caracterização do betão: focado na avaliação de curvas de conversão existentes e na calibração de novas curvas de conversão por meio da velocidade de pulso e número de rebote do martelo Schmidt utilizando a metodologia SonReb (Anexo B), avaliação da resistência a tração (f_{ctm}) por meio do ensaio Pull-Off e avaliação das capacidades do equipamento de ultrassom na estimativa de profundidade de fendas.

2 - Análise da madeira: focado na avaliação da influência da anisotropia, teor de umidade e direção de medição (perpendicular radial e tangencial e paralelo às fibras) na velocidade de propagação das ondas.

3 - Estudo de rocha granítica: Direcionada à comparação entre as medições de ondas P, ondas S através do pulso eco, esclerômetro e resistência a compressão, com a criação de uma correlação pela metodologia SonReb (Anexo B).

Os procedimentos adotados neste trabalho foram balizados por normativas internacionais, tais como o Eurocódigo 2, ASTM, RILEM e NBR, conforme detalhado nos tópicos subsequentes (ABNT 7584, 2012; ABNT 8802, 2019; ASTM, 2000a, 2016, 2019; CEN,

2004; RILEM, 1993). A seleção destas normas teve como critério a sua aplicabilidade específica a cada ensaio.

3.2 Equipamentos e instrumentação

Nesta seção, detalham-se os equipamentos utilizados para a execução da campanha experimental, que abrangeu ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos complementares.

Inicialmente, para a determinação da velocidade de pulso ultrassônico (UPV), utilizou-se o equipamento Pundit PL-200, da empresa Proceq, acompanhados de transdutores de ondas P de 54kHz e aparelho scanner, mostrado na Figura 1.

Uma característica central desta linha de equipamentos é a integração de algoritmos avançados para a interpretação de dados *in situ*. O *software* do Pundit PL-200 permite a estimativa da resistência à compressão do betão através de curvas de conversão pré-programadas no sistema, baseadas em modelos matemáticos reconhecidos na literatura, como os de Turgut, Raouf-Ali, Di Leo e RILEM NDT-4 (DiLeo, 1994; Raouf, 1983; RILEM, 1993; Turgut, 2004).

Além da medição de velocidade, o equipamento dispõe da funcionalidade de estimativa de profundidade de fendas, utilizando o método de tempo de percurso da onda contornando a descontinuidade, o que permite diagnosticar danos internos sem a necessidade de extração de carotes.

No que diz respeito à precisão dos ensaios em laboratório, a escolha dos transdutores de 54kHz impõe critérios geométricos específicos aos materiais ensaiados. De acordo com o manual de operação do fabricante (Proceq, 2017), a fiabilidade da leitura depende da relação entre a frequência do transdutor e a menor dimensão do provete, visando evitar interferências de borda e garantir que a onda se propague de forma plana.

A Tabela 3 resume as dimensões mínimas recomendadas para os provetes de rocha, betão e madeira utilizados neste estudo, assegurando que o percurso da onda seja estatisticamente válido para a frequência adotada.

Tabela 3. Limitação do ensaio UPV pelo tamanho do provete.

Limitações do objeto de teste

Transdutores	Comprimento de onda	Tamanho máximo do grão	Dimensão lateral mínima	Aplicação
54 kHz	68,5 mm	34 mm	69 mm	Betão, madeira e rocha.

Nota: adaptado de Proceq (2017).

Ressalta-se que, antes da realização de cada ensaio, o equipamento de ultrassom foi devidamente calibrado com o uso de gel acoplante e com o auxílio do corpo de referência fornecido pelo fabricante, garantindo a precisão e a confiabilidade das medições obtidas ao longo de toda a campanha experimental.

Como forma de complementar os ensaios de UPV na avaliação física e mecânica dos materiais, especialmente betão e rocha, foi empregado o ensaio esclerométrico, por meio do martelo Schmidt do tipo NR da Proceq mostrado na Figura 11.



Figura 11. Martelo Schmidt do Tipo NR.

Nota: Pundit Manual (2017) citado por Abreu Filho (2020).

Para os ensaios de integridade e cálculo do f_{ctm} do betão, foram utilizados dois equipamentos específicos: uma caroteadora, mostrada na Figura 9, para o corte dos círculos com 47 mm de diâmetro, preparando a superfície para o ensaio Pull-Off, e um extrator dinamométrico digital mostrado na Figura 12, da Proceq, modelo DY-216, que aplicou a força de tração controlada até ao arranque do provete.



Figura 12. Equipamento DY-216 para ensaio Pull-Off.

Nota: Pundit Manual (2017) citado por Abreu Filho (2020).

Ainda no ensaio de arrancamento, foi utilizada resina epóxi Sikadur 32 EF, a qual teve tempo de cura de 48 horas precedentes à realização do ensaio.

A caracterização das propriedades mecânicas destrutivas, necessárias para a validação dos métodos não destrutivos, foi realizada numa máquina universal de ensaios de compressão axial com capacidade máxima de 3000 kN, ou 300 tf, mostrado na Figura 13. Esta prensa foi utilizada para os ensaios de compressão dos provetes de madeira, betão e rocha.



Figura 13. Equipamento Universal de Compressão.

Nota: Matesp, citado por Abreu Filho (2020).

3.3 Utilização do Equipamento de Ultrassons em Betão

3.3.1 Caracterização dos traços e identificação dos provetes

Os provetes de betão utilizados nesta investigação estavam armazenados em laboratório e foram confeccionados em outubro de 2023 (10/23). Para a presente tese, estas amostras foram

selecionadas para a realização de ensaios não destrutivos, permitindo avaliar a estabilidade das medições de UPV e esclerometria ao longo do tempo tendo em vista a idade de 2 anos e 4 meses na data dos ensaios.

A amostragem foi subdividida em três famílias de traços distintos, identificadas com a nomenclatura Provete de betão, Tipo e N° do provete: Pb_t1_01 para o provete 1 do tipo 1. Cada tipo de betão é composto por 2 provetes cúbicos com 15 centímetros de lado e 1 viga prismática com dimensões de 15x15x55 centímetros. Os traços do tipo 1 e 2 contaram, ainda, com um cilindro com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura.

As dosagens dos materiais variaram conforme os objetivos definidos para o estudo original:

- Traço do tipo 1: composto por 10,632kg de cimento, 25,3kg de areia, 31,6kg de brita e 4,8kg de água. sem adição de aditivo plastificante. Em termos de proporção unitária em massa, este traço aproxima-se da dosagem 1:2,38:2,97 para cimento, areia e brita, respectivamente, com uma relação água/cimento de 0,45.
- Traço do tipo 2: caracterizado pela mistura de massas iguais de 13kg de cimento, areia e brita, com adição de 68cm³ de aditivo plastificante e uma massa de água igual a 3,5kg, redução de 1,3kg em relação ao traço de tipo 1.
- Traço tipo 3: composto por 11,9kg de cimento, 14 kg de areia, 27,7 kg de brita, 2 kg de cinzas volantes e 60 cm³ de plastificante para 3,8 kg de água. Adicionalmente, este traço contou com 12,6 kg de areia grossa, cuja influência nas propriedades acústicas será analisada.

A Tabela 4 resume a distribuição e nomenclatura dos provetes por tipo e traço.

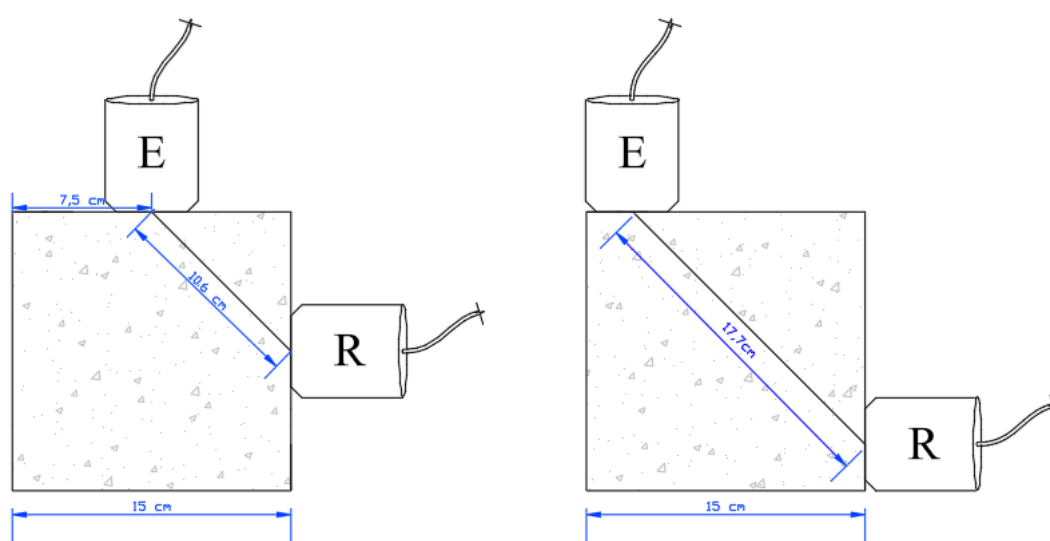
Tabela 4. Detalhamento dos traços de betão.

Provete	Cimento (kg)	Areia fina (kg)	Areia grossa (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Plastificante (cm ³)	Cinzas (kg)
Pb_t1	10,632	25,3	-	31,6	4,8	-	-
Pb_t2	13	13	-	13	3,5	68	-
Pb_t3	11,9	14	12,6	27,7	3,8	60	2

3.3.2 Ensaios de velocidade de pulso ultrassônico (UPV)

A avaliação não destrutiva iniciou-se pela medição da UPV nos cubos, cilindros e vigas. Nos cubos, foram realizadas medições por transmissão direta, com distância entre transdutores de 15 cm, e transmissão semidireta, com duas distâncias fixas entre transdutores iguais a 10,6 e 17,7 cm para avaliar a variação da velocidade em função do percurso da onda, bem como a integridade interna do betão.

As distâncias para as medições semidiretas foram calculadas com a hipotenusa do triângulo retângulo formado pelos transdutores e o cubo, sendo a distância de 10,6 cm a resultante dos transdutores posicionados no centro das faces perpendiculares entre si, e a distância de 17,7 cm a resultante dos transdutores posicionados nas extremidades opostas das faces, conforme mostrado na Figura 14.

**Figura 14.** Medição semidireta com d=10,6cm e d=17,7cm.

Para cada posição dos transdutores, foram realizadas três medições sucessivas, abrangendo os métodos direto e semidireto. O resultado foi expresso pela média aritmética, sendo também calculado o respectivo coeficiente de variação (CoV).

Nos cilindros, foram realizadas medições diretas de velocidade de pulso, além da estimativa de resistência pelas 4 curvas de conversão implementadas no aparelho, como mostrado na Figura 15.

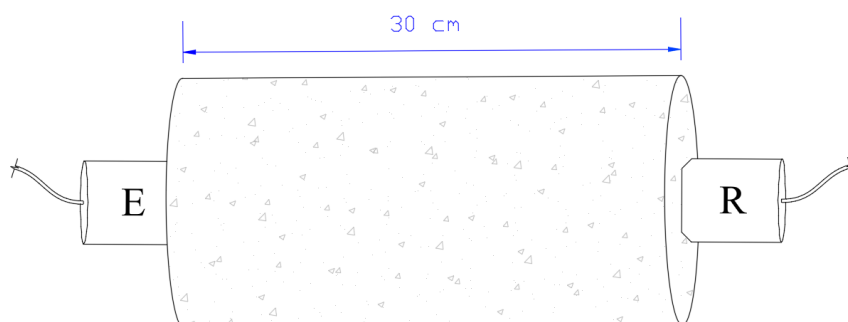


Figura 15. Medição de velocidade em cilindro com $d=30\text{cm}$.

3.3.3 Medições de ondas S via Eco pulse

Para além das ondas longitudinais, procedeu-se também à medição da velocidade de propagação das ondas de cisalhamento ou ondas S. Para tal, utilizou-se a tecnologia pulso eco, integrada ao sistema Pundit PL-200PE mostrado na Figura 1.

O procedimento consistiu na realização de medições em 3 faces distintas de cada um dos cubos de 15cm denominadas como Faces A, B e C, a fim de mitigar a influência de possíveis heterogeneidades e garantir uma leitura em todas as direções dos provetes. A Figura 16 ilustra o método de medição realizado.

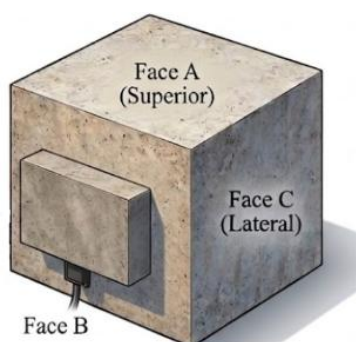


Figura 16. Ilustração de medição de Pulso Eco nos cubos de betão.

Os dados foram tratados estatisticamente, sendo o valor de velocidade final igual à média aritmética das três medições realizadas.

3.3.4 Ensaio esclerométrico

Como forma de complementar a avaliação da integridade do betão, estimar a sua resistência à compressão e aplicar a metodologia SonReb, realizou-se o ensaio de esclerometria. O procedimento seguiu as diretrizes da Norma ASTM C805 (2019).

Foram realizados 10 golpes por provete, distribuídos em duas faces, com 5 golpes em cada uma. Essa divisão foi adotada devido à exigência de um espaçamento mínimo de 30 mm, tanto entre os pontos de impacto quanto entre cada ponto e a borda do provete. A partir dos 10 valores obtidos, calculou-se inicialmente a média aritmética.

Em seguida, foram descartados os resultados que apresentaram desvio superior a 6 unidades no valor de ressaltos, para mais ou para menos, em relação à média aritmética. Por fim, foi calculada uma nova média aritmética com os valores remanescentes, sendo este valor final adotado como o número de rebote.

Adicionalmente, o ensaio de esclerometria foi também realizado em provetes cilíndricos. Nestes elementos, os impactos foram aplicados ao longo do corpo (altura) do cilindro, sendo realizados 12 golpes por provete. Estes golpes foram divididos em três conjuntos, sendo aplicados 4 golpes distribuídos ao longo da altura, com separação angular de 120°, de modo a garantir uma adequada representatividade da superfície ensaiada, conforme representado na Figura 17.

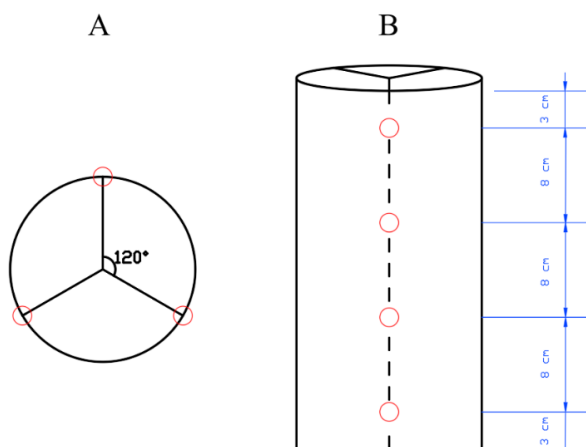


Figura 17. Representação dos golpes com Martelo Schmidt nos cilindros.

Na Figura 17, **A** representa a distribuição angular dos golpes com o martelo Schmidt e **B** representa a distribuição dos golpes ao longo do corpo do cilindro, com pequenos círculos vermelhos espaçados em 8 cm entre si e à 3 cm das bordas superiores e inferiores dos provetes para representar exatamente onde serão aplicados.

O procedimento de tratamento dos resultados, incluindo o descarte de valores discrepantes e o cálculo do número de ressalto final, foi igualmente conduzido em conformidade com a Norma ASTM C805 (2019).

A principal finalidade da recolha destes dados foi a aplicação da metodologia SonReb. Esta metodologia utiliza os valores da UPV, obtidos conforme descrito no tópico 3.3.2, e o número de ressalto para estabelecer uma correlação multivariada. A partir desta correlação, é possível gerar uma curva de conversão específica, que permite estimar a resistência à compressão com maior precisão quando comparada à utilização de curvas genéricas da literatura. Dessa forma, o método adapta-se de forma mais adequada às características dos provetes analisados, considerando tanto o traço do betão quanto a sua idade.

3.3.5 Estimativa da resistência a compressão via modelos de conversão

Com o intuito de obter uma avaliação preliminar da capacidade resistente do betão de forma não invasiva, utilizou-se a funcionalidade de estimativa de resistência integrada no *software* do equipamento de ultrassom. Esta ferramenta permite converter a velocidade de propagação das ondas longitudinais em valores de tensão de compressão, recorrendo a modelos matemáticos correntes na literatura técnica.

Para esta análise, foram selecionadas as curvas de conversão dos seguintes autores, cujas curvas estavam implementadas no equipamento: Turgut, Raouf-Ali, Di Leo e RILEM -NDT4. O procedimento de coleta de dados foi padronizado para garantir a consistência estatística: em cada provete, foram realizadas três medições independentes para cada um dos quatro autores mencionados.

O valor final de resistência estimada para cada modelo foi determinado através da média aritmética das três leituras obtidas. Este método de tripla medição foi adotado para mitigar eventuais oscilações pontuais de leitura e assegurar que o valor registrado fosse representativo

da matriz do betão analisada. Estes dados foram devidamente tabulados para permitir, em fase posterior, a comparação entre as diferentes previsões teóricas e a resistência real do material.

3.3.6 Ensaio com vigas

Complementarmente aos ensaios realizados nos cubos, as vigas de betão (15x15x55 em centímetros) foram submetidas a uma campanha experimental focada na avaliação da integridade estrutural. Inicialmente, procedeu-se à medição da velocidade de transmissão direta ao longo do comprimento total de 55 cm. Adicionalmente, executou-se o mapeamento da velocidade superficial para a construção da reta de correlação tempo *versus* distância, seguindo o método de medição indireto, apresentado na Figura 7.

Com o objetivo de validar a sensibilidade e a precisão do equipamento de ultrassom na deteção de patologias, foi induzida uma fenda artificial, por meio de um corte de 7,5 cm de profundidade e 4 mm de espessura, no centro geométrico de cada uma das três vigas, como apresentado na Figura 18.



Figura 18. Corte transversal nas vigas de betão.

A estimativa da profundidade desta fenda foi realizada através da funcionalidade específica de processamento de sinal do aparelho, permitindo confrontar, em fase posterior, o valor estimado pelo software com a medida real do corte executado.

Posteriormente à caracterização acústica, iniciou-se a preparação para o ensaio de resistência à tração superficial, denominado Pull-Off. Este ensaio foi realizado a fim de realizar uma correlação entre resistência a tração via arrancamento com a velocidade superficial. Com

o auxílio de uma caroteadora, foram executados seis cortes circulares com 50mm de diâmetro em cada viga, sendo 4 cortes em uma face e 2 na face perpendicular. Após a perfuração, as superfícies foram devidamente limpas e submetidas a um processo de secagem natural de 5 horas para garantir a eficácia da colagem dos discos metálicos.

Para a fixação dos discos, utilizou-se cola epóxi, respeitando-se um período de cura de 48 horas antes da realização do ensaio de arranque. Inicialmente, foram ensaiados os quatro discos colados primeiro em sequência. Caso fossem observados resultados discrepantes entre esses quatro iniciais e os dois últimos colados na face lateral, os dois últimos seriam descartados, uma vez que o processo de arrancamento pode provocar pequenas fissuras internas no betão, comprometendo a resistência à tração dos discos localizados na mesma área de influência.

Todo o procedimento, desde a preparação da superfície até à aplicação da carga de tração, seguiu as recomendações do Eurocódigo 2 (CEN, 2004) e da norma ASTM C1583 (2020).

3.3.7 Ensaio de resistência a compressão axial

A etapa final de caracterização mecânica dos provetes de betão consistiu na realização do ensaio de resistência à compressão axial, de natureza destrutiva. Este procedimento é essencial para aferir a resistência real das amostras e servir como parâmetro de controle para a validação de todas as estimativas não destrutivas realizadas anteriormente.

A realização deste ensaio após a conclusão de toda a campanha não destrutiva permitiu estabelecer a correlação direta entre a realidade física do material e os dados acústicos e esclerométricos obtidos, fundamentando a análise de precisão das curvas de conversão discutidas no tópico anterior.

3.4 Programa experimental para caracterização física e mecânica da madeira

3.4.1 Preparação e identificação dos provetes

A campanha experimental dedicada à madeira utilizou a espécie *Pinus pinaster* (Pinheiro-bravo), selecionada pela sua relevância estrutural e prevalência no contexto florestal

português. Para garantir a caracterização completa da anisotropia do material e a validade das medições acústicas, foram preparados dois tipos de geometria:

- Cubos (5x5x5 cm): Destinados à avaliação da velocidade de propagação nos três eixos fibrosos - longitudinal, radial e tangencial. A nomenclatura utilizada foi $P_{mc_//}$ para medições paralelas às fibras e $P_{mc_|}$ para medições perpendiculares às fibras, as quais foram subdivididas em perpendiculares radial ($P_{mc_|-r}$) e tangencial ($P_{mc_|-t}$).
- Prismas (5x5x15 cm): Utilizados para ensaios de propagação longitudinal, paralelamente às fibras, identificados com o prefixo P_{mp} .

As faces dos provetes foram retificadas previamente de modo a assegurar a perpendicularidade e o pleno contato entre o provete e os transdutores, minimizando erros de leituras por irregularidades.

Os provetes que contavam com defeitos visuais, isto é, nós ou fissuras expressivas, foram descartados.

3.4.2 *Controle de umidade*

O teor de umidade (U) foi controlado para avaliar o seu impacto na velocidade de propagação das ondas, seguindo as diretrizes das normas EN 13183-1 (CEN, 2002) e ASTM D143 (2022). Para garantir a estabilidade das amostras e a uniformidade da umidade interna, adotou-se um protocolo de ciclos de secagem e reidratação dos provetes:

Secagem em estufa: Inicialmente, todos os provetes foram colocados em estufa ventilada a uma temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

Controle de umidade por meio da massa: A estabilização em massa seca foi determinada através do monitoramento da massa em balança de precisão. Considerou-se que os provetes atingiram a massa seca quando a diferença entre duas pesagens consecutivas não sofreu variação superior a 0,5%.

Reidratação: Após atingir o estado de insaturação das fibras, os provetes foram transferidos para uma câmara úmida com umidade controlada. Essa etapa permitiu que a madeira absorvesse umidade de forma gradual, visando atingir os percentuais desejados para cada amostra.

Para a organização dos ensaios, as amostras foram divididas conforme os seguintes objetivos.

- Cubos: Visando a comparação direta da anisotropia sob condições controladas, todos os cubos foram estabilizados no teor de umidade de referência: 12% +/- 0,5%.
- Prismas: Para estes elementos, a amostra foi dividida em dois grupos: metade dos prismas foi estabilizada a 12% +/- 0,5%, enquanto a outra metade foi condicionada para atingir um intervalo entre 13% e 15%. A adoção deste intervalo justifica-se pela dificuldade prática de estabilização do equilíbrio higroscópico interno em teores mais elevados, garantindo assim que as medições de ultrassom fossem realizadas em estado de equilíbrio dinâmico estável.

O cálculo do teor de umidade em cada ciclo de secagem e reidratação dos provetes foi realizado através da Equação 11.

$$U = \left(\frac{M_0 - M_f}{M_0} \right) * 100 \quad (11)$$

Onde:

U = Teor de umidade em porcentagem;

M₀ = Massa inicial do provete em gramas;

M_f = Massa final do provete em gramas.

3.4.3 Ensaio de ultrassom na madeira

O protocolo experimental foi desenvolvido para distinguir o comportamento acústico em função da geometria do provete, da orientação anatômica das fibras e da umidade, conforme descrito nos tópicos subsequentes.

I. Ensaio em provetes prismáticos:

Nos prismas, o objetivo principal consistiu na determinação da velocidade de propagação no eixo de maior extensão, simulando o comportamento de elementos estruturais lineares em função da sua geometria e umidade. As medições foram realizadas exclusivamente na direção longitudinal, ou seja, paralelamente à direção das fibras, com os transdutores posicionados paralelamente às faces quadradas opostas de 5 cm.

Esse arranjo de transmissão direta permitiu a leitura do tempo de transmissão ao longo dos 15 cm de percurso, transpassando o núcleo de cada amostra. Para cada prisma, foram registradas três leituras independentes, procedendo-se à limpeza e reaplicação do gel acoplante entre medições, de forma a assegurar a repetibilidade do sinal e a estabilidade da onda recebida no transdutor receptor.

II. Ensaio em provetes cúbicos:

A utilização dos cubos permitiu uma análise aprofundada da anisotropia da madeira, sendo estas amostras submetidas a uma varredura triaxial. O estudo diferenciou a orientação das fibras em três vetores ortogonais entre si:

- Eixo longitudinal (//): medição paralela às fibras, perpendicular aos planos de corte transversais.
- Eixo perpendicular radial (|-r) medição realizada na direção dos anéis internos da madeira, como representado na Figura 19.

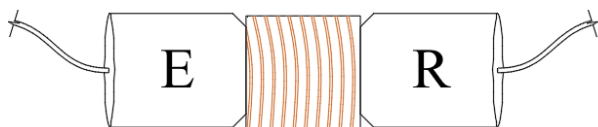


Figura 19. Representação de medição perpendicular no plano radial.

- Eixo perpendicular tangencial (|-t): medição realizada tangencialmente aos anéis internos da madeira, representados na Figura 20.

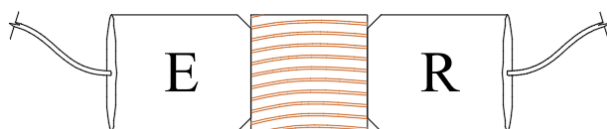


Figura 20. Representação da medição perpendicular no plano tangencial.

3.4.4 Ensaio de compressão

A fase final do programa experimental para a madeira consistiu na determinação da resistência à compressão, visando a validação das correlações obtidas por métodos não destrutivos. Os ensaios foram conduzidos na Máquina Universal de Ensaios, sob um regime de carregamento monótono crescente com uma taxa de aplicação de carga de 10 MPa/min, em

conformidade com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 7190-2 (2022) e pela ASTM D143 (2022).

O protocolo de rotura foi diferenciado segundo a geometria e os objetivos para cada grupo de provetes:

- I. Prismas: Os espécimes prismáticos foram submetidos exclusivamente à compressão paralela às fibras. O ensaio focou-se na obtenção da tensão de rotura ao longo do eixo de 15 cm, garantindo a correspondência direta com as medições de UPV realizadas previamente.
- II. Cubos: Para os provetes cúbicos, a estratégia inicial previa a determinação da resistência nos sentidos longitudinal e perpendicular. Contudo, durante a execução dos ensaios preliminares no sentido perpendicular radial, observou-se o fenómeno de esmagamento e confinamento das fibras lenhosas. Este comportamento resultou numa densificação excessiva do material sem a ocorrência de uma rotura frágil ou plástica definida, gerando valores de resistência superiores a 200 MPa. Sendo este um valor desprovido de significado físico para a espécie *Pinus pinaster*, procedeu-se a uma adequação do plano experimental. Desta forma, os ensaios de compressão perpendicular nos cubos foram todos redirecionados para o sentido tangencial. Esta orientação permitiu a observação de modos de falha consistentes e valores de resistência compatíveis para a espécime, assegurando a integridade estatística da amostra e a viabilidade das correlações entre a rigidez acústica e a resistência mecânica efetiva.

3.5 Caracterização da rocha granítica

3.5.1 Identificação e preparação das amostras

O estudo experimental para o granito incidiu sobre 20 provetes cúbicos com 15 cm de aresta e 10 provetes cúbicos com 10 cm de aresta. Devido à elevada resistência intrínseca na matriz rochosa e às limitações de carga do equipamento de compressão para este tipo de material, a caracterização centrou-se na avaliação da integridade e rigidez através, apenas, de métodos não destrutivos para os cubos com 15 cm, como o ultrassom e esclerómetro. Complementarmente aos ensaios não destrutivos, os cubos de 10 cm foram submetidos à prensa para obter-se o real valor de resistência à compressão.

As amostras foram divididas em três grupos:

- Provetes de rocha (Pr_01 a Pr_10): Provete cúbico com 15cm de aresta, ensaiados com as características que saíram de campo, sem controle de umidade ou preparação prévia aos ensaios de ultrassom e esclerometria.
- Provete de rocha *dry* (Prd_01 a Prd_10): Provete cúbico com 15cm de aresta submetidos a ciclos de secagem controlada em câmara seca.
- Provete de rocha com cubos de 10cm (Pr10_01): Provete cúbico com 10 cm de aresta submetidos aos ensaios não destrutivos e destrutivos.

3.5.2 Protocolo de condicionamento térmico

O processo de secagem das amostras do grupo Prd foi conduzido por ciclos de 6 horas a uma temperatura constante de 60°C. A determinação desta temperatura fundamenta-se na necessidade de preservar a estrutura interna do granito. Temperaturas superiores a 66°C podem induzir fenômenos de microfissuração térmica devido à expansão dos cristais de quartzo e feldspato, como citado na Norma ASTM D2845 (2000a), o que comprometeria a validade das medições de UPV e esclerometria.

3.5.3 Ensaios de ultrassom

A caracterização acústica foi realizada tanto no sentido longitudinal (ondas P) quanto no sentido transversal (ondas S), utilizando transdutores de 54 kHz e transdutor de contato a seco. No ensaio longitudinal, foram efetuadas medições nos modos direto e semidireto, com distâncias entre os transdutores de 15 cm e 10,6 cm, respectivamente.

Cada valor de velocidade, tanto para as ondas P quanto para as ondas S, foi determinado a partir da média aritmética de três medições independentes, realizadas em faces distintas dos provetes.

Já os cubos de menores dimensões foram submetidos exclusivamente à medição de ondas P, uma vez que suas dimensões são inferiores ao mínimo requerido para a utilização do transdutor de contato a seco. Para estes provetes, realizaram-se medições nos modos direto e semidireto, sendo considerada uma distância de propagação de 10,6 cm, conforme metodologia

de cálculo apresentada no tópico 3.3.2, na Figura 14. Durante os ensaios, os transdutores foram posicionados nas extremidades de faces adjacentes.

3.5.4 Ensaio de esclerometria em rocha

A avaliação da dureza da superfície rochosa foi efetuada mediante o uso do esclerômetro, mostrado na Figura 11, seguindo as prescrições da Norma ASTM D5873 (2000b).

O protocolo operacional consistiu na aplicação de 10 impactos distribuídos uniformemente em duas faces do provete de forma contígua, conforme ilustra a Figura 21.

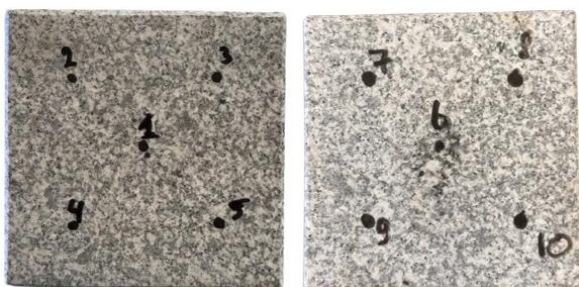


Figura 21. Posição dos golpes com o martelo Schmidt nos provetes de granito de 15cm.

Já na realização dos golpes nos granitos cúbicos com 10cm de aresta, o protocolo operacional buscou mitigar a influência do efeito da borda, respeitando a distância mínima entre golpes e entre golpe-borda do provete, a qual deve ser de, no mínimo, 2,5cm de acordo com a Norma ASTM D5873 (2000b). Foram realizados 10 golpes, sendo distribuídos em 4 faces dos cubos, onde três faces receberam 3 golpes e uma face recebeu 1 golpe, conforme ilustra a Figura 22.

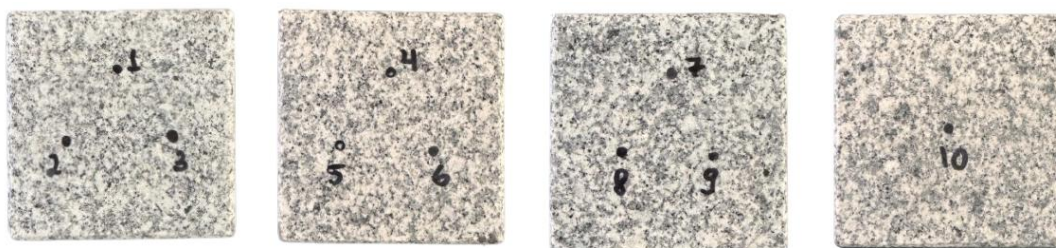


Figura 22. Distribuição dos golpes com o Martelo Schmidt nos provetes graníticos de 10 cm.

Para a validação estatística dos resultados, foram descartados os valores que apresentassem discrepância maior ou igual a 7 unidades de ressalto em relação à média aritmética inicial do grupo. Após essa filtragem, procedeu-se ao recálculo da média aritmética

com base nos valores remanescentes, o qual foi definido como o valor de rebote para o granito, conforme as orientações da Norma ASTM D5873 (2000b).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo é dedicado à apresentação e discussão dos resultados derivados da campanha experimental. O foco incide sobre o comportamento do betão, da madeira e do granito, analisados sob a ótica dos NDT. Através da análise cruzada entre a UPV e o valor de rebote, pretende-se validar o uso de métodos combinados, como o SonReb, na estimativa da resistência mecânica, além do desenvolvimento de curvas de conversão para os materiais estudados. São também discutidos fatores de influência específicos, como a anisotropia da madeira e a heterogeneidade natural da rocha, de forma a verificar a sensibilidade das técnicas de ultrassons na deteção de anomalias e variações na matriz interna dos materiais estudados.

4.1 Cubos de betão

4.1.1 Relação entre UPV direto e resistência a compressão real dos provetes cúbicos de betão

A medição direta da UPV apresentou uma forte correlação com a resistência real à compressão do betão. Foram testados modelos de regressão polinomial e exponencial para ajustar os dados obtidos, conforme apresentado na Figura 23.

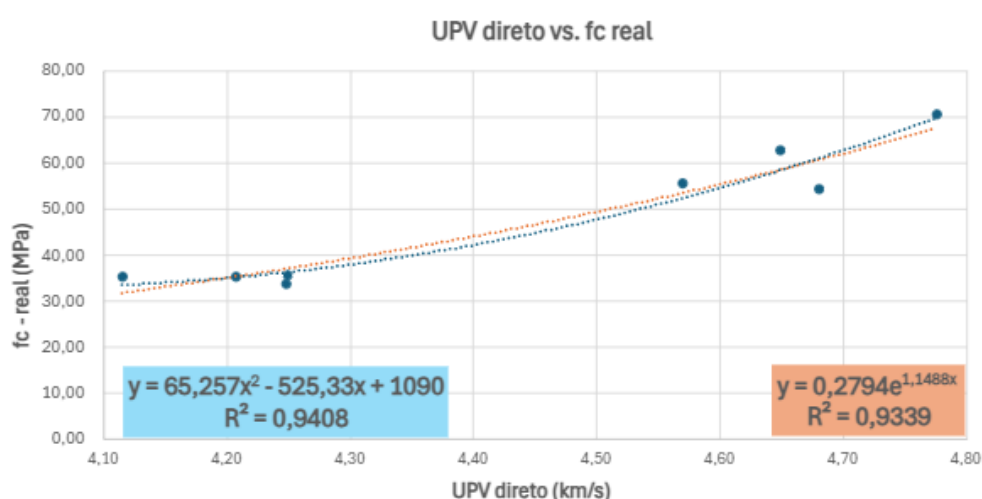


Figura 23. Gráfico do UPV direto vs. f_c – Regressão polinomial e de 2º grau.

O modelo polinomial de segundo grau obteve um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9408, ligeiramente superior ao modelo exponencial, cujo R^2 resultou em 0,9339. Este elevado valor de R^2 indica que a transmissão direta das ondas através da seção transversal dos provetes, tanto dos cubos quanto dos cilindros, fornece uma estimativa altamente confiável da compacidade e, conseqüentemente, da resistência do material.

Observou-se que para velocidades acima de 4,5km/s, a resistência à compressão ultrapassou os 50 MPa, caracterizando um betão de “Excelente Qualidade” conforme os critérios da (IAEA, 2002), presentes na Tabela 2.

Ao analisar individualmente cada traço, verificou-se comportamento semelhante na relação entre as variáveis. De modo geral, quanto maior a velocidade de pulso, maior foi a resistência à compressão obtida. Como exceção, destacam-se os provetes 2 e 3 do tipo 1, que apresentaram a mesma velocidade de pulso, porém com uma diferença de 1,8 MPa na resistência. A Tabela 5 apresenta os valores individuais de UPV direto, f_c e o CoV calculado a partir das três medições de UPV realizadas em cada provete.

Tabela 5. UPV direta vs. f_c real do Betão estudado.

Proвете	UPV direto (km/s)	f_c real (MPa)	CoV entre medições de UPV (%)	CoV médio (%)
Pb_t1_01	4,12	35,12	1,79%	1,07%
Pb_t1_02	4,25	35,23	0,99%	
Pbc_t1_03	4,25	33,45	0,78%	
Pb_t2_01	4,68	53,96	1,79%	
Pb_t2_02	4,57	55,40	0,93%	
Pbc_t2_03	4,21	34,95	0,78%	
Pb_t3_01	4,65	62,66	0,57%	
Pb_t3_02	4,78	70,30	0,96%	

A análise dos resultados de dispersão apresentados na Tabela 5 revela um coeficiente de variação médio de 1,07%, variando de 0,57% a 1,79%, o que indica uma baixa dispersão entre as leituras e homogeneidade dos provetes.

De modo geral, verificou-se a existência de uma correlação consistente entre a UPV e a resistência à compressão, mesmo considerando traços distintos.

4.1.2 Relação da UPV semidireta vs. f_c .

A análise da UPV pelo método semidireto foi realizada utilizando duas distâncias distintas entre os transdutores (10,6 cm e 17,7 cm), visando identificar a influência do percurso da onda na superfície sobre a estimativa da resistência à compressão. Para ambas as distâncias, foram testados modelos de regressão exponencial e polinomial de segundo grau.

Os resultados revelam uma superioridade estatística consistente para a distância de 10,6 cm. No modelo exponencial, esta distância obteve um R^2 igual a 0,8293, enquanto o modelo polinomial apresentou um ajuste ligeiramente superior, com R^2 igual a 0,8394. Esses valores indicam que, em distâncias menores, o método semidireto mantém uma correlação robusta com a resistência interna do betão, sendo o modelo polinomial o que melhor descreve esse comportamento, conforme representado na Figura 24.

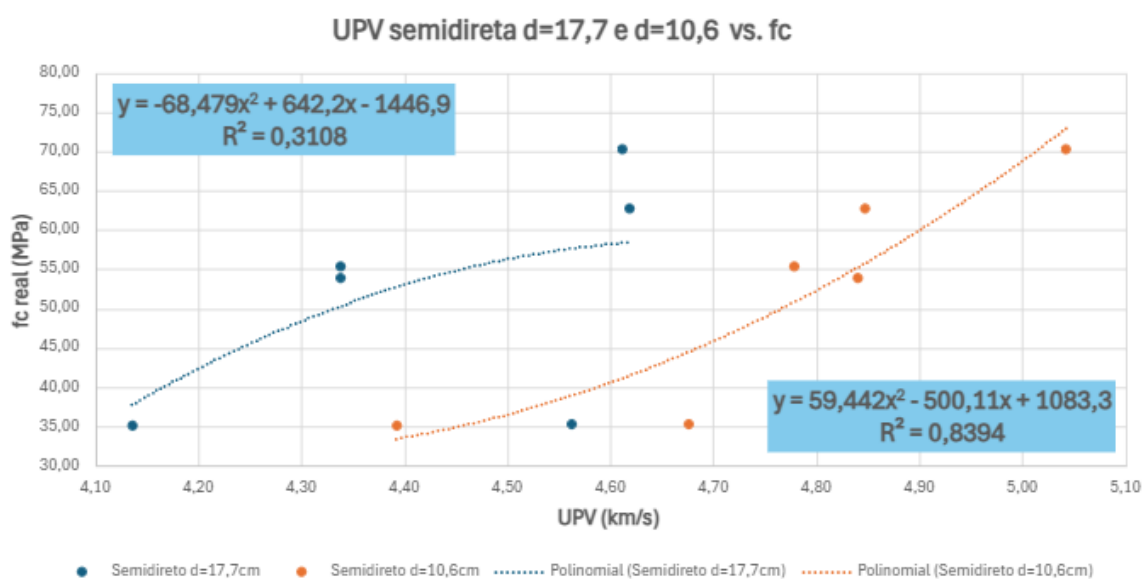


Figura 24. Relação polinomial da velocidade semidireta vs. f_c real.

Em contrapartida, para a distância de 17,7 cm, observou-se uma degradação severa na qualidade do ajuste. O modelo exponencial resultou em um R^2 igual a 0,2884, e o polinomial em um R^2 igual a 0,3108. A baixa correlação nesta distância evidencia as limitações do método semidireto. À medida que a distância entre transdutores aumenta, a onda percorre um caminho

mais longo pela zona superficial do betão, que é mais suscetível a microfissuras, variações de umidade e carbonatação, não refletindo a realidade da massa de betão estrutural.

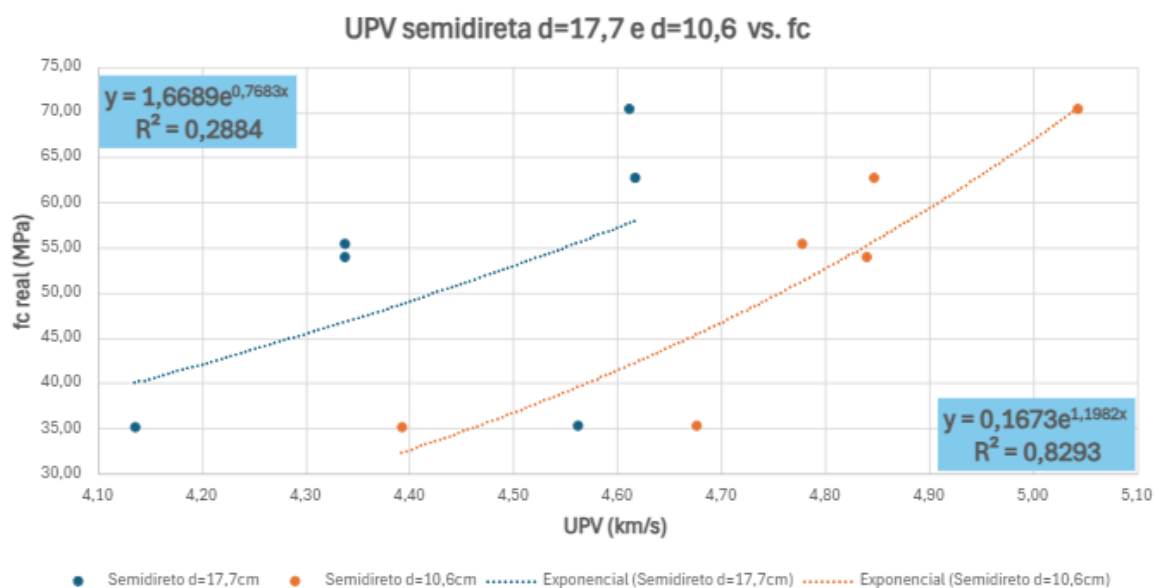


Figura 25. Relação exponencial da velocidade semidireta vs. f_c real.

Comparando os dois modelos matemáticos, apresentados nas Figuras 24 e 25, para a distância mais curta (10,6 cm), nota-se que tanto a curva exponencial quanto a polinomial apresentam coeficientes de determinação muito próximos e elevados ($R^2 > 0,82$). No entanto, a curva polinomial de 2º grau consegue capturar de forma mais precisa a tendência de ganho de resistência em velocidades mais elevadas, sendo, portanto, a curva de conversão recomendada para este estudo quando o acesso à medição direta às faces do elemento estrutural não for possível.

Ademais, o CoV médio das três medições realizadas por provete através do método semidireto, para as distâncias de 10,6 cm e 17,7 cm, fixou-se em 4,15% e 3,62%, respetivamente. Estes patamares de dispersão, tratando-se de ensaios controlados em ambiente laboratorial, revelam-se superiores aos registados na transmissão direta, contrariando o CoV de 1,07% para medição direta e a tendência de alta homogeneidade para o betão estudado. Este comportamento pode ser justificado pela maior suscetibilidade do método semidireto a desvios operacionais de natureza geométrica. Dado que o equipamento de ultrassons utilizado exige a introdução manual prévia da distância entre os pontos de leitura, qualquer flutuação ou desalinhamento no posicionamento dos transdutores altera o tempo de trânsito real do pulso ultrassônico, comprometendo a precisão do cálculo automático da UPV efetuado pelo aparelho. Adicionalmente, cumpre notar que a medição semidireta força a onda a propagar-se pelas

camadas mais superficiais do material, as quais são mais vulneráveis a gradientes de secagem, microfissuração e variações na pressão de contato manual aplicada pelo operador, fatores que, em conjunto, justificam o acréscimo do CoV frente à configuração de transmissão direta.

4.1.3 *Análise multivariada e formulação via método SonReb*

O método SonReb, que combina a UPV direta com o índice esclerométrico foi avaliado para verificar se a combinação de dois ensaios não destrutivos reduziria as incertezas inerentes a cada método isoladamente, visando a obtenção de uma estimativa de resistência a compressão que integrasse as respostas dinâmicas internas.

A Equação 12 corresponde à expressão de correlação não linear obtida por regressão logarítmica natural, calibrada com base nos pares de velocidade de pulso ultrassônico e índice esclerométrico, associados aos valores de resistência à compressão do betão medidos experimentalmente na prensa. Para a obtenção da correlação foi utilizado o método SonReb fornecido pela Proceq.

$$f_c = 0,01562 \cdot UPV^{4,67229} \cdot N^{0,2786} \quad (12)$$

Onde:

- f_c = Resistência a compressão (MPa);
- UPV = Velocidade de pulso ultrassônico (km/s);
- N = Número de rebote.

Ao analisar a sensibilidade da Equação 12, observa-se que o expoente associado à velocidade de pulso exerce uma influência preponderante no cálculo da resistência final em comparação ao expoente do índice esclerométrico. Este comportamento indica que, para o traço e materiais utilizados, a integridade da massa interna e a compacidade do material são indicadores mais sensíveis da evolução da resistência do que as variações de dureza superficial captadas pelo impacto do esclerômetro.

A Tabela 6 detalha o desempenho da Equação 12 frente aos valores reais de ruptura obtidos para cada provete.

Tabela 6. Comparativo de f_c real vs. f_c estimada pelo SonReb.

Provete	f_c real (MPa)	f_c SonReb (MPa)	Erro relativo	Erro Médio
Pb_t1_01	35,12	31,61	9,99%	6,64%
Pb_t1_02	35,23	36,77	4,36%	
Pb_t1_03	33,45	36,86	10,21%	
Pb_t2_01	53,96	60,62	12,35%	
Pb_t2_02	55,40	52,02	6,10%	
Pb_t2_03	34,95	35,22	0,76%	
Pb_t3_01	62,66	59,87	4,46%	
Pb_t3_02	70,30	66,87	4,89%	

Os dados revelam uma correlação entre si, com um erro médio de 6,64%. Este valor é significativamente inferior aos erros observados nas curvas de autores presentes na literatura, como Di Leo (9,53%) e Rilem NDT4 (12,05%), discutidas no tópico seguinte. A superioridade do modelo calibrado reside na sua capacidade de ajustar a estimativa para as particularidades do agregado e da pasta de cimento utilizados nesta pesquisa, algo que curvas genéricas não conseguem captar com o mesmo rigor.

Ao analisar os erros individuais, destaca-se o provete Pb_t2_03, que apresentou um desvio de apenas 0,76% (35,22 MPa estimados vs. 35,00 MPa reais). Mesmo nas amostras de alta resistência, como a Pb_t3_02 (70,3 MPa reais), o método SonReb manteve um erro de 4,89%, demonstrando estabilidade em toda a faixa de resistência ensaiada, a qual variou de 33 a 70 MPa. Esta constância é fundamental para a validação do método, pois indica que a equação não sofre de distorções significativas nem em betões de resistências usuais, nem em betões de alta resistência.

Observou-se ainda que o método SonReb foi capaz de adequar as flutuações que a UPV direta apresentava isoladamente. Por exemplo, na série Pb_t2, onde as velocidades de pulso foram muito próximas, a variação do índice esclerométrico entre 37,7 e 43,7 permitiu ao modelo diferenciar as resistências reais de 55,4 MPa e 54,0 MPa, respectivamente. Isso demonstra que a inclusão do parâmetro de dureza superficial atua como um refinamento estatístico para a precisão do modelo final.

Comparando-se o desempenho deste método com as exigências técnicas para inspeções estruturais, o erro médio de 6,64% valida a Equação 12 como uma ferramenta confiável para a estimativa da resistência à compressão para estes traços estudados. A baixa dispersão dos valores e a consistência das estimativas em relação aos dados experimentais reforçam que a calibração realizada é estatisticamente representativa do comportamento mecânico do betão analisado, mesmo diante da complexidade não linear das correlações envolvidas. Portanto, os resultados obtidos pelo método SonReb consolidam-se como a estimativa mais precisa desta investigação experimental, superando as limitações dos ensaios não destrutivos quando aplicados de forma isolada e sem a devida calibração local.

Ressalta-se, contudo, que para uma validação estatística definitiva e abrangente deste método, faz-se necessária a realização de um número substancialmente maior de ensaios em uma diversidade ampliada de provetes e traços de betão. No entanto, para fins exploratórios e dentro do escopo desta pesquisa, os resultados demonstram a eficácia do método SonReb como uma alternativa superior para a predição da resistência mecânica do betão analisado.

4.1.4 Correlação com curvas da literatura

Nesta seção, realiza-se o confronto entre a resistência real medida em prensa e as estimativas obtidas por meio de equações presentes na literatura técnica e implementadas no equipamento de ultrassom (Turgut, Raouf-Ali, Rilem NDT4 e Di Leo). Esta análise visa verificar a aplicabilidade de modelos universais à realidade do betão ensaiado, servindo como base comparativa para validar a eficácia da calibração local realizada nos tópicos anteriores.

A Tabela 7 detalha os erros percentuais individuais de cada equação para os diferentes provetes ensaiados, bem como o erro médio final de cada modelo.

Tabela 7. Erro de estimativas de resistência e resistência real do betão.

Provete	Erro em relação a f_c real			
	Equação de Turgut	Equação de Raouf-Ali	Equação de RILEM NDT4	Equação de Di Leo
Pb_t1_01	22,16%	31,66%	17,42%	-3,47%
Pb_t1_02	15,80%	25,26%	12,01%	-8,80%
Pbc_t1_03	8,31%	20,27%	1,34%	-24,57%
Pb_t2_01	27,73%	39,46%	9,19%	-6,87%
Pb_t2_02	30,21%	42,24%	27,80%	10,35%
Pbc_t2_03	13,22%	22,75%	4,63%	-17,30%
Pb_t3_01	34,04%	46,81%	11,70%	-1,60%
Pb_t3_02	38,84%	48,32%	12,29%	3,28%
Média	23,79%	34,60%	12,05%	9,53%

A análise dos dados revela que as equações de Turgut e Raouf-Ali apresentaram os maiores desvios, com erros médios de 23,79% e 34,60%, respectivamente. É importante ressaltar que estas duas equações se baseiam exclusivamente UPV, o que limita sua capacidade de captar variações na dureza superficial do material. Observa-se uma tendência sistemática de subestimação da resistência real por parte desses modelos em todas as amostras, com erros que chegam a 48,32% no caso da equação de Raouf-Ali no provete Pb_t3_02. Embora tal comportamento possa ser interpretado como uma margem de segurança conservadora sob o ponto de vista estrutural, a magnitude dos erros invalida o uso direto dessas equações para uma avaliação precisa da capacidade resistente do betão em estudo.

Por outro lado, as equações de Rilem NDT4 e Di Leo demonstraram uma aderência significativamente superior aos dados experimentais. Um fator determinante para este desempenho superior é que ambos os modelos utilizam o índice de rebote em conjunto com a UPV para realizar a estimativa, caracterizando-se como métodos SonReb. O modelo da Rilem NDT4 obteve um erro médio de 12,05%, mostrando-se um parâmetro normativo robusto. Já a equação de Di Leo apresentou o menor erro médio entre as curvas de conversão, apresentando um percentual de 9,53. No entanto, é importante notar que, diferentemente dos modelos de Turgut e Raouf-Ali, a equação de Di Leo apresentou oscilações entre subestimação e superestimação. Destaca-se o provete Pbc_t1_03, onde a equação de Di Leo superestimou a resistência em 24,57%, o que reforça o risco de se utilizar curvas da literatura sem a devida

calibração local, visto que a superestimação da resistência pode comprometer a segurança de uma análise estrutural.

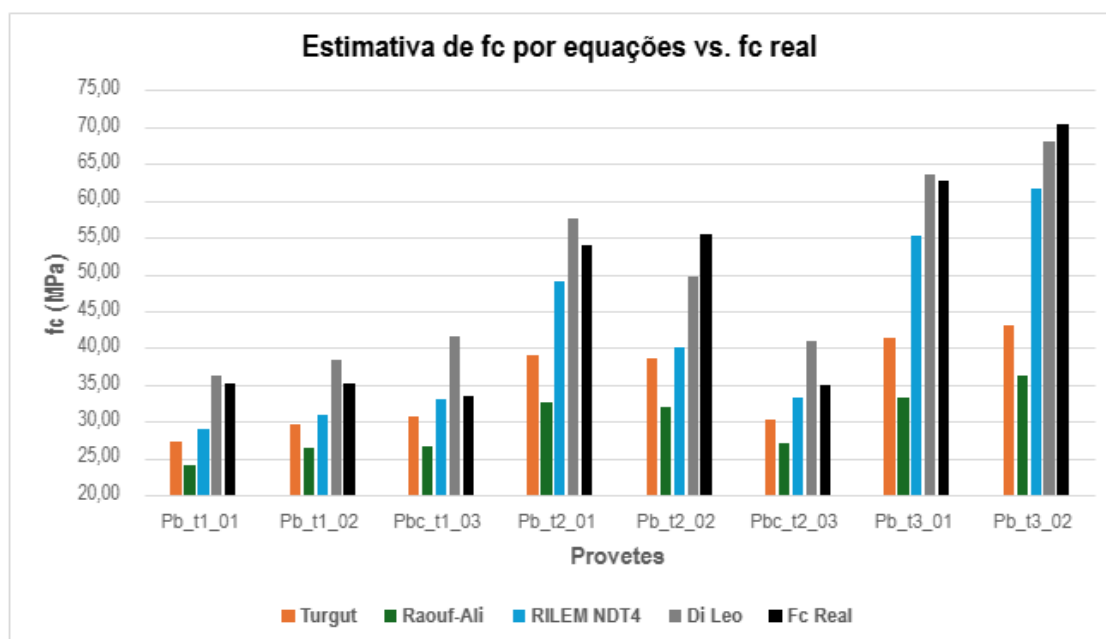


Figura 26. Comparativo da resistência estimada com a resistência real.

O gráfico apresentado na Figura 26 evidencia visualmente a aproximação das estimativas das curvas de Rilem NDT4 e Di Leo com a resistência real dos provetes, sendo representadas pelas cores azul, cinza e preto, respectivamente.

Em conclusão, a disparidade entre os modelos da literatura e os resultados de f_c Real confirma que fatores como a natureza dos agregados e a composição da matriz cimentícia exercem influência determinante na velocidade de pulso ultrassônico. A superioridade do método SonReb calibrado nesta análise, com erro médio de 6,64%, justifica o esforço experimental de calibração, consolidando-se como uma metodologia capaz de garantir uma estimativa precisa e segura para o betão analisado.

4.1.5 Análise das ondas transversais via Pulso Eco

Nesta seção, avalia-se o comportamento das ondas S obtidas por meio do transdutor de pulso eco. As medições foram realizadas em três faces distintas para cada provete, visando captar a homogeneidade do material e a estabilidade das leituras fornecidas pelo equipamento. A Tabela 8 apresenta as médias das velocidades de pulso eco registradas.

Tabela 8. Pulso Eco nos provetes de betão.

Provete	Pulso eco (m/s)			MÉDIA
	Face 1	Face 2	Face 3	
Pb_t1_01	1079	542	990	870
Pb_t1_02	1042	1042	1038	1041
Pb_t1_03	2120	2105	2113	2113
Pb_t2_01	1181	1176	1087	1148
Pb_t2_02	1099	1095	1095	1096
Pb_t2_03	2098	2105	2105	2103
Pb_t3_01	1087	1210	1107	1135
Pb_t3_02	1119	1128	1136	1128

Os resultados revelam uma discrepância acentuada entre as duas geometrias testadas. Enquanto os cubos apresentaram velocidades médias de onda S em torno de 1070 m/s, os cilindros (Pb_t1_03 e Pb_t2_03) registraram valores significativamente superiores, na ordem de 2110 m/s. Esta variação indica que a velocidade encontrada através do pulso eco foi diretamente influenciada pelo formato e dimensões do provete, não refletindo apenas a rigidez intrínseca do betão.

Uma justificativa prática para essa diferença reside no caminhamento da onda dentro do material. Nos cubos de 15 cm, a curta distância entre as faces paralelas e a proximidade das bordas laterais podem ter gerado interferências no sinal de retorno, resultando em velocidades subestimadas. Já nos cilindros, a altura de 30 cm permitiu um percurso de onda mais longo e estável, reduzindo a incidência de ruídos e reflexões precoces que distorcem a leitura.

Diante da alta variabilidade observada, em que provetes do mesmo betão apresentaram velocidades com uma diferença superior a 90% apenas pela mudança de geometria, conclui-se que não é possível estabelecer uma curva de conversão fidedigna entre a velocidade das ondas S e a resistência à compressão para esse estudo. A falta de estabilidade nos resultados obtidos nos cubos, em comparação com os cilindros, demonstra que o método de pulso eco é extremamente sensível às condições de contorno do elemento testado, o que torna arriscada qualquer tentativa de estimar a resistência com base em um conjunto de dados com variabilidade geométrica.

4.1.6 Estimativa do módulo de elasticidade via Software PL-Link.

Para uma análise mais aprofundada das propriedades mecânicas do betão, procedeu-se à estimativa do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (ν). Estes parâmetros foram obtidos através do processamento conjunto das velocidades de ondas P e S, integradas à densidade (ρ) de cada provete, utilizando o *software* especializado PL-Link da Proceq.

A tabela 9 apresenta os valores de UPV, pulso eco e o respectivo módulo de elasticidade calculado pelo *software* para cada provete.

Tabela 9. Resultados de UPV, Pulso Eco e Módulo de Elasticidade.

Proвете	UPV (m/s)	Pulso Eco (m/s)	E-Modulus (MPa)
Pb_t1_01	4115,33	870	5105,4
Pb_t1_02	4249,33	1041	7267,3
Pb_t1_03	4248,00	2113	27240,0
Pb_t2_01	4681,33	1148	8900,0
Pb_t2_02	4570,33	1096	8120,0
Pb_t2_03	4208,33	2103	27129,6
Pb_t3_01	4649,00	1135	8700,0
Pb_t3_02	4776,00	1128	8606,6

A análise dos resultados do módulo de elasticidade reforça as discussões anteriores sobre a influência da geometria dos provetes na fidedignidade dos ensaios não destrutivos. Nos cilindros, onde as dimensões atendem aos requisitos técnicos do fabricante para o ensaio de pulso eco, os valores de E situaram-se em torno de 27.200 MPa (27,2 GPa). Estes valores são condizentes com a literatura técnica para betões de resistência intermediária a alta, validando a eficácia da combinação de ondas P e S para a caracterização elástica do material quando as condições de contorno são respeitadas.

Em contrapartida, nos cubos de 15 cm, os valores de E estimados variaram entre 5.105 MPa e 8.900 MPa. Estes resultados são atipicamente baixos para um betão estrutural e decorrem diretamente da subestimativa da velocidade das ondas S nessas amostras, conforme discutido no tópico 4.1.5.

A utilização do *software* PL-Link permitiu a visualização clara desta sensibilidade. Ao inserir os dados de entrada (UPV, pulso eco e densidade), o *software* aplica as equações e

fornece o valor final do módulo. A discrepância observada entre cubos e cilindros serve como um alerta metodológico, em que a estimativa de módulos elásticos por meio do ultrassom exige um rigor geométrico, sob pena de gerar dados que, embora processados por ferramentas de alta precisão, perdem o sentido físico devido a interferências de sinal nas bordas do elemento.

Conclui-se que, para o betão analisado, o módulo de elasticidade real situa-se em torno de 27 GPa, valor este que pôde ser confirmado apenas nos cilindros.

4.2 Vigas de betão

4.2.1 Correlação entre velocidade superficial e resistência a tração - Pull-Off

Neste tópico, buscou-se estabelecer uma correlação entre um ensaio não destrutivo, a velocidade superficial do ultrassom, e um ensaio semi-destrutivo, a resistência de aderência pelo ensaio Pull-Off, que mede diretamente a resistência à tração da camada superficial do material.

A análise da relação entre esses dois parâmetros é consolidada através do gráfico de dispersão apresentado na Figura 27, que confronta as velocidades superficiais médias de cada viga com as respectivas tensões médias de Pull-Off.

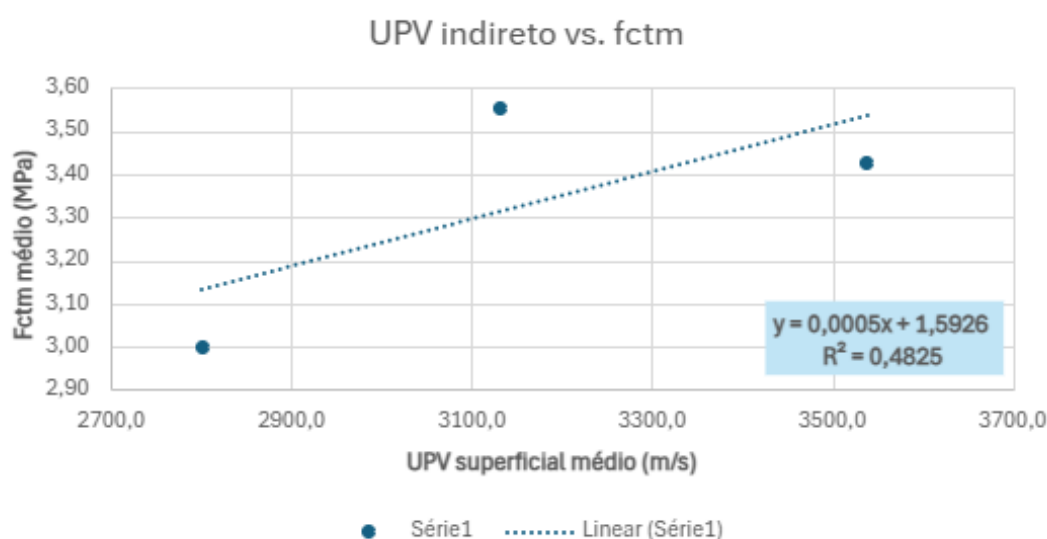


Figura 27. Relação entre a UPV superficial e a resistência a tração do betão (f_{ctm}) em valores médio.

O coeficiente de correlação R^2 calculado para este conjunto de dados de regressão linear foi de 0,4825. Este valor indica a existência de uma correlação entre moderada e baixa entre a velocidade de propagação das ondas superficiais e a resistência ao arrancamento. Visualmente, o gráfico de dispersão demonstra que a viga Pvb_t2, que registrou a maior velocidade superficial (3539,0 m/s), apresentou uma elevada tensão de Pull-Off (3,43 MPa). No entanto, a viga Pvb_t3, apesar de possuir uma velocidade superficial significativamente inferior à Pvb_t2, obteve a maior resistência média ao Pull-Off do estudo (3,55 MPa), o que contribui para a dispersão dos dados e a redução da força da correlação linear.

Esta discrepância sugere que, embora a velocidade superficial forneça um indicativo qualitativo da compacidade e densidade da capa do betão, a resistência de aderência à tração é influenciada por variáveis adicionais que o ultrassom superficial pode não captar integralmente, como a microestrutura da matriz cimentícia na zona de arrancamento.

Contudo, a robustez dos resultados de Pull-Off é confirmada quando confrontada com os parâmetros normativos presentes no Quadro 3.1 do Eurocódigo 2 (Anexo A). Ao converter as tensões médias de tração em classes de resistência à compressão através das expressões analíticas da norma, obtiveram-se valores de 31,8 MPa, 38,6 MPa e 41,5 MPa para as vigas Pvb_t1, Pvb_t2 e Pvb_t3, respectivamente, as quais serão discutidas no tópico seguinte.

4.2.2 Correlação entre UPV direta e f_{ctm} estimada através do Eurocódigo 2

Dando continuidade à caracterização das vigas de betão, realizou-se o ensaio direto de UPV ao longo do comprimento das vigas. Os valores obtidos foram confrontados com as classes de resistência estimadas anteriormente a partir do ensaio de Pull-Off e das equações do Eurocódigo 2.

Os dados de velocidade média direta registrados foram de 4161,7 m/s, 4456,3 m/s e 4590,0 m/s para as vigas Pvb_t1, Pvb_t2 e Pvb_t3, respectivamente. Ao realizar a análise de regressão entre estas velocidades e as resistências estimadas, obteve-se um cenário estatístico de alta correlação, apesar do baixo número de amostras, como apresentado na Figura 28.

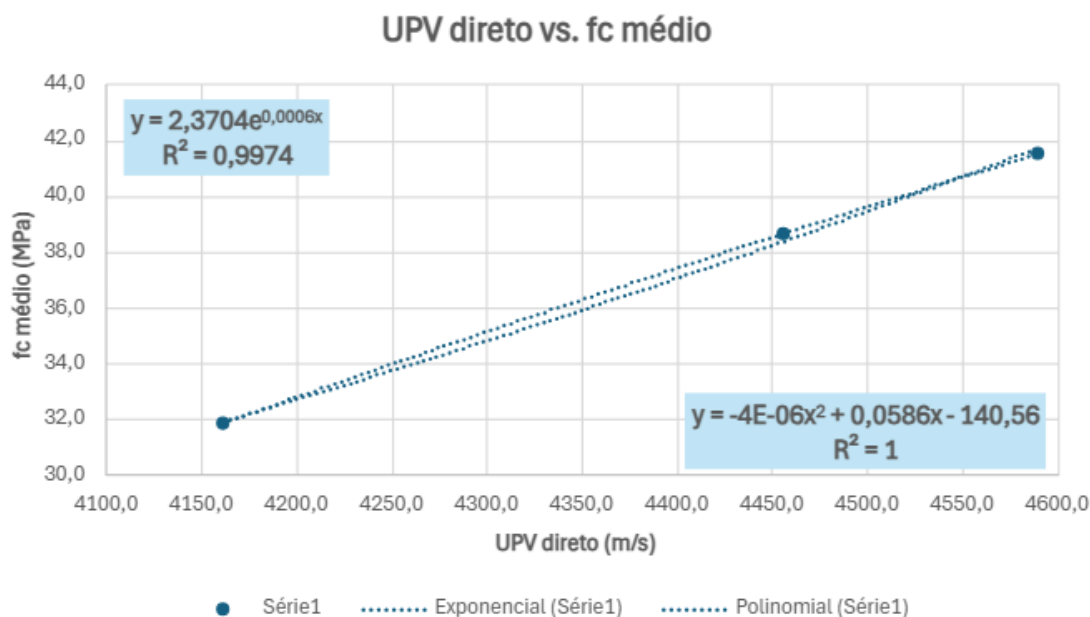


Figura 28. Relação entre UPV direta e resistência estimada através do Eurocódigo 2.

Os coeficientes de determinação R^2 obtidos, de 0,9974 para a regressão exponencial e de 1,00 para a regressão polinomial, evidenciam uma correlação extremamente elevada para o betão analisado, reafirmando os resultados já apresentados no tópico 4.1.1 desta pesquisa. Esses valores indicam um excelente ajuste dos modelos aos dados experimentais, demonstrando que a relação entre as variáveis se mantém consistente e confiável. Ainda se verifica que, mesmo para medições em elementos de curto e médio comprimento, a correlação permanece robusta e representativa do comportamento do betão.

Contudo, deve-se considerar que estes resultados possuem um caráter predominantemente exploratório, visto que a análise se baseia em um conjunto limitado de três amostras. Embora a correlação observada seja excepcional, a validação estatística plena do modelo exigiria a expansão da base de dados com um número maior de provetes para confirmar se esta tendência de ajuste perfeito se mantém em uma escala amostral mais abrangente.

4.2.3 Estimativa de profundidade de fendas

Nesta etapa, avaliou-se a eficácia do ultrassom na detecção da profundidade de fendas induzidas artificialmente em vigas de betão. Para validar o ensaio, realizou-se um corte real de 7,5 cm de profundidade em cada viga, como demonstrado no tópico 3.3.7 desta pesquisa, servindo como valor de referência para a comparação entre as estimativas obtidas por meio da Equação 10 e pela funcionalidade automática do equipamento.

Os resultados médios das estimativas, tanto manual quanto do equipamento, apresentam-se na Tabela 10.

Tabela 10. Comparativo de profundidade de fendas - Real vs. estimado.

Provete	Profundidade Real (cm)	Estimativa pela equação (cm)	Estimativa pelo PUNDIT (cm)
Pvb_t1	7,50	5,25	6,60
Pvb_t2	7,50	5,03	7,25
Pvb_t3	7,50	7,01	6,38
Erro médio	-	33,02%	11,58%

A análise dos dados revela que a estimativa por meio da Equação 10 apresentou sua maior precisão na viga Pvb_t3, com um valor de 7,01cm, aproximando-se significativamente da profundidade real. Nas vigas Pvb_t1 e Pvb_t2, contudo, a equação tendeu a subestimar a profundidade. Esta variação pode ser atribuída à sensibilidade do operador na captura dos tempos de propagação t1 e t2 e à possível influência da trajetória da onda em torno da fenda em betões de diferentes compacidades.

Por outro lado, a funcionalidade automática do aparelho demonstrou uma maior estabilidade na viga Pvb_t2, com uma média de 7,25cm, o valor mais próximo do real entre todas as medições automatizadas. Um ponto de discussão relevante reside na influência dos parâmetros de configuração do sinal, especificamente a voltagem e o ganho.

Na viga Pvb_t3, observou-se que a utilização de uma voltagem elevada de 400V combinada com um ganho de 100x resultou em uma estimativa de 9 cm, superestimando a fenda em 20%. Este comportamento sugere que o excesso de potência no sinal pode causar saturação no interior da viga ou a captura de reflexões secundárias no fundo do provete, induzindo o algoritmo do aparelho a um erro por excesso. Em contrapartida, as configurações mais moderadas, entre 150V e 200V e ganho entre 5x e 10x tenderam a fornecer resultados mais próximos da realidade física do corte.

Em suma, os resultados demonstram que a funcionalidade automática do equipamento de ultrassom apresenta uma eficácia superior e maior praticidade operacional em comparação à aplicação da equação analítica manual. Contudo, a variabilidade observada em função dos parâmetros de sinal reforça que, antes de qualquer medição em campo, se faz necessário realizar uma calibração prévia em fendas de profundidade conhecida. Este procedimento é essencial

para determinar a combinação de voltagem e ganho que melhor se adequa à situação específica e às características do material analisado, garantindo que a estimativa da patologia seja fidedigna e livre de erros por saturação ou atenuação excessiva do sinal.

4.3 Madeira – *Pinus pinaster*

4.3.1 Limitações geométricas do ensaio de UPV em provetes cúbicos e prismáticos.

A caracterização da madeira de *Pinus pinaster* por meio do UPV revelou a importância e influência da geometria do provete em relação ao comprimento de onda do ultrassom. Embora a madeira seja um material ortotrópico, com velocidades de propagação de onda distintas em suas direções paralela, radial e tangencial, as medições realizadas em provetes cúbicos de 5 cm apresentaram limitações significativas.

Utilizando transdutores de 54kHz e aplicando a Equação 2 com os valores de velocidade média nos provetes cúbicos, conclui-se que o comprimento de onda variou de 9,2 a 9,5 cm, com UPV de 4975 a 5127 m/s, respectivamente. Considerando a dimensão lateral de 5 cm dos provetes cúbicos, o comprimento de onda do ultrassom é significativamente maior. Essa condição, portanto, impede que a onda ultrassônica se desenvolva completamente dentro do material, resultando em leituras de UPV que podem não ser fidedignas ou representativas das propriedades intrínsecas da madeira.

Em contrapartida, os provetes prismáticos, com dimensão ao longo das fibras de 15cm, possuem comprimento suficiente para a onda completar um ciclo, tornando suas medições de UPV mais confiáveis. A Tabela 11 apresenta a comparação das velocidades médias na direção paralela às fibras entre os cubos e os prismas.

Tabela 11. UPV direto médio nos 3 grupos de provetes de madeira.

Provetes	UPV médio (m/s)	Umidade Média
Pmc	4974	12,37%
Pmp	5127	12,11%
Pmps	4975	13,61%

Observa-se que a UPV média do grupo Pmc é similar à do Pmps, e ligeiramente inferior à os Pmp. No entanto, a confiabilidade das medições nos cubos é questionável devido à relação

desfavorável entre o comprimento de onda e a dimensão do provete. Isso sugere que, para ensaios de ultrassom em madeira, a escolha da geometria do provete deve considerar a frequência do transdutor e o comprimento de onda resultante para evitar interferências geométricas e garantir a precisão dos resultados.

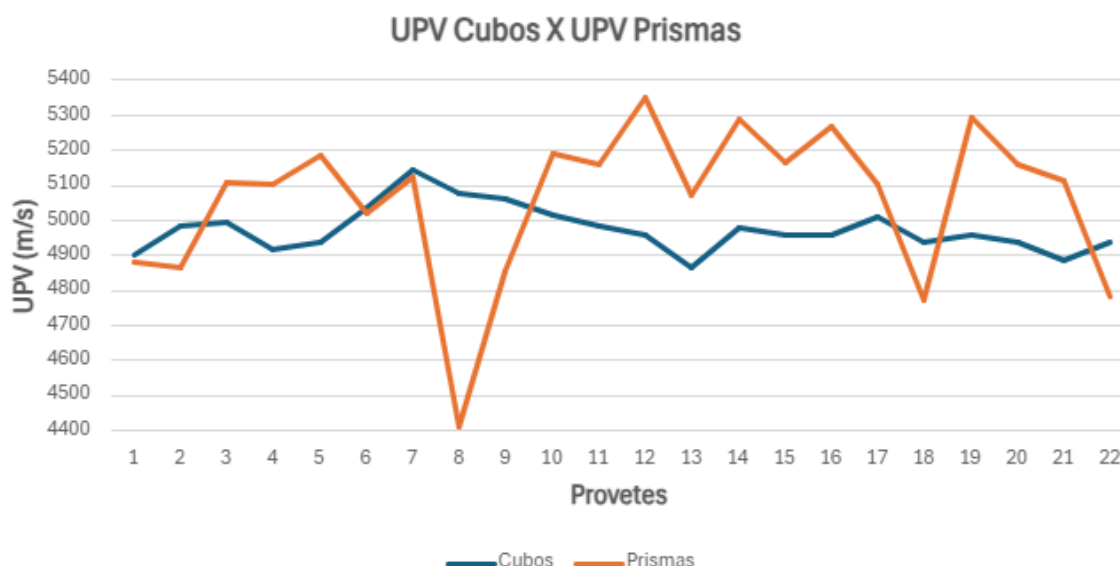


Figura 29. Aproximação do UPV entre diferentes geometrias de madeira.

A similaridade das velocidades médias entre os cubos e os prismas, apesar da diferença no comprimento, pode indicar que as dimensões laterais dos prismas (5x5 cm) também influenciaram a propagação da onda de forma semelhante aos cubos, conforme apresentado na Figura 29. Tal efeito de interferência lateral pode ter comprometido a fidedignidade das medições de UPV em ambos os tipos de provetes, sugerindo que as velocidades registradas podem não representar plenamente as propriedades do material.

4.3.2 Correlação entre UPV e f_c em prismas e cubos.

A análise da correlação entre a UPV e a f_c em provetes prismáticos de *Pinus pinaster* é fundamental para avaliar a aplicabilidade do método ultrassônico na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. A Figura 30 apresenta a relação entre a UPV e a f_c para os grupos Pmc, Pmp e Pmps.

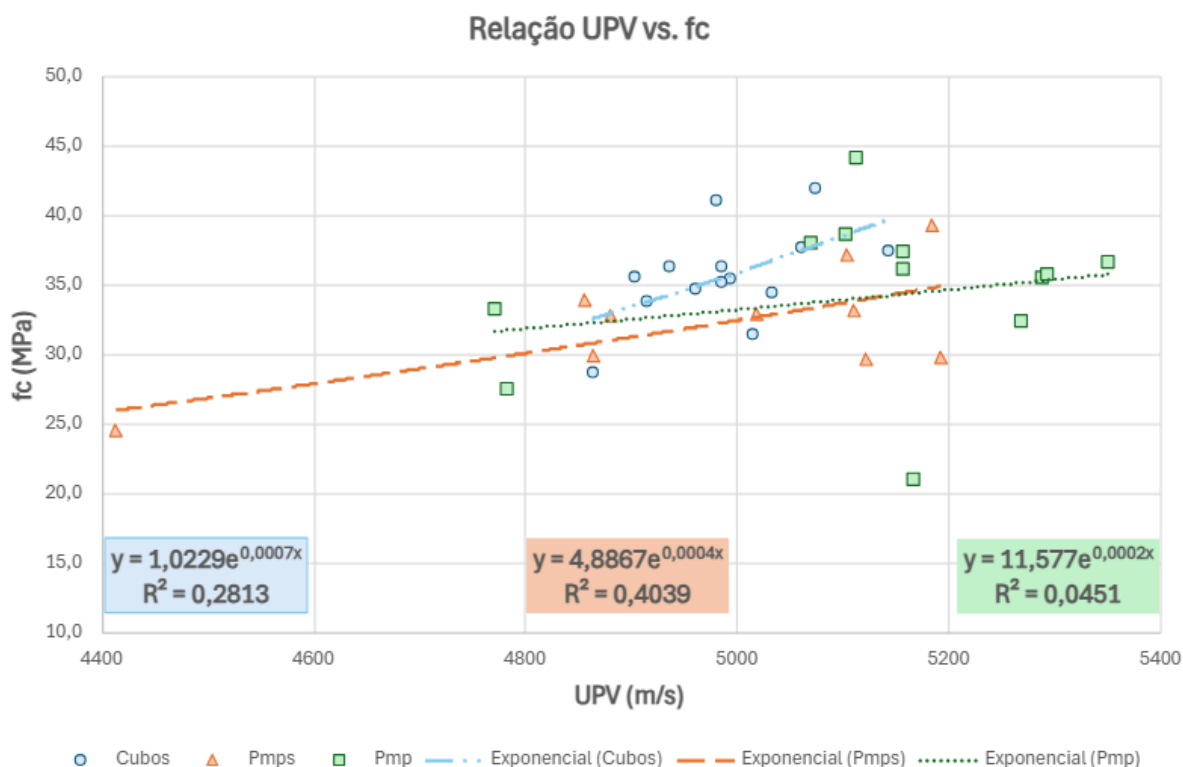


Figura 30. Relação entre o UPV e o f_c para os três grupos de provetes de madeira e suas respectivas equações exponenciais.

Observa-se no gráfico que, para o grupo Pmps, a curva de tendência exponencial apresenta o maior coeficiente de determinação, com R^2 igual a 0,4039. Contudo, este valor, mesmo sendo o maior entre os 3 grupos, ainda apresenta fraca correlação entre os dados, indicando que a UPV explica menos de 41% da variabilidade da resistência à compressão. Embora haja uma leve tendência de aumento da UPV com a f_c , a dispersão dos dados é significativa, comprometendo a capacidade preditiva.

Para o grupo Pmc e Pmp, a correlação exponencial resultou em um R^2 igual a 0,2813 e a 0,0451, respectivamente. Estes coeficientes de determinação são fracos, sugerindo que a UPV tem uma capacidade muito limitada de prever a resistência à compressão para este tipo de provete, seja pela geometria, seja pela umidade. A alta dispersão dos pontos, com muitos valores afastados da linha de tendência, confirma a baixa confiabilidade da correlação.

Esta análise comparativa entre os tipos de provetes reforça a complexidade de se utilizar o ensaio de ultrassom para a estimativa de propriedades mecânicas da madeira. Os baixos coeficientes de determinação R^2 observados em todos os grupos indicam que, para este estudo, a UPV não se mostrou um método fidedigno para a estimativa da resistência à compressão e

criação de uma curva de correlação. A influência do teor de umidade é evidente, mas mesmo nos provetes do grupo Pmps, a correlação é fraca. Além disso, a similaridade das velocidades médias entre os grupos Pmc e Pmps, conforme discutido no tópico 4.3.1, sugere que as limitações geométricas impostas pela dimensão transversal de 5x5 cm podem ter afetado a fidedignidade das medições de UPV em ambos os casos. A dispersão dos dados nos três grupos aponta para a influência combinada de fatores como a geometria do provete, o teor de umidade e a heterogeneidade natural da madeira, que devem ser cuidadosamente considerados na interpretação dos resultados, levando à conclusão de que a UPV, nas condições testadas, não é um bom preditor da resistência à compressão.

4.3.3 Análise triaxial no grupo Pmc e efeito de confinamento

Além da direção paralela às fibras, a caracterização da madeira em provetes cúbicos também incluiu ensaios de compressão e medições de UPV nas direções tangencial e radial, visando compreender a anisotropia do material. Os resultados para a correlação entre UPV e f_c na direção tangencial são apresentados na Figura 31.

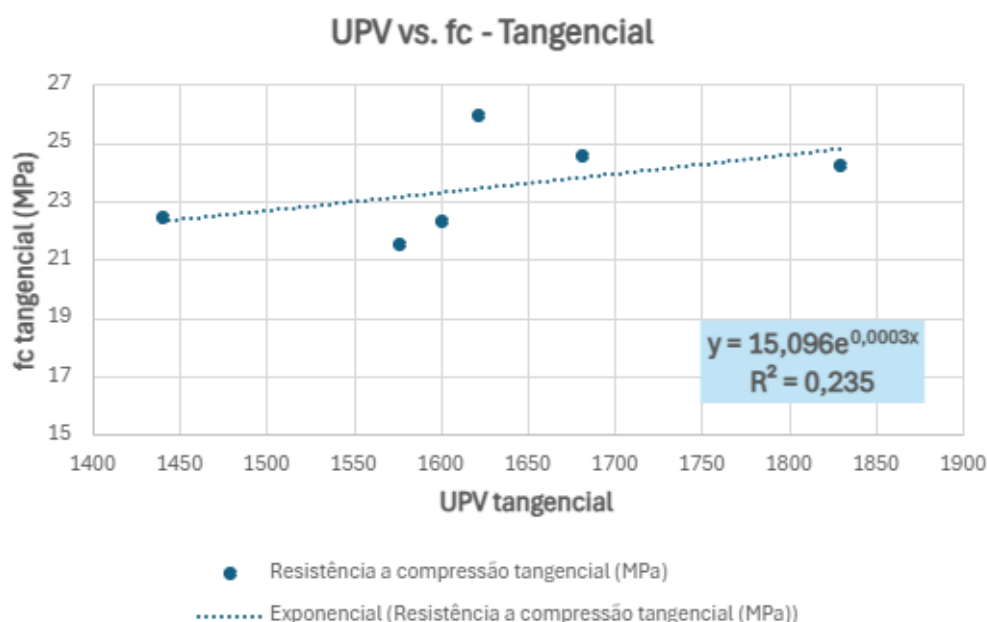


Figura 31. Relação entre UPV e f_c na direção tangencial às fibras.

Conforme apresentado na Figura 31, a correlação entre UPV e f_c na direção tangencial apresentou, para uma curva exponencial, um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,235. Este valor, similar aos observados na direção paralela, reforça a conclusão de que a UPV, nas condições testadas, possui uma capacidade preditiva fraca para a resistência à compressão da

madeira, mesmo em outras direções. A dispersão dos pontos indica que a variabilidade intrínseca do material e as limitações do ensaio de ultrassom, discutidas no tópico 4.3.1, persistem independentemente da direção de aplicação da carga.

Na direção radial, foi registrada uma resistência à compressão significativamente superior aos demais resultados obtidos, atribuída ao efeito de confinamento. Este fenômeno ocorre quando a geometria do provete e as condições de carregamento induzem um estado de tensões triaxiais, aumentando artificialmente a capacidade de carga do material.

A Figura 32 ilustra a deformação severa de um provete que sofreu confinamento, apresentando uma altura significativamente reduzida em comparação ao seu estado inicial.



Figura 32. Deformação de provete cúbico devido ao efeito de confinamento.

Devido a esse efeito, o resultado obtido foi identificado como um *outlier* e, portanto, excluído das análises. Da mesma forma, as medições realizadas na direção radial também foram desconsideradas, uma vez que não representam adequadamente a resistência intrínseca da madeira sob condições de compressão.

4.4 Rocha

4.4.1 Caracterização física e sensibilidade ao condicionamento térmico

A análise da UPV em rochas graníticas, submetidas a diferentes condições de umidade, revelou uma clara sensibilidade do material à presença de água em sua estrutura porosa. A comparação entre provetes em condição natural e provetes secos em estufa demonstra o impacto da umidade na propagação das ondas ultrassônicas, bem como a alta capacidade do aparelho Pundit de captar essa variação.

Os resultados obtidos para os diferentes métodos de medição de UPV, com transdutores de Ondas P, direto e semidireto com distâncias entre transdutores iguais a $d=10,6\text{cm}$ e $d=17,7\text{cm}$, e de ondas S com a funcionalidade de pulso eco, indicam uma redução notável na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nos provetes secos em estufa em comparação com os provetes em condição natural. Especificamente, observou-se uma diminuição média na UPV que variou de, aproximadamente, 5,48% para o método semidireto com $d=17,7\text{cm}$ a 9,48% para o método de pulso eco com a remoção da umidade. A Figura 33 ilustra graficamente essa variação, evidenciando a menor velocidade para os provetes secos para todos os ensaios.

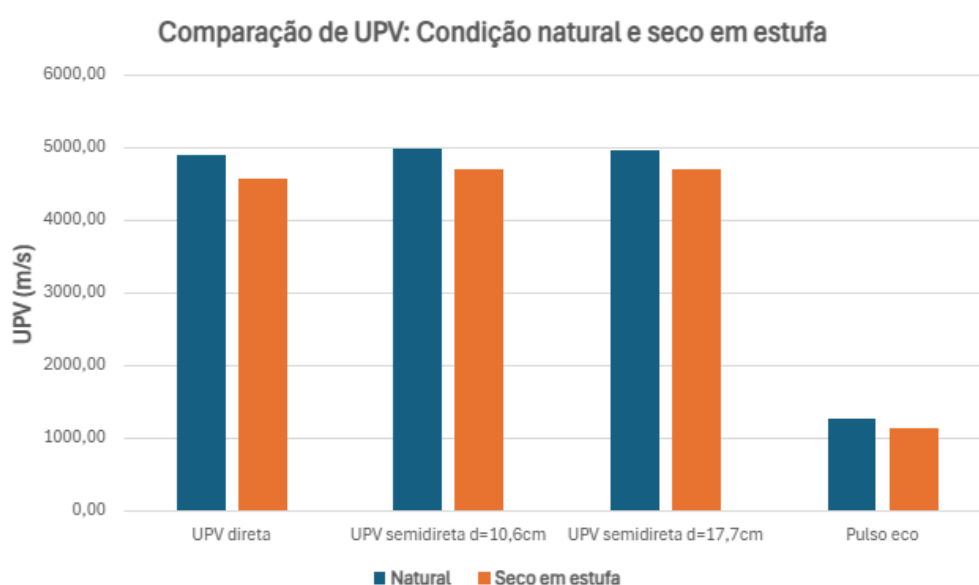


Figura 33. Comparativo da UPV entre granitos em estado natural e secos em estufa.

A redução da UPV em rochas secas decorre da alteração na impedância acústica do material. Em rochas porosas como o granito, a substituição da água pelo ar nos vazios durante a secagem em estufa cria descontinuidades acústicas significantes, como apresentado na Figura 33.

Enquanto a água favorece um caminho de propagação mais contínuo e com menor contraste de impedância em relação à matriz sólida, o ar atua como uma barreira à transmissão de energia. Devido à sua baixa densidade e reduzida velocidade de propagação, a presença de ar nos poros aumenta a dispersão e a atenuação da onda, forçando-a a contornar esses vazios. Consequentemente, a transmissão torna-se menos eficiente, resultando em menores valores de UPV quando comparados ao estado saturado

A sensibilidade do granito à umidade, conforme demonstrado pela variação da UPV, ressalta a importância de considerar o estado de saturação do material ao realizar e interpretar ensaios não destrutivos. A umidade atua como um fator determinante na resposta acústica da rocha, e sua influência deve ser devidamente contabilizada para uma avaliação precisa das propriedades físicas e mecânicas do granito.

4.4.2 Análise comparativa entre os métodos de medição nos cubos de 15cm

As medições realizadas pelo método semidireto em duas faces distintas revelaram uma estabilidade nos valores de UPV, com uma diferença média de 40,5 m/s entre as distâncias de 10,6 cm e 17,7 cm. Conforme ilustrado no gráfico da Figura 34, os perfis de velocidade para ambas as distâncias seguem uma tendência próxima em todos os provetes analisados.

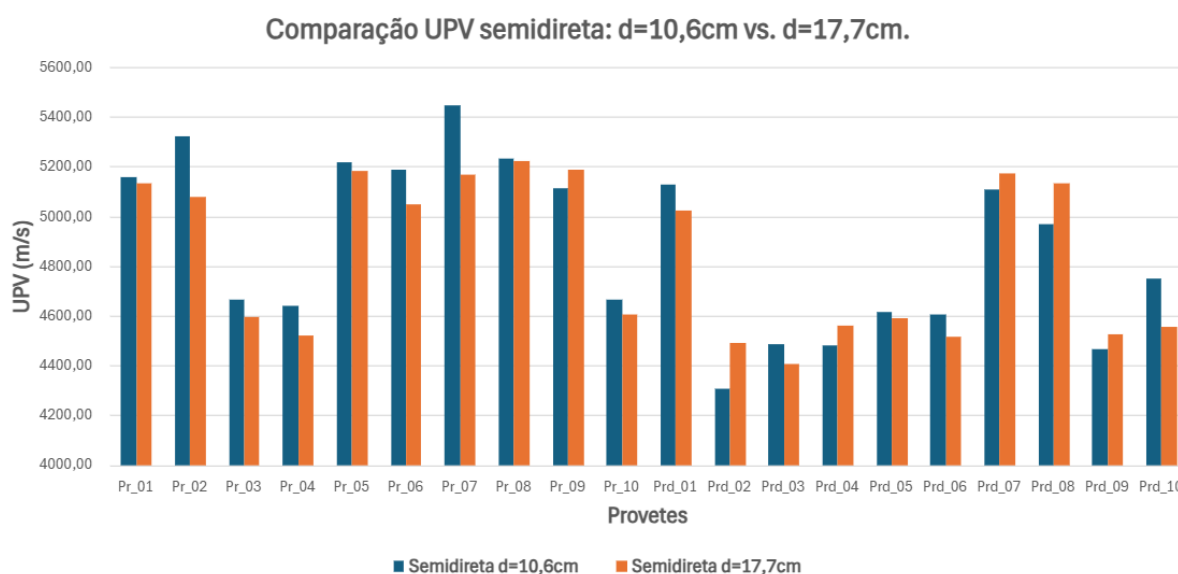


Figura 34. Comparação das UPV pelo método semidireto em diferentes distâncias – provetes cúbicos de 15cm.

Embora o acréscimo de distância entre os transdutores acarrete um comprimento de onda maior e, conseqüentemente, mais suscetível à anisotropia da rocha, não foi observada uma perda de precisão significativa entre leituras de UPV. Tal estabilidade sugere que o granito estudado apresente uma anisotropia baixa ou bem distribuída em sua estrutura. Se houvesse uma elevada anisotropia, seria esperada uma maior variabilidade nas leituras de UPV à medida que a distância aumentasse e, conseqüentemente, o caminho percorrido pela onda se alterasse.

Analisando as medições de pulso eco, o efeito de borda nos cubos de 15 cm pode ter influenciado a detecção correta da velocidade, tal qual aconteceu no betão, como discutido no tópico 4.1.5.

4.4.3 Correlações mecânicas nos cubos de 10cm

A comparação entre as velocidades obtidas pelos métodos direto e semidireto com $d=10,6$ cm nos cubos de 10 cm revela uma discrepância notável entre os dois procedimentos. Conforme ilustrado na Figura 35, a velocidade semidireta apresenta valores superiores e uma maior variabilidade em relação à velocidade direta para a mesma amostra.

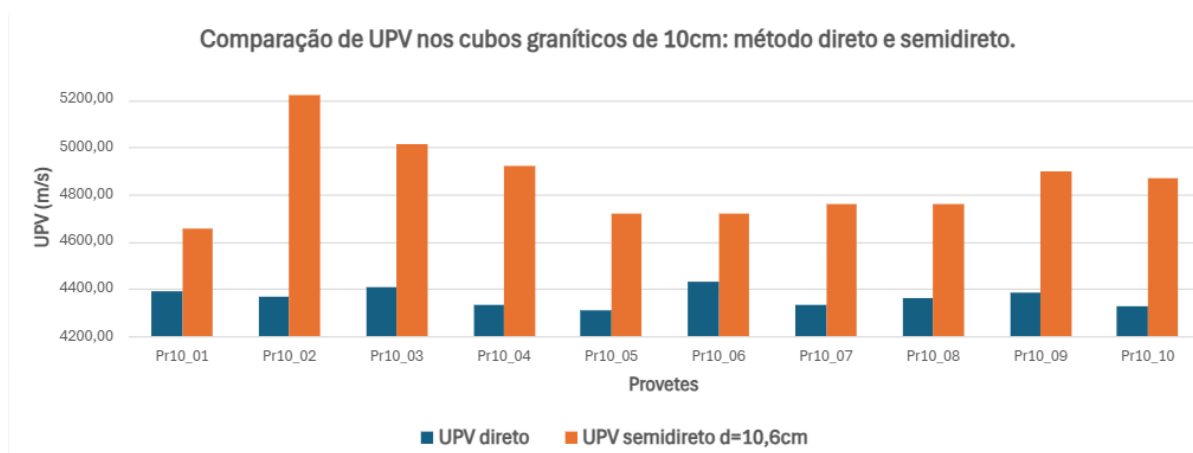


Figura 35. Comparação das UPV pelos métodos direto e semidireto com $d=10,6$ cm – provetes cúbicos de 10cm.

Diferente do observado nos cubos de 15 cm, a geometria reduzida de 10 cm parece acentuar as diferenças entre os métodos. No método semidireto, a trajetória da onda é influenciada pela proximidade das bordas e pelas reflexões internas, o que pode resultar em tempos de percurso que não refletem a velocidade linear pura da matriz rochosa. Essa instabilidade sugere que, para dimensões menores, o método direto oferece uma leitura mais homogênea da propriedade física do material.

A análise da relação entre as UPV direta e semidireta com a f_c revelou coeficientes de determinação R^2 semelhantes para ambos os casos. A relação UPV direto vs. f_c resultou em um R^2 de 0,1991, enquanto a UPV semidireta vs. f_c apresentou R^2 de 0,1970. Tais valores indicam uma fraca relação entre as grandezas analisadas, independentemente do método de medição.

Em rochas cristalinas, como o granito, o comportamento mecânico é fortemente influenciado pela direção dos cristais e planos de anisotropia, o que impacta diretamente a sua

resistência mecânica e, por vezes, não apresenta alterações significativas na UPV, dificultando a predição de suas propriedades mecânicas por meio das propriedades físicas para este estudo.

4.4.4 Metodologia SonReb aplicada à rocha

Inicialmente, durante a realização dos ensaios esclerométricos, o provete Pr10_01 foi submetido a medições na posição horizontal. Contudo, observou-se que a fixação inadequada do provete nessa configuração resultou em pequenas movimentações durante os impactos do esclerômetro. Tais deslocamentos podem dissipar parte da energia de rebote, levando a valores subestimados e inconsistentes. Para garantir a qualidade estatística e a confiabilidade dos resultados, decidiu-se excluir os dados de esclerometria do provete Pr10_01 da análise. Os ensaios subsequentes foram realizados com os provetes posicionados verticalmente, o que eliminou as movimentações e assegurou a integridade das medições de rebote para os demais provetes.

A Equação 13 foi obtida através de uma regressão logarítmica natural, utilizando o método SonReb disponibilizado pela Proceq, a partir dos valores de UPV, N e f_c determinados em laboratório, visando estabelecer uma correlação entre os NDT e a resistência à compressão das rochas, igualmente realizado no betão.

$$f_c = 2,338^{13} \cdot UPV^{-9,773} \cdot N^{-2,796} \quad (13)$$

Onde:

- f_c = Resistência a compressão (MPa);
- UPV = Velocidade de pulso ultrassônico (km/s);
- N = Número de rebote.

A aplicação desta equação aos provetes de granito permitiu estimar a f_c e comparar os valores com a resistência a compressão real, obtida em ensaios destrutivos. A precisão do modelo foi avaliada através do cálculo do erro percentual, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de f_c estimados pela Equação 13 (SonReb) e erros em relação à resistência real.

Provete	f_c SonReb (MPa)	f_c real (MPa)	Erro (%)	Erro Médio Absoluto (%)
Pr10_02	103,3	111,5	-7,91%	
Pr10_03	92,9	101,4	-9,12%	
Pr10_04	118,8	70,1	40,99%	
Pr10_05	123,5	102,3	17,21%	
Pr10_06	93,7	119,6	-27,71%	13,97%
Pr10_07	104,6	111,0	-6,05%	
Pr10_08	107,2	114,9	-7,19%	
Pr10_09	105,7	102,4	3,05%	
Pr10_10	111,5	118,7	-6,48%	

Os resultados indicam um erro médio absoluto de 13,97% na estimativa da resistência à compressão utilizando a Equação 13. Contudo, a análise detalhada revela uma alta variabilidade nos erros individuais, com desvios significativos como 40,99% (Pr10_04) e -27,71% (Pr10_06). Tais magnitudes de erro são demasiadamente elevadas para a aplicação do método como um preditor confiável da resistência à compressão em rochas graníticas, especialmente em contextos em que a segurança e a precisão são críticas. Embora a média possa sugerir uma aplicabilidade razoável, a presença de erros pontuais tão expressivos compromete a confiabilidade da metodologia SonReb para este material e nas condições estudadas. A heterogeneidade intrínseca da rocha e as sensibilidades específicas de cada ensaio às características microestruturais podem amplificar essas variações, indicando que, para uma predição robusta, o método requer calibração mais rigorosa ou a combinação com outras abordagens.

5. CONCLUSÕES

A presente dissertação permitiu avaliar a eficácia de diferentes NDT na caracterização física e mecânica de materiais distintos: betão, Madeira e Rocha Granítica. Como resultado prático da campanha experimental e visando facilitar a reprodutibilidade dos ensaios, foi desenvolvido um Manual Prático de Operações para o aparelho ultrassom PUNDIT PL200PE da Proceq. Este documento detalha de forma instrucional as funcionalidades e parametrizações utilizadas ao longo desta investigação, encontrando-se disponível no Anexo C.

A análise comparativa entre os métodos indiretos (UPV e esclerometria) e os ensaios destrutivos possibilitou a extração das seguintes conclusões principais:

5.1 Eficácia dos NDT aplicados em betão

A análise dos resultados obtidos no betão permitiu validar a sensibilidade dos NDT às variações da matriz cimentícia, destacando-se as seguintes conclusões:

- Superioridade da Metodologia SonReb: Os resultados confirmam que a utilização isolada da UPV ou do índice esclerométrico apresenta limitações de precisão. Contudo, a combinação multivariada SonReb revelou-se eficaz. O modelo calibrado especificamente para este estudo obteve um erro médio de 6,64%, demonstrando uma precisão significativamente superior aos modelos genéricos da literatura, como o de Di Leo (9,53%) e o da RILEM NDT4 (12,05%). Este fato destaca a importância crítica de desenvolver curvas de correlação próprias para o tipo de betão e agregados regionais em análise.
- Correlações UPV direta e f_c : Verificou-se que a medição por transmissão direta em cubos oferece a correlação mais robusta com a resistência real, com o modelo polinomial de segundo grau que registrou o ajuste estatístico mais elevado, $R^2 = 0,9408$.
- Correlações UPV semidireta e f_c : O ensaio por transmissão semidireta evidenciou um decréscimo de precisão traduzido em um aumento expressivo do CoV médio, sendo igual a 4,15% para $d=10,6$ e 3,62% para $d=17,7$ cm. Esse comportamento pode estar associado a erros operacionais durante a execução do ensaio, bem como à influência do trajeto da onda ultrassônica, afetado por gradientes de secagem e microfissuras presentes nas regiões superficiais do betão, onde tendem a ser mais pronunciados.

- Módulo de Elasticidade e Software *PL-Link*: A determinação do módulo de elasticidade dinâmico através do software *PL-Link* permitiu aferir valores na ordem dos 27 GPa para cilindros. A comparação com os ensaios de compressão em provetes cilíndricos validou a fiabilidade do método ultrassônico para a caracterização da rigidez do material.
- Limitações do ensaio Pull-Off: Contrariamente à precisão do SonReb para a compressão, a correlação entre a velocidade superficial e a resistência à tração por arrancamento nas vigas apresentou um coeficiente de determinação moderado, com $R^2 = 0,4825$. Estes resultados indicam que a resistência de aderência superficial é influenciada por fatores locais que não são totalmente captados pela propagação de ondas ultrassônicas globais.
- Influência geométrica nos resultados: A utilização do método pulso eco permitiu identificar a sensibilidade das ondas ultrassônicas aos limites físicos dos provetes. Observou-se o efeito de borda, onde a proximidade das faces laterais nos cubos e vigas interferiu na reflexão e propagação dos impulsos. Este fenómeno exige um posicionamento crítico dos transdutores e uma interpretação cautelosa dos tempos de percurso, uma vez que a reflexão nas fronteiras do material pode gerar sinais complexos que mascaram a profundidade real ou a homogeneidade interna, bem como o real valor de UPV para ondas S.

5.2 Caracterização física e mecânica da madeira

- Influência geométrica e comprimento de onda: A aplicação do ensaio de UPV na madeira demonstrou uma alta dependência das dimensões do provete com o comprimento de onda do aparelho ultrassons. Nos provetes cúbicos, a dimensão reduzida impediu o desenvolvimento completo do ciclo da onda, gerando leituras possivelmente menos fidedignas. Em contrapartida, os provetes prismáticos de comprimento igual a 15cm garantiu uma formação completa da onda ultrassônica, embora ambos os formatos tenham sofrido efeito de borda devido às dimensões transversais de 5x5 cm.
- Fraca capacidade preditiva para a resistência a compressão: Os modelos de regressão revelaram correlações fracas entre a UPV e a f_c real paralela às fibras. O grupo Pmps alcançou o maior ajuste estatístico, ainda assim limitado a um $R^2 = 0,4039$, explicando menos de 41% da variabilidade, enquanto os grupos Pmc e Pmp demonstraram uma dispersão ainda maior, com R^2 iguais a 0,2813 e 0,0451, respectivamente. Conclui-se

que, no contexto deste estudo, a UPV isolada não se mostrou um preditor viável para a estimativa da resistência à compressão da madeira de *Pinus pinaster*, apresentando forte influência do teor de umidade e da heterogeneidade intrínseca do material.

5.3 Caracterização do granito e fatores de influência

- Influência da umidade na UPV: A umidade confirmou-se como um fator determinante na resposta acústica das rochas graníticas, identificando-se uma redução de até 9,48% na UPV nos provetes secos em estufa quando comparados ao seu estado natural.
- Relação da UPV e da f_c : As correlações entre UPV, seja ela direta ou semidireta, e a f_c real do granito revelaram-se fracas, com coeficientes de relação menores de 20%, indicando que a UPV isolada não é um preditor viável para este material neste estudo.
- Aplicação da metodologia SonReb no granito: A combinação de dois NDT não se revelou eficiente para rochas, dada a anisotropia presente neste material. A equação criada nesse método apresentou um erro médio absoluto de 13,97%, com desvios individuais ainda mais acentuados, atingindo -27,71% e 40,99%. Considerando a eficiência do método quando aplicado ao betão, conclui-se que os elevados erros observados no granito estão associados à heterogeneidade microestrutural, pelos planos de anisotropia e pela orientação dos cristais, fatores que influenciam significativamente a UPV e a f_c . Dessa forma, os resultados obtidos indicam que não foi verificada uma correlação consistente entre os parâmetros analisados para o granito, comprometendo a aplicabilidade da metodologia SonReb neste material.

5.4 Análise e discussão comparativa dos materiais

A abordagem simultânea de três materiais com naturezas estruturais distintas permitiu traçar uma perspectiva crítica e comparativa sobre os limites e potencialidades dos NDT.

Os resultados demonstram que a eficácia da técnica de UPV está intrinsecamente ligada à matriz estrutural do material. No betão, cuja matriz é artificialmente controlada e idealizada para a homogeneidade, a UPV isolada foi altamente preditiva. No entanto, perante a anisotropia natural e a presença de planos de clivagem ou orientação de cristais no Granito, ou a orientação de fibras e nós na Madeira, a propagação das ondas ultrassónicas deixa de medir a evolução da

resistência mecânica global e passa a ser governada pelas descontinuidades internas. Como consequência, a UPV isolada revelou-se inviável para prever a f_c nestes dois materiais.

Ademais, a comparação entre o desempenho da metodologia SonReb no betão e no granito, analisados nos tópicos 4.1.3 e 4.4.4, respectivamente, permitiu evidenciar a influência da heterogeneidade intrínseca dos materiais nas medições da UPV e do número de rebote. Dessa forma, os resultados reforçam a validade da metodologia SonReb para materiais com estrutura interna mais homogênea, enquanto sua aplicação em materiais com elevada heterogeneidade exige uma análise criteriosa e uma interpretação cautelosa dos resultados obtidos.

Por fim, identificou-se que os fatores externos de perturbação operam de forma semelhante em escalas e materiais distintos. O efeito de borda e as limitações do comprimento de onda face às dimensões dos provetes afetaram negativamente tanto os ensaios de pulso eco no betão como as medições nos cubos e prismas de madeira. Adicionalmente, as condições ambientais, especificamente o teor de umidade, mostraram ser um fator de interferência crítico que altera a resposta acústica do material. Isto reforça que, para qualquer intervenção em campo, a geometria do elemento e o seu estado de saturação devem ser parametrizados para evitar leituras errôneas.

5.5 Sugestão para trabalhos futuros

Com base nas limitações e descobertas validadas nesta dissertação, sugerem-se as seguintes linhas de investigações futuras:

1- Para o betão:

Expandir o manual prático de operações (Anexo C) desenvolvido neste trabalho através da incorporação das técnicas A-Scan e B-Scan, recorrendo ao transdutor do tipo scanner de contato a seco. Esta abordagem permitirá mapear a homogeneidade interna de forma contínua, estimar a profundidade de anomalias internas com maior precisão quando compara aos ensaios com transdutores de ondas P de 54kHz, e confeccionar provetes de betão armado e delimitar sequencialmente as etapas para localizar os vergalhões de aço com o scanner.

2- Para a madeira:

Alargar a base amostral do ensaio de um número significativamente maior de provetes, permitindo um tratamento estatístico maior, capaz de filtrar a elevada dispersão intrínseca do material biológico ortotrópico.

Realizar ensaios em provetes com geometrias e dimensões distintas de forma a minimizar o efeito de borda e a influência do comprimento de onda na caracterização da madeira.

3- Para a rocha granítica:

Apesar de os resultados obtidos com os 10 provetes analisados terem sido insatisfatórios para a estimativa da f_c , recomenda-se a replicação da metodologia em um programa experimental com uma amostragem substancialmente maior de provetes. O aumento do número de provetes de granito poderá permitir verificar se a fraca correlação observada decorre de uma característica intrínseca da matriz rochosa ou se um modelo de regressão multivariada mais abrangente é capaz de reduzir a dispersão dos dados e estabilizar os desvios observados.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT. (2022). *ABNT NBR 7190-2. Projeto de estruturas de madeira Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeir.*
- ABNT 7584. (2012). *NBR 7584:2012 – Concreto resistido: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.*
- ABNT 8802. (2019). *NBR 8802:2019 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.*
- Abreu, M. A. F. (2020). *A UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTO ULTRASSÔNICO NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ELEMENTOS EM BETÃO ARMADO.*
- ACI, A. C. I. C. 228--N. T. of. (2003). *In-place methods to estimate concrete strength.* https://www.academia.edu/71404327/228_1R_03_In_Place_Methods_to_Estimate_Concrete_Strength
- Amini, K., Jalalpour, M., & Delatte, N. (2016). Advancing concrete strength prediction using non-destructive testing: Development and verification of a generalizable model. *Construction and Building Materials*, 102, 762–768. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.131>
- Andrade, G. S. de, Gott, A. P. P., Soares, L. K. O., Martini, R. J., Bortone, T. P., & Ramos, M. de P. (2021). Avaliação da resistência do concreto por meio do ensaio de ultrassonografia. *Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções*, 323–330. <https://doi.org/10.4322/CINPAR.2021.041>
- Andrade, M. S., Oliveira, D. S., Cardoso, M. A. N., Santos, C. F. R., Coelho, Á. C., Martins, A. C. P., Souza, C. A. F., Ribeiro, J. C. L., Carvalho, J. M. F., & César Jr, K. M. L. (2023). *Aplicabilidade de ensaios não-destrutivos para obtenção de dados de projeto e avaliação da condição estrutural de pontes de concreto armado.*
- Andreucci, R. (2024). *Ensaio Por ultrassom* (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos - ABENDI, Org.). <http://www.abendi.org.br>

- Aquino, J. H., Yêda, R., & Póvoas, V. (2019). Detecção de corrosão em concreto armado com termografia infravermelha e ultrassom. *Ambiente Construído*, 19(3), 53–68. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212019000300324>
- ASNT. (1981). *Nondestructive Testing, ultrasonic*. (2°). American Society for Nondestructive Testing.
- ASTM. (2000a). *ASTM D2845-00: Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*.
- ASTM. (2000b). *D5873 - Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method*.
- ASTM. (2016). *C 597-16: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*.
- ASTM. (2019). *C805 - Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*.
- ASTM. (2020). *C 1583 - Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1583_C1583M-20
- ASTM. (2022). *D143 - Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0143-22>
- Braga, N. M. T. (2010). *Patologia nas construções: trincas e fissuras em edifícios*.
- Breysse, D. (2012). Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials*, 33, 139–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>
- Bucur, V. (1983). An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics*, 21(3), 116–126.
- Bucur, V. (1995). Wood acoustic characterization by ultrasound. *1995 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium*, 615–623. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1995.495651>
- Bungey, J. H., & Grantham, M. G. (2006). *Testing of Concrete in Structures*. Crc Press.

- Candian, M., & Sales, A. (2009). Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. *Ambiente Construído*, 9(4), 83–98. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212009000400519>
- Carvalho, C. H., Macedo, M. C. S. S., Severo, J. B., Griza, J. ; S., De Andrade, ; C E C, Santos, A. A. Dos, Barreto, ; L S, Carvalho¹, C. H., Severo Junior, ; J B, Griza, ; S, & Dos Santos, ; A A. (2013). *Estudo comparativo das técnicas não destrutivas de ultrassom e esclerometria na avaliação do desempenho mecânico de estruturas em concreto armado*.
- CEN. (2002). BS EN 13183-1:2002. Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method. Em *BS EN 13183-1:2002*. BSI British Standards. <https://doi.org/10.3403/02558468>
- CEN, E. C. for S. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
- Crawford, G. I. (1997). *Guide to nondestructive testing of concrete*. United States. Federal Highway Administration.
- Di Leo, A., & Pascale, G. (1994). Prove non distruttive sulle costruzioni in c.a. *Il Giornale delle Prove Non Distruttive*, (4).
- Evangelista, A. C. J. (2002). *AValiação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaaios Não Destrutivos*.
- Faktorová, D., Stanciu, M. D., Krbata, M., Savin, A., Kohutiar, M., Chlada, M., & Năstac, S. M. (2024). Analysis of the Anisotropy of Sound Propagation Velocity in Thin Wooden Plates Using Lamb Waves. *Polymers*, 16(6), 753. <https://doi.org/10.3390/polym16060753>
- Fener, M., Kahraman, S., Bilgil, A., & Gunaydin, O. (2005). A Comparative Evaluation of Indirect Methods to Estimate the Compressive Strength of Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(4), 329–343. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0061-8>
- Freitas, N. B. A. de, Dantas, J. G. M., & Zingano, A. C. (2017). *EQUAÇÃO DE CORRELAÇÃO COM ENFASE NA LITOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL ATRAVÉS DO USO DE PUNDIT** (Vol. 47, Número 2).

- IAEA. (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. *Training Course Series*, (17).
- Irrigaray, M. A. P. (2012). *Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos na pasta do concreto*.
- Jedidi, M., & Benjeddou, O. (2018). Chemical causes of concrete degradation. *MOJ Civil Engineering*, 4(1), 40–46. <https://doi.org/10.15406/mojce.2018.04.00095>
- KEINERT, J. R. ; M. J. L. M. (1998). *Uso de emissão de ondas acústicas para classificação de lâminas e produção de painéis estruturais de lâminas paralelas*.
- Kim, W., Jeong, K., Choi, H., & Lee, T. (2022). Correlation Analysis of Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical Properties of Normal Aggregate and Lightweight Aggregate Concretes in 30–60 MPa Range. *Materials*, 15(8), 2952. <https://doi.org/10.3390/ma15082952>
- Kohlhauser, C., & Hellmich, C. (2013). Ultrasonic contact pulse transmission for elastic wave velocity and stiffness determination: Influence of specimen geometry and porosity. *Engineering Structures*, 47, 115–133. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.027>
- Matest S.p.A. (2008). Section C - Concrete. Em *Material testing solutions* (pp. 109-240). Matest.
- Medeiros, A. (2007). *APLICAÇÃO DO ULTRA-SOM NA ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE FENDAS SUPERFICIAIS E NA AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DE INJEÇÕES EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO*.
- Meneghetti, L. C. (1999). *Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som*.
- Moura, E. M. de, & Padilha, T. M. (2024). *Uma revisão sobre a utilização do ultrassom na caracterização das propriedades e defeitos da madeira*. 1–12. <https://doi.org/10.46421/entac.v20i1.6031>
- Naik, T. R., Malhotra, V. M., & Popovics, J. S. (2003). The ultrasonic pulse velocity method. Em *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Second Edition* (p. 1–8). CRC Press.

- NP EN 12504-1. (2009). 12504—1. 2009, Ensaios do betão nas estruturas-Parte 1: Carotes, extração, exame e ensaio à compressão. *Lisboa: IPQ*.
- NP EN 12504-2. (2012). *NP EN 12504-2 - Determinação do índice esclerométrico*. www.ipq.pt
- NP EN 12504-4. (2007). *NP EN 12504-4: Ensaios do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons*.
- Oliveira, F. G. R. de. (2001). *Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultra-som* [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.88.2017.tde-11072017-162319>
- Oliveira, F. G. R. de, Miller, K. P., Candian, M., & Sales, A. (2006). Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultra-sônica em madeiras. *Revista Árvore*, 30(1), 141–145. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000100017>
- Pedrosa, D. M. F. (2013). *CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PÉTREOS ATRAVÉS DO ENSAIO POR ULTRA-SOM*. Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Pereira, E., & Medeiros, M. H. F. de. (2012). Pull Off test to evaluate the compressive strength of concrete: an alternative to Brazilian standard techniques. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5(6), 757–780. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952012000600003>
- Pereira, R. (2014). *CONTROLO DA QUALIDADE DE BETÕES*. Universidade do Minho. Escola de Engenharia.
- Proceq. (2017). *Manual de operação - Proceq Pundit200PE*.
- Raouf, Z. ; A. Z. M. (1983). Assessment of concrete characteristics at an early age by ultrasonic pulse velocity. *Journal of Building Research*, 2(1), 31–44.
- RILEM. (1993). *NDT 4 Recommendations for In Situ Concrete Strength Determination by Combined Non-Destructive Methods—Compendium*. E.F.N. Spon.
- Roque, M. A. T. de S. (2014). *Inspeção de estruturas de betão armado e pré-esforçado através da técnica de ultra-sonografia por intremédio do tomógrafo de ultra-sons-MIRA*.

- Sampaio, C. M. C. P. (2010). *CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ATRAVÉS DE TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS* Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO. <http://www.fe.up.pt>
- Santini, S., Forte, A., & Sguerri, L. (2020). The structural diagnosis of existing rc buildings: The role of nondestructive tests in the case of low concrete strength. *Infrastructures*, 5(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5110100>
- Silva Júnior, S. F., & Marques, P. V. (2006). *Apostila do curso de Engenharia Mecânica*.
- Sousa, J. L. C. de, Aquino, F. K. M. de, Nascimento, N. V. do, Costa, A. A. V. da, & Teixeira, J. C. S. (2021). Patologias do concreto armado e seus métodos de restauração estrutural. *Research, Society and Development*, 10(1), e53010112015. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.12053>
- Souza, C. A. F. (2019). *Patologias em estruturas de betão armado por influência do ambiente marítimo: Estudo de caso*. Universidade de Coimbra.
- Trinca, A. J., & Gonçalves, R. (2009). Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira. *Revista Árvore*, 33(1), 177–184. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000100019>
- Turgut, P. (2004). *Research into the correlation between concrete strength and UPV values* (Vol. 12, Número 12). <https://www.ndt.net/article/v09n12/turgut/turgut.htm>
- Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., Alves, C. A. S., & Pamplona, J. (2008). Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics*, 48(5), 453–466. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.03.008>
- Wang, W., Lu, C., Yuan, G., & Zhang, Y. (2017). Effects of pore water saturation on the mechanical properties of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.031>
- Wiciak, P., Cascante, G., & Polak, M. A. (2017). Sensor and Dimensions Effects in Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in Mortar Specimens. *Procedia Engineering*, 193, 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.231>

Zima, B., & Moll, J. (2023). Numerical and experimental investigation of guided ultrasonic wave propagation in non-uniform plates with structural phase variations. *Ultrasonics*, 128, 106885. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106885>

ANEXOS

A. Eurocódigo 2: Quadro 3.1- Características de resistência e de deformação do betão.

Classes de resistência do betão															Expressão analítica /Comentários
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck}+8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm}=0,30\times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm}=2,12 \cdot \ln(1+(f_{cm}/10))$ > C50/60
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ quantilho de 5 %
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ quantilho de 95 %
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3}$ (f_{cm} em MPa)
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	ver a Figura 3.2 $\epsilon_{c1}^{(0/100)} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	ver a Figura 3.2 para $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu1}^{(0/100)}=2,8+27[(98-f_{cm})/100]^4$
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	ver a Figura 3.3 para $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c2}^{(0/100)}=2,0+0,085(f_{ck}-50)^{0,53}$
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ver a Figura 3.3 para $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu2}^{(0/100)}=2,6+35[(90-f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	para $f_{ck} \geq 50$ MPa $n=1,4+23,4[(90-f_{ck})/100]^4$
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	ver a Figura 3.4 para $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c3}^{(0/100)}=1,75+0,55[(f_{ck}-50)/40]$
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ver a Figura 3.4 para $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu3}^{(0/100)}=2,6+35[(90-f_{ck})/100]^4$

Quadro 3.1 – Características de resistência e de deformação do betão

B. Método SonReb pelo Excel – Proceq.



Using EXCEL to determine SONREB curve coefficients

In order to create a SONREB curve for estimating the compressive strength of a particular concrete it is necessary to carry out both ultrasonic pulse velocity measurements and rebound measurements on samples of the concrete and then to correlate this to the compressive strength determined in the press.

The following example shows an example of practical data collected using Pundit 200 and Silver Schmidt OS8200.

	Pundit 200	OS8200
Compressive Strength f_{ck}	Ultrasonic Pulse Velocity (V)	Q-value (S)
29.5	4237	36
32.6	4608	38
40.3	4484	45
41.2	4630	42
44.2	4587	49
45.3	4673	56
48.5	4644	49
50.6	4695	47
51.5	4717	50
52	4760	56
55.8	4744	57
57	4722	53
58.1	4728	57
60.9	4673	66
62.3	4732	54
68.6	4854	61

The SONREB curve is expressed in the format:

$$\text{Compressive Strength } f_{ck} = a \cdot V^b \cdot S^c$$

Where:

a, b and c are constants

V is the ultrasonic pulse velocity in m/s

S is the rebound value.

So the question is how to determine the constants a, b and c from this data.



The LINEST function of EXCEL can be used to do this. Below is an extract from the EXCEL help file:

"The LINEST function calculates the statistics for a line by using the "least squares" method to calculate a straight line that best fits your data, and then returns an array that describes the line. You can also combine LINEST with other functions to calculate the statistics for other types of models that are linear in the unknown parameters, including polynomial, logarithmic, exponential, and power series. Because this function returns an array of values, it must be entered as an array formula. Instructions follow the examples in this article.

The equation for the line is:

$$y = mx + b$$

—or—

$$y = m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + b \text{ (if there are multiple ranges of x-values)}$$

where the dependent y-values are a function of the independent x-values. The m-values are coefficients corresponding to each x-value, and b is a constant value. Note that y, x, and m can be vectors. The array that the LINEST function returns is {m_n,m_{n-1},...,m₁,b}. LINEST can also return additional regression statistics."

The array format is:

	A	B	C	D	E	F
1	m _n	m _{n-1}	...	m ₂	m ₁	b
2	se _n	se _{n-1}	...	se ₂	se ₁	se _b
3	r ²	se _y				
4	F	df				
5	ss _{reg}	ss _{resid}				

Where:

Statistic	Description
se1,se2,...,sen	The standard error values for the coefficients m1,m2,...,mn.
seb	The standard error value for the constant b (seb = #N/A when const is FALSE).
r ²	The coefficient of determination. Compares estimated and actual y-values, and ranges in value from 0 to 1. If it is 1, there is a perfect correlation in the sample — there is no difference between the estimated y-value and the actual y-value. At the other extreme, if the coefficient of determination is 0, the regression equation is not helpful in predicting a y-value. For information about how r ² is calculated, see "Remarks," later in this topic.
sey	The standard error for the y estimate.
F	The F statistic, or the F-observed value. Use the F statistic to determine whether the observed relationship between the dependent and independent variables occurs by chance.
df	The degrees of freedom. Use the degrees of freedom to help you find F-critical values in a statistical table. Compare the values you find in the table to the F statistic returned by LINEST to determine a confidence level for the model. For information about how df is calculated, see "Remarks," later in this topic. Example 4 shows use of F and df.
ssreg	The regression sum of squares.
ssresid	The residual sum of squares. For information about how ssreg and ssresid are calculated, see "Remarks," later in this topic.



In the case of SONREB we have a power series curve so we have to work with the natural logarithms of the data in order to use LINEST. To do this we first use the function "LN".

LN(f_{ck})	LN(V)	LN(S)
3.384390263	8.351679	3.577948
3.484312288	8.435613	3.624341
3.696351469	8.408339	3.806662
3.718438256	8.440232	3.732896
3.788724789	8.431015	3.89182
3.813307032	8.449535	4.025352
3.881563798	8.443323	3.89182
3.923951576	8.454218	3.845883
3.941581808	8.458924	3.901973
3.951243719	8.468083	4.025352
4.021773869	8.464549	4.048301
4.043051268	8.460035	3.966511
4.062165664	8.461349	4.034241
4.109233175	8.449535	4.18205
4.131961426	8.462074	3.985273
4.228292535	8.487634	4.11578

The corresponding formula will be:

$$y = m_1x_1 + m_2x_2 + b \text{ where:}$$

The SONREB coefficients we require a, b, c = EXP(b), m2, m1

To enter the array function select an array of 3 columns x 5 rows and enter the LINEST function in the top left hand corner of the array as shown:-

LOG		=LINEST(E3:E18;F3:G18;TRUE;TRUE)									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Pundit Lab+	SilverSchmidt									
	Compressive	Ultrasonic									
	Strength f_{ck}	Pulse									
		Velocity (V)	Q-value (S)	LN(f_{ck})	LN(V)	LN(S)					
3	29.5	4237	36	3.384390263	8.351679	3.577948					
4	32.6	4608	38	3.484312288	8.435613	3.624341					
5	40.3	4484	45	3.696351469	8.408339	3.806662					
6	41.2	4630	42	3.718438256	8.440232	3.732896					
7	44.2	4587	49	3.788724789	8.431015	3.89182					
8	45.3	4673	56	3.813307032	8.449535	4.025352					
9	48.5	4644	49	3.881563798	8.443323	3.89182					
10	50.6	4695	47	3.923951576	8.454218	3.845883					
11	51.5	4717	50	3.941581808	8.458924	3.901973					
12	52	4760	56	3.951243719	8.468083	4.025352					
13	55.8	4744	57	4.021773869	8.464549	4.048301					
14	57	4722	53	4.043051268	8.460035	3.966511					
15	58.1	4728	57	4.062165664	8.461349	4.034241					
16	60.9	4673	66	4.109233175	8.449535	4.18205					
17	62.3	4732	54	4.131961426	8.462074	3.985273					
18	68.6	4854	61	4.228292535	8.487634	4.11578					
19											
20											



Press CTRL+SHIFT+ENTER to complete the entry of the array function:

The array will show the following data. The key to the data is shown in the table on the right. The coefficients "b" for the pulse velocity and "c" for the rebound hammer can be read directly. For the constant "a" it is necessary to convert it back to the correct form by using an exponential function.

c(S)	b(V)	a
0.860156	2.809633	-23.2105406
0.198111	1.083358	8.586289002
0.880203	0.085978	#N/A
47.75848	13	#N/A
0.706089	0.0961	#N/A

m2	m1	b
se2	se1	seb
r2	sey	
F	df	
ssreg	ssresid	

Coefficient c = 0.860155674
 Coefficient b = 2.809633333
 Coefficient a = 8.31362E-11 =EXP(-23.2105406)

So the SONREB curve for this set of data would be:

$$f_{ck} = 8.314 \times 10^{-11} \cdot V^{2.8096} \cdot S^{0.8602}$$

with a correlation coefficient of 0.88.

C. Manual Prático de Operação: Ultrassom PUNDIT PL-200PE.

Manual Prático de Operação: Ultrassom PUNDIT PL-200PE.

Guia de referência rápida para calibração dos transdutores, obtenção de tempo de propagação de ondas ultrassônicas, estimativa de resistência a compressão do betão e estimativa de profundidade de fendas.

1) Considerações Iniciais e Delimitação de Escopo

Este manual foi elaborado pelo aluno Pedro Lorensen no âmbito da dissertação de Mestrado em Engenharia Civil intitulada “Avaliação de Características Físicas e Mecânicas de Diversos Materiais Através de Ensaios Não Destrutivos”, desenvolvida sob a orientação da Professora Doutora Eduarda Luso.

O presente documento possui caráter estritamente prático, tendo como principal objetivo servir de guia para a replicação das funcionalidades abordadas na metodologia adotada nesta investigação. Ressalta-se que este texto não contempla todas as funcionalidades do equipamento e não substitui, em hipótese alguma, o Manual Oficial do Fabricante, cuja consulta é indispensável para a execução de operações avançadas e procedimentos de manutenção e segurança.

Este manual apresenta, de forma detalhada, o procedimento para obtenção dos dados de saída de determinadas funcionalidades do aparelho de ultrassons PUNDIT PL-200PE, da Proceq, com ênfase na determinação do tempo de propagação da onda ultrassônica, tanto para Ondas P quanto para Ondas S. A análise e interpretação dos resultados obtidos não são abordadas neste documento, sendo recomendada, para esse fim, a consulta ao Manual Oficial do Fabricante.

O manual encontra-se dividido em duas etapas principais. A primeira contempla os procedimentos de calibração, manuseio do equipamento e realização de ensaios utilizando transdutores de ondas P de 54 kHz. A segunda etapa aborda a utilização do transdutor do tipo scanner, explorando a funcionalidade de pulso eco. **Equipamentos e acessórios**

Apresenta-se e identifica-se, neste tópico, o equipamento de Ultrassons e os seus respectivos acessórios necessários para a realização dos ensaios. A Figura 1 mostra o equipamento de ultrassons com os transdutores de 54kHz (cilíndricos) e o transdutor tipo scanner. Este é o módulo central de processamento de dados, visualização das ondas e armazenamento de resultados.

Figura 1: Equipamento Ultrassons PUNDIT PL-200PE com transdutores.



Acompanha, na Figura 1, um par de transdutores cilíndricos (um emissor e um receptor), com frequência de 54kHz e um transdutor do tipo scanner. A Figura 2 mostra os transdutores cilíndricos com o cabo de conexão.

Figura 2: Transdutores de Ondas P de 54kHz com cabo.



As figuras 3 e 4 mostram o cabo de conexão do transdutor tipo scanner e o local de conexão no aparelho ultrassons, respectivamente.

Figura 3: Cabo de conexão do transdutor tipo scanner.



Figura 4: Zona de conexão dos cabos.

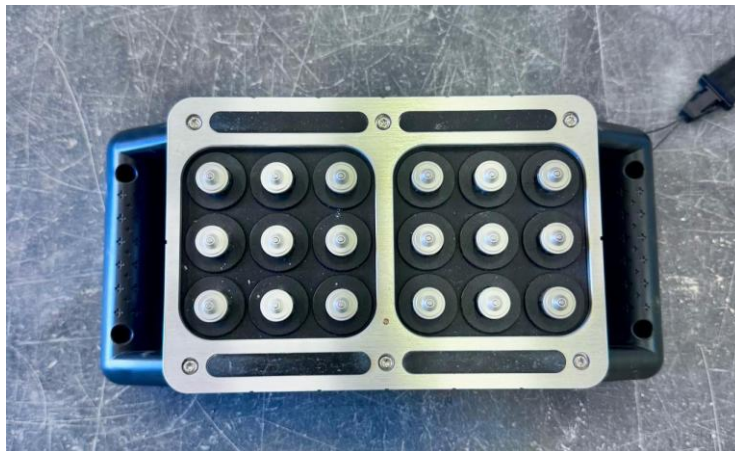


Transdutor do tipo scanner de contato a seco apresentado nas Figuras 5 e 6. Este transdutor possui 18 pontos com cristais piezoelétricos, responsáveis pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas, atuando como pulso eco. Também possui 2 botões, cujas funcionalidades serão exploradas nos tópicos seguintes.

Figura 5: Transdutor do tipo scanner.



Figura 6: Cristais piezoelétricos do transdutor do tipo scanner.

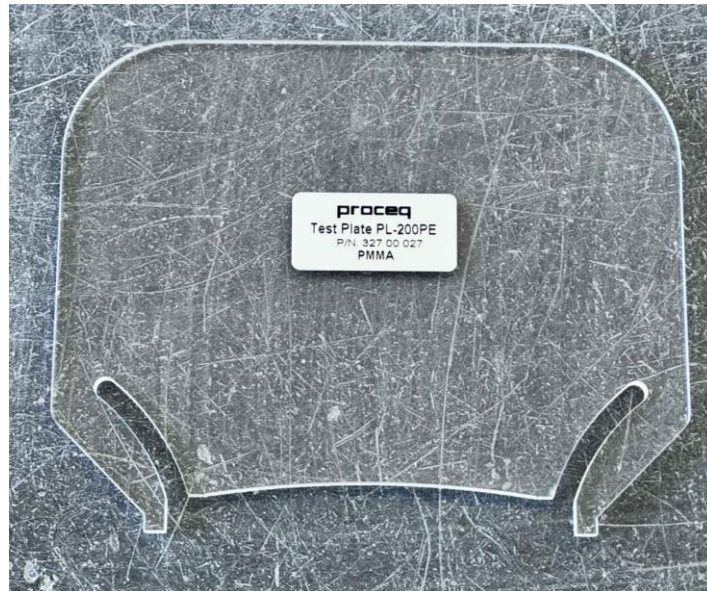


Também acompanha o aparelho de ultrassons, duas peças de acrílico para calibração dos transdutores. O bastão cilíndrico, mostrado na Figura 7, é utilizado para a calibração dos transdutores de 54kHz, enquanto a placa, mostrada na Figura 8, é utilizada para a calibração do scanner.

Figura 7: Bastão de calibração dos transdutores cilíndricos.



Figura 8: Placa de calibração do transdutor tipo scanner.



Para a realização dos ensaios e calibração com os transdutores cilíndricos, faz-se necessário a utilização de um gel acoplante, como apresentado na Figura 9.

Figura 9: Gel acoplante para os transdutores cilíndricos



2) Transdutores de ondas P de 54kHz: Calibração, preparação e ensaios.

a) Acoplamento acústico.

Antes de iniciar qualquer ensaio ou procedimento de calibração com os transdutores de 54 kHz, é indispensável a aplicação de gel acoplante em ambas as faces de contato dos transdutores. Esta etapa é importante pois elimina as interferências da rugosidade superficial, garantindo uma boa emissão e recepção das ondas ultrassônicas. Para a calibração com o bastão, uma quantidade do tamanho de um grão de ervilha é o suficiente para garantir um bom acoplamento. Para ensaios com materiais muito rugosos, é necessário a aplicação de uma quantidade maior de gel.

A ausência do gel acoplante ou sua aplicação insuficiente compromete a transmissão das ondas ultrassônicas entre o transdutor e a superfície ensaiada, inviabilizando a leitura correta ou gerando valores de tempo de propagação errôneos. **Antes de iniciar o ensaio, verifique se o gel foi aplicado de forma uniforme e em quantidade adequada em toda a área de contato.**

Durante a realização do ensaio, monitore continuamente a qualidade do acoplamento observando os seguintes indicadores de problema:

- **Amplitude das ondas reduzida:** ondas quase imperceptíveis no visor do aparelho de ultrassom indicam transmissão deficiente do sinal;
- **Tempo de propagação instável:** leituras oscilantes ou sem estabilização são sinal de contato inadequado entre o transdutor e a superfície;
- **Resistência tátil ao deslizamento:** sensação de rugosidade ao movimentar o transdutor paralelamente à superfície indica ausência ou insuficiência de gel na interface de contato.

Diante de qualquer um desses indicadores, interrompa a leitura, reaplique o gel acoplante e repita o ensaio naquele ponto.

*Nota: Não se deve utilizar gel acoplante no transdutor **tipo scanner**.*

b) Calibração dos transdutores de 54kHz.

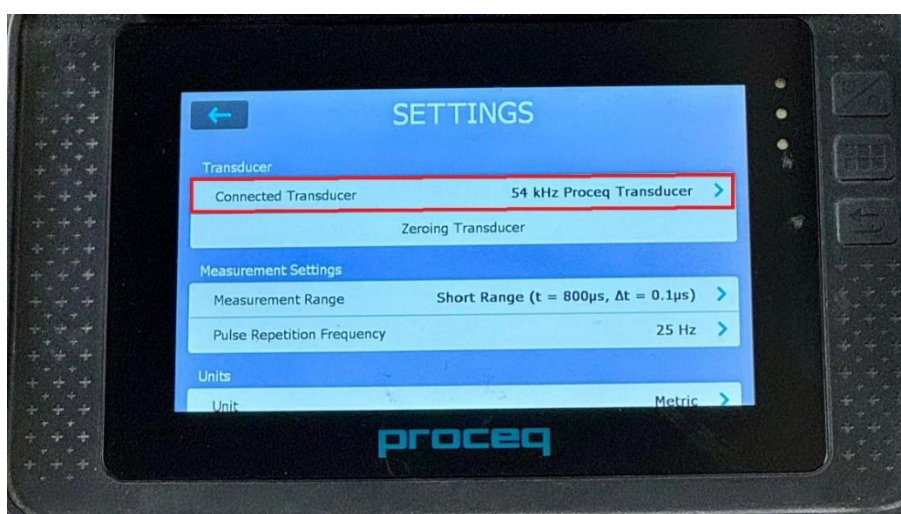
Com o aparelho ligado, acesse ao menu “Settings” e certifique-se de que os cabos de ligação estão devidamente acoplados tanto à unidade de controle quanto aos transdutores. Em seguida, na primeira linha denominada “Transducer”, prima em “Connected Transducer” e selecione a opção correspondente ao ensaio atual, que neste caso é “54 kHz Proceq Transducer”. Após selecionar o tipo de transdutor correto, retorne à janela anterior e prima em “Zeroing Transducer” para dar início ao processo de ajuste de zero.

As Figuras 10 a 14 mostram o processo completo de calibração.

Figura 10: Tela inicial com opções - Setting.



Figura 11: Tela em “settings” para selecionar o tipo de transdutor.



Aplique o gel acoplante nos transdutores e posicione-os no bastão de calibração de modo que fiquem fixos e imóveis, como mostrado na Figura 12.

Figura 12: Exemplificação de acoplagem dos transdutores no bastão de calibração.



Após, prima na opção destacada na Figura 13 e aguarde o aparelho realizar a calibração. A calibração destes transdutores é realizada quando o tempo de percurso da onda no bastão atinge 99,9 microssegundos, como mostrado na figura 14.

Figura 13: Tela de início da calibração.



Figura 14: Tela de calibração bem sucedida.



c) Ensaio de medição de velocidade de pulso ultrassônico.

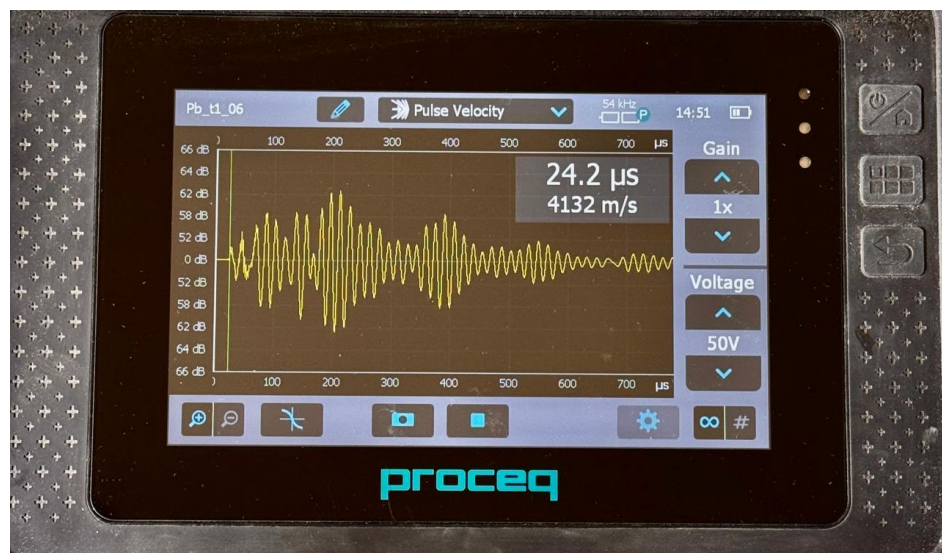
Para realizar a medição da Velocidade de Pulso Ultrassônico (UPV), prima o botão “Measurement” e, em seguida, aceda ao menu de opções de medição para selecionar a alternativa “Pulse Velocity”. Durante qualquer ensaio, o equipamento permite ajustar parâmetros como a voltagem e o ganho dos transdutores. Para garantir a obtenção de dados fidedignos, recomenda-se regular estes parâmetros de modo a manter o sinal o mais estável possível; deve-se evitar que a amplitude das ondas ultrapasse os limites verticais do visor, o que saturaria o sinal e formaria um perfil retangular na imagem, conforme exemplificado na Figura 15.

Figura 15: Tela de medição de velocidade de pulso com ganho e voltagem elevados.



Caso o sinal extrapole os limites do ecrã e forme o referido retângulo de linhas amarelas, diminua gradualmente a voltagem e o ganho até que a onda fique totalmente visível e o tempo de propagação estabilize, permitindo uma leitura clara e precisa, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Tela de medição de velocidade de pulso com ganho e voltagem ideais.

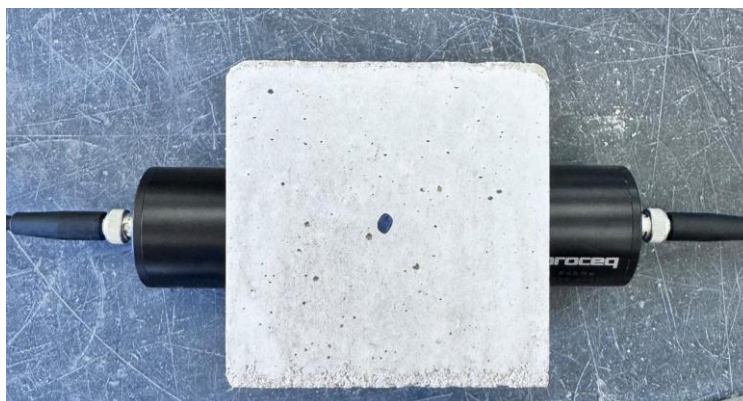


Como diretriz prática, é aconselhável iniciar as medições configurando o ganho em 1x e a voltagem em 50V. Se o sinal se apresentar excessivamente fraco, resultando numa onda sem picos e vales acentuados no visor, pode-se elevar a voltagem para 100V. Caso a atenuação persista após uma nova medição, deve-se aumentar o ganho e a voltagem de forma sucessiva. Vale ressaltar que uma onda fraca também pode ser indício de um acoplamento acústico deficiente; nesta situação, deve-se interromper o ensaio e aplicar uma quantidade adicional de gel acoplante nos transdutores.

Embora o PUNDIT realize o cálculo da UPV de forma automática, recomenda-se focar e anotar o tempo de propagação da onda ultrassônica pelo material como o dado principal. Isto deve-se ao facto de a velocidade ser calculada com base na distância introduzida manualmente pelo operador antes da medição, o que torna o tempo de trânsito o dado bruto mais fidedigno do ensaio.

Para a execução do ensaio propriamente dito, após concluir a calibração, aplicar o gel acoplante e inserir a distância real entre os transdutores na unidade de controle, o sistema estará pronto. Prima o botão com o ícone triangular para ativar a emissão dos pulsos e posicione os transdutores alinhados em faces opostas do provete (transmissão direta), exercendo uma pressão constante, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Exemplificação da posição dos transdutores em medição direta.

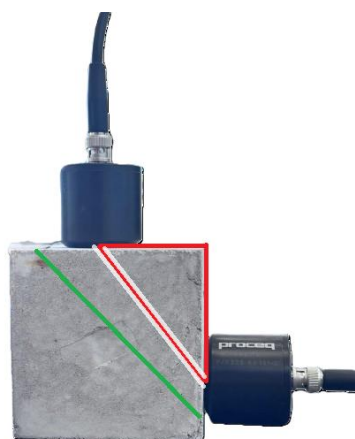


A Figura 17 exemplifica a configuração de uma medição direta. Neste método, a onda ultrassônica é significativamente menos suscetível a oscilações e perdas de energia, proporcionando um sinal mais nítido e claro quando comparado com os restantes métodos. Para a sua execução, aconselha-se a marcação prévia do centro geométrico de cada face ensaiada;

este cuidado garante que os transdutores sejam posicionados o mais afastados possível das arestas do provete, minimizando ou evitando a influência do efeito de borda na propagação da onda.

Como alternativa para situações em que o acesso às faces opostas é limitado, também é possível realizar medições semidiretas e indiretas. A medição semidireta é executada posicionando os transdutores em faces adjacentes e perpendiculares entre si, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18: Exemplificação da posição dos transdutores na medição semidireta.

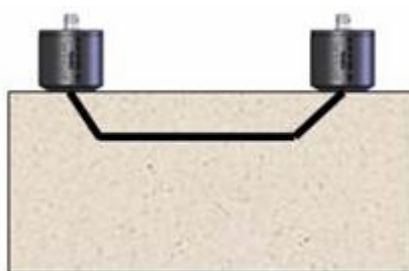


No caso da Figura 18, o percurso teórico realizado pela onda é representado pela linha vermelha. Contudo, em provetes de pequenas dimensões (como cubos com arestas de até 15 cm), aconselha-se realizar a medição semidireta afastando os transdutores o máximo possível, ou seja, posicionando-os nas extremidades opostas das faces adjacentes, o que resulta num percurso de onda mais próximo ao indicado pela linha verde.

Para efetuar o cálculo final da velocidade de pulso neste método, é indispensável determinar a distância real percorrida pela onda entre os pontos de emissão e recepção. Na medição semidireta, esta distância pode ser obtida analiticamente através do Teorema de Pitágoras. Dado que a trajetória estimada da onda e o alinhamento dos transdutores formam um triângulo retângulo com a geometria do provete, o valor da hipotenusa corresponderá à distância procurada, enquanto os catetos serão definidos pelas distâncias medidas desde o centro de cada transdutor até ao vértice comum que une as duas faces.

Por fim, o ensaio indireto é adotado, com maior frequência, quando o acesso a faces opostas ou perpendiculares é inviabilizado pelas condições do elemento estrutural. Este método apresenta uma precisão inferior aos métodos direto e semidireto, uma vez que o pulso ultrassônico tende a percorrer uma trajetória curva entre o emissor e o receptor. Consequentemente, quanto maior for a distância de afastamento entre os transdutores, maior será o percurso no material e mais acentuadas serão as perdas de energia e amplitude do sinal, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19: Método de medição indireta.



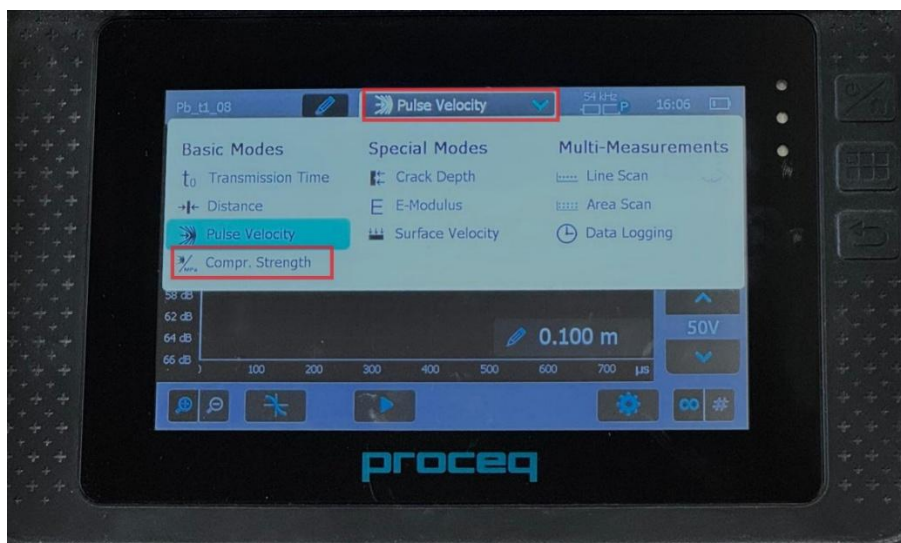
Devido ao fato de a onda percorrer uma trajetória mais longa e dissipativa em comparação com os dois métodos anteriormente mencionados, a medição indireta exige a configuração de valores de voltagem e ganho significativamente superiores na unidade de controle, garantindo que o transdutor receptor consiga captar o sinal com uma amplitude adequada para a leitura.

d) Ensaio de estimativa de resistência a compressão.

A unidade de controle do PUNDIT possui ainda a funcionalidade de estimar a resistência à compressão axial do betão a partir dos valores obtidos de UPV, recorrendo a equações empíricas formuladas por diferentes autores e normas técnicas. O equipamento integra, na sua base de dados, os modelos matemáticos desenvolvidos por Di Leo, Gasparik, Nasht, Popovics, Raouf & Ali e Turgut, além das diretrizes da norma RILEM-NDT4.

Para realizar esta estimativa de resistência à compressão diretamente no aparelho, aceda à janela “Measurement”, abra o menu com as opções de medição e selecione a alternativa “Compr. Strength” (Resistência à Compressão), conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20: Tela com opção de “Compressive Strength” marcada.

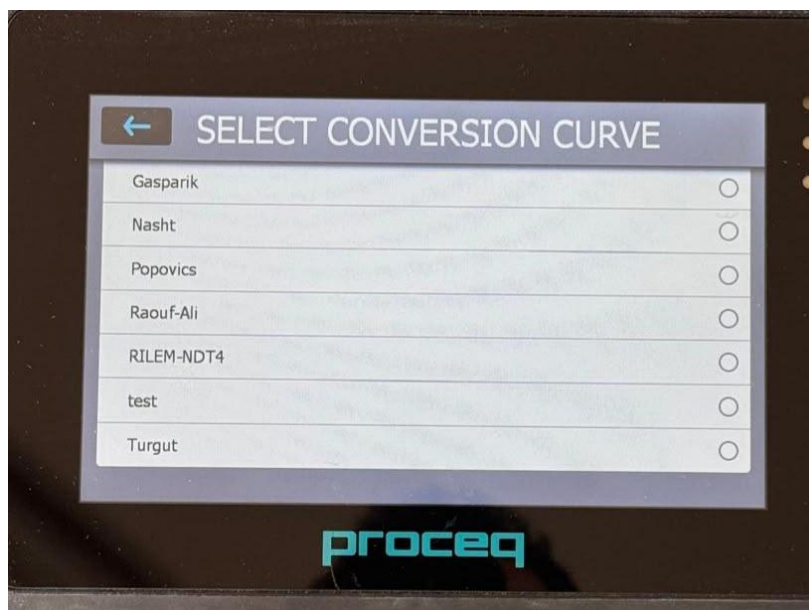


Após esta seleção, o ecrã de medição exibirá o nome do autor ou da norma atualmente ativa para o cálculo da estimativa. Para alterar, basta clicar sobre essa aba e selecionar, a partir da lista de autores anteriormente citados, o modelo matemático que pretende utilizar na investigação, conforme demonstrado nas Figuras 21 e 22.

Figura 21: Tela com a opção de alterar o autor da curva de conversão entre UPV e resistência a compressão.



Figura 22: Tela com as opções das curvas de conversão.



Após selecionar a curva de conversão desejada, o equipamento estará pronto para realizar a medição. Para este procedimento, recomenda-se a utilização do método de transmissão direta sempre que as condições o permitam, garantindo assim uma recepção de sinal mais eficaz e nítida.

É importante notar que, para estimar a resistência à compressão através das curvas de conversão de Di Leo e da norma RILEM NDT4, o sistema exige a introdução do número de rebote. A opção para a inserção deste dado surge automaticamente no ecrã de medição. Para obter este valor, deve-se realizar previamente o ensaio esclerométrico com o Martelo Schmidt, seguindo rigorosamente as diretrizes da norma ASTM C805. Apenas após a introdução deste índice esclerométrico na unidade de controle é que se poderá proceder ao ensaio ultrassônico.

Nota: As curvas de conversão que relacionam a UPV com a resistência à compressão não são universais e carecem de uma calibração prévia para cada traço de betão específico. Para misturas com características distintas daquelas que os autores utilizaram na formulação original das curvas, o ideal é desenvolver uma correlação geométrica e estatística própria. Para esse fim, aconselha-se a aplicação do método combinado SonReb, cujas diretrizes e ferramentas de calibração partilhada se encontram disponíveis no website digital da Proceq, cujo link está disponível no tópico 6 ao final deste manual.

e) Ensaio de estimativa de profundidade de fendas.

O equipamento de ultrassom é igualmente capaz de estimar a profundidade de fendas ou fissuras. Para que a medição e a respectiva estimativa sejam eficazes, é aconselhável que a fissura esteja limpa, livre de detritos ou água, e preenchida apenas com ar. O elevado contraste de impedância acústica entre o betão e o meio gasoso impede a passagem direta da onda através da abertura, forçando o pulso ultrassônico a contornar a ponta da fissura, o que permite ao aparelho detectar a sua profundidade com base no atraso do tempo de trânsito.

Para aceder a esta funcionalidade, na janela “Measurement”, abra a lista de opções de medição e prima em “Crack Depth” (Profundidade de Fissura). De imediato, surgirá no ecrã do aparelho a indicação gráfica de como proceder ao ensaio.

O procedimento baseia-se no método de posicionamento relativo e requer a marcação de dois pares de pontos equidistantes em relação ao eixo da fissura (por exemplo, a 10cm e a 20cm). É obrigatório que a distância do segundo ponto seja exatamente o dobro da distância do primeiro ponto. Insira o valor da menor distância na unidade de controle e realize o ensaio posicionando os transdutores sequencialmente em cada par de pontos, conforme o passo a passo ilustrado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23: Tela com a opção “Crack Depth” marcada.

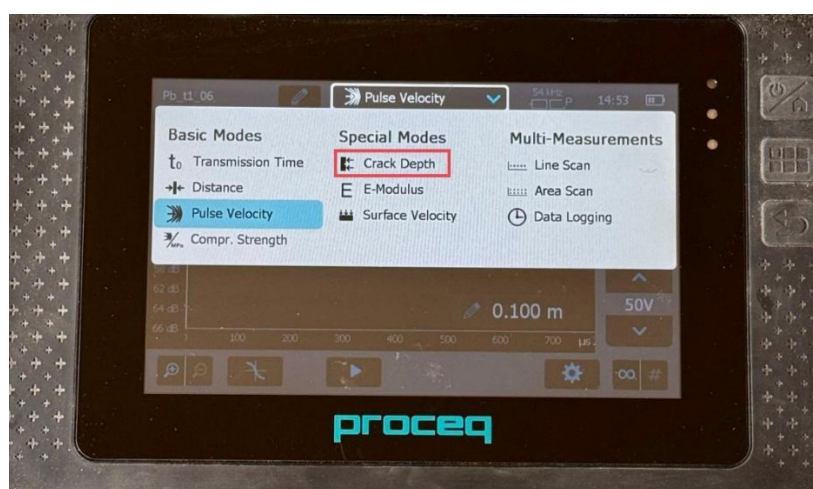


Figura 24: Tela com a orientação para estimar a profundidade de fendas.



Após a realização das duas medições consecutivas, a unidade de controle processará os tempos de trânsito e exibirá diretamente no ecrã o valor estimado para a profundidade da fissura. Devido à sensibilidade deste método, é altamente recomendável realizar o ensaio algumas vezes em um provete piloto com uma fissura de profundidade previamente conhecida. Este procedimento experimental permite ajustar e determinar os valores ideais de ganho e voltagem, garantindo que as estimativas futuras sejam o mais próximas possível da realidade física do material.

3) Transdutor de ondas S tipo scanner: Calibração, preparação e ensaios.

a) Calibração do transdutor do tipo scanner.

Com a unidade de controle ligada, aceda ao menu “Settings” e certifique-se de que os cabos de ligação estão devidamente conectados tanto ao aparelho quanto ao transdutor pulso eco. Em seguida, na primeira linha denominada “Transducer”, prima em “Connected Transducer” e selecione a opção “50kHz Pulse Echo Shear Wave Trans.”, correspondente ao transdutor de ondas S que será utilizado nesta etapa. Após confirmar a seleção do modelo correto, retorne à janela anterior e prima em “Zeroing Transducer” para dar início ao procedimento de ajuste de zero específico deste sistema. A sequência das Figuras 25 a 28 apresentam o passo a passo citado.

Figura 25: Tela com a opção de seleccionar o tipo de transdutor – Pulse Echo.

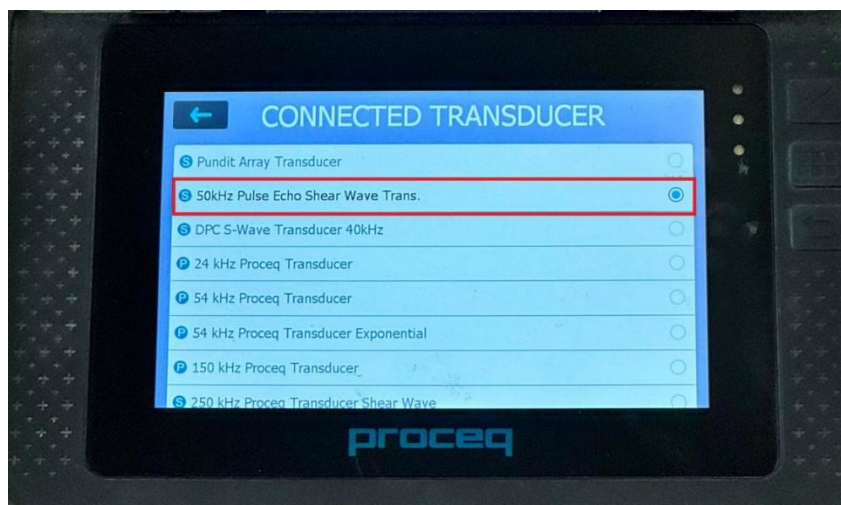
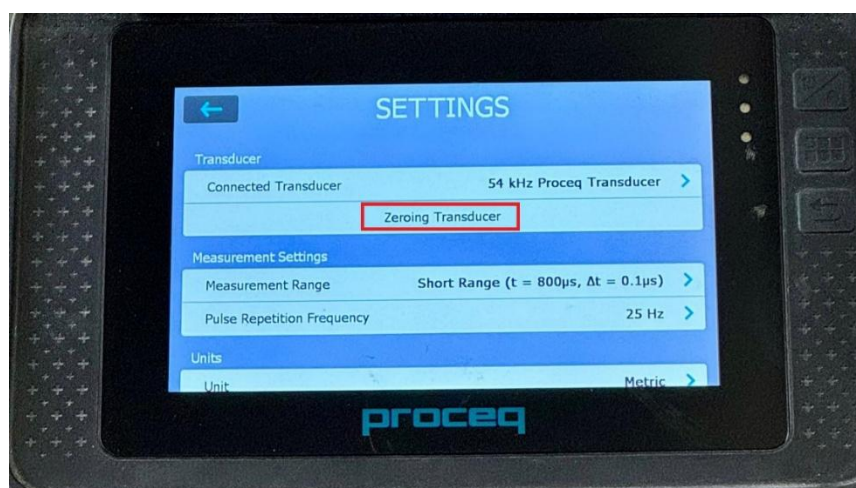


Figura 26: Tela com a opção de calibrar o transdutor.



Para realizar a calibração do transdutor tipo *scanner*, posicione o equipamento na horizontal com os cristais (pontas de contato a seco) voltados para cima e siga atentamente as instruções gráficas exibidas no ecrã do PUNDIT. Utilizando a placa de calibração específica para este sistema, apoie-a firmemente sobre o conjunto de cristais indicados no ecrã e aguarde que o aparelho processe o ajuste desse canal. Este procedimento deve ser repetido sequencialmente para os 9 pares de cristais, garantindo a calibração uniforme de toda a matriz de sensores, conforme ilustrado nas Figuras 27 e 28.

Figura 27: Tela com as orientações para calibrar o transdutor tipo scanner.

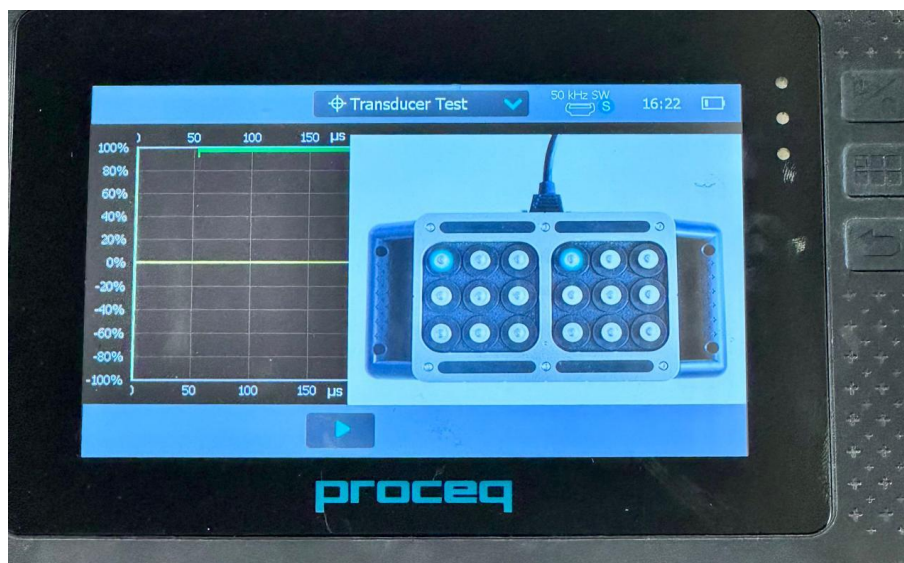


Figura 28: Exemplificação da posição da placa de calibração no transdutor tipo scanner.



Ao final da calibração de todos os canais, o visor exibirá a mensagem “Zeroing succeeded”. Assim que esta confirmação surgir, o processo de ajuste de zero estará concluído e o aparelho estará pronto para iniciar as medições em campo ou no laboratório.

b) Ensaio de velocidade de pulso – Pulso Eco.

Uma característica intrínseca do transdutor tipo *scanner* é a medição da VPU transversal, ou seja, através de ondas S, comumente denominadas ondas de cisalhamento. A grande vantagem deste transdutor reside na capacidade de realizar a medição da VPU quando o acesso a mais do que uma face do elemento estrutural é impedido por fatores externos.

Para realizar a medição por pulso eco com o aparelho *scanner*, aceda à janela “Measurement”, abra o menu de opções e selecione a alternativa “Pulse Velocity”, tal como efetuado anteriormente na medição de ondas P com os transdutores de 54 kHz.

Nesta modalidade de ensaio, é necessário introduzir na unidade de controle o dado relativo à espessura do provete (ou da peça em análise) que será objeto de medição. Adicionalmente, para garantir a obtenção de dados fidedignos, é fundamental que a face oposta à superfície de ensaio não esteja em contato com qualquer outro material sólido ou líquido. Como as ondas do pulso eco são emitidas e recebidas pela mesma matriz de transdutores, qualquer interface nos fundos pode dissipar a energia ou alterar a reflexão, fazendo com que o "eco" retorne de uma distância distinta da espessura real configurada.

É igualmente crucial atentar-se ao efeito de borda. Uma vez que o *scanner* emite ondas a partir de uma matriz de 9 cristais emissores, o feixe sônico espalha-se por múltiplos caminhos volumétricos simultâneos, tornando-o muito mais sensível à geometria da peça do que os transdutores de ondas P de 54 kHz. Esta sensibilidade ficou evidente no comportamento dos diferentes provetes testados: enquanto os cilindros normativos do Eurocódigo 2 (15 cm de diâmetro por 30 cm de altura) apresentaram resultados de velocidade de onda S condizentes com a literatura, os cubos normativos de 15 cm de aresta registaram velocidades na ordem de 50% do valor previsto. Este fenómeno decorreu, possivelmente, do efeito de borda nos cubos de pequenas dimensões, onde as frentes de onda sofreram reflexões parasitas nas paredes laterais, fletindo e alterando o percurso sônico (ou perdendo energia por dispersão) durante o ensaio.

A medição, em cilindro, é mostrada na Figura 29.

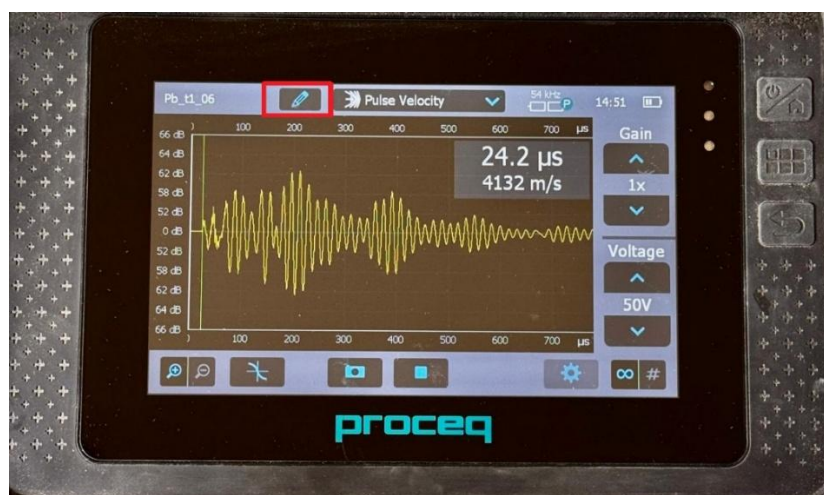
Figura 29: Exemplificação de medição de pulso eco em cilindro.



4) Armazenamento de leituras e transferência de dados para o PL-Link.

Para a realização de análises detalhadas dos dados obtidos pelo equipamento de ultrassom, o sistema permite o armazenamento e a posterior exportação das leituras diretamente para o software PL-Link. Para proceder ao salvamento durante o ensaio, e assim que o sinal se encontre perfeitamente estável no ecrã, pause a medição, sendo recomendável o auxílio de um segundo operador para garantir a precisão do momento, e prima o botão de gravação indicado na Figura 30.

Figura 30: Tela com opção “salvar medição” marcada.



Ao seleccionar a referida opção, o ecrã exibirá uma nova janela que permite editar o nome do ficheiro a ser gravado. Recomenda-se a escolha de uma nomenclatura clara, padronizada e de fácil identificação, uma vez que a memória interna do equipamento armazena habitualmente um volume elevado de medições de ensaios anteriores.

Após guardar todas as medições pretendidas na memória do equipamento, instale o software PL-Link da Proceq no seu computador e execute os passos subsequentes para a transferência de dados. Com o programa aberto, aceda ao menu superior e prima em “File”, selecione a opção “Add” e, por fim, clique em “Measurements on device”, conforme demonstrado nas Figuras 31 e 32.

Figura 31: Interface do Software PL-Link.

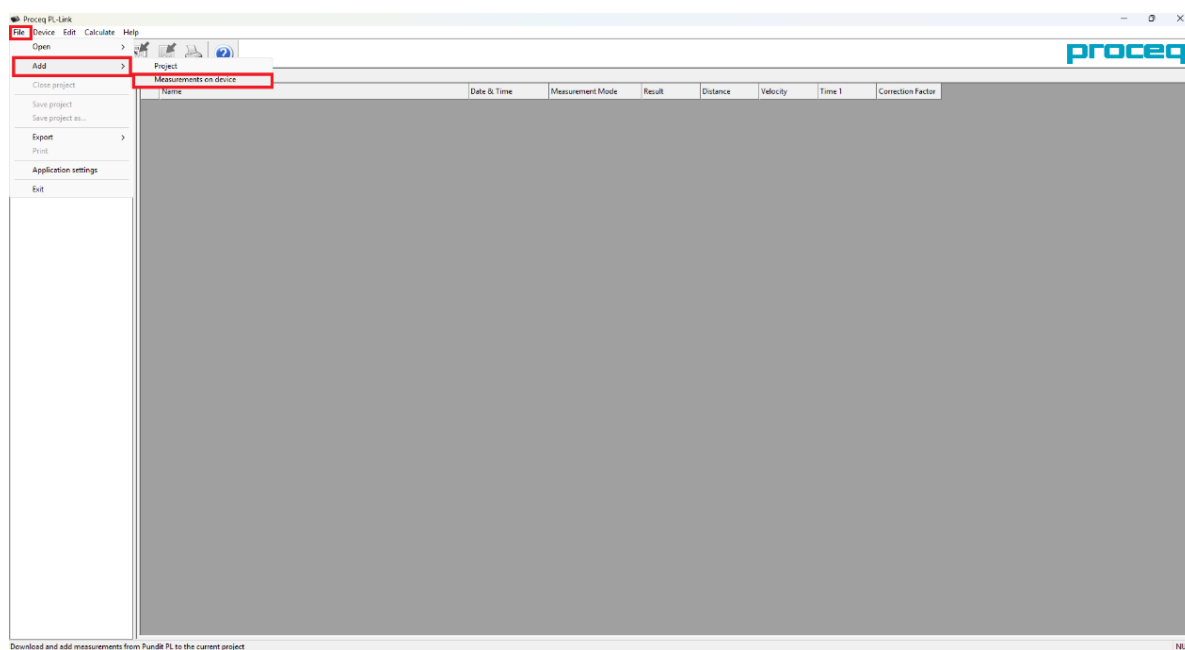
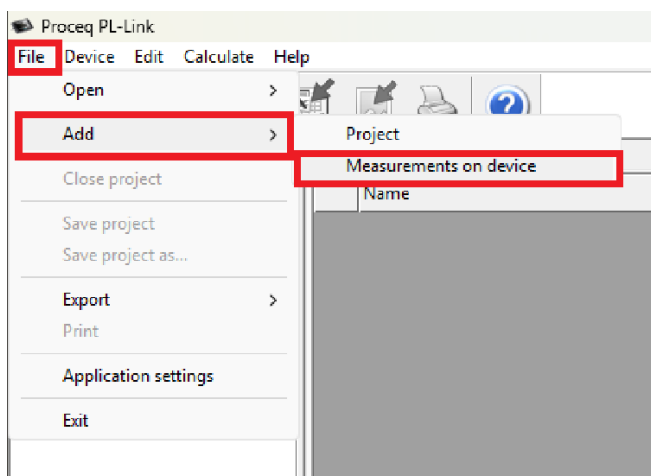
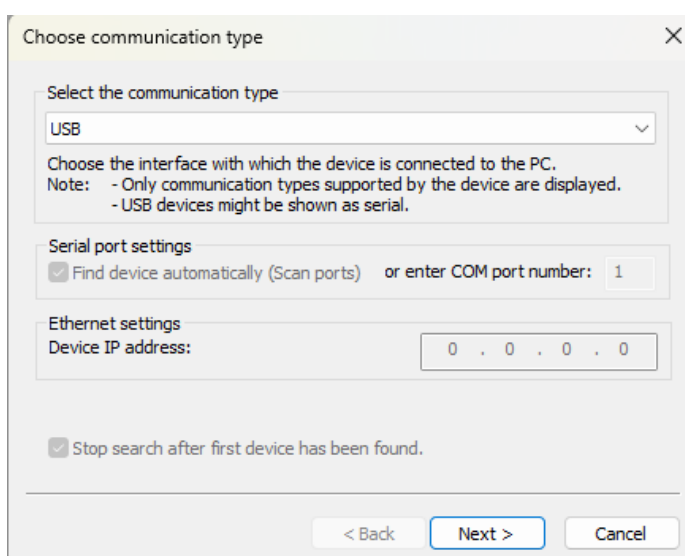


Figura 32: Passo a passo para importar medições do ultrassom para o Software PL-Link.



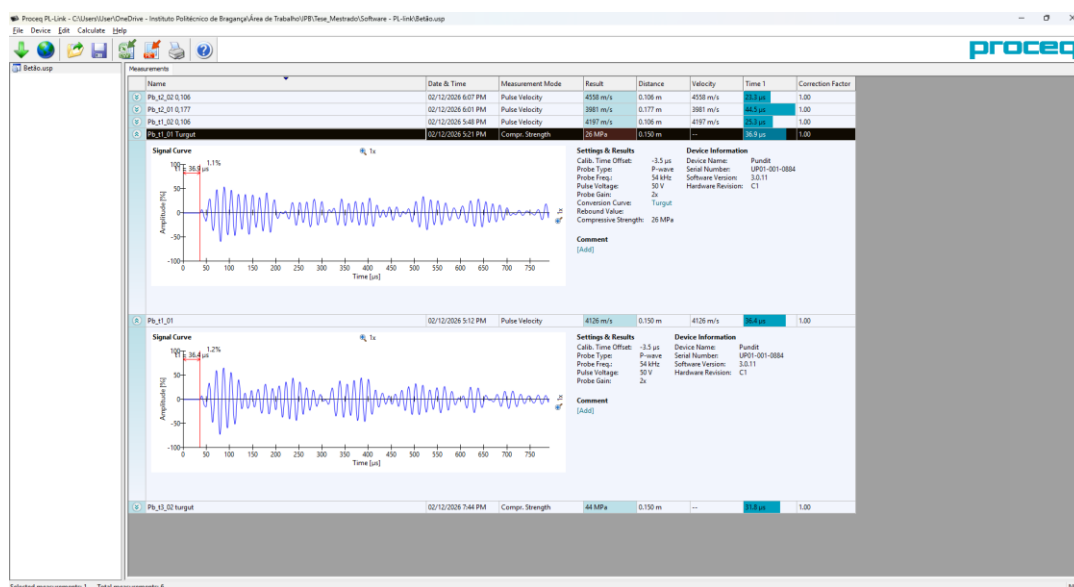
Em seguida, a interface do software abrirá uma nova janela solicitando a definição do tipo de comunicação a estabelecer entre o computador e o equipamento de ultrassom, conforme ilustrado na Figura 33. Mantenha selecionada a opção “USB”, conecte o cabo de comunicação em ambos os dispositivos e prossiga com a operação. Por fim, selecione a ou as medições pretendidas na lista apresentada e efetue a sua transferência para o ambiente de trabalho do software.

Figura 33: Janela para escolher o tipo de comunicação entre o computador e o aparelho ultrassons.



As medições aparecerão em forma de lista, onde é possível “expandir” uma a uma e visualizar o formato da onda e as respectivas informações, como mostrado na Figura 34.

Figura 34: Medições disponíveis na interface do Software PL-Link.



Adicionalmente, é possível consultar e gerir a lista de ficheiros gravados diretamente na unidade de controle do equipamento de ultrassom. Para o efeito, a partir do ecrã inicial do aparelho, selecione a opção “Explorer”. O sistema direcionará o utilizador imediatamente para a pasta que contém o histórico de todas as medições armazenadas, conforme ilustrado nas Figuras 35 e 36.

Figura 35: Tela inicial do aparelho ultrassons com a opção “Explorer” marcada.

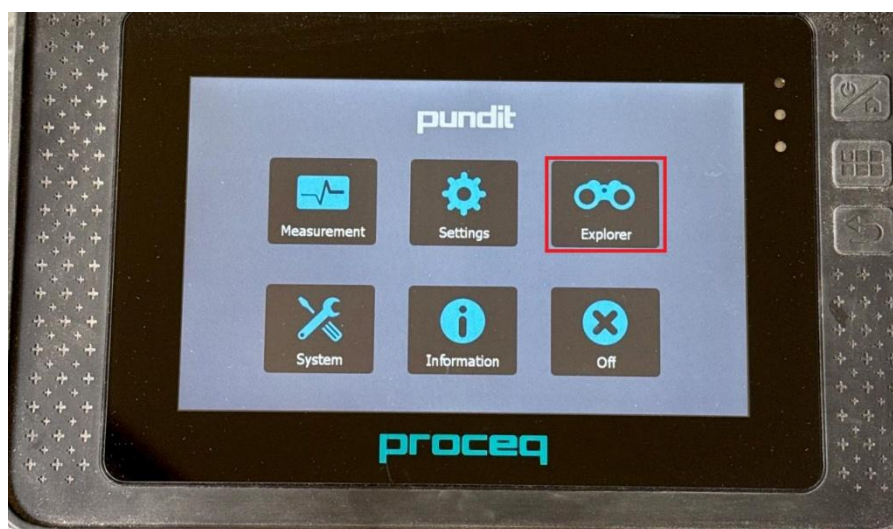


Figura 36: Tela com as medições salvas.

	Name	Date & Time	Result	Count
☐	Pb_t1_09	20/05/2026 16:27	2128 m/s	1
☐	Pb_t1_07	12/05/2026 14:58	4098 m/s	1
☐	Pb_t1_03	16/04/2026 14:21	4099 m/s	1
☐	Pb_t3_02 eco-003	26/02/2026 12:15	1136 m/s	1
☐	Pb_t3_02 eco-002	26/02/2026 12:15	1128 m/s	1
☐	Pb_t3_02 eco-001	26/02/2026 12:15	1119 m/s	1

6) Links importantes

- PDF com a metodologia SonReb da Proceq:

https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Using%20EXCEL%20to%20determine%20SONREB%20coefficients.pdf?_gl=1*1ql94o7*_gcl_aw*R0NMLjE3ODAwMDk4MjUuQ2p3S0NBandpLURCQmhBNUVpd0FYT0hzR2JzS2tZQXYxdWhCSUpON0tCS1hwZWIDa3JWYm1iVlpidkF2RU5SdlBEYINQQTZWUUhheINob0N0WllRQXZEX0J3RQ..*_gcl_au*MTg1NjQ2NTk3MC4xNzgwMDA5Nzk1*_ga*MjM3MTcwMDU5LjE3NjIxNjg2MzU.*_ga_9F039ZWCXQ*cze3ODAwMDk3OTUkbzI4JGcxJHQxNzgwMDA5ODUzJGoyJGwwJGgw

Disponível em: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-200>

- Link para Download do Software PL-Link:

https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/PL-Link_Setup_V_3_0_5.exe?_gl=1*6fx9fu*_gcl_aw*R0NMLjE3ODAwMDk4MjUuQ2p3S0NBandpLURCQmhBNUVpd0FYT0hzR2JzS2tZQXYxdWhCSUpON0tCS1hwZWIDa3JWYm1iVlpidkF2RU5SdlBEYINQQTZWUUhheINob0N0WllRQXZEX0J3RQ..*_gcl_au*MTg1NjQ2NTk3MC4xNzgwMDA5Nzk1*_ga*MjM3MTcwMDU5LjE3NjIxNjg2MzU.*_ga_9F039ZWCXQ*cze3ODAwMDk3OTUkbzI4JGcxJHQxNzgwMDA5ODUzJGoyJGwwJGgw

Disponível em: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-200>

- Link com o Manual de Operação da Fabricante:

https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/pundit%202-operating-instructions-english.pdf?_gl=1*1zveot*_gcl_aw*R0NMLjE3ODAwMDk4MjUuQ2p3S0NBandpLURCQmhBNUVpd0FYT0hzR2JzS2tZQXYxdWhCSUpON0tCS1hwZWlDa3JWYm1iVlpidkF2RU5SdlBEYINQQTZWUUhheINob0N0WlIRQXZEX0J3RQ..*_gcl_au*M Tg1NjQ2NTk3MC4xNzgwMDA5Nzk1*_ga*MjM3MTcwMDU5LjE3NjIxNjg2MzU.*_ga_9F039ZWCXQ*czE3ODAwMDk3OTUkbzI4JGcxJHQxNzgwMDA5ODUzJGoyJGwwJGgw

Disponível em: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-200>