



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Ciências da Terra

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PÉTREOS
ATRAVÉS DO ENSAIO POR ULTRA-SOM

Daniela Maria Fernandes Pedrosa

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA E DE MINAS

Orientadores científicos

Prof. Doutor Fernando Pedro Figueiredo, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra

Prof. Doutora Lídia Catarino, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra

Setembro, 2013

Esta Dissertação de Mestrado foi redigida segundo o antigo Acordo Ortográfico.

“Nada na vida deve ser temido, somente compreendido. Agora é hora de compreender mais para temer menos.”

Marie Curie

Agradecimentos

A presente dissertação de Mestrado reúne a colaboração de diferentes pessoas e entidades que permitiram o seu enriquecimento e concretização, aos quais deixo o meu sentido reconhecimento.

Aos meus orientadores científicos, Professor Doutor Fernando Pedro Figueiredo e Professora Doutora Lúcia Catarino pela disponibilidade, paciência, partilha de conhecimentos e valiosas contribuições para este trabalho.

Ao Dr. João Duarte pela disponibilidade, apoio e ajuda dispensada sempre que precisei.

Às empresas Eduardo Marques & Rosa e Neves & Neves pela oportunidade e condições disponibilizadas para a realização deste trabalho.

À minha colega Ana Oliveira por todo o companheirismo.

Ao Orlando pela ajuda, motivação, incentivo e carinho manifestados.

Aos meus amigos e família, principalmente aos meus pais pelo apoio incondicional ao longo destes anos e porque sempre acreditaram em mim, dos quais sinto imenso orgulho.

A TODOS, UM MUITO OBRIGADA.

Resumo

Para as indústrias extractiva e transformadora de rochas ornamentais, a presença de descontinuidades nos blocos explorados é um factor de risco económico. A existência de um método de inspecção rápido, de baixo custo e não intrusivo, para a avaliação de blocos, iria facilitar o aproveitamento destes, evitando o seu desperdício.

Sendo o ensaio por ultra-som um método não-destrutivo, testou-se no presente trabalho a sua aplicação a um bloco de rocha calcária. Após alguns testes preliminares, determinou-se a execução de três tipos de ensaio de contacto, dois por transmissão de superfície e um por transmissão directa. Pretendeu-se com a aplicação desta técnica, detectar e localizar eventuais descontinuidades internas no bloco, mas também conseguir diferenciar o tamanho de grão.

Foi apenas através dos ensaios por transmissão de superfície e pela sua conjugação, que foi possível detectar e localizar algumas das fracturas visíveis individualizadas, mas também fracturas não visíveis à superfície da face ensaiada. Destes ensaios, no qual a distância entre transdutores é a menor e constante (mapeamento) podem-se observar valores de velocidades de propagação entre 7500 e 6500m/s em zonas de grão mais grosseiro com matriz fina, entre 6000 e 5000m/s em zonas de grão mais fino e homogéneo e entre 4500 e 3500m/s em zonas de fracturação, conseguindo-se desta forma distinguir zonas de tamanho de grão diferentes.

Esta metodologia provou-se ser de fácil realização experimental, embora seja necessária a conjugação dos vários ensaios para uma interpretação mais congruente.

Palavras-Chave

Ensaio por ultra-som; Velocidade de propagação de ondas longitudinais; Detecção de fracturas; Rochas ornamentais; Caracterização de blocos.

Abstract

For mining and manufacturing of ornamental stones, the presence of discontinuities in the exploited blocks is an economic risk factor. The existence of a method of inspection fast, low cost and non-intrusive to the blocks evaluation would carry out to a better use and avoid great quantities of waste.

In this study was used ultrasound testing, a non-destructive method, applied to a limestone block. After some preliminary tests it was determined the performance of three types of contact test, two by surface transmission and one by direct transmission. It was intended to apply this technique to detect and locate any internal discontinuities in the block, but also can differentiate their grain size.

With these surface transmission tests and its conjugation, was possible to locate and detect individualized visible cracks, but also non-visible cracks at the surface of tested face. Of these tests, in which the distance between the transducers is smaller and constant (maps), propagation velocities values can be observed between 7500 and 6500m/s in zones of coarser grain with finer matrix, between 6000 and 5000m/s in zones of finer grain and homogenous grain and between 4500 and 3500m/s in zones of fracturing, achieving in this way distinguish zones of different grain sizes.

This methodology has proven to be of easy application, but it is necessary a combination of several tests for a consistent interpretation.

Keywords

Ultrasonic testing; Velocity of propagation of longitudinal waves; Detection of cracks; Ornamental stones; Characterization of blocks.

Índice

1. Introdução	2
1.1. Enquadramento da Dissertação	2
1.2. Objectivos	3
1.3. Organização.....	4
2. Enquadramento Teórico	6
2.1. Princípios Básicos do Ensaio de Ultra-Som	6
2.2. Geração de Ondas Ultra-Sónicas.....	7
2.2.1. Efeito Piezoeléctrico.....	7
2.3. Vibrações Mecânicas	8
2.3.1. Tipos de Ondas.....	8
2.3.2. Frequência	11
2.3.3. Comprimento de Onda	12
2.3.4. Velocidade de Propagação	12
2.3.5. Relações entre Parâmetros.....	13
2.4. Campo Próximo e Campo Distante	14
2.5. Reflexão, Refracção e Lei de Snell	16
2.6. Atenuação das Ondas Sonoras.....	18
2.7. Impedância Acústica	19
2.8. Influência da Amostra no Feixe de Som	21
2.8.1. Rugosidade da Superfície	21
2.8.2. Forma ou Contorno da Amostra	22
2.8.3. Partículas de Grão Grosseiro	22
2.8.4. Orientação e Profundidade das Descontinuidades.....	23
3. Equipamento	25
3.1. Unidade de Ultra-Som – Emissor/Receptor.....	25
3.2. Transdutores.....	26
3.3. Acoplante	28
4. Metodologias.....	31
4.1. Introdução	31
4.1.1. Ensaios de Contacto	31
4.1.1.1. Transmissão de Superfície ou Indirecta	32
4.1.1.2. Transmissão Directa e Semi-Directa	33
4.2. Testes Preliminares.....	33
4.3. Plano de Ensaios e de Medições	38

4.3.1. Ensaio 1 (Ensaio de Contacto por Transmissão de Superfície - Mapeamento)	39
4.3.2. Ensaio 2 (Ensaio de Contacto por Transmissão de Superfície – T fixo e R móvel).....	41
4.3.3. Ensaio 3 (Ensaio de Contacto por Transmissão Directa)	42
5. Caracterização do Material	45
5.1. Enquadramento Geográfico	45
5.2. Enquadramento Geológico.....	46
6. Recolha e Análise de Dados.....	51
6.1. Identificação do Bloco	51
6.2. Análise e Interpretação de Resultados.....	54
6.2.1. Face A	54
6.2.2. Face B	59
6.3. Interpretação Conjunta.....	63
6.4. Ensaio por Transmissão Directa.....	65
7. Considerações Finais	68
Referências Bibliográficas.....	72
ANEXOS	74
Anexo I – Resultados do Ensaio 1	75
Anexo II – Valores Obtidos pelo Ensaio 1 (Transmissão de Superfície/Mapeamento)	77
Anexo III – Valores Obtidos pelo Ensaio 2 (Transmissão de Superfície/T fixo e R móvel)	81
Anexo IV – Valores Obtidos pelo Ensaio 3 (Transmissão Directa).....	85

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Representação gráfica da intensidade do sinal reflectido em função do tempo.	6
Figura 2.2 - Geração de onda ultra-sónica. Transdutor em contacto com a superfície da amostra e o pulso de feixe de som a viajar através da mesma.	7
Figura 2.3 - Contração e expansão do material piezoeléctrico quando submetido a uma tensão alternada.	8
Figura 2.4 - Movimento da partícula responsável pela propagação das ondas longitudinais e transversais.....	9
Figura 2.5 - Desenho esquemático dos movimentos das partículas nas ondas P.....	10
Figura 2.6 - Desenho esquemático do movimento das partículas nas ondas S.....	11
Figura 2.7 - Campo de audibilidade das vibrações mecânicas.....	11
Figura 2.8 - Desenho esquemático de ondas de baixa frequência e de alta frequência e comparação com respectivos comprimentos de onda.....	14
Figura 2.9 - Campo de som de um típico transdutor piezoeléctrico. A intensidade do som é indicada pela cor, onde cores mais claras correspondem a maiores intensidades.	14
Figura 2.10 - Desenho esquemático do perfil de um feixe de som.....	15
Figura 2.11 - Desenho esquemático da reflexão do feixe de som.....	17
Figura 2.12 - Diagrama que relaciona os ângulos e velocidades das ondas em dois meios diferentes. Onde VL1 é a velocidade da onda longitudinal no material 1, VL1' é a velocidade da onda longitudinal reflectida e VL2 é a velocidade da onda longitudinal no material 2.....	18
Figura 2.13 - Desenho esquemático da incidência de um feixe de som num material com partículas de diferentes tamanhos.....	19
Figura 2.14- Esquema ilustrativo do ajuste de um transdutor em superfícies com diferentes graus de rugosidade.....	21
Figura 2.15 - Efeito da superfície posterior irregular.....	22
Figura 3.1 - Equipamento de ensaio ultra-sónico Pundit Lab da Proceq, constituído pela unidade de leitura de dados, bloco de calibração, transdutores, cabos de conexão, pasta de acoplamento, carregador, documentação e mala de transporte....	26
Figura 3.2 - Corte longitudinal de um típico transdutor de contacto.....	27
Figura 3.3 - Transdutores de Contacto Proceq de 54kHz utilizados no presente trabalho.....	27
Figura 3.4 - Desenho esquemático do acoplante entre as faces do transdutor e da amostra.....	28

Figura 3.5 - Esquema do sistema elaborado com pormenor do corte do elemento de adaptação aos transdutores.....	29
Figura 3.6 - Esquema do ensaio por imersão	29
Figura 4.1 - Desenho esquemático do ensaio de contacto por transmissão de superfície.....	32
Figura 4.2 - Desenho esquemático do ensaio de contacto por transmissão directa.	33
Figura 4.3 - Imagens dos blocos ensaiados nos teste preliminares.	35
Figura 4.4 - Esquema do traçado de linhas e colunas efectuado em quatro faces do bloco.....	39
Figura 4.5 - Esquema do Ensaio 1 com espaçamento entre linhas de dez centímetros em uma das colunas.....	39
Figura 4.6 - Esquema do Ensaio 1 com espaçamento entre linhas de vinte centímetros em uma das colunas.....	40
Figura 4.7 - Esquema do Ensaio 1 com espaçamento entre linhas de trinta centímetros em uma das colunas.....	40
Figura 4.8 - Esquema do Ensaio 2 no sentido da esquerda para a direita em uma das linhas com afastamento progressivo entre transdutores de dez centímetros.	41
Figura 4.9 - Esquema do Ensaio 2 no sentido da direita para a esquerda (inverso) em uma das linhas com afastamento progressivo entre transdutores de dez centímetros.	42
Figura 4.10 - Esquema do Ensaio 3 em uma das colunas com medições afastadas de vinte centímetros.	43
Figura 5.1 - Mapa de Portugal e do Distrito de Santarém	45
Figura 5.2 - Localização geográfica da pedreira.	45
Figura 5.3 - Extracto da Carta Geológica de Portugal (Folha 27-A Vila Nova de Ourem na escala 1:50000) da localização da Pedreira Eduardo Marques & Rosa Lda.	46
Figura 5.4 - Síntese litostratigráfica.....	47
Figura 5.5 - Coluna litostratigráfica da Formação de Santo António-Candeeiros.	48
Figura 6.1 - Desenho esquemático do Bloco 4 (bloco 2064) da Pedreira Eduardo Marques & Rosa Lda.	51
Figura 6.2 - Fotografia da Face A com respectivas medidas, esquema da grelha de apoio às medições e fractura visível evidenciada.	52
Figura 6.3 - Fotografia da Face B com respectivas medidas, esquema da grelha de apoio às medições e fractura visível evidenciada.	52
Figura 6.4 - Fotografia da Face C com respectivas medidas, esquema da grelha de apoio às medições e fracturas visíveis evidenciadas.	53

Figura 6.5 - Fotografia da Face D com respectivas medidas, esquema da grelha de apoio às medições e fracturas visíveis evidenciadas.	53
Figura 6.6 - Histograma de valores das medições obtidas por Mapeamento.	54
Figura 6.7 - Resultados do ensaio 1 na Face A com respectiva grelha de apoio às medições e fractura evidenciada.	56
Figura 6.8 - Resultado do ensaio 2 (sentido directo), linha I, na Face A.....	57
Figura 6.9 - Resultado do ensaio 2 (sentido inverso), linha II, na Face A.....	58
Figura 6.10 - Resultado do ensaio 1 na Face B com respectiva grelha de apoio às medições e fractura evidenciada.	60
Figura 6.11 - Resultado do ensaio 2 (sentido directo), linha I, na Face B.....	61
Figura 6.12 - Resultado do ensaio 2 (sentido inverso), linha III, na Face B.....	62
Figura 6.13 - Modelo da distribuição de velocidades no bloco a três dimensões, com vista das Faces A e D.	63
Figura 6.14 - Modelo da distribuição de velocidades no bloco a três dimensões, com vista das Faces C e D.....	64
Figura 6.15 - Modelo da distribuição de velocidades no bloco a três dimensões, com valores das medições extrapolados para o seu interior.....	65
Figura 6.16 - Resultados do ensaio 3, com respectivas grelhas de apoio às medições, onde o mapa (d) corresponde ao ensaio da Face A para a Face C e o mapa (e) da Face D para a Face B.....	66

Índice de Tabelas

Tabela 2.1-Propriedades acústicas de alguns materiais	20
Tabela 2.2- Variação da velocidade das ondas sísmicas longitudinais em função da porosidade.....	20
Tabela 4.1 - Esquemas possíveis do tipo de transmissão e tipo de disposição dos transdutores realizados.....	34
Tabela 4.2 - Síntese dos ensaios e resultados obtidos nos ensaios preliminares.	36
Tabela 5.1 - Ficha Técnica do Calcário de Moleanos.....	49

Capítulo **1**

Introdução

1. Introdução

1.1. Enquadramento da Dissertação

O tema da presente dissertação insere-se na área da Engenharia Geológica e de Minas e foca o ensaio por ultra-som como uma das técnicas não destrutivas na caracterização de blocos de rocha ornamental.

O sector das Rochas Ornamentais, também designado por Pedras Naturais ou Pedras Dimensionais, diz respeito às rochas que podem ser utilizadas com uma função estruturante e decorativa de construções. No passado as rochas ornamentais foram utilizadas com funções estruturais, mas actualmente têm apenas um carácter decorativo, podendo apresentar um tratamento das suas superfícies recorrendo exclusivamente a processos mecânicos para induzir texturas decorativas.

Em Portugal tem-se observado um crescente nível de mecanização e industrialização neste sector, o que tem permitido manter uma grande actividade. É essencialmente nas regiões do Alentejo, Fátima e Pero Pinheiro que se concentra a indústria extractiva de rochas carbonatadas. Nestas regiões produz-se mármore e calcário e em muitos destes centros transformadores é utilizada alta tecnologia de tratamento de pedra para produzir material padronizado e assim corresponder a encomendas, fundamentalmente para exportação (AEP, 2003). Carvalho *et al.* (2012) referem que a actividade em pedreiras de blocos é bastante intensa e que a sua produção tem como destino principal a exportação, em particular para a República Popular da China.

O sector das rochas ornamentais é constituído por três tipos de produtos diferentes, nomeadamente o bloco, a chapa serrada e o produto em obra. O bloco é aquele que é extraído dos recursos geológicos, depois de cortado constitui as chapas serradas. As chapas polidas, seleccionadas e embaladas formam o produto transformado, ou seja, o produto em obra (AEP, 2003). Neste sector, fazem parte todos os tipos rochosos que são extraídos e consecutivamente, processados em diversas dimensões e formas. Estas podem ser desde cubos utilizados no calcetamento de ruas, até aos blocos, dos quais se podem obter chapas para pavimentos e revestimentos, estatuária, pedras tumulares, entre outros (Carvalho, 2007). A extracção de rochas ornamentais é feita com esquadramento através blocos com volume de 3 a 5 metros cúbicos e após o processo de transformação original, chapas de várias espessuras, consoante a sua utilização (Carvalho *et al.*, 2012).

A presença de descontinuidades dentro de elementos estruturais de grandes dimensões é na realidade um factor de risco económico. Detectar determinadas características ocultas num bloco, não é geralmente possível excepto por técnicas intrusivas. Para as indústrias extractiva e transformadora, um procedimento de diagnóstico não destrutivo utilizado para o controlo de qualidade dos blocos seria uma mais-valia (Bramanti e Bozzi, 2000 e El-Gohary, 2012).

É certo que existem um conjunto de normas a indicar quais os ensaios a serem feitos em rochas, mas continua a haver uma necessidade crescente de ensaios mais específicos para facilitar aos profissionais deste sector a indicação de qual o melhor processamento a efectuar e desta forma evitar problemas futuros e fundamentalmente problemas de rentabilidade do material.

O ensaio por ultra-som permite determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais ultra-sónicas e por meio destas avaliar, indirectamente, o grau de alteração e de coesão das rochas. A presente dissertação não tem por objetivo focar a avaliação em si destes parâmetros, mas sim em detectar e localizar eventuais descontinuidades internas, relacionando-os de certa forma. A sua importância reside no facto de ser um dos poucos ensaios não destrutivos disponíveis para a verificação de propriedades rochosas.

Este pequeno avanço pode permitir de certa forma o aproveitamento e difusão de certas rochas ornamentais não comercializadas, pois admite viabilizar de antemão soluções estéticas e funcionais, de acordo com as indicações obtidas pelo ensaio, que podem ser interessantes e confiáveis.

É de grande relevância e vantagem competitiva, a maximização da qualidade dos produtos, evitando o mais possível o seu desperdício e conseqüentemente os custos relativos a este. Se à partida, fosse possível o conhecimento de uma descontinuidade no interior do bloco, apesar de não ser visível à superfície, poderia ser praticável uma diferente abordagem de corte consoante a sua localização e dimensão, conseguindo um maior aproveitamento deste e um menor custo para o proprietário.

1.2. Objectivos

Tendo em conta as dificuldades em obter informações sobre a qualidade dos blocos de rocha ornamental referidas anteriormente, é objectivo principal da presente

dissertação detectar e se possível localizar eventuais descontinuidades internas através de técnicas não destrutivas, como a técnica de Ultra-Som.

Numa primeira fase, pretendeu-se avaliar quais os tipos de ensaio mais apropriados e com resultados mais fiáveis para posteriormente ser-se capaz de fazer uma correcta caracterização do material, tal como o estado de alteração e as diferenças na composição mineralógica e no tamanho do grão.

Ambiciona-se contribuir desta forma para um maior desenvolvimento e aplicação da técnica de ultra-som para a certificação de blocos de rocha ornamental, sendo esta uma técnica com ensaios pouco dispendiosos e expeditos.

1.3. Organização

O presente trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos, que se apresentam em seguida.

No presente capítulo é feita uma apresentação do trabalho desenvolvido, assim como os seus principais objectivos.

No segundo capítulo são abordados os conceitos teóricos relativos à técnica de ultra-som, assim como as características e actuação das ondas sónicas.

No terceiro capítulo encontra-se descrito o equipamento utilizado, a sua constituição e funcionalidade.

No quarto capítulo apresenta-se o estudo experimental e a metodologia adoptada. São descritos os ensaios e técnicas efectuadas, tanto em ensaios preliminares, como nos ensaios que permitiram um estudo intensivo de um dos blocos.

No quinto capítulo descreve-se geográfica e geologicamente a área da pedreira de onde proveio o bloco de rocha ornamental em estudo, assim como as características deste.

No sexto capítulo incide-se essencialmente sobre os resultados experimentais obtidos, apresentando em conjunto uma interpretação dos mesmos.

No sétimo capítulo apresentam-se as principais conclusões do estudo desenvolvido.

Capítulo **2**

Enquadramento Teórico

2. Enquadramento Teórico

2.1. Princípios Básicos do Ensaio de Ultra-Som

O ensaio por ultra-som é um método não destrutivo que usa a energia do som de alta frequência para detectar defeitos ou descontinuidades internas nos mais variados materiais (Andreucci, 2008).

Um sistema típico de ensaio de ultra-som é constituído por algumas unidades funcionais, tais como o transdutor emissor/receptor, ou um transdutor emissor e um transdutor receptor e dispositivos de visualização (NDT, n.d.).

O transdutor é um dispositivo eletrónico capaz de converter energia eléctrica em energia mecânica, ou seja, produz impulsos eléctricos de alta voltagem que são transformados em energia de frequência ultra-sónica. Esta energia sonora conduzida pelo emissor é introduzida e propagada através dos materiais sob a forma de ondas. Quando no trajecto, a onda encontra uma descontinuidade (como por exemplo uma fractura), uma parte da energia da onda é reflectida a partir da superfície desta descontinuidade. O sinal da onda reflectida (o eco acústico) volta a ser transformado num sinal eléctrico, recebido pelo receptor e exibido no dispositivo de visualização.

Na figura 2.1, está representada a intensidade do sinal reflectido em função do tempo de geração do sinal até ao momento do eco ser recebido (NDT, n.d.).

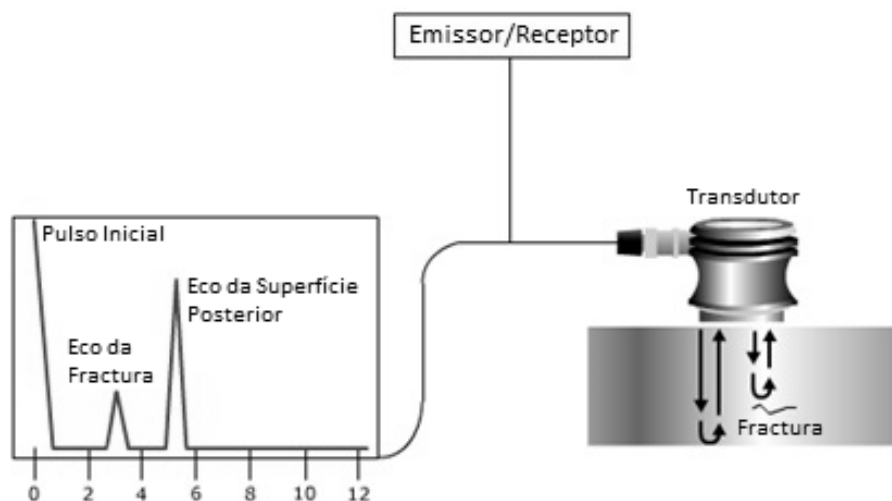


Figura 2.1 - Representação gráfica da intensidade do sinal reflectido em função do tempo (NDT, n.d.).

Este tipo de ensaio permite a caracterização dos mais variados materiais, com a vantagem de ser não destrutivo, de ser de aplicação fácil e rápida e de ser sensível à anisotropia da matéria (Velho e Gomes, 1997).

2.2. Geração de Ondas Ultra-Sónicas

O ensaio por ultra-som, como já foi referido anteriormente, é iniciado por um impulso de energia eléctrica que provoca a excitação dos cristais presentes no transdutor. O feixe de som produzido viaja desde o transdutor até à superfície da amostra a ensaiar, passando pelo acoplante, figura 2.2 (ASNT, 1981).

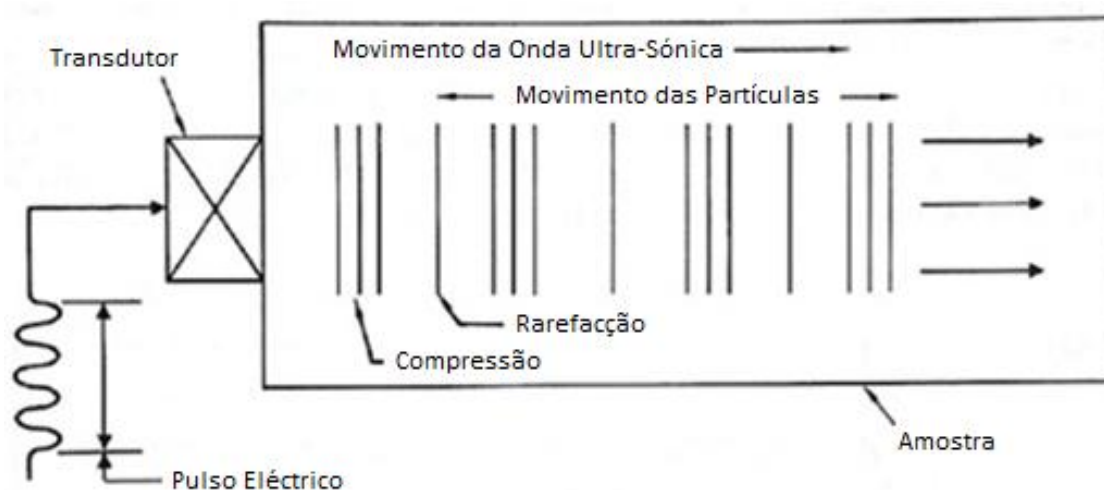


Figura 2.2 - Geração de onda ultra-sónica. Transdutor em contacto com a superfície da amostra e o pulso de feixe de som a viajar através da mesma. (ASNT, 1981)

2.2.1. Efeito Piezoeléctrico

A base para os ensaios de ultra-som é a conversão dos impulsos eléctricos em vibrações mecânicas e vice-versa. Para produzir um feixe sónico, o transmissor, aplica um pulso eléctrico de alta frequência num cristal piezoeléctrico (ASNT, 1981).

Materiais piezoeléctricos, tais como o quartzo, sulfato de lítio e titanato de bário, formam uma peça de material polarizado, com eléctrodos ligados nas duas faces opostas, chamada de elemento activo. É este elemento activo, no núcleo do transdutor, que converte as energias (NDT, n.d.).

Quando se aplica os eléctrodos no material piezoeléctrico com tensão alternada, cria-se um campo eléctrico e as moléculas polarizadas vão alinhar-se segundo este, o que provoca a alteração das dimensões do material, figura 2.3 (NDT, n.d.).

Ao tentar impedir este movimento, o material vai transmitir esforços de compressão às zonas adjacentes e emitir uma onda longitudinal. A forma desta onda, depende então da frequência de excitação e das dimensões dos cristais constituintes do material piezoeléctrico (Andreucci, 2008).

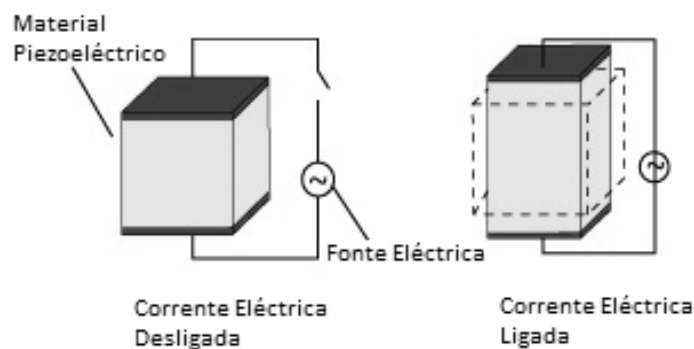


Figura 2.3 - Contração e expansão do material piezoeléctrico quando submetido a uma tensão alternada. (NDT, n.d.)

Assim sendo, piezoeléctricidade, não é mais do que o fenómeno de reversibilidade por meio de um cristal, que quando vibra, produz corrente eléctrica e que quando é aplicada uma corrente eléctrica, este vibra (ASNT, 1981).

2.3. Vibrações Mecânicas

O som é a vibração mecânica das partículas num dado meio material. As partículas quando são atingidas por uma onda de som, não viajam pelo material com a onda. Estas apenas reagem à energia da onda, vibrando em torno de um ponto fixo com a mesma energia da onda de som (ASNT, 1981).

2.3.1. Tipos de Ondas

Todas as substâncias materiais são compostas por átomos, os quais podem ser forçados num movimento vibracional sobre as suas posições de equilíbrio (NDT, n.d.).

Segundo Andreucci (2008), as ondas mecânicas são compostas de oscilações de partículas discretas no meio em que se propagam e ao fazer passar-se energia acústica no meio, as partículas que o constituem, praticam o movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio. Ao assumir o meio como sólido e elástico, onde as partículas que o compõem se encontram rigidamente ligadas, podendo sofrer oscilação em qualquer direcção, as ondas acústicas podem ser classificadas em quatro tipos distintos: ondas longitudinais (ondas de compressão); ondas transversais (ondas de cisalhamento) e ondas superficiais ou de Rayleigh – Love e Lamb.

As ondas longitudinais e transversais são os dois modos de propagação com mais utilização em ensaios de ultra-som. Estas ondas são idênticas às observadas a quando da ocorrência de um sismo, embora a fonte de energia seja distinta. O movimento das partículas responsáveis pela propagação destas ondas é ilustrado na figura 2.4 (NDT, n.d.).

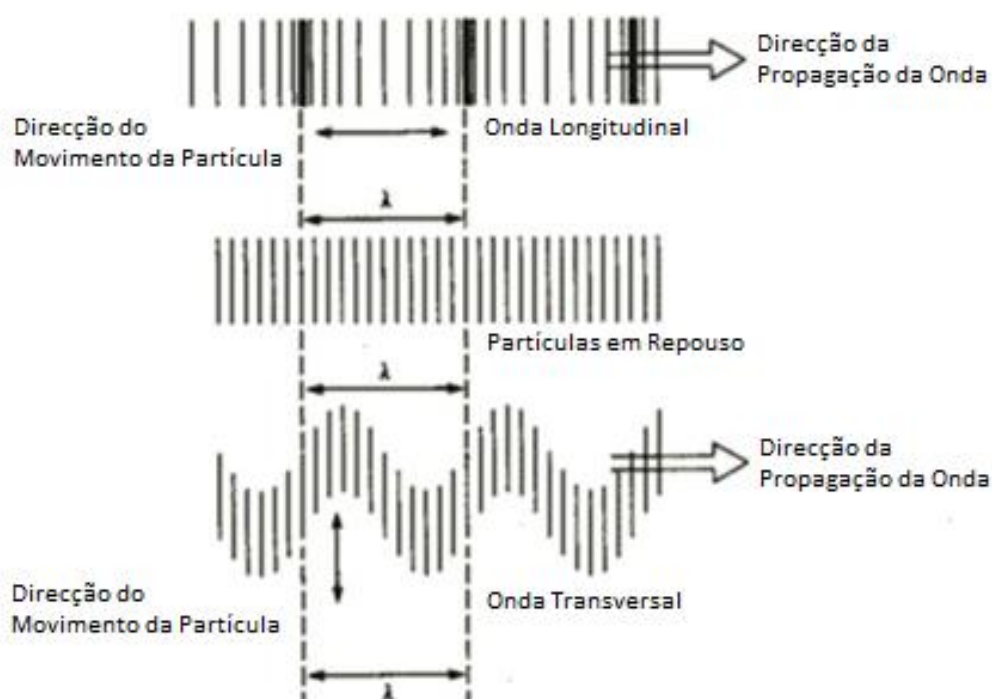


Figura 2.4 - Movimento da partícula responsável pela propagação das ondas longitudinais e transversais. (NDT, n.d.)

Em ondas longitudinais, as oscilações ocorrem na direcção longitudinal ou na direcção de propagação da onda, segundo a qual se desloca a frente de onda. Segundo Lima (1998), são também referidas por ondas de compressão C ou de

dilatação D, pois aquando da passagem das ondas são exercidas sucessivas compressões ou rarefações do meio onde se movimentam (Figura 2.5). Este tipo de onda possui alta velocidade de propagação, sendo as primeiras a chegar a qualquer ponto da superfície, daí a sua designação por ondas P.

É a distância entre duas zonas de compressão que determina o comprimento de onda (Andreucci, 2008).

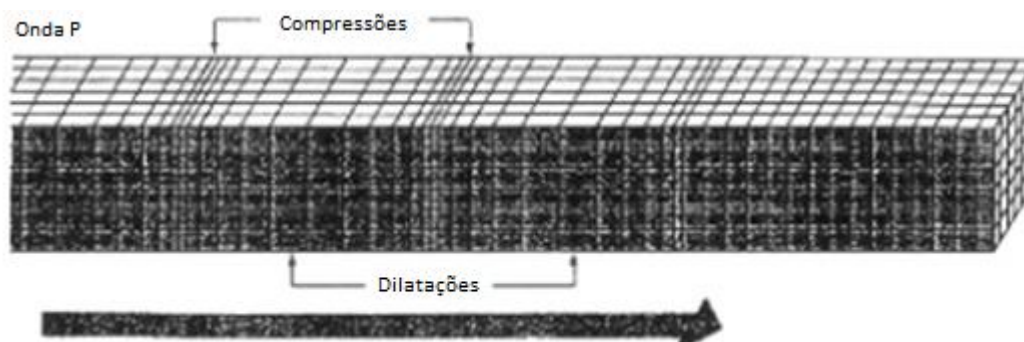


Figura 2.5 - Desenho esquemático dos movimentos das partículas nas ondas P. (Bolt, 1976 in Bodare, 2009)

Em ondas transversais ou de cisalhamento, as partículas oscilam em ângulo recto, ou transversalmente à direcção de propagação. Estas ondas deslocam-se a velocidades inferiores às anteriores, surgindo em segundo lugar, com a designação de ondas S (shear wave) (Lima, 1998).

Andreucci (2008), refere que estas ondas são incapazes de se propagarem em meios líquidos e gasosos, devido às características das ligações entre as partículas destes. De acordo com o mesmo autor, o comprimento de onda é determinado entre dois "vales" ou "picos" (Figura 2.6).

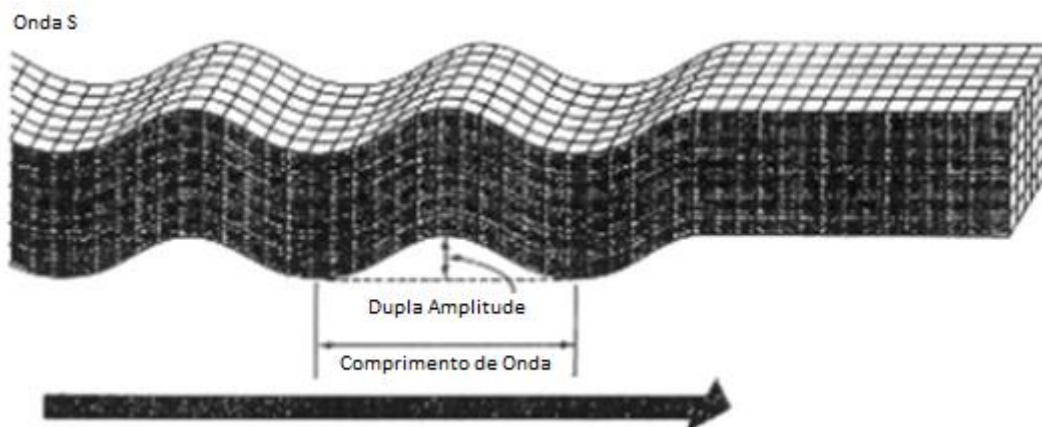


Figura 2.6 - Desenho esquemático do movimento das partículas nas ondas S. (Bolt, 1976 in Bodare, 2009)

2.3.2. Frequência

As ondas de som são classificadas segundo a sua frequência e medidas em ciclos ou oscilações por segundo. A unidade 1 ciclo/segundo é denominada 1Hertz. Ao tempo necessário à execução de um ciclo dá-se o nome de Período e à distância percorrida pela onda durante o Período, dá-se o nome de Comprimento de Onda. Assim, o inverso do período é igual à frequência da onda (Blitz, 1971).

Os limites inferior e superior audível situam-se respectivamente entre os 20 Hz e os 20 kHz e a partir deste último valor a frequência passa a ser ultra-sónica, figura 2.7 (Andreucci, 2008).

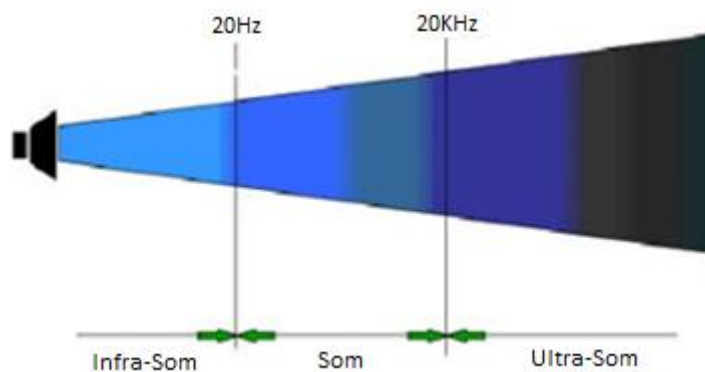


Figura 2.7 - Campo de audibilidade das vibrações mecânicas. (Andreucci, 2008)

No entanto, a maioria dos equipamentos de ultra-som dispõem de um intervalo de frequência desde os 400 kHz até aos 25 MHz, podendo o feixe de som de todas estas frequências penetrar em materiais de grão fino sem dificuldade. O mesmo não acontece ao usar altas frequências em material de grão grosseiro, pois neste caso esperar-se-á uma dispersão do feixe. Assim sendo, é com frequências mais baixas que se pode atingir maior profundidade de penetração (ASNT, 1981).

Segundo a mesma bibliografia, baixas frequências (até cerca de 1 MHz) penetram facilmente nos materiais devido à sua fraca atenuação, e inclusive em estruturas mais grosseiras e superfícies rugosas, devido à fraca dispersão. Em contrapartida, é maior a dificuldade em encontrar pequenos defeitos, pois o ângulo de divergência deste tipo de frequência é mais amplo. Em altas frequências é emitido um feixe de som mais concentrado que oferece um melhor poder de resolução, com a desvantagem de ter uma maior dispersão em materiais de grão grosseiro.

2.3.3. Comprimento de Onda

Comprimento de Onda é a distância percorrida pela onda entre valores repetidos e sucessivos. Isto é, enquanto a fonte emissora executa um ciclo completo de vibração no tempo T , as ondas sonoras viajam a uma distância fixa, dada pelo produto da velocidade pelo período da onda, chamado Comprimento de Onda (λ) – Equação 1 (Blitz, 1971).

Este pode ser estabelecido entre dois picos (máximos) de ondas consecutivos (Andreucci, 2008).

$$\lambda = V \cdot T \quad (1)$$

Onde: λ - comprimento de onda (m); V - velocidade de propagação (m/s); T - período (s).

2.3.4. Velocidade de Propagação

O som, segundo Drury (1992), viaja através de um material com uma velocidade característica desse material.

A distância percorrida pela onda sónica, por unidade de tempo é definida como “velocidade de propagação”. Esta é uma característica do meio, uma constante, independente da frequência (Andreucci, 2008).

A velocidade das ondas ultra-sónicas através de meios sólidos e líquidos é relativamente elevada, mas em meios gasosos é rapidamente atenuada, ou mesmo extinta. Esta variação de velocidades deve-se, entre outros factores, às diferenças de densidade e elasticidade de cada material (ASNT, 1981). Está ainda relacionada com as características físico-mecânicas, tais como a composição mineralógica, as conexões intercristalinas, a porosidade, o teor de humidade e o estado de alteração das rochas (El-Gohary 2012).

2.3.5. Relações entre Parâmetros

É possível, através da relação entre a velocidade de propagação e a frequência, o cálculo do comprimento de onda, visto que a primeira é geralmente conhecida e a segunda depende apenas da fonte emissora, também conhecida – Equação 2 (Blitz, 1971),

$$V = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (2)$$

onde : V – velocidade de propagação (m/s); λ – comprimento de onda (m); T – período (s); f – frequência (Hz).

Por meio da relação acima descrita e como mostra a figura 2.8, pode-se chegar a uma conexão entre a frequência e o comprimento de onda, ou seja, a frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda (Equação 3).

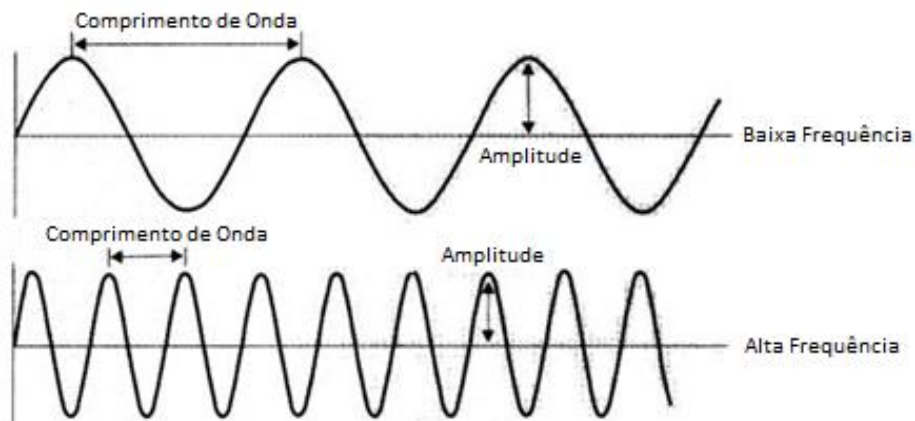


Figura 2.8 - Desenho esquemático de ondas de baixa frequência e de alta frequência e comparação com respectivos comprimentos de onda (adaptado de <http://crv.educacao.mg.gov.br>).

$$f = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

2.4. Campo Próximo e Campo Distante

Um transdutor piezoelétrico não emite o feixe de som a partir de um ponto, mas sim da maior parte da superfície do elemento piezoelétrico, assemelhando-se a uma massa cilíndrica na frente do transdutor, no caso de este ser redondo, figura 2.9 (NDT, n.d.).

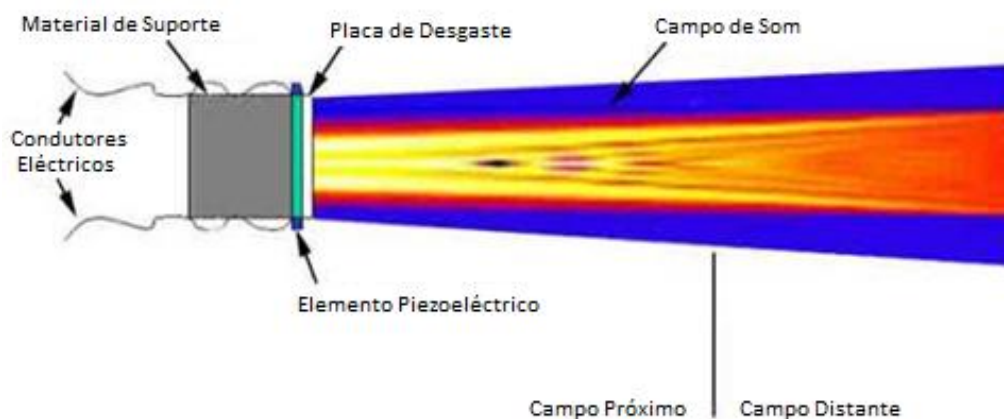


Figura 2.9 - Campo de som de um típico transdutor piezoelétrico. A intensidade do som é indicada pela cor, onde cores mais claras correspondem a maiores intensidades. (NDT, n.d.)

O feixe de som não é consistente e ao medir-se a sua intensidade a várias distâncias do transdutor são encontrados dois campos distintos, conhecidos como campo próximo e campo distante, figura 2.10 (ASNT, 1981).

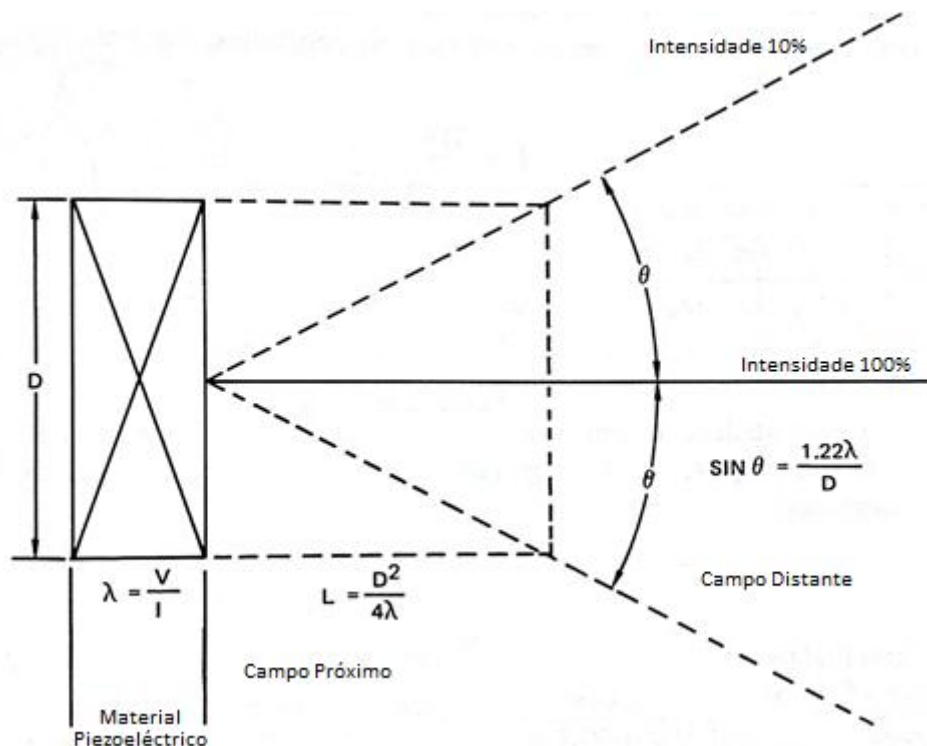


Figura 2.10 - Desenho esquemático do perfil de um feixe de som. (ASNT, 1981)

As interferências entre as ondas sonoras que são emitidas da face do transdutor provocam um padrão irregular na intensidade sonora no campo próximo do transdutor (ASNT, 1981). Devido às variações dentro deste campo acústico próximo, pode tornar-se difícil fazer uma avaliação precisa de pequenas descontinuidades nos materiais (menores que o diâmetro do transdutor), quando estes estão posicionados nesta área (Andreucci, 2008).

Segundo Blitz (1971), são o diâmetro do transdutor e o comprimento de onda do feixe sónico que influenciam o comprimento do campo próximo (Equação 4),

$$L = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (4)$$

onde: L – comprimento do campo (m); D – diâmetro do transdutor (m); λ – comprimento de onda do feixe sónico (m).

De acordo com a mesma bibliografia, num dado material, desde que o comprimento de onda do feixe seja inversamente proporcional à frequência, pode-se encurtar o comprimento do campo próximo baixando a frequência.

Para além do campo próximo, encontra-se o campo distante, onde o feixe de ultrassom se torna mais uniforme e estende-se com um padrão a partir da origem do transdutor para o exterior (NDT, n.d.). Neste campo a única consequência é o efeito da dispersão do feixe sónico e o seu grau pode ser calculado pela equação 5 (ASNT, 1981),

$$\sin\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

onde: θ – metade do ângulo de dispersão ($^{\circ}$); λ – comprimento de onda do feixe sónico (m); D – diâmetro do transdutor (m).

A área pouco depois do campo próximo é onde a onda sonora tem melhor comportamento e máxima força, logo quando as descontinuidades ocorrem nesta área, os resultados de detecção serão óptimos (NDT, n.d.).

De forma sucinta e segundo Andreucci (2008), no campo próximo é difícil detectar pequenas descontinuidades; no campo distante, numa área junto do campo próximo, podem ser detectadas descontinuidades maiores; no restante campo distante é possível detectar qualquer descontinuidade, desde que compatível com o comprimento de onda.

2.5. Reflexão, Refracção e Lei de Snell

No ensaio por ultra-som, são emitidas ondas ultra-sónicas através da amostra e são recebidos os ecos tanto da reflexão da onda na superfície posterior da amostra, como da descontinuidade. O eco da reflexão da superfície posterior, por ter de atravessar toda a amostra, será recebido depois do eco da reflexão da descontinuidade. A título exemplificativo, a figura 2.11 mostra que a diferença de tempo entre a viagem do feixe de som através da amostra até à descontinuidade e até à superfície posterior e respectivos retornos, indicando o local onde se encontra a descontinuidade. Ou seja, se o tempo de viagem até à descontinuidade e seu retorno é dois terços do tempo de

viagem até à superfície posterior e seu retorno, a descontinuidade vai-se encontrar a dois terços da distância da superfície posterior. (ASNT, n.d.)

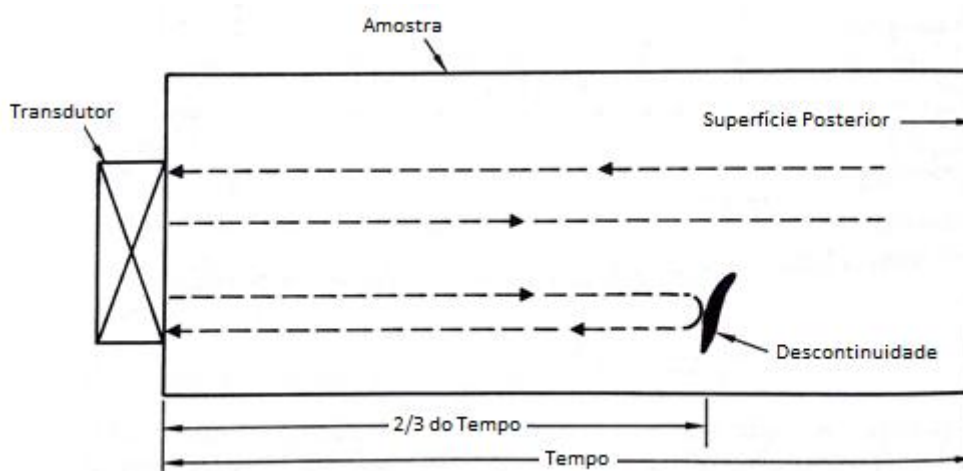


Figura 2.11 - Desenho esquemático da reflexão do feixe de som. (ASNT, n.d.)

Neste tipo de ensaio, a natureza da descontinuidade tem de ser deduzida tendo em conta vários factores, sendo os mais importantes o conhecimento do material da amostra e a sua constituição (ASNT, n.d.).

Quando a onda ultra-sónica passa através de uma interface entre dois materiais com índices de refração diferentes, produz ondas reflectidas e refractadas (NDT, n.d.).

A refração é uma alteração na direcção de uma onda, causada por uma alteração na sua velocidade. Isto acontece numa interface devido à diferença de velocidades de propagação das ondas acústicas nos dois materiais (NDT, n.d.).

A relação entre as velocidades (em m/s) dos materiais V_{L1} e V_{L2} e os senos dos ângulos incidente (θ_1) e refractado (θ_2), é dada pela Lei de Snell (Equação 6 e Figura 2.12).

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{L2}} \quad (6)$$

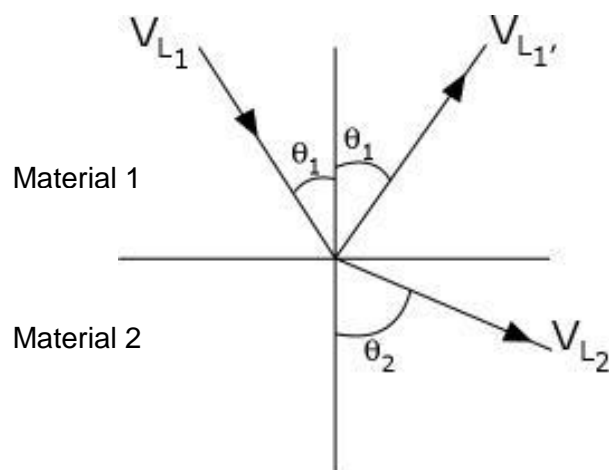


Figura 2.12 - Diagrama que relaciona os ângulos e velocidades das ondas em dois meios diferentes. Onde V_{L1} é a velocidade da onda longitudinal no material 1, V_{L1}' é a velocidade da onda longitudinal reflectida e V_{L2} é a velocidade da onda longitudinal no material 2. (NDT, n.d.)

2.6. Atenuação das Ondas Sonoras

O som, ao viajar através de um meio, vai diminuindo a sua intensidade com a distância. No caso de materiais ideais, a amplitude do sinal só seria reduzida pela dispersão da onda, mas em materiais naturais o enfraquecimento é maior devido a fenómenos de dispersão e de absorção. Ao efeito combinado destes dois fenómenos, chama-se atenuação (NDT, n.d.).

A dispersão, segundo Andreucci (2008), resulta do facto de a matéria não ser totalmente homogénea, existindo desta forma, interfaces naturais da sua estrutura interna, não sendo mais do que a reflexão do som em direcções diferentes à direcção de propagação original. Conforme o mesmo autor, a absorção é a energia que a onda cede para que cada partícula do meio execute o movimento oscilatório.

A energia das ondas é perdida através de calor devido ao atrito da vibração das partículas (ASNT, 1981).

Este enfraquecimento é proporcional ao volume do grão do material, à sua porosidade, densidade e compactação e ao comprimento onda do feixe de som (ASNT, 1981). A dispersão depende do tipo de material, onde grãos de maior tamanho causam maior dispersão, figura 2.13 (Drury,1992).



Figura 2.13 - Desenho esquemático da incidência de um feixe de som num material com partículas de diferentes tamanhos. (Drury, 1992)

2.7. Impedância Acústica

A impedância acústica é a causa da atenuação do som num material, pois é a resistência deste à passagem das ondas sonoras. A impedância acústica de um material, pode ser definida como o produto da sua densidade pela velocidade acústica - Equação 7 (ASNT, 1981),

$$Z = \rho \cdot V \quad (7)$$

onde: Z – impedância acústica ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); ρ – densidade (kg/m^3); V – velocidade da onda (m/s).

É de notar que a impedância da onda sónica no ar é muito baixa, sendo a da água relativamente mais alta, tal como se pode observar na tabela 2.1 (ASNT, 1981).

Tabela 2.1-Propriedades acústicas de alguns materiais (adaptado de ASNT, 1981).

Propriedades Acústicas de Materiais			
Material	Densidade (Kg/m ³)	Ondas Longitudinais	
		Velocidade (m/s)	Impedância (x10 ⁶ Kg/m ² .s)
Aço	7800	5850	0,046
Água	1000	1490	1,490
Alumínio	2800	6250	0,018
Ar	1	330	0,003
Bronze	8860	3530	0,031
Calcário	2450	2600	6,370
Cortiça	240	510	0,120
Glicerina	1261	1920	2,420
Granito	2650	5200	13,780
Mármore	2750	3400	9,350
Quartzo	2200	5930	0,013

Será de ter em conta, que por exemplo, como no caso dos calcários, a velocidade das ondas sísmicas varia em função da porosidade, tabela 2.2.

Tabela 2.2- Variação da velocidade das ondas sísmicas longitudinais em função da porosidade (adaptado de Lima & Menezes, 2008).

Calcários	
Porosidade Total (%)	Velocidade de Ondas Longitudinais (m/s)
1	6500
5	6000
10	5200
20	4000
30	3000
45	1850

2.8. Influência da Amostra no Feixe de Som

Num ensaio por ultra-som, o grau de confiança é aumentado pelo facto de serem conhecidas as propriedades da amostra e respectivos efeitos. Para simplificar a avaliação dos efeitos da geometria e propriedades da amostra, pode-se efectuar um furo com recolha de testemunho de modo a ser usado como referência *standard*. Em todo o caso, será conveniente conhecerem-se as principais variáveis da amostra que afectam as leituras, entre as quais a rugosidade da superfície, a forma da amostra e o tamanho de grão do material (ASNT, 1981).

2.8.1. Rugosidade da Superfície

A rugosidade é um factor de resistência ao deslizamento numa descontinuidade (Lima e Menezes, 2008). Apresenta-se como um conjunto de irregularidades, quer de saliências, quer de reentrâncias, existentes na superfície.

Esta influencia o comportamento de componentes mecânicos no que diz respeito ao deslizamento, ao desgaste, ao ajuste do acoplamento, entre outros.

Como é visível na figura 2.14, a diferença do ajuste de um transdutor numa superfície com rugosidade de graus distintos é significativa. Numa superfície onde a rugosidade seja de menor amplitude, isto é, onde a diferença entre o pico e o vale é menor, a área de contacto entre a superfície da amostra, o acoplante e o transdutor é maior, o que permite uma emissão do feixe de som mais eficaz.



Figura 2.14- Esquema ilustrativo do ajuste de um transdutor em superfícies com diferentes graus de rugosidade.

As superfícies rugosas alteram os resultados ultra-sónicos, como a perda da amplitude do eco a partir das descontinuidades da amostra, perda do poder de resolução e alargamento do feixe sónico (ASNT, 1981).

2.8.2. Forma ou Contorno da Amostra

Amostras com limites não paralelos (angulares) ou com superfícies contornadas, podem provocar uma perda parcial ou mesmo total de reflexão. Na figura 2.15 e a título exemplificativo, encontra-se representada uma amostra com uma superfície frontal regular, mas uma superfície posterior irregular. Quando a superfície posterior é paralela à superfície frontal, as ondas de som simplesmente voltam ao transdutor (lado direito da amostra). Quando a superfície posterior é inclinada em relação à superfície frontal, as ondas de som sofrem sucessivas reflexões até desaparecerem por completo devido ao fenómeno da atenuação (lado esquerdo da amostra). Se estas ondas não desaparecerem por completo, poderão dar origem à recepção no transdutor de um sinal fraco que provocará indicações confusas (ASNT, 1981).

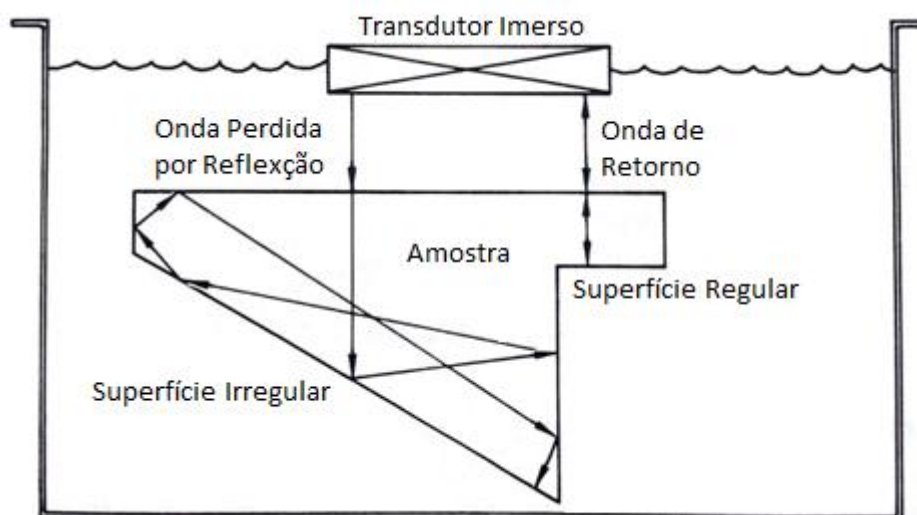


Figura 2.15 - Efeito da superfície posterior irregular (ASNT, 1981).

2.8.3. Partículas de Grão Grossoiro

As partículas de grão grosseiro numa amostra podem provocar dispersão e perda de reflexões. Isto acontece em situações particulares, quando o tamanho das partículas e o comprimento de onda são comparáveis. Ao baixar-se a frequência, de modo a que o comprimento de onda se torne maior do que o tamanho do grão, as perdas por dispersão são reduzidas (ASNT, 1981).

2.8.4. Orientação e Profundidade das Descontinuidades

A orientação e a profundidade das descontinuidades, podem resultar em indicações confusas, ou mesmo numa perda de eco da descontinuidade (ASNT, 1981).

Quando a orientação da descontinuidade é paralela ao feixe sonoro, pode causar uma pequena indicação proporcional ao tamanho da descontinuidade. Em situação contrária, quando a orientação da descontinuidade tem uma inclinação em relação ao feixe sonoro, a reflexão deste é afastada do transdutor. A presença de uma qualquer descontinuidade pode ser indicada por uma súbita perda da reflexão da superfície posterior durante um ensaio (ASNT, 1981).

Se a descontinuidade se situar no campo próximo, numa zona logo após a superfície frontal, é possível que não seja detectada. Ainda no campo próximo, numa zona mais afastada da superfície frontal, devido às interferências próprias deste campo, a amplitude do eco varia para um ângulo considerável em função da profundidade e posição da descontinuidade. No campo distante, a amplitude do eco da descontinuidade diminui exponencialmente, à medida que a distância aumenta (ASNT, 1981).

Capítulo **3**

Equipamento

3. Equipamento

3.1. Unidade de Ultra-Som – Emissor/Receptor

Os circuitos que fornecem corrente para todas as funções do equipamento constituem a fonte de alimentação, onde a energia eléctrica é fornecida a partir de uma bateria contida nesta unidade.

O emissor é a fonte de curtas rajadas de energia eléctrica que são accionadas pelo temporizador e transmitidas ao transdutor. Ao receptor, que está a uma distância conhecida, chegam os pulsos de retorno da amostra ensaiada. O intervalo de tempo entre a transmissão e a recepção do pulso é medida e exibida no dispositivo de visualização do equipamento (El-Gohary, 2012).

O Pundit Lab (*Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester*) da Proceq é um equipamento de ultra-som portátil que foi o utilizado neste trabalho e como qualquer equipamento de ensaio por ultra-som, baseia-se no método de velocidade do pulso para fornecer informações sobre a uniformidade, cavidades, fissuras e defeitos do material em causa. Este equipamento, a par com a tradicional medição do tempo de trânsito das ondas ultrassónicas e com a medição da velocidade do pulso, pode medir também o comprimento do trajecto, a profundidade de fracturas perpendiculares e a velocidade de superfície (Proceq, n.d.).

Este equipamento possui a capacidade de se ligar via porta USB com um computador, por meio de um programa informático, que vem incluído no sistema e que permite obter em tempo real a forma da onda e a transmissão de resultados gravados na sua memória. A unidade de leitura de dados faz-se acompanhar de dois transdutores de 54 kHz, dois cabos de conexão, um bloco de calibração, uma pasta de acoplamento, uma fonte para uso na rede eléctrica e uma mala para transporte, figura 3.1.



Figura 3.1 - Equipamento de ensaio ultra-sónico Pundit Lab da Proceq, constituído pela unidade de leitura de dados, bloco de calibração, transdutores, cabos de conexão, pasta de acoplamento, carregador, documentação e mala de transporte.

Sempre que os cabos são trocados, ou é alterado o tipo de ensaio, o equipamento Pundit Lab deve ser colocado a zero e calibrado, tal como recomenda o seu manual de instruções operacionais.

3.2. Transdutores

Tal como foi referido no segundo capítulo, um transdutor consiste basicamente num elemento piezoelétrico e no seu suporte (Figura 3.2). O elemento piezoelétrico converte a energia eléctrica em energia ultra-sónica e introduz vibrações mecânicas na amostra a ensaiar (modo de emissão/transmissão). Este também recebe as vibrações reflectidas a partir da amostra e converte-as em sinais eléctricos que são exibidos (modo de recepção) (ASNT, 1981).

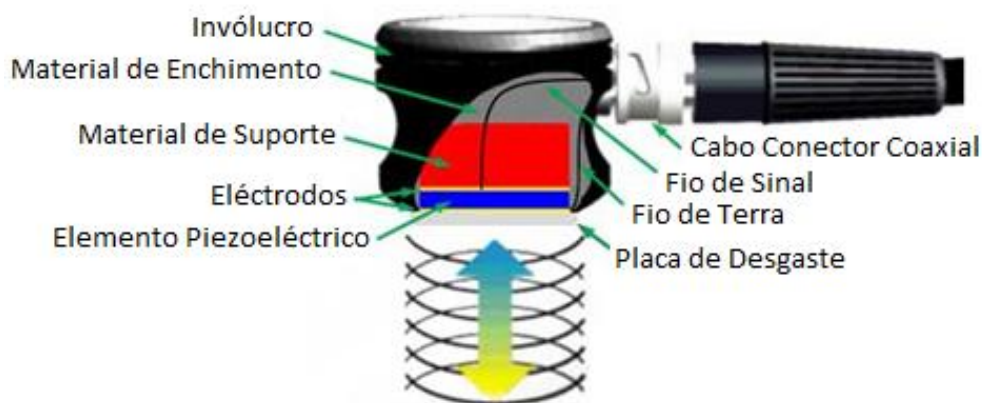


Figura 3.2 - Corte longitudinal de um típico transdutor de contacto. (NDT, n.d.)

Os transdutores são classificados segundo a sua aplicação podendo ser de contacto, ou de imersão. Em inspecções de contacto directo, como o caso do presente trabalho, são usados os transdutores de contacto (Figura 3.3). Estes têm os seus elementos constituintes protegidos por um invólucro robusto para resistir ao contacto e deslizamento com os mais variados materiais a testar. Possuem um desenho ergonómico, para que seja facilitado o seu manuseamento (NDT, n.d.).



Figura 3.3 - Transdutores de Contacto Proceq de 54kHz utilizados no presente trabalho.

Neste trabalho foram utilizados transdutores de frequência igual a 54kHz. Estes transdutores de frequência bastante baixa foram escolhidos com o intuito de serem capazes de penetrar em materiais tanto de grão fino, como de grão grosseiro, atingindo maiores profundidades de penetração.

3.3. Acoplante

No ensaio por ultra-som é essencial o uso de um acoplante entre as faces do transdutor e da amostra a ensaiar, pois facilita a transmissão de energia ultra-sónica entre estas faces. Um acoplamento acústico adequado dos transdutores à superfície em teste é fundamental para obter um bom sinal e por consequência, um resultado de sucesso (Leong *et al.*, 2004). A presença de uma material acoplante força o deslocamento do ar existente na superfície da amostra e faz com que seja possível obter uma maior energia do som na amostra e conseqüentemente melhor sinal ultra-sónico. A dificuldade na transmissão de energia reside na diferença de impedância acústica que existe entre o ar e a amostra (sólido), o que faz com que uma grande parte da energia seja reflectida e só a restante seja transmitida à amostra (NDT, n.d.).

Como mostra a figura 3.4, deve-se aplicar uma camada fina de pasta de acoplamento nos transdutores e na superfície da amostra a ensaiar. Materiais como glicerina, vaselina e água são dos mais usados.

Se necessário deve preparar-se a superfície, limpando qualquer sujidade que esta contenha e tentando alisá-la através de uma superfície abrasiva.

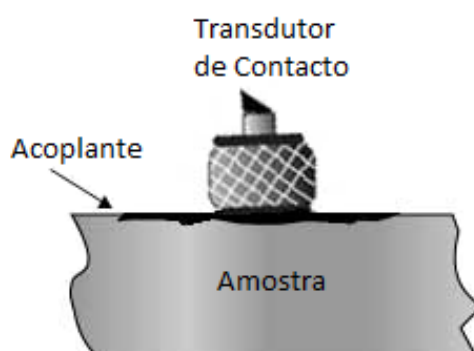


Figura 3.4 - Desenho esquemático do acoplante entre as faces do transdutor e da amostra. (NDT, n.d.)

Perante as dificuldades de testar amostras de rocha e especialmente se tiver superfícies rugosas, Bramanti e Bozzi (2001) decidiram criar um sistema de adaptação aos transdutores em que é usada a água como meio de acoplamento entre os transdutores e a superfície em teste. Como é demonstrado na figura 3.5, foi construído um recipiente cilíndrico onde se encaixou o transdutor. O recipiente é aberto na parte da frente e tem uma borracha em silicone para vedar a água. Este pode então ser preenchido com água quando pressionado contra a face da superfície da amostra. A

água que se possa perder devido a alguma imperfeição no contacto entre a junta de vedação e a superfície será substituída pela água contida no interior de um pequeno tanque.

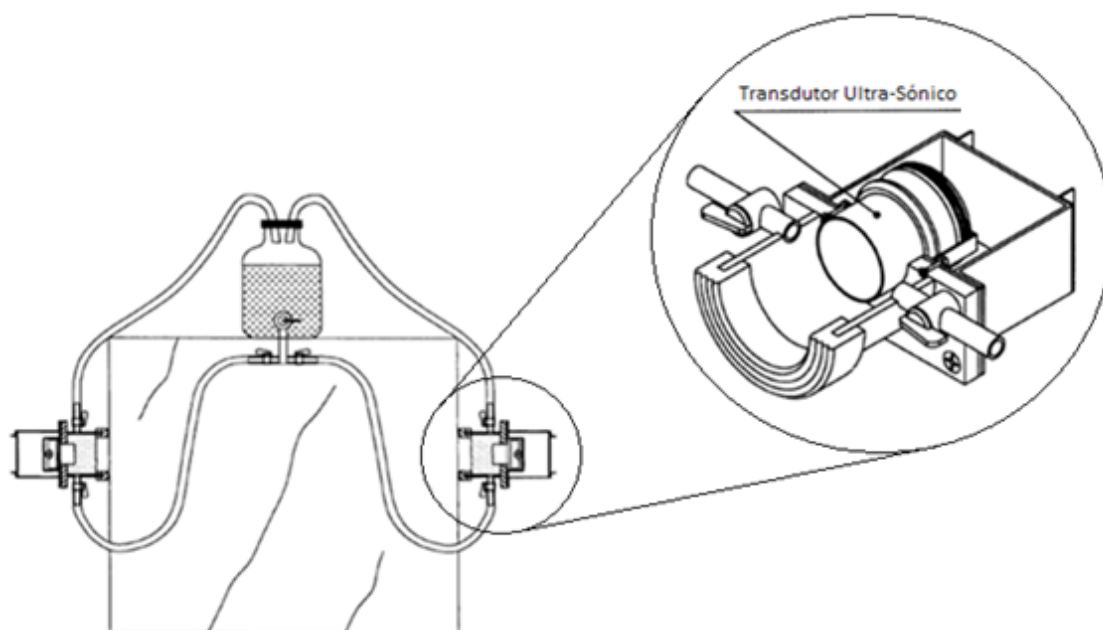


Figura 3-5 - Esquema do sistema elaborado, com pormenor do corte do elemento de adaptação aos transdutores (Bramanti e Bozzi, 2001).

Para um ensaio com resultados mais precisos, é frequentemente usada a técnica da imersão em água. Nesta técnica, tanto o transdutor como a amostra ficam imersos, o que torna mais fácil manter o acoplamento constante enquanto se manuseia o transdutor e a amostra, figura 3.6 (NDT, n.d.). No presente trabalho tal não era possível devido às dimensões das amostras, o que dificultava o seu manuseamento e imersão.

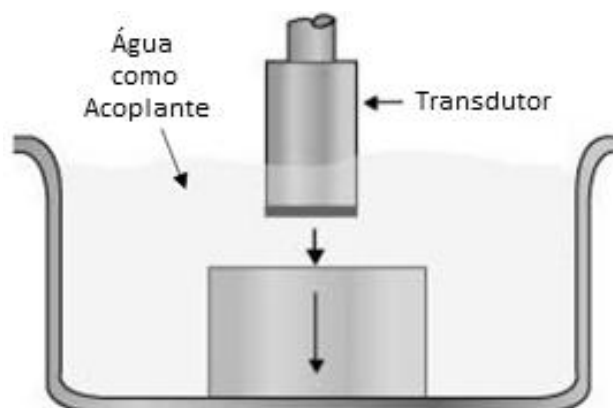


Figura 3.6 - Esquema do ensaio por imersão (adaptado de Andreucci, 2001)

Capítulo **4**

Metodologías

4. Metodologias

4.1. Introdução

A velocidade de uma onda sónica num material sólido depende da densidade e propriedades elásticas deste. Assim, a medição da velocidade de propagação de ultra-som num material, pode ser usada para indicar a sua qualidade e determinar as suas propriedades elásticas (James Instruments, 1996)

Para estabelecer a qualidade do material através da medição da velocidade das ondas de ultra-som (Equação 9), o equipamento efectua medições exactas do tempo de transmissão através da amostra em estudo.

$$V = \frac{L}{t} \quad (9)$$

Onde : V – velocidade de propagação da onda (m/s); L – comprimento percorrido (m); t – tempo de trânsito (s).

O equipamento de ultra-som dá indicação do tempo que o pulso emitido demora desde o transmissor até ao receptor, tanto em ensaios de imersão como em ensaios de contacto.

No presente trabalho foram realizados apenas ensaios de contacto para transmitir ondas longitudinais na amostra. Os transdutores usados também foram de contacto e o material acoplante foi a vaselina pela sua facilidade de aplicação e baixo custo.

As ondas longitudinais são relativamente mais fortes em comparação com as ondas de cisalhamento, na realidade estas últimas são normalmente geradas utilizando uma parte da energia das ondas longitudinais (NDT, n.d.). Deste modo, apenas foram realizados ensaios com ondas longitudinais.

4.1.1. Ensaio de Contacto

Os ensaios de contacto directo são conseguidos através da projecção de um feixe de som perpendicular à superfície em teste da amostra, para obter as reflexões do eco do pulso da superfície posterior ou da descontinuidade situada entre estas duas superfícies (Transmissão de Superfície), ou para obter uma diminuição no sinal

recebido quando o feixe de som é interrompido por uma descontinuidade (Transmissão Directa) (ASNT, 1981).

4.1.1.1. Transmissão de Superfície ou Indirecta

Na transmissão de superfície, um dos transdutores projecta um pulso de ondas longitudinais na amostra e o outro transdutor recebe os ecos tanto da superfície posterior, como da descontinuidade, mesmo que o transmissor não esteja directamente sobre as superfícies reflectoras, figura 4.1 (ASNT, 1981).

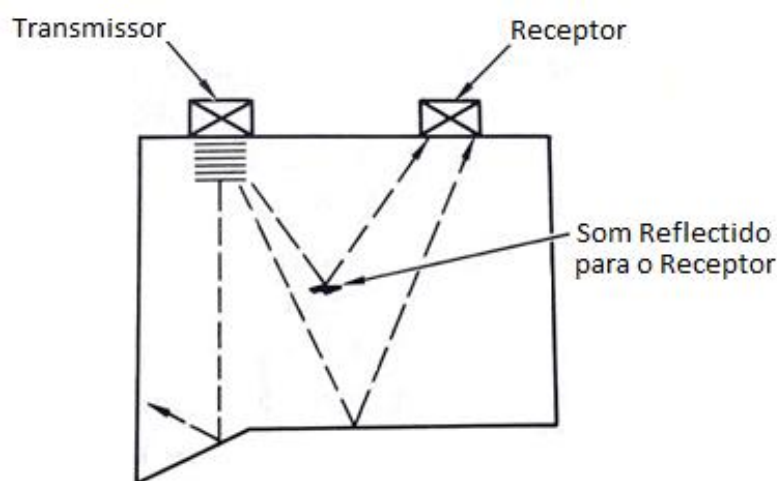


Figura 4.1 - Desenho esquemático do ensaio de contacto por transmissão de superfície. (ASNT, 1981)

Neste tipo de transmissão, os transdutores podem ser dispostos: tipo “Mapeamento”, onde a distância entre eles é sempre constante, mudando apenas o local da medição; tipo “T fixo e R móvel”, onde o transmissor é fixo numa posição e o receptor é movido a cada medição, aumentando a distância entre eles de forma progressiva; e tipo “Profundidade da Fractura”, onde a primeira medição é realizada com ambos os transdutores a uma mesma distância da fractura e a segunda medição com os transdutores afastados o dobro da primeira distância da fractura.

Tanto a disposição dos transdutores desta secção, como da secção 4.1.1.2, serão apresentados na tabela 4.1.

4.1.1.2. Transmissão Directa e Semi-Directa

Na transmissão directa e semi-directa, tal como na transmissão de superfície, um dos transdutores actua como transmissor e outro com receptor, mas agora colocam-se um de cada lado da amostra. Na transmissão directa colocam-se em faces opostas e na semi-directa em faces adjacentes da amostra. O transmissor projecta o feixe de som no material e este atravessa-o até à superfície oposta ou adjacente, onde é captado pelo receptor. Se no trajecto do feixe sonoro se encontrar alguma descontinuidade, esta vai causar uma diminuição na quantidade da energia do som que chega ao receptor, figura 4.2 (ASNT, 1981).

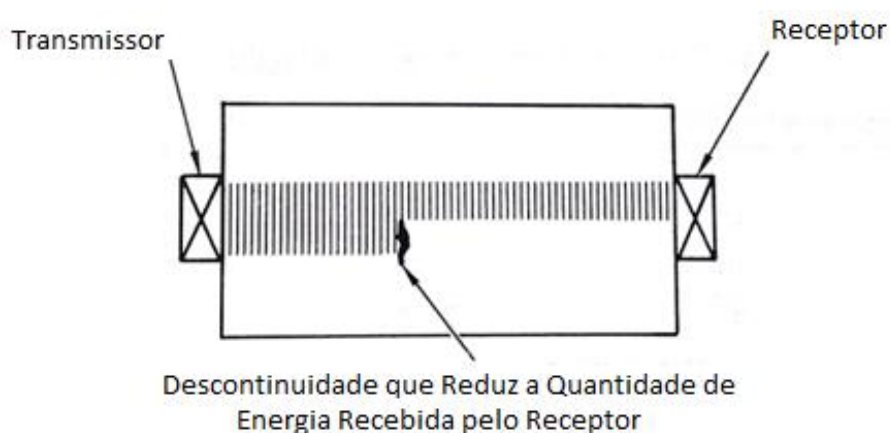


Figura 4.2 - Desenho esquemático do ensaio de contacto por transmissão directa.
(ASNT, 1981)

Krautkrämer e Krautkrämer, 1990 in Leong *et al.*, 2004, afirmam que este método é o mais adequado para medir a velocidade das ondas e a atenuação em geomateriais.

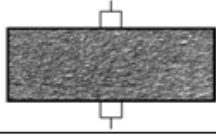
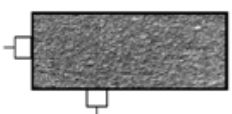
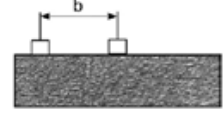
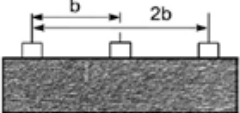
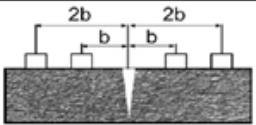
Segundo o manual de instruções operacionais do equipamento de ultra-som Pundit Lab, deve-se usar a disposição directa sempre que possível, pois esta permite a transmissão máxima do sinal entre os transdutores, uma vez que as ondas longitudinais se propagam essencialmente na direcção normal à face do transmissor.

4.2. Testes Preliminares

Numa primeira tentativa de conseguir caracterizar os blocos de rocha, detectar e localizar possíveis descontinuidades internas, experimentou-se os diferentes tipos de

transmissão com as várias disposições dos transdutores em alguns blocos de rochas carbonatadas. A tabela 4.1 mostra os esquemas possíveis e que foram efectuados.

Tabela 4.1 - Esquemas possíveis do tipo de transmissão e tipo de disposição dos transdutores realizados.

Ensaio de Contacto		
Tipo de Transmissão	Tipo de Disposição dos Transdutores	Esquema
Directo		
Semi-Directo		
Superfície	Mapeamento	
	T fixo e R móvel	
	Profundidade da Fractura	

Estes testes preliminares foram realizados essencialmente na serração Neves & Neves, situada em Vila Nova de Poiares no distrito de Coimbra, devido à proximidade das suas instalações. Também foram realizados alguns dos testes na empresa Eduardo Marques & Rosa Lda em Fátima no distrito de Santarém.

Na serração Neves & Neves foi possível encontrar vários tipos de blocos de rocha de diferentes formas, mas os testes incidiram em blocos de calcário e mármore. Nesta serração, os blocos de calcário são provenientes do Maciço Calcário Estremenho (MCE) e os blocos de mármore do Alentejo. Na empresa Eduardo Marques & Rosa Lda, apenas foi possível testar blocos calcários, também eles do Maciço Calcário Estremenho, dado que são extraídos em pedreira própria. Na figura 4.3, podem ver-se fotografias relativas a cada um dos blocos testados e referidos na tabela 4.1. Foram assinaladas a giz as localizações das descontinuidades visíveis.

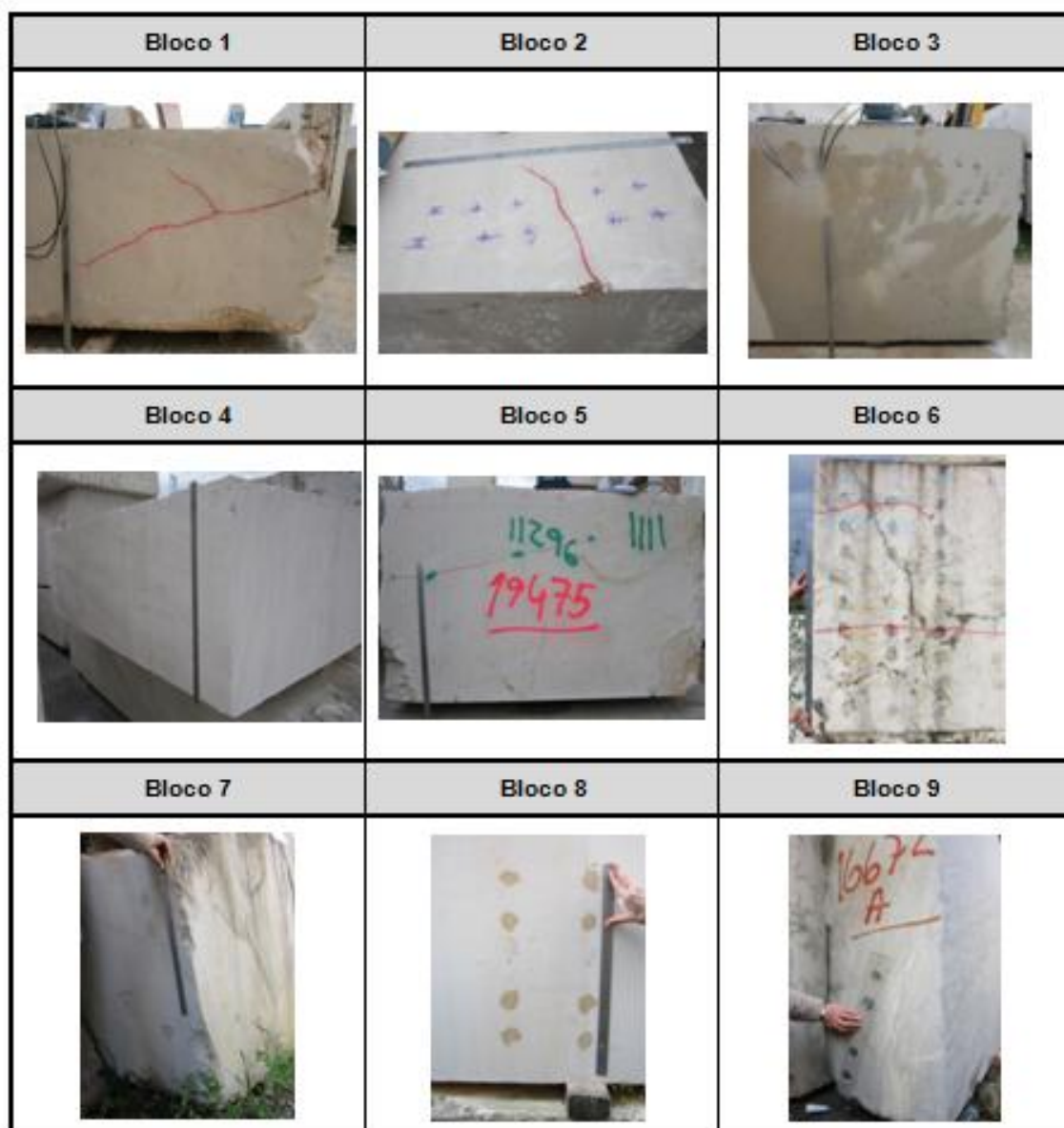


Figura 4.3 - Imagens dos blocos ensaiados nos teste preliminares.

A tabela 4.2 mostra de forma sintetizada a origem de cada bloco testado, o tipo de ensaio realizado e ainda uma avaliação do resultado obtido.

Tabela 4.2 - Síntese dos ensaios e resultados obtidos nos ensaios preliminares.

Ensaio Preliminares				
Bloco	Tipo de Material	Proveniência	Ensaio Efectuados	Resultados Obtidos
1	Calcário	MCE	Mapeamento (b=0,10 m)	**
			Profundidade da Fractura (b=0,10 m)	*
2	Calcário	MCE	Profundidade da Fractura (b=0,10 m)	-
			T fixo e R móvel (b=0,10 m)	**
3	Calcário	MCE	T fixo e R móvel (b=0,10 m)	**
			Profundidade da Fractura (b=0,10 m)	-
4	Calcário	MCE	Directo (extensão do trajecto=0,80 m)	***
			Directo (extensão do trajecto=2,84 m)	***
5	Calcário	MCE	Directo (extensão do trajecto=1,71 m)	-
			Mapeamento (b=0,10 m)	*
			Mapeamento (b=0,20 m)	-
			Semi-Directo (extensão do trajecto=0,47 m)	-
6	Mármore	Alentejo	Profundidade da Fractura (b=0,10 m)	-
			T fixo e R móvel (b=0,10 m)	**
7	Mármore	Alentejo	Directo (extensão do trajecto= 1,54 m)	***
			Semi-Directo (extensão do trajecto=0,28 m)	**
8	Calcário	MCE	Profundidade da Fractura (b=0,10 m)	*
9	Mármore	Alentejo	Profundidade da Fractura (b=0,10 m)	-

<u>Legenda:</u>	***	**	*	-
	Bom	Razoável	Mau	Impossível

Dos resultados obtidos é de salientar que no bloco 5, os erros e impossibilidades de medições podem ser causados pela elevada porosidade da rocha assim como da sua textura mais oolítica.

Já relativamente aos blocos 6 e 7, tendo o mármore uma formação mais cristalina do que o calcário, com porosidade geralmente mais baixa, os resultados obtidos foram tendencialmente de melhor qualidade.

Algumas das superfícies dos blocos testados, cortadas por meio de cordão diamantado, encontram-se com bastantes estrias, o que dificulta o acoplamento e impossibilita também a medição.

Os ensaios de profundidade da fractura não foram possíveis na grande maioria dos blocos testados, referindo o equipamento um erro de medição. Este erro deve-se ao facto de o tempo de trânsito t_1 ser inferior a metade do tempo de trânsito t_2 , o que resulta numa raiz quadrada negativa na equação 10. Este ensaio revelou-se apenas eficiente em descontinuidades com pouca profundidade e perpendiculares à superfície de ensaio. Quando o equipamento era capaz de fazer a medição, sem referir qualquer erro associado, a profundidade da fractura foi confirmada por uma equação que calcula a mesma, equação 10 (James Instruments, 1996),

$$c = b \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (10)$$

onde: c – profundidade da fractura (m); b – afastamento entre transdutores escolhido (m); t_1 – tempo de trânsito da onda até b (μ s); t_2 – tempo de trânsito da onda até $2b$ (μ s).

Devido ao número de blocos ensaiados, testes efectuados e ao tempo que alguns ensaios demoraram a ser aplicados, não foi possível a sua realização no mesmo dia. Dado este facto, as condições de temperatura e humidade dos blocos diferiram nos diferentes dias em que se deu continuidade aos ensaios. Por este motivo, efectuou-se medições pelo mesmo tipo ensaio no mesmo bloco nos vários dias. Dos valores obtidos, calculou-se o desvio-padrão que deu um resultado na ordem dos 6,5m/s, o que se pode considerar de influência insignificante a variação da temperatura e humidade para os resultados finais.

Após a realização de todos estes testes tornou-se necessária a escolha da metodologia mais eficaz e a escolha de um só bloco em que se pudesse fazer medições e respectivas caracterizações de todas as faces.

Dos resultados dos testes preliminares optou-se por efectuar apenas os ensaios de transmissão directa, transmissão de superfície com disposição dos transdutores para mapeamento e de T fixo e R móvel.

A escolha do bloco não foi fácil de se fazer, mas acabou-se por seleccionar o bloco designado como Bloco 4, assinalado na tabela 4.3. Este apresenta características que se pensou serem as necessárias para a realização de testes de pormenor, entre elas o facto de ter grandes dimensões e de ser homogéneo, ter faces com superfícies lisas, ter algumas descontinuidades visíveis, correspondendo à maioria dos blocos de

calcário geralmente extraídos. O facto de apresentar fracturas visíveis baixa o seu valor comercial e por este motivo encontra-se armazenado em parque próprio da pedreira e poderá permanecer neste local durante algum tempo, pelo menos o essencial à execução dos ensaios. O mesmo não aconteceria na serração Neves & Neves, pois lá o objetivo é a compra de blocos para os transformar, quer seja em chapas ou em obra acabada. Desta forma, o tempo de residência na serração é difícil de definir, dependendo essencialmente do interesse do cliente.

4.3. Plano de Ensaios e de Medições

Para atingir os objectivos do trabalho, foi levado a cabo uma série de ensaios que consistiu num conjunto de medições por diferentes métodos de transmissão das ondas de ultra-som e disposição dos transdutores, num bloco de calcário proveniente da pedreira Eduardo Marques & Rosa Lda, já referido na secção 4.2 como Bloco 4.

Dos testes preliminares acima referidos, foram escolhidos os três tipos que sugeriam uma informação mais precisa e de mais fácil interpretação. De cada um, foram recolhidas medições da velocidade de propagação das ondas e tempos percorridos, nas quatro faces verticais do bloco. Para tal foi seguido o manual de instruções operacionais do equipamento ultra-sónico Pundit Lab.

Antes de cada série de ensaios, o equipamento de ultra-som foi calibrado. Para a calibração e determinações de velocidade ultra-sónica no bloco, foi aplicada uma fina camada de vaselina, como meio acoplante, para evitar a presença de ar na interface transdutor/amostra.

Com o objetivo de facilitar as medições, traçou-se e numerou-se em cada uma das quatro faces do bloco uma grelha com linhas e colunas espaçadas entre si de dez centímetros, figura 4.3. O limite destas grelhas encontram-se a uma distância igual ou superior a 15 centímetros do limite de cada face do bloco, tentando considerar desta forma as condições de fronteira na transmissão do feixe de som.

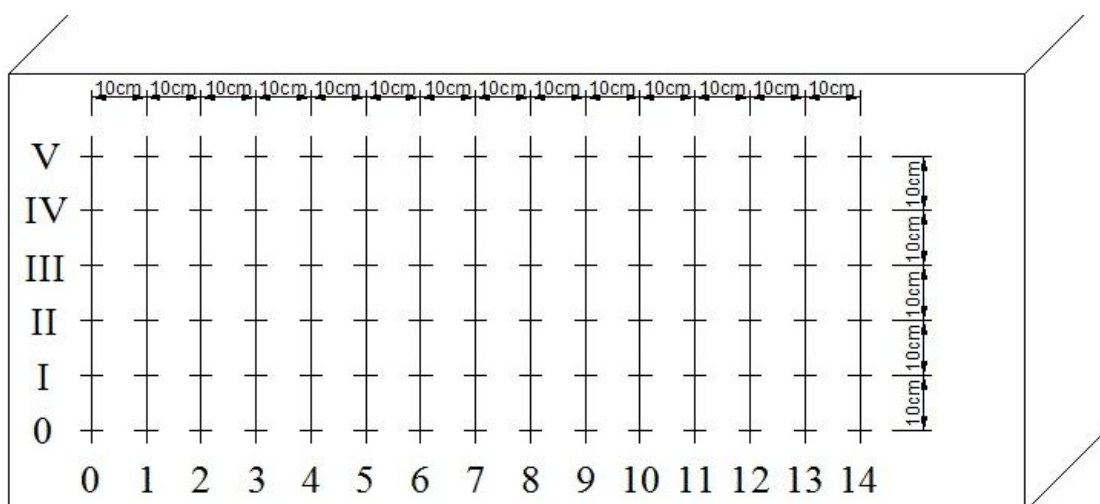


Figura 4.4 - Esquema do traçado de linhas e colunas efectuado em quatro faces do bloco.

4.3.1. Ensaio 1 (Ensaio de Contacto por Transmissão de Superfície - Mapeamento)

Para este ensaio, escolhe-se a seguinte opção no equipamento de ultra-som Pundit Lab: Medições compostas - Velocidade de superfície - Configurar o parâmetro b , distância em metros.

O ensaio 1 foi realizado com um espaçamento entre linhas de 10, 20 e 30 centímetros, como está representado nas figuras 4.4 a 4.6.

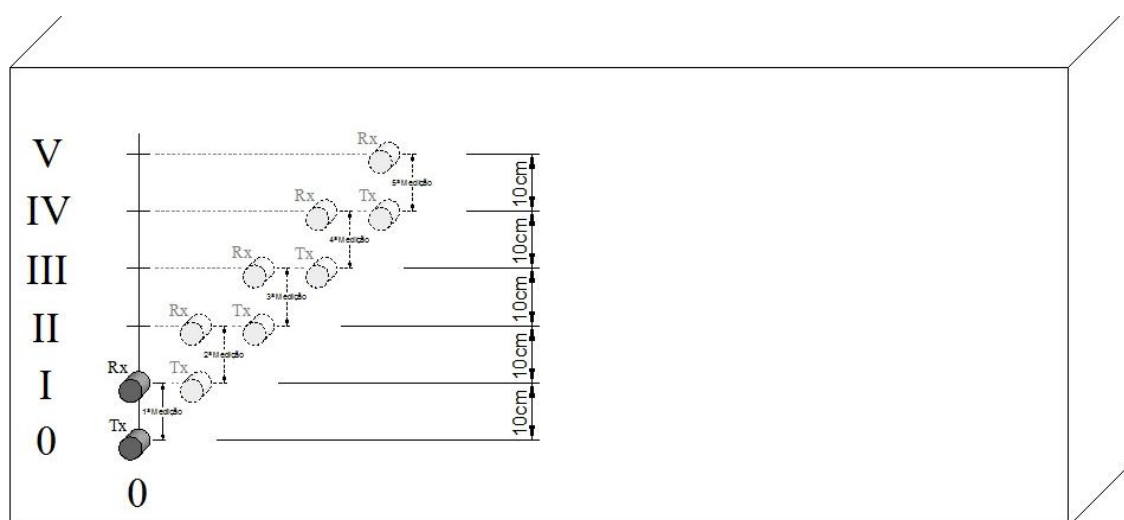


Figura 4.5 - Esquema do Ensaio 1 com espaçamento entre linhas de dez centímetros em uma das colunas.

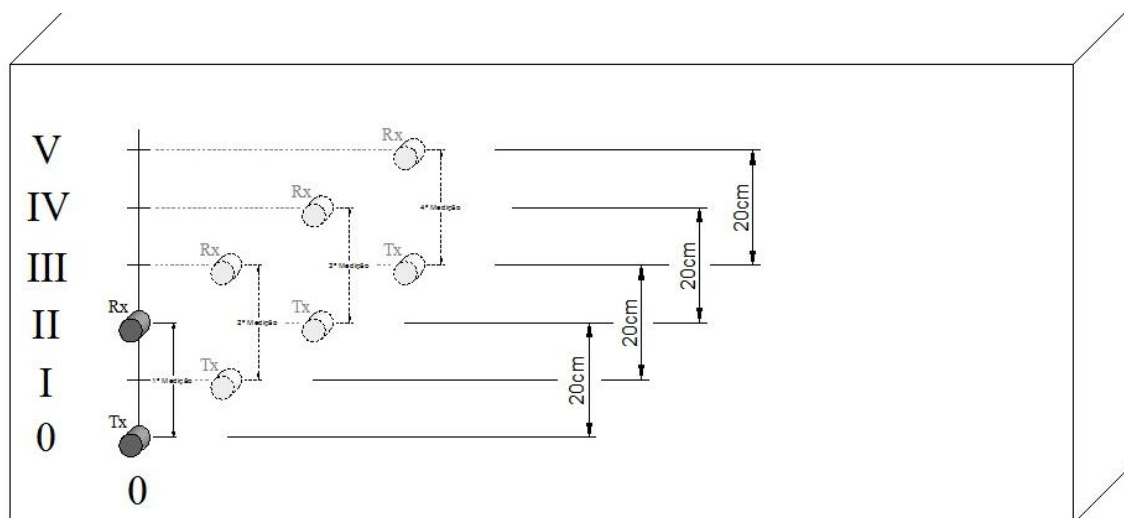


Figura 4.6 - Esquema do Ensaio 1 com espaçamento entre linhas de vinte centímetros em uma das colunas.

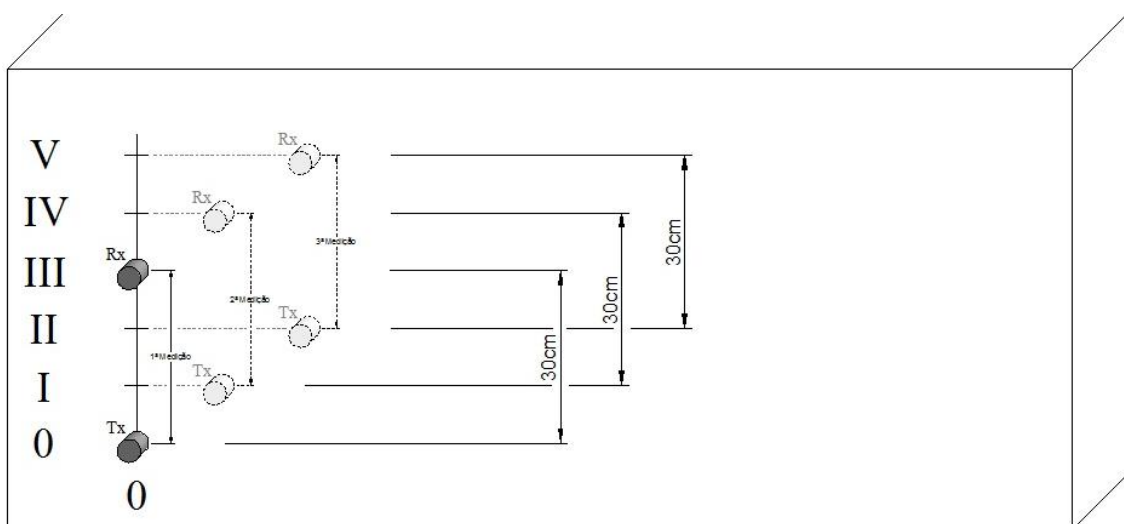


Figura 4.7 - Esquema do Ensaio 1 com espaçamento entre linhas de trinta centímetros em uma das colunas.

Com os resultados do conjunto das medições de cada coluna, é possível traçar um mapa de tempos e conseqüentemente de velocidades com o programa informático Golden Surfer V 8.01 e através da diferença de cores do mapa detectar e localizar possíveis discontinuidades.

Ao afastar a distância entre transdutores a profundidade de medição dentro do bloco também aumenta, dando origem a mapas da mesma face mas com profundidades diferentes.

No *software* Golden Surfer V 8.01, foi escolhido como algoritmo matemático de interpolação o *Kriging*, por ser o geralmente utilizado em dados geológicos e por apresentar boas relações com as características geológicas observadas no bloco. Com esta informação é também possível compor um modelo das quatro faces deste bloco em três dimensões, através do programa informático RockWorks V 15.

4.3.2. Ensaio 2 (Ensaio de Contacto por Transmissão de Superfície – T fixo e R móvel)

Para este ensaio, escolhe-se a seguinte opção no equipamento de ultrassom Pundit Lab: Medições compostas - Velocidade de superfície – Configurar o parâmetro *b*, distância em metros.

O ensaio 2 foi realizado nas linhas com um espaçamento crescente de dez centímetros, como está representado nas figuras 4.7 e 4.8. Este foi efectuado no sentido da esquerda para a direita (sentido directo) em todas as linhas e no sentido da direita para a esquerda (sentido inverso) em parte das linhas.

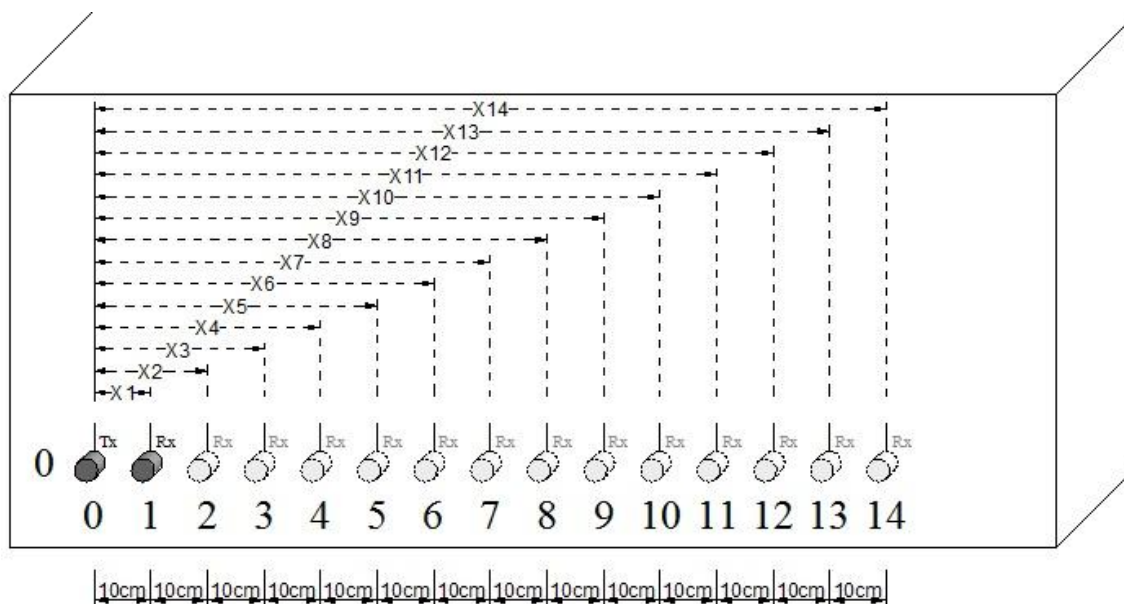


Figura 4.8 - Esquema do Ensaio 2 no sentido da esquerda para a direita em uma das linhas com afastamento progressivo entre transdutores de dez centímetros.

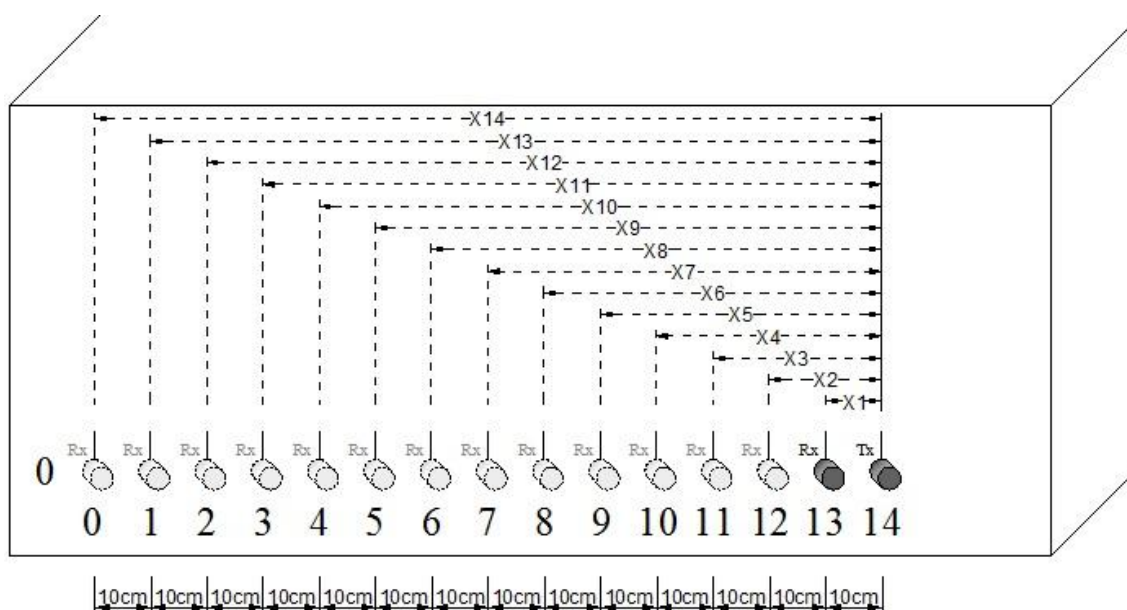


Figura 4.9 - Esquema do Ensaio 2 no sentido da direita para a esquerda (inverso) em uma das linhas com afastamento progressivo entre transdutores de dez centímetros.

Com os resultados das medições de cada linha, é possível traçar um gráfico tempo/distância onde é possível localizar e por vezes determinar a profundidade de descontinuidades internas.

4.3.3. Ensaio 3 (Ensaio de Contacto por Transmissão Directa)

Para este ensaio, escolhe-se a seguinte opção no equipamento de ultra-som Pundit Lab: Medições Básicas – Configurar o parâmetro extensão do trajecto em metros.

O ensaio 3 foi realizado com um espaçamento entre linhas e colunas de vinte centímetros, como está representado na figura 4.9, da face A para a face C e da face D para a face B.

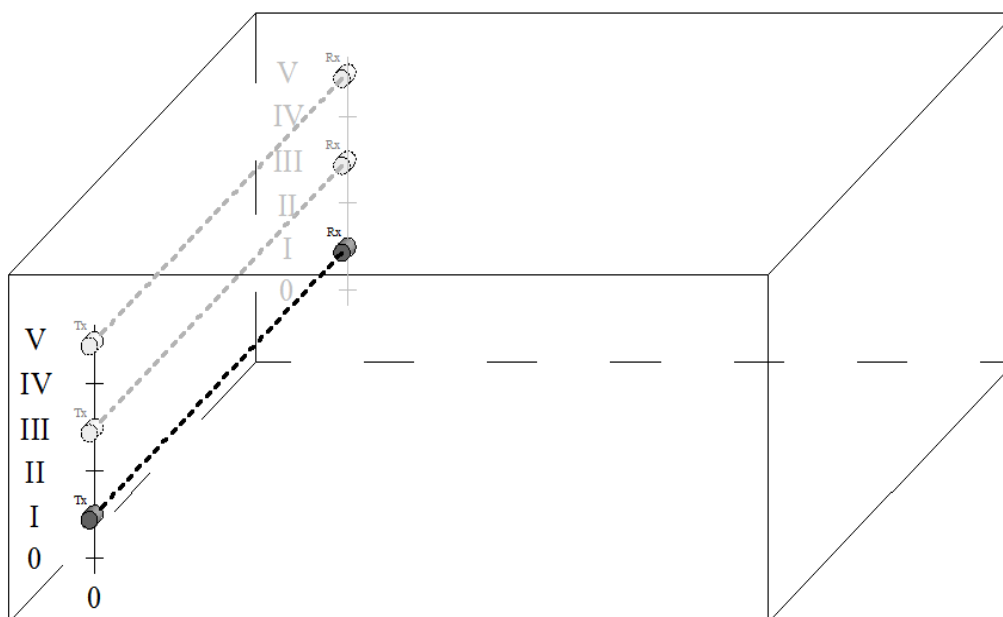


Figura 4.10 - Esquema do Ensaio 3 em uma das colunas com medições afastadas de vinte centímetros.

Tal como na secção 4.3.1, e através do programa informático Golden Surfer V 8.01 é também possível traçar um mapa de velocidades com os resultados do conjunto das medições de cada coluna. Neste ensaio, como os transdutores se colocam em faces opostas do bloco, o mapa resultante vai se localizar a meio da distância entre as faces opostas do bloco.

No *software* Golden Surfer V 8.01, voltou-se a escolher o *Kriging* como algoritmo matemático de interpolação.

Capítulo **5**

Caracterização do Material

5. Caracterização do Material

5.1. Enquadramento Geográfico

O bloco de rocha ornamental sujeito a um estudo intensivo por meio do ensaio ultra-sónico pertence à Pedreira com número de cadastro EM&R 6478, da Empresa Eduardo Marques & Rosa Lda. Esta localiza-se no distrito de Santarém, concelho de Ourém, freguesia de Fátima e lugar Valinho de Fátima (Figura 5.1). Está inserida na folha número 309 da Carta Militar de Portugal, à escala 1:25000 (Série M888) (Figura 5.2).

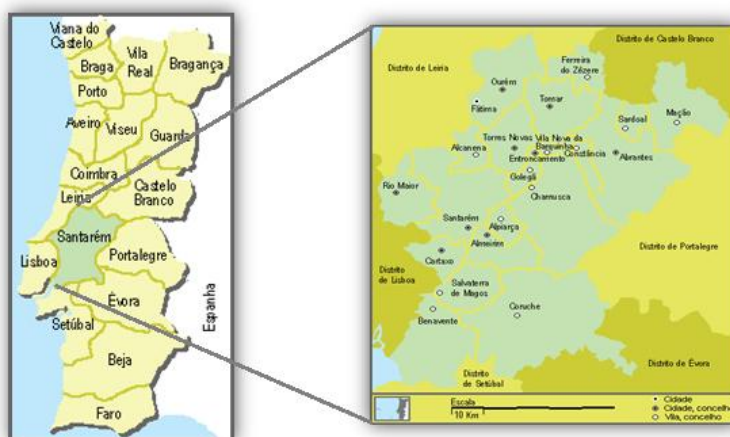


Figura 5.1 - Mapa de Portugal e do Distrito de Santarém. (www.mapadeportugal.net/indicedistritos.asp)

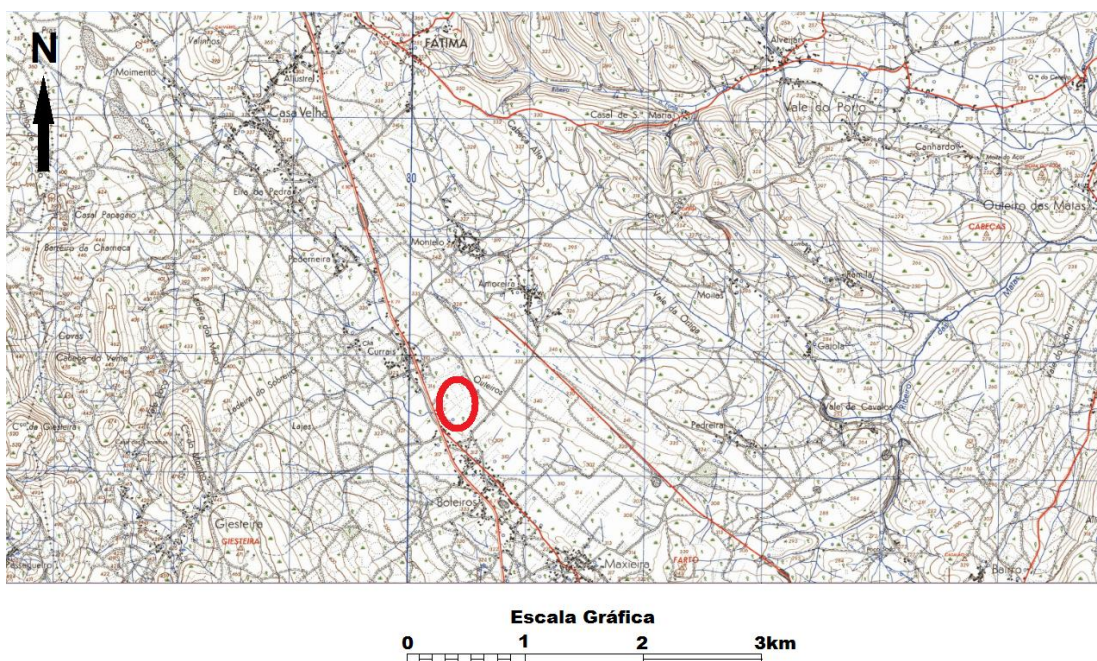


Figura 5.2 - Localização geográfica da pedreira (extracto da Folha 309 da Carta Militar de Portugal, na escala 1:25000).

5.2. Enquadramento Geológico

A empresa Eduardo Marques & Rosa Lda, extrai em pedra própria blocos de rocha ornamental, essencialmente calcária, denominados Creme Valinho, tipo Moleanos ou Moca Creme. A área de exploração da pedra é constituída por uma formação litológica do Caloviano, denominada na Carta Geológica de Portugal, Folha 27-A Vila Nova de Ourém na escala 1:50000, como Calcários de Moleanos, do topo do Jurássico Médio (Figura 5.3). Esta formação geológica que compõem a área de exploração da pedra faz parte dos afloramentos do Membro de Moleanos (topo da Formação de Santo António-Candeeiros) nas proximidades de Fátima, que formam uma mancha em forma crescente com convexidade para Sul, enquadrada pelas Serras de Aire e Candeeiros e Planalto de Santo António (Azerêdo, 2007).

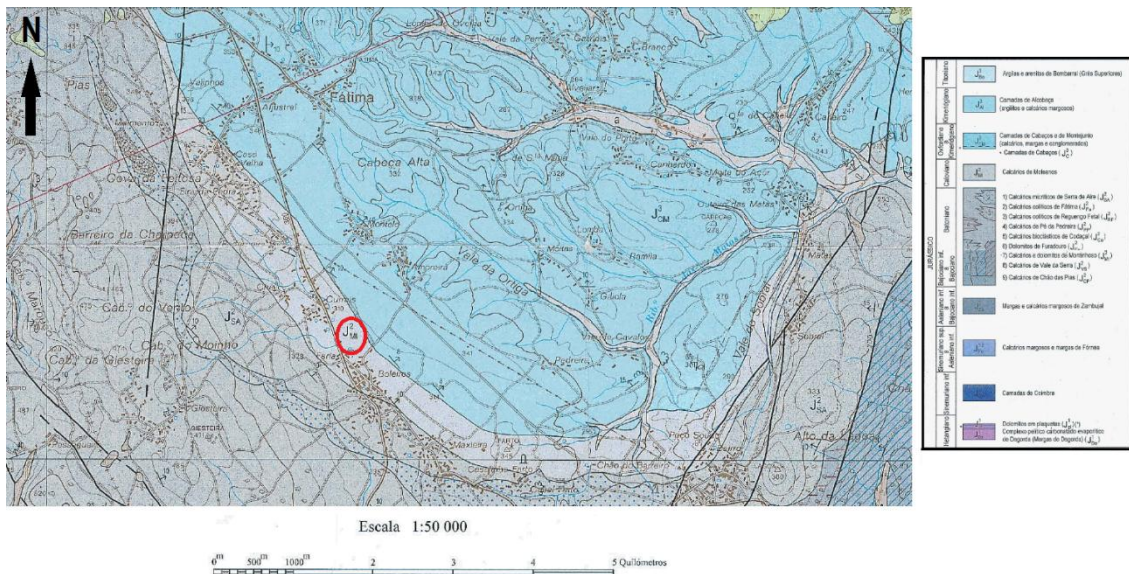


Figura 5.3 - Extracto da Carta Geológica de Portugal (Folha 27-A Vila Nova de Ourém na escala 1:50000) da localização da Pedreira Eduardo Marques & Rosa Lda.

Martins, 1949 in Carvalho *et al.*, 2012, define o Maciço Calcário Estremenho (MCE) como uma região do território português com cerca de 900 Km², na qual tem decorrido uma intensa actividade extractiva de rochas para fins ornamentais.

Segundo Martins, 1949 in Azerêdo, 2007, o MCE, no qual se integra o Parque Nacional das Serras de Aire e Candeeiros, corresponde ao grupo de relevos do centro-oeste de Portugal e representa ainda uma parte fundamental da história geológica da Bacia Lusitânica.

De acordo com mesmo autor este maciço apresenta uma forma rômbrica e alongada na direcção NE-SW, que se encontra limitada a N e NE pelas localidades de Batalha e de Vila Nova de Ourém, (abrangida pela já referida Folha 27-A da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000), a E e SE pelas localidades de Torres Novas e Alcanena, a S pela localidade de Rio Maior e a W pela localidade de Alcobaça.

As formações carbonatadas do Jurássico Médio, sobre as quais incide a constituição do Maciço Calcário Estremenho, encontram-se sobretudo nas zonas elevadas. São compostas maioritariamente por calcários, dos quais fazem parte os calcários dolomíticos, dolomitos e na parte inferior da série calcários margo-argilosos e margas (Azerêdo, 2007).

No topo da série litostratigráfica do Jurássico Médio deste maciço encontra-se a Formação de Santo António-Candeeiros, constituída pelos membros de Moleanos, de Pé da Pedreira e de Codaçal, que representam o Batoniano Inferior e Superior e parte da base do Caloviano, figura 5.4 (Azerêdo, 2007).

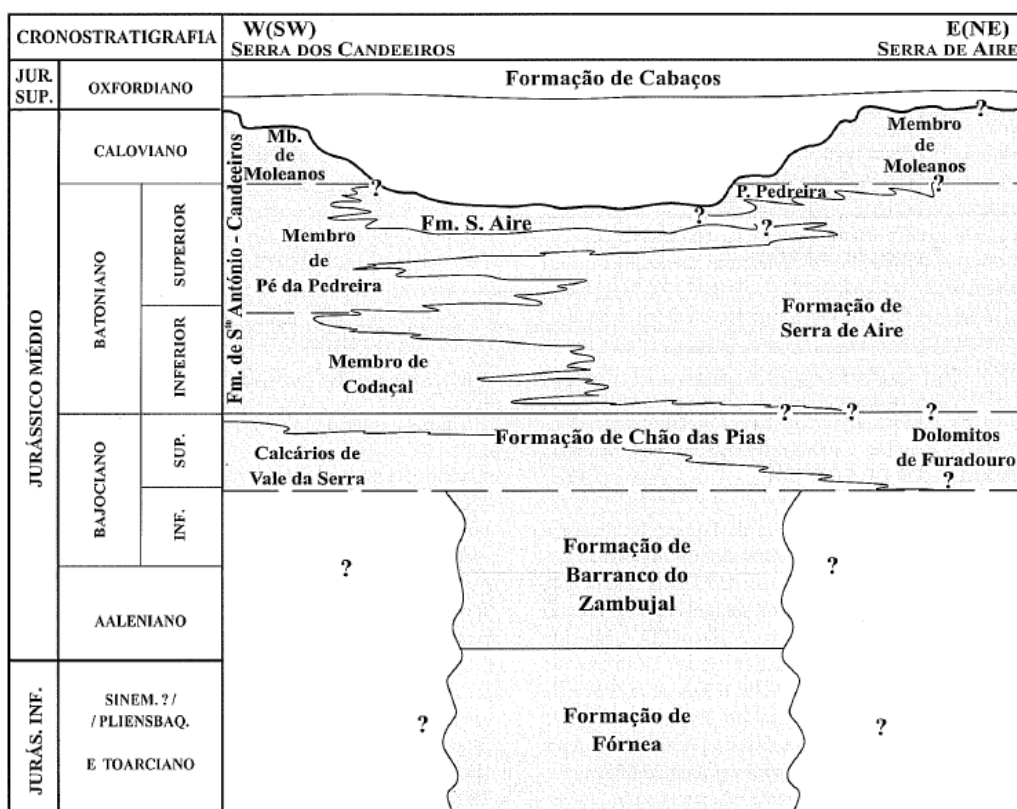


Figura 5.4 - Síntese litostratigráfica (adaptado de Azerêdo, 2007).

A Formação de Santo António-Candeeiros tem uma espessura máxima de 500 metros e é composta por calcários, cuja deposição foi por hidrodinamismo elevado, dando origem a calcários oolíticos e bioclásticos com estratificação oblíqua de vários tipos, calcários intra/lito/bioclásticos maciços ou gradados, calcários intrapelóidicos, biostromas de coraliários e algas.

No topo da Formação de Santo António-Candeeiros encontra-se o Membro de Moleanos (Caloviano) com cerca de 150 m de espessura. Estes são calcários de tons claros, essencialmente oolíticos e biocalciclásticos, de grão médio a grosseiro, com cimento esparritico e evidentes laminações sedimentares, em particular estratificação entrecruzada (Eduardo Marques & Rosa Lda, comunicação pessoal, Maio 2013) (Figura 5.5).

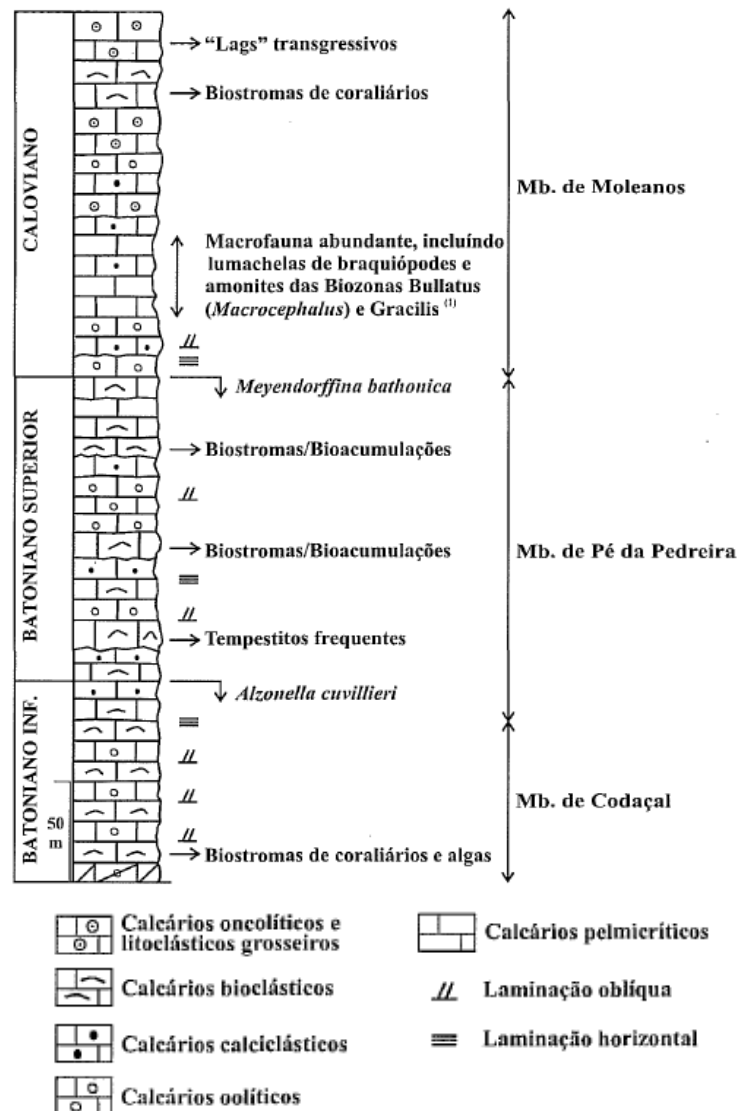


Figura 5.5 - Coluna litostratigráfica da Formação de Santo António-Candeeiros (adaptado de Azerêdo, 2007).

Mais informações sobre o material, como a sua composição química e características físico-mecânicas são referidas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Ficha Técnica do Calcário de Moleanos (adaptado de Eduardo Marques & Rosa Lda., comunicação pessoal, Maio 2013).

Ficha Técnica do Calcário de Moleanos	
Análise Química	
CaO	56,07%
MgO	0,37%
Fe ₂ O ₃	0,07%
Na ₂ O	0,03%
K ₂ O	0,01%
MnO	n.d.
CO ₂	44,00%
Características Físico-Mecânicas	
Resistência Mecânica à Compressão	79 MPa
Resistência Mecânica à Flexão	11,8 MPa
Massa Volúmica Aparente	2450 kg/m ³
Absorção de Água à Pressão Atmosférica Normal	3,5%
Porosidade Aberta	9,4%

Capítulo **6**

Recolha e Análise de Dados

6. Recolha e Análise de Dados

6.1. Identificação do Bloco

Na figura 6.1 encontra-se representado um esquema da forma e dimensões do bloco no qual foi realizado o maior conjunto de ensaios. Este conjunto de ensaios foi apenas possível de se efectuar nas quatro das faces verticais do bloco, representadas como A, B, C, e D.

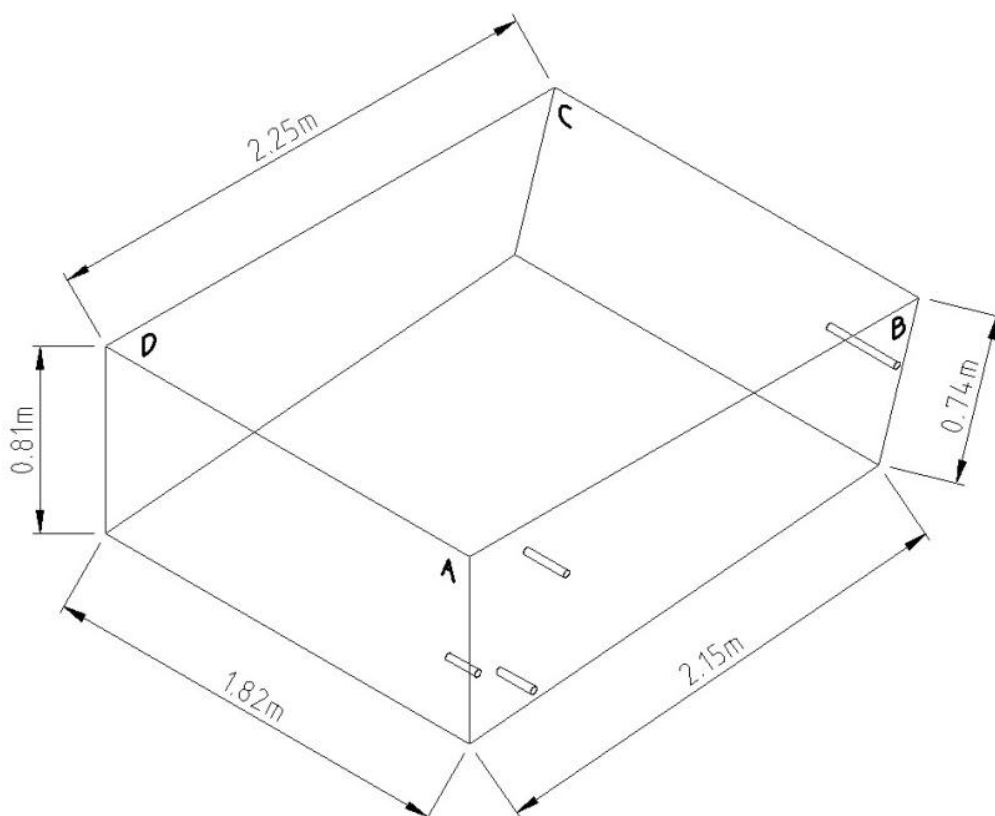


Figura 6.1 - Desenho esquemático do Bloco 4 (bloco 2064) da Pedreira Eduardo Marques & Rosa Lda.

Nas figuras 6.2 a 6.5, apresenta-se uma fotografia de cada uma das faces em estudo, com respectivas medidas, grelhas de apoio aos ensaios e ainda as fracturas visíveis. Será de evidenciar que o bloco tem uma estratificação entrecruzada e que as faces A e C se encontram cortadas contra esta estratificação e que as faces D e B se encontram cortadas a favor desta.

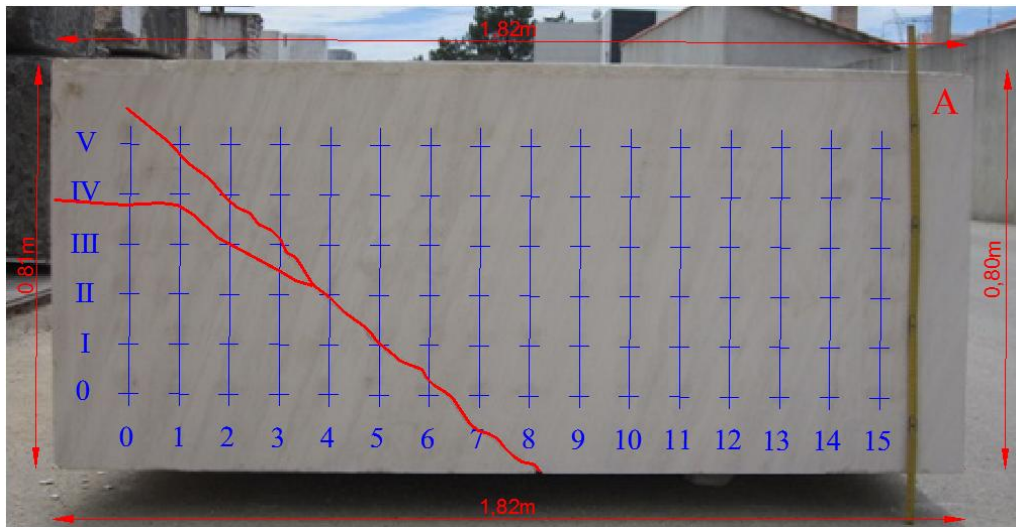


Figura 6.2 - Fotografia da Face A com respectivas medidas, esquema da grelha de apoio às medições e fractura visível evidenciada.

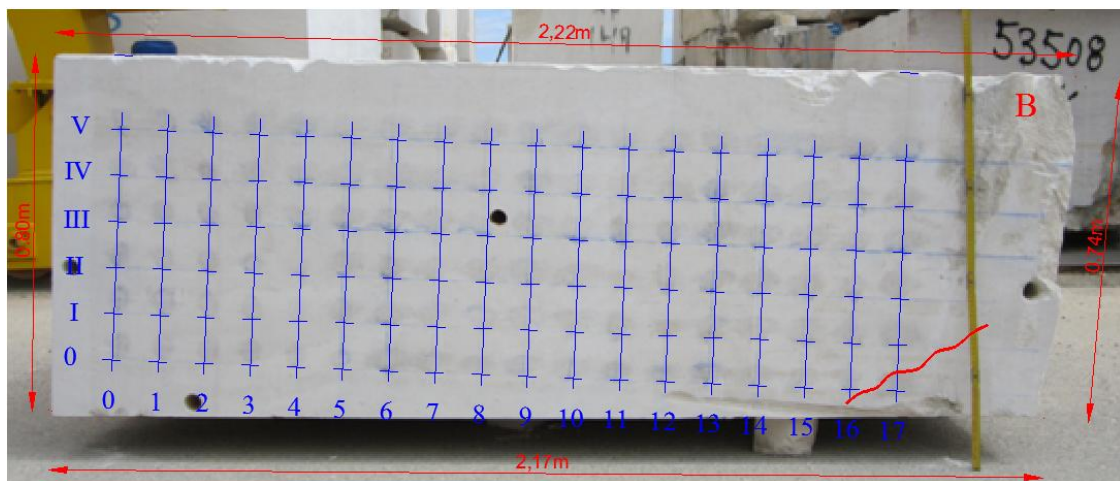


Figura 6.3 - Fotografia da Face B com respectivas medidas, esquema da grelha de apoio às medições e fractura visível evidenciada.

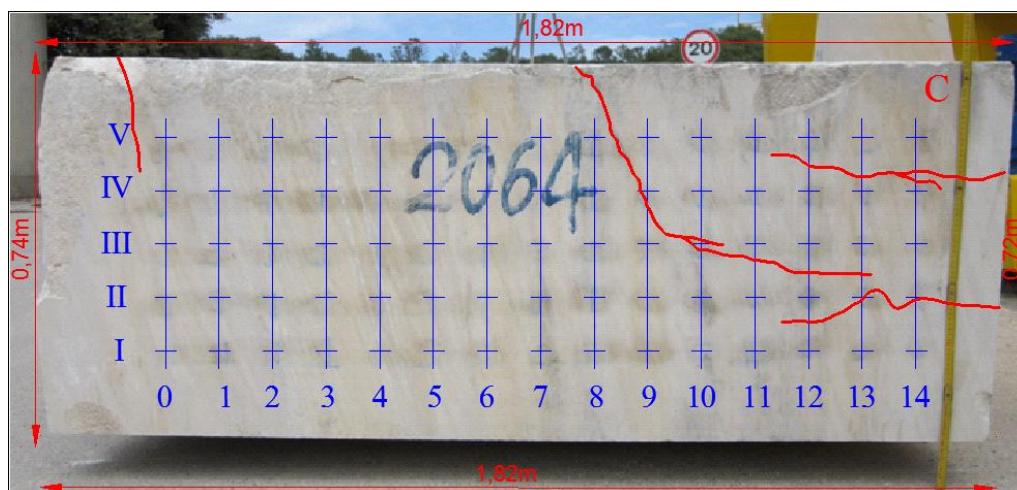


Figura 6.4 - Fotografia da Face C com respectivas medidas, esquema da grelha de apoio às medições e fracturas visíveis evidenciadas.

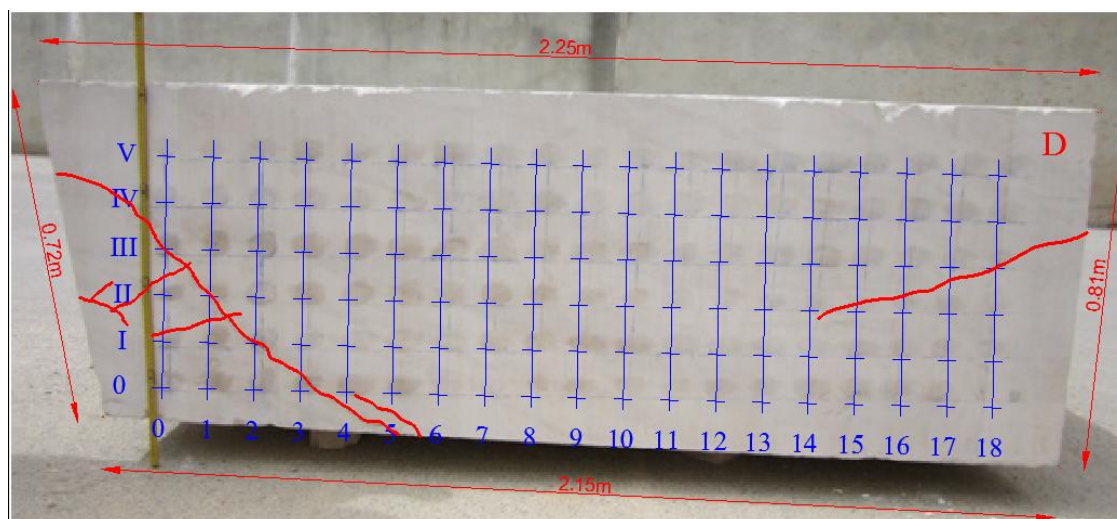


Figura 6.5 - Fotografia da Face D com respectivas medidas, esquema da grelha de apoio às medições e fracturas visíveis evidenciadas.

No total foram realizadas 771 leituras em Mapeamento, cujo histograma se apresenta na figura 6.6. Conforme pode ser observado as classes de valores com maior representatividade vão de 2000m/s a 6000m/s, o que corresponde a valores médios observados em calcários.

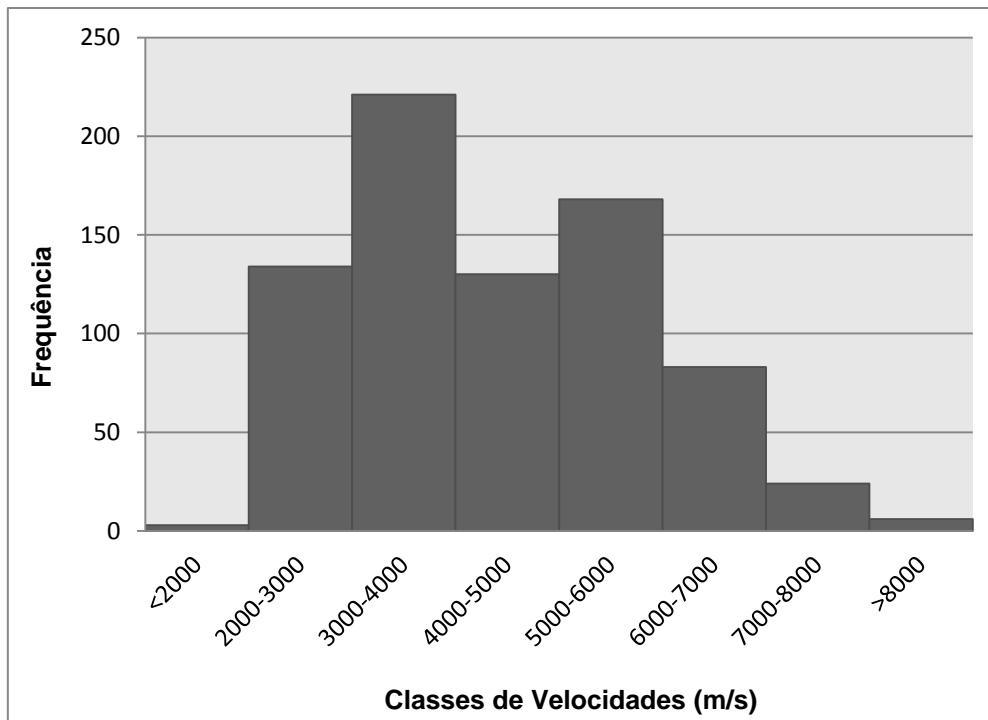


Figura 6.6 - Histograma de valores das medições obtidas por Mapeamento.

6.2. Análise e Interpretação de Resultados

Das quatro faces sujeitas a um estudo exaustivo, escolheu-se as duas mais representativas e sobre as quais vai recair uma análise mais pormenorizada. Para a interpretação destas faces apenas se considerou os Ensaio 1 e 2 (ver secção 4.3.1 e 4.3.2).

Os resultados dos ensaios 1 e 2 das restantes duas faces, foram processados e podem ser consultados no Anexo I.

6.2.1. Face A

A face A tem cerca de 1,80 por 0,80m, onde foi possível traçar dezasseis colunas (de 0 a 15) e seis linhas (de 0 a V). Esta apresenta uma fractura visível que a atravessa na diagonal.

Na figura 6.7 apresenta-se o resultado da ensaio 1, onde os mapas (a), (b) e (c) correspondem respectivamente ao afastamento entre transdutores de 10, 20 e 30cm (ver figuras 4.4 a 4.6).

No conjunto dos três mapas, a profundidades diferentes, é possível identificar-se a zona da fractura visível, pois corresponde a zonas de velocidades mais baixas.

No mapa (a), que representa a distribuição de valores de velocidade de propagação mais próximos da superfície é possível estabelecer uma relação directa com o que se observa na face. Neste caso, as zonas valor de velocidade entre 5000 e 6000m/s, identificada como (i), correspondem a zonas de granulometria mais homogénea e fina. As zonas com maior valor de velocidade entre 6500 e 7500m/s, identificada como (ii), correspondem a oólitos mais grosseiros com uma matriz muito fina a preencher os espaços intergranulares, diminuindo a respectiva porosidade.

As variações de cor (geralmente designadas por “vergadas”) observadas nas faces cortadas contra a estratificação (face A e C) não apresentam relação directa com os valores de velocidade das ondas ultra-sónicas medidas, correspondendo apenas a variações na estratificação entrecruzada.

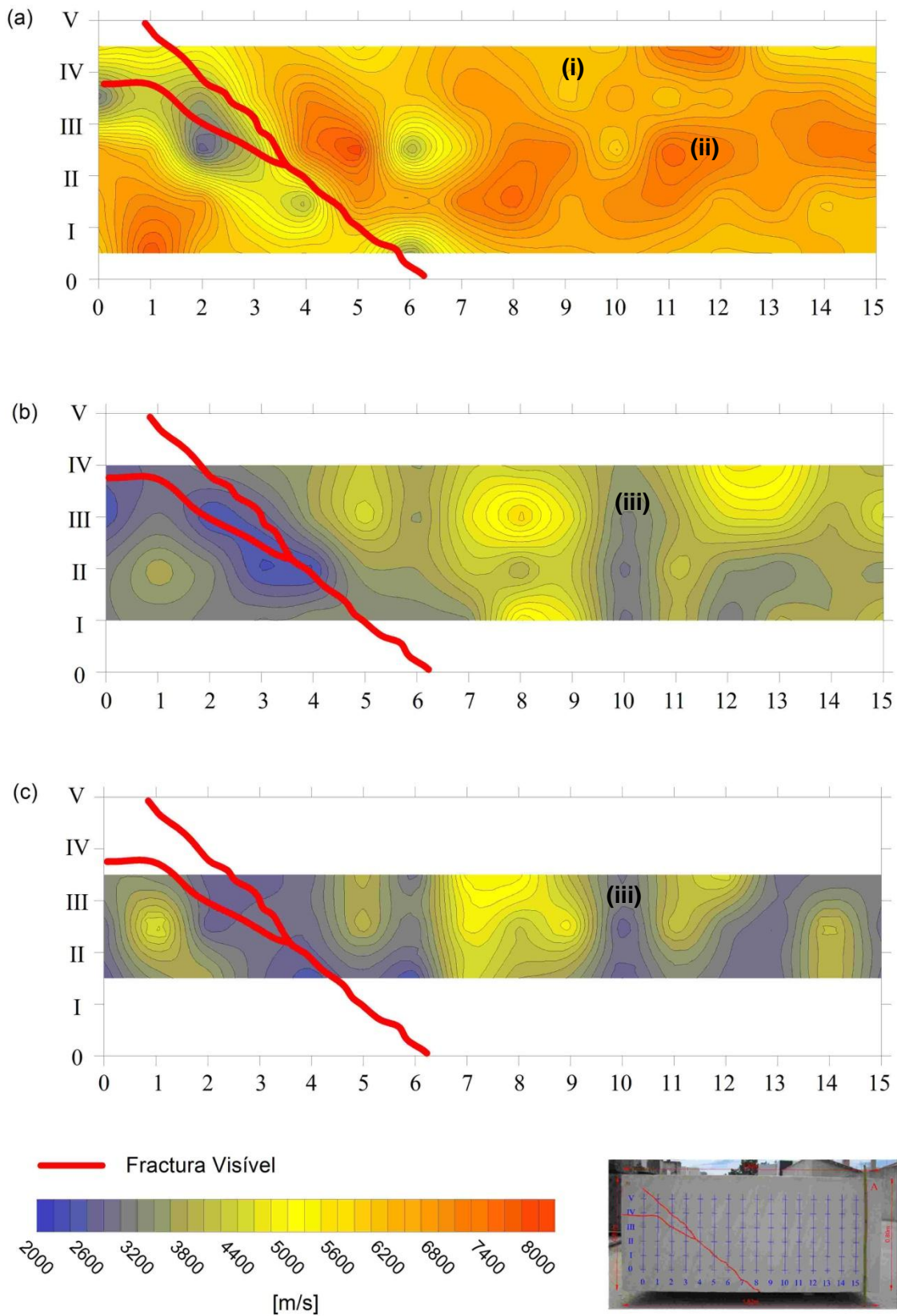


Figura 6.7 - Resultados do ensaio 1 na Face A com respectiva grelha de apoio às medições e fractura evidenciada.

Na figura 6.8, referente ao ensaio 2 (sentido directo, ver figura 4.7), efectuado na linha I, a informação relativa à presença da fractura é confirmada. A diferença entre a inclinação das duas linhas de tendência indicia a presença de uma descontinuidade entre as distâncias 40 e 50cm, que correspondem às colunas 4 e 5 da figura 6.7. A velocidade obtida pela equação da primeira recta é de 5160m/s e de 2404m/s na segunda recta. No ensaio 2 a profundidade de investigação, varia de forma consecutiva com a distância entre transdutores. Assim, o valor da velocidade de propagação da primeira recta pode ser comparável com os valores de velocidade do mapa (a), enquanto a velocidade da segunda recta será mais correctamente comparada com as velocidades do mapa (c).

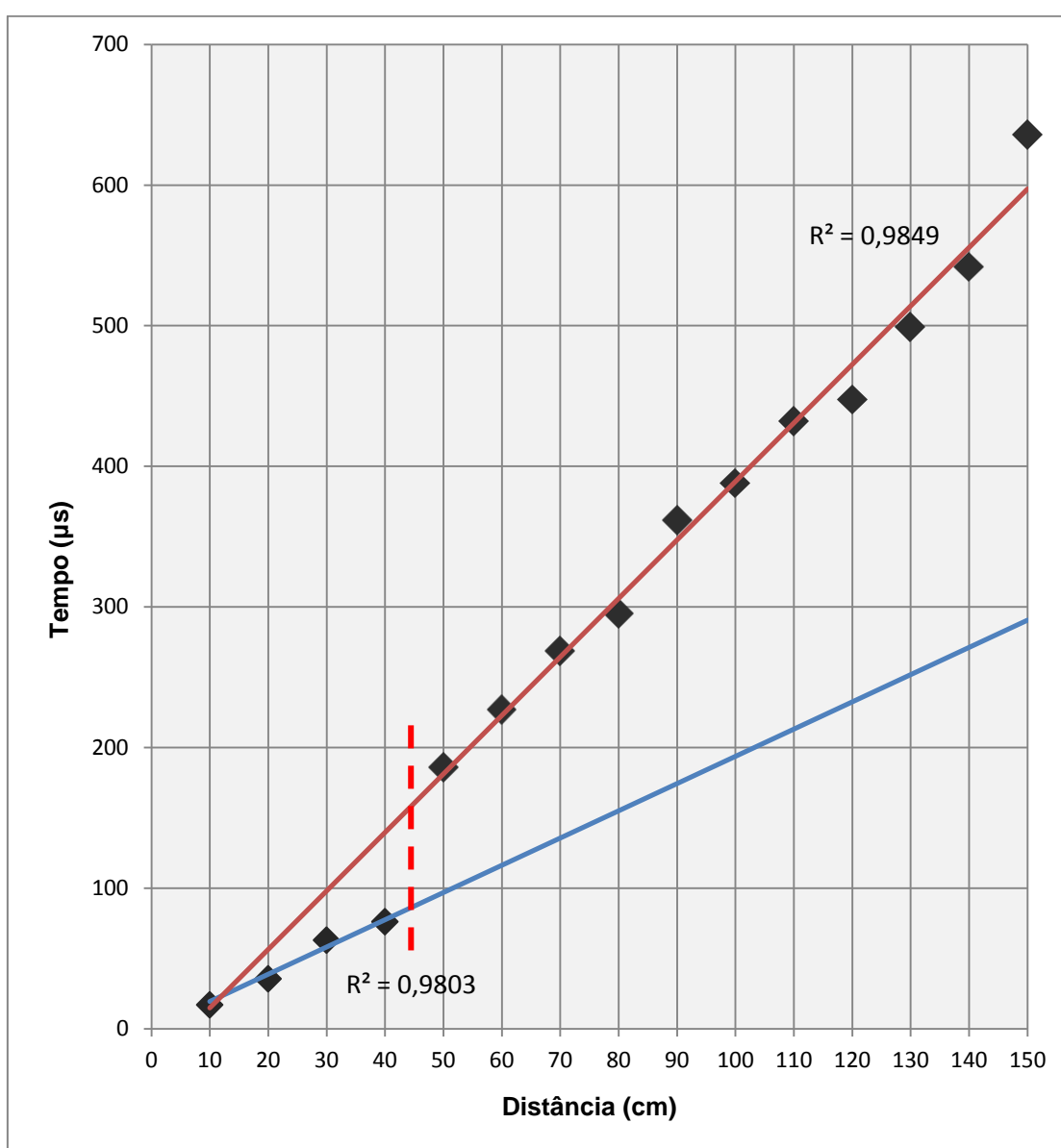


Figura 6.8 - Resultado do ensaio 2 (sentido directo), linha I, na Face A.

Na figura 6.9, referente ao ensaio 2 (sentido inverso, ver figura 4.8), efectuado na linha II, a informação quanto à presença da fractura já não se pode confirmar, pois a esta distância entre transdutores a profundidade de investigação poderá já ser distinta da localização da fractura. Mas nesta figura é possível confirmar-se o alinhamento vertical observado nos mapas (b) e (c) da figura 6.7, designado como (iii). A diferença entre as inclinações das três linhas de tendência indicia então, uma possível descontinuidade referente à segunda recta, entre as distâncias 40 e 60cm, que correspondem às colunas 9 e 11 da figura 6.7.

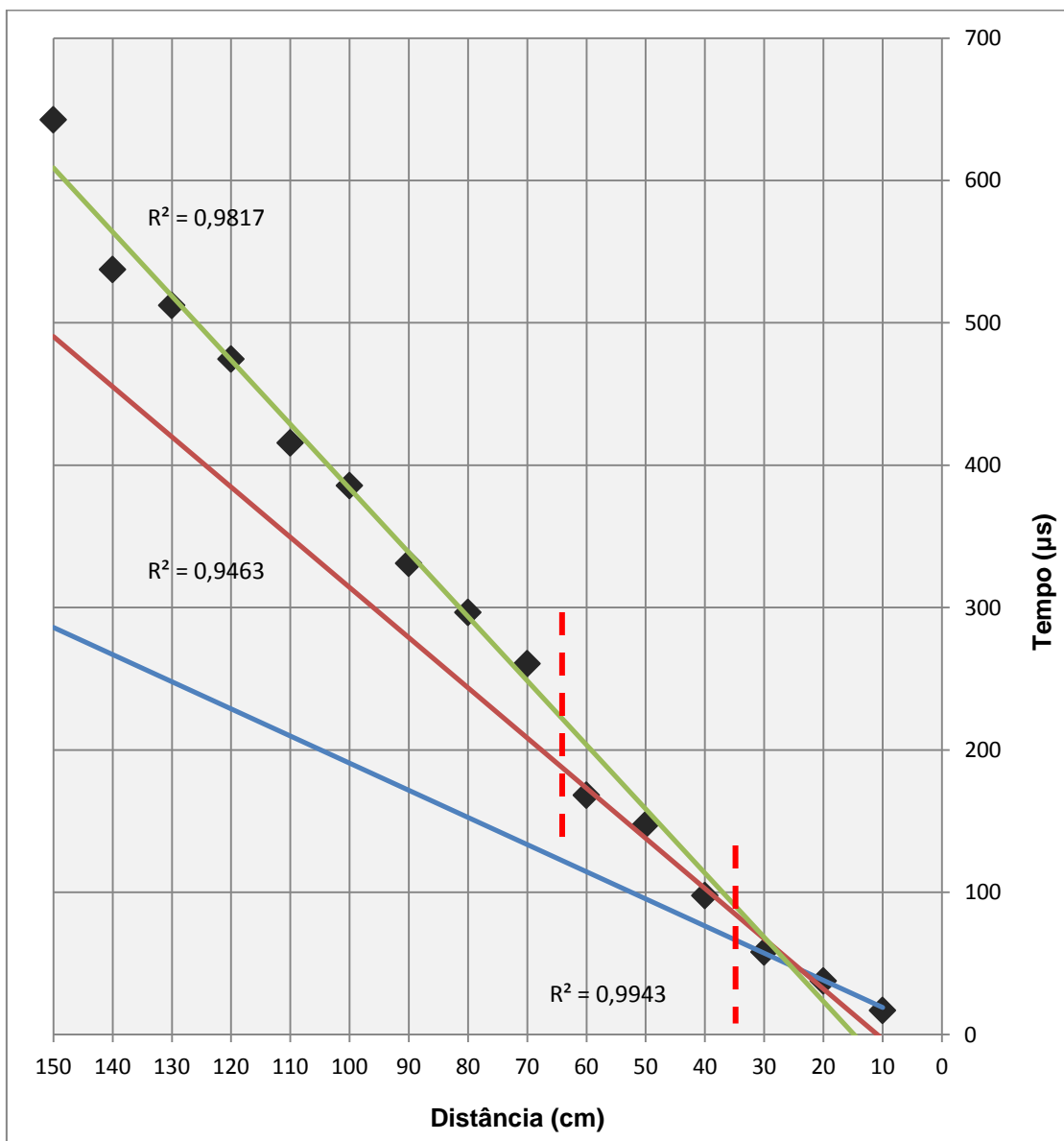


Figura 6.9 - Resultado do ensaio 2 (sentido inverso), linha II, na Face A.

6.2.2. Face B

A Face B tem cerca de 2,20 por 0,80m, onde foi possível traçar dezoito colunas (de 0 a 17) e seis linhas (de 0 a V). Esta face apresenta uma pequena fractura visível, no canto inferior direito da área de teste. Tem a particularidade de possuir quatro furos de sondagem com cerca de vinte centímetros de profundidade.

Na figura 6.8 apresenta-se o resultado do ensaio 1, onde os mapas (a), (b) e (c) correspondem respectivamente ao afastamento entre transdutores de 10, 20 e 30cm (ver figuras 4.4 a 4.6).

Tal como na face A, é possível fazer-se uma comparação do mapa (a), correspondente à menor profundidade de investigação, com o observado na superfície do bloco. Assim, e como já foi referido na secção 6.2.1, zonas de velocidade de propagação entre os 5000 a 6000m/s correspondem a zonas de granulometria mais fina e as zonas de velocidade de propagação entre os 6500 a 7500m/s correspondem a zonas de material mais grosseiro, mas com matriz mais fina. Nesta face, estando cortada segundo um sentido paralelo à estratificação, corta os vários leitos, observando-se melhor a sua composição.

Pode observar-se um alinhamento vertical de velocidades de propagação mais baixas, na ordem dos 3000 a 3500m/s, junto da coluna 12 e assinalado como (iv), no conjunto dos três mapas, mesmo no de maior profundidade de investigação, mapa (c). Este alinhamento vertical não é visível nesta face, mas pode ser observado na superfície do topo do bloco.

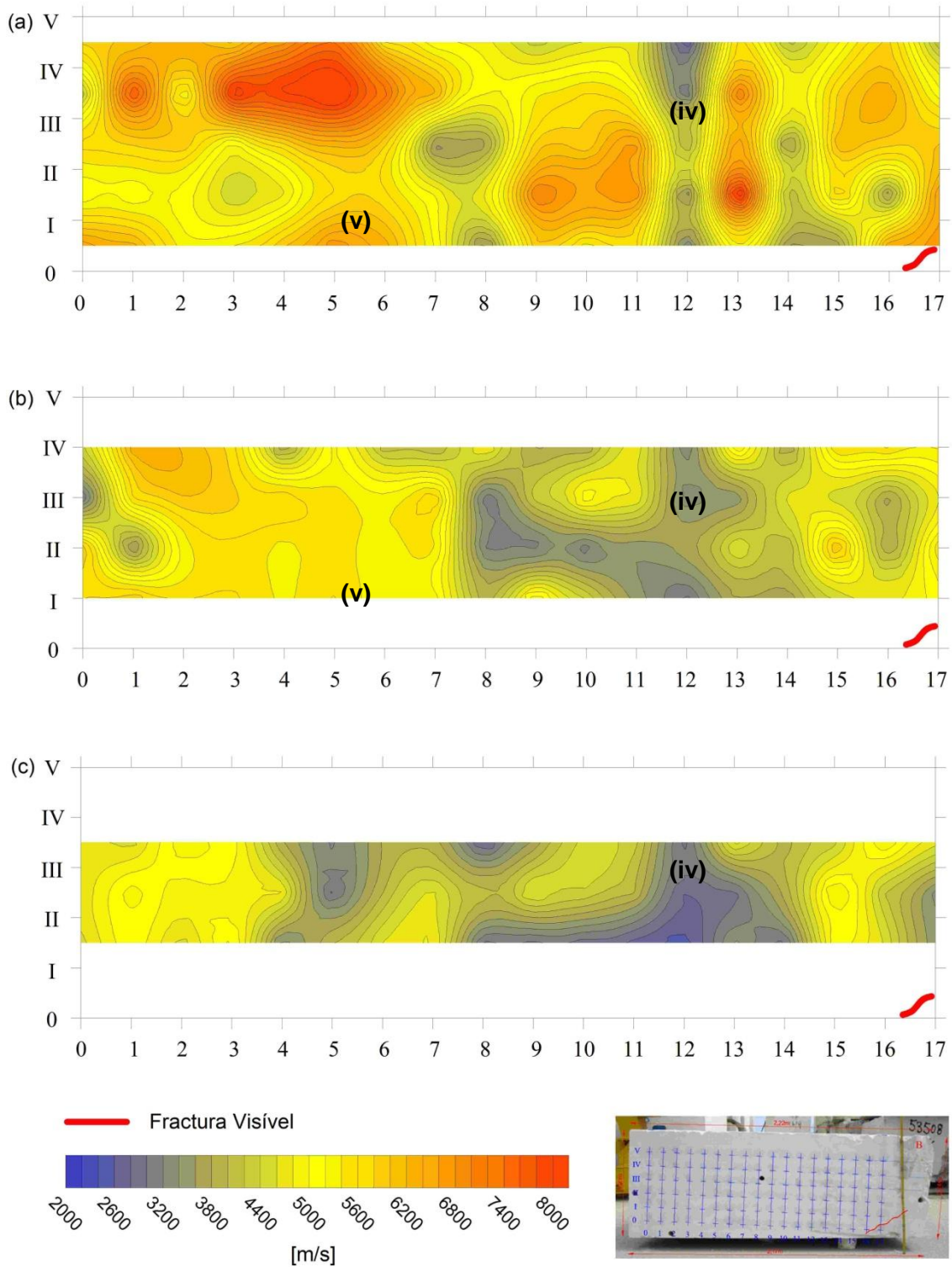


Figura 6.10 - Resultado do ensaio 1 na Face B com respectiva grelha de apoio às medições e fractura evidenciada.

Na figura 6.11, referente ao ensaio 2 (sentido directo, ver figura 4.7), realizado na linha I, é possível efectuarem-se três linhas de tendência. As velocidades obtidas pelas equações das rectas são de 4478m/s para a primeira, 5155m/s para a segunda e de 2577m/s para a terceira. Como se pode verificar, a velocidade de propagação mais elevada corresponde à segunda recta, que se situa entre os 50 e 60cm, que corresponde à coluna 5 e 6 do ensaio 1. Na figura 6.10 a zona que corresponde a esta segunda recta de velocidade mais elevada, está identificada como (v) no mapa (a) e como se pode observar é uma zona também de velocidades mais elevadas neste ensaio, que dizem respeito a um tamanho de grão mais grosseiro.

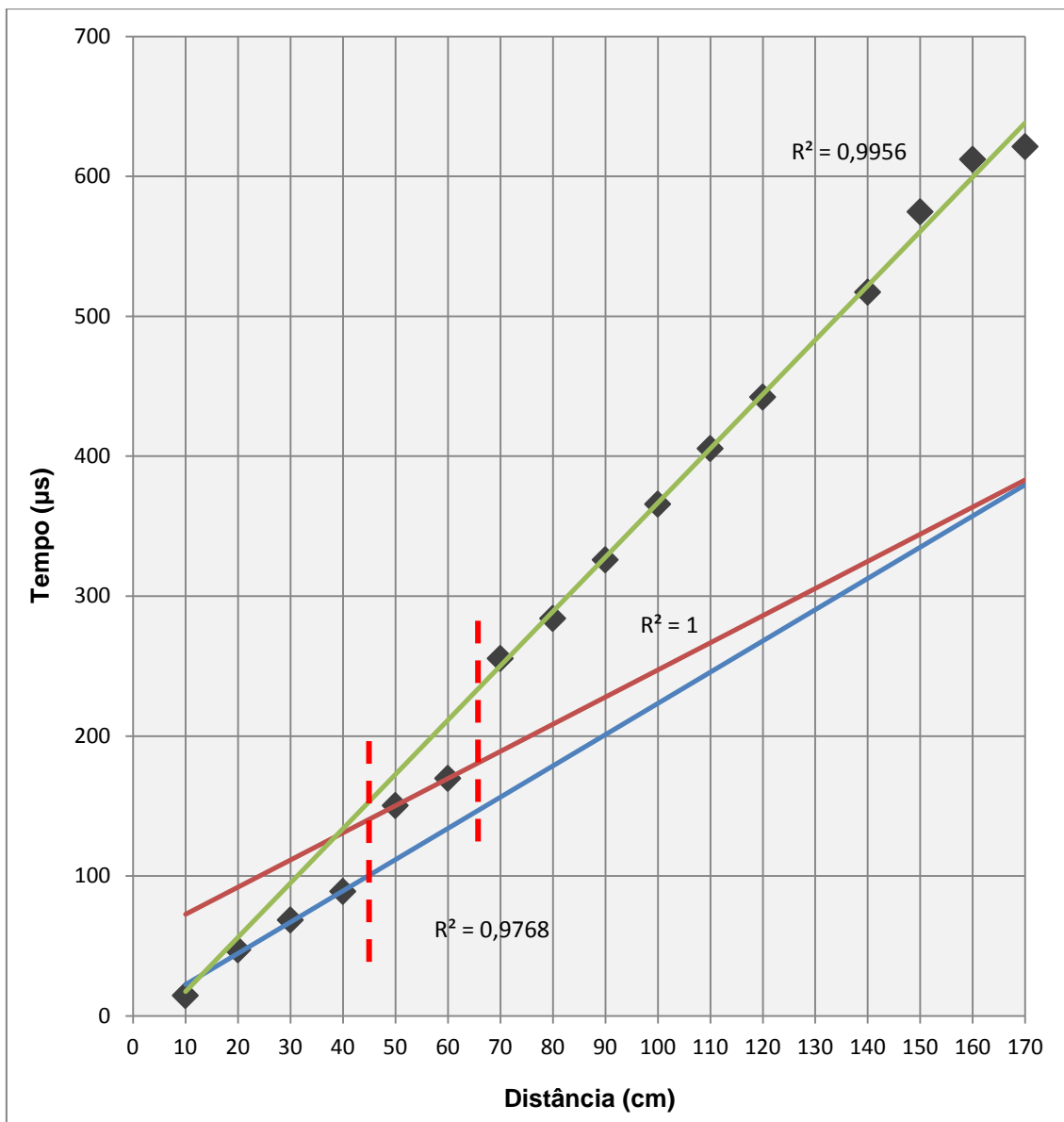


Figura 6.11 - Resultado do ensaio 2 (sentido directo), linha I, na Face B.

Na figura 6.12, referente ao ensaio 2 (sentido inverso, ver figura 4.8), efectuado na linha III, é possível confirmar a informação referente à presença de uma fractura não visível na face, designada como (iv). Esta indicação está presente na diferença entre as inclinações das duas primeiras linhas de tendência, entre as distancias 40 e 50cm, que correspondem às colunas 11 e 12 da figura 6.10. Da primeira recta obtém-se uma velocidade de propagação de 4735m/s e da segunda uma velocidade de 3945m/s, mais baixa do que a primeira, o que também se confirma na figura 6.10.

O valor assinalado e designado com (vi) na figura 6.12, não se adequa a nenhuma das linhas de tendência e poderá estar relacionado com o furo de sondagem presente nesta face.

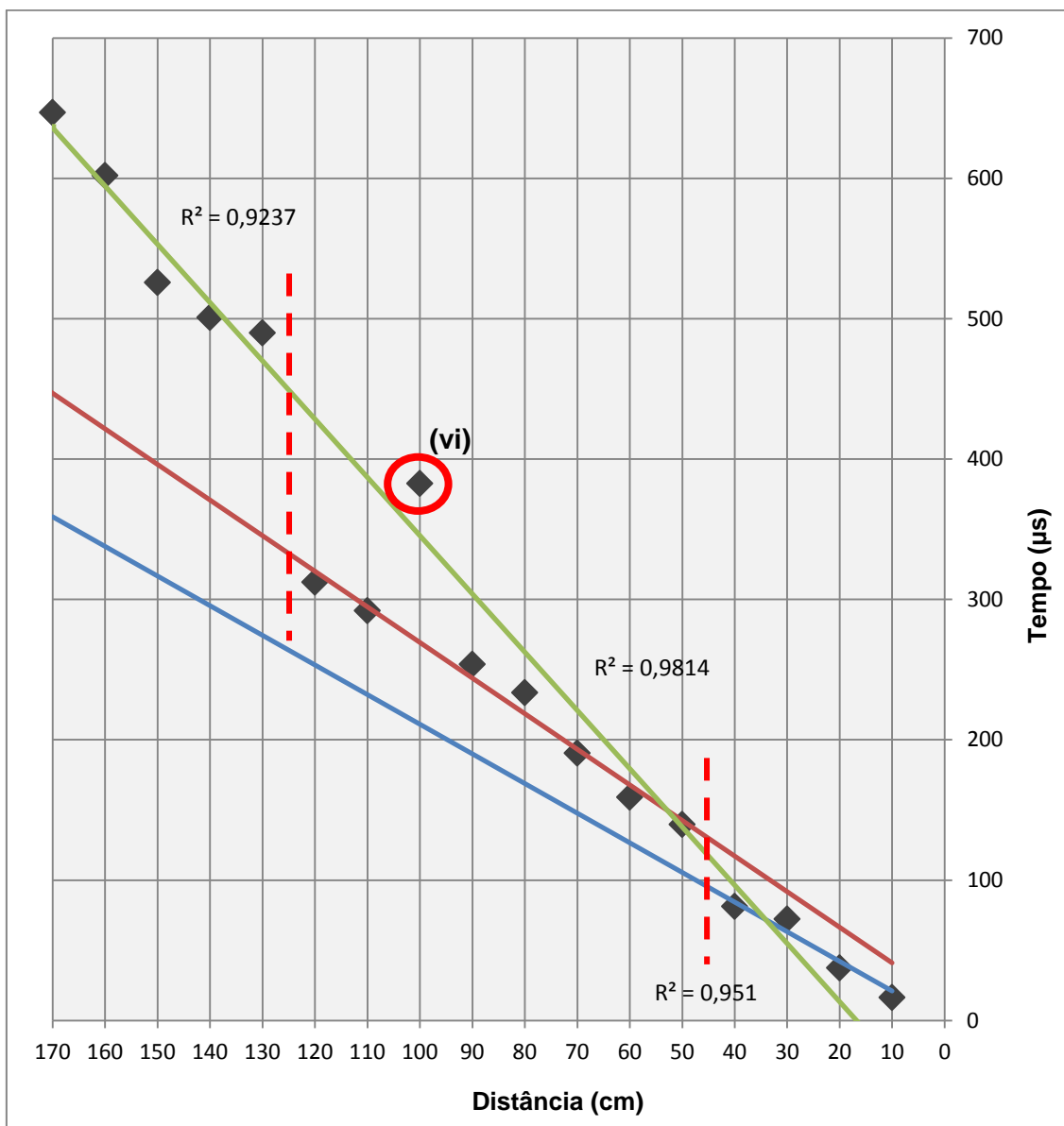


Figura 6.12 - Resultado do ensaio 2 (sentido inverso), linha III, na Face B.

6.3. Interpretação Conjunta

Através das medições efectuadas para o ensaio 1, elaborou-se também um modelo do bloco a três dimensões, pelo programa informático RockWorks V 15 (ver secção 4.3.1). A elaboração deste modelo torna-se de grande importância, já que a partir dele, é possível observar-se o conjunto e intersecção das faces ensaiadas e também a continuidade da informação de face para face.

Nas figuras 6.13 e 6.14 apresenta-se o conjunto das quatro faces ensaiadas. Na primeira é possível observar-se a relação entre a face A e D, onde as fracturas visíveis das duas faces se encontram e é perceptível a continuidade entre elas. O mesmo é possível de se observar na figura 6.14, em relação às faces C e D.

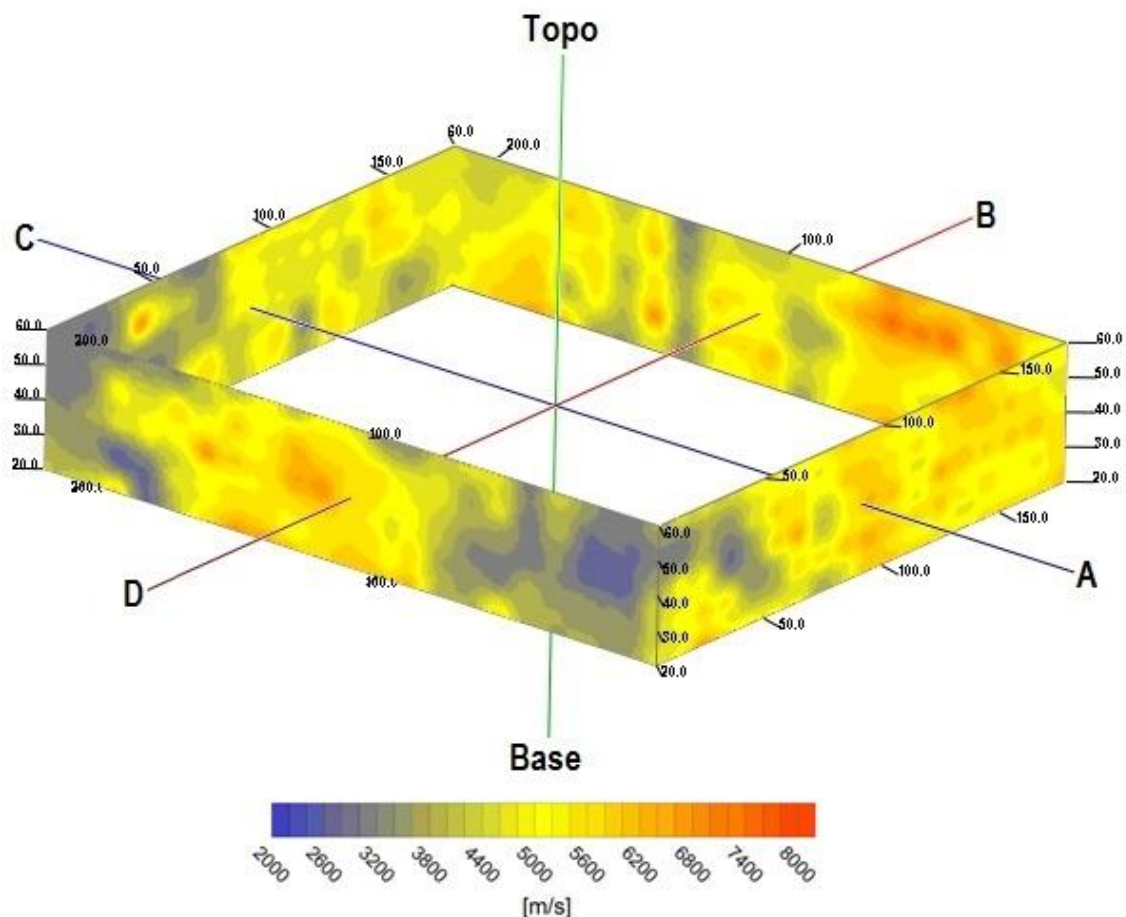


Figura 6.13 - Modelo da distribuição de velocidades no bloco a três dimensões, com vista das Faces A e D.

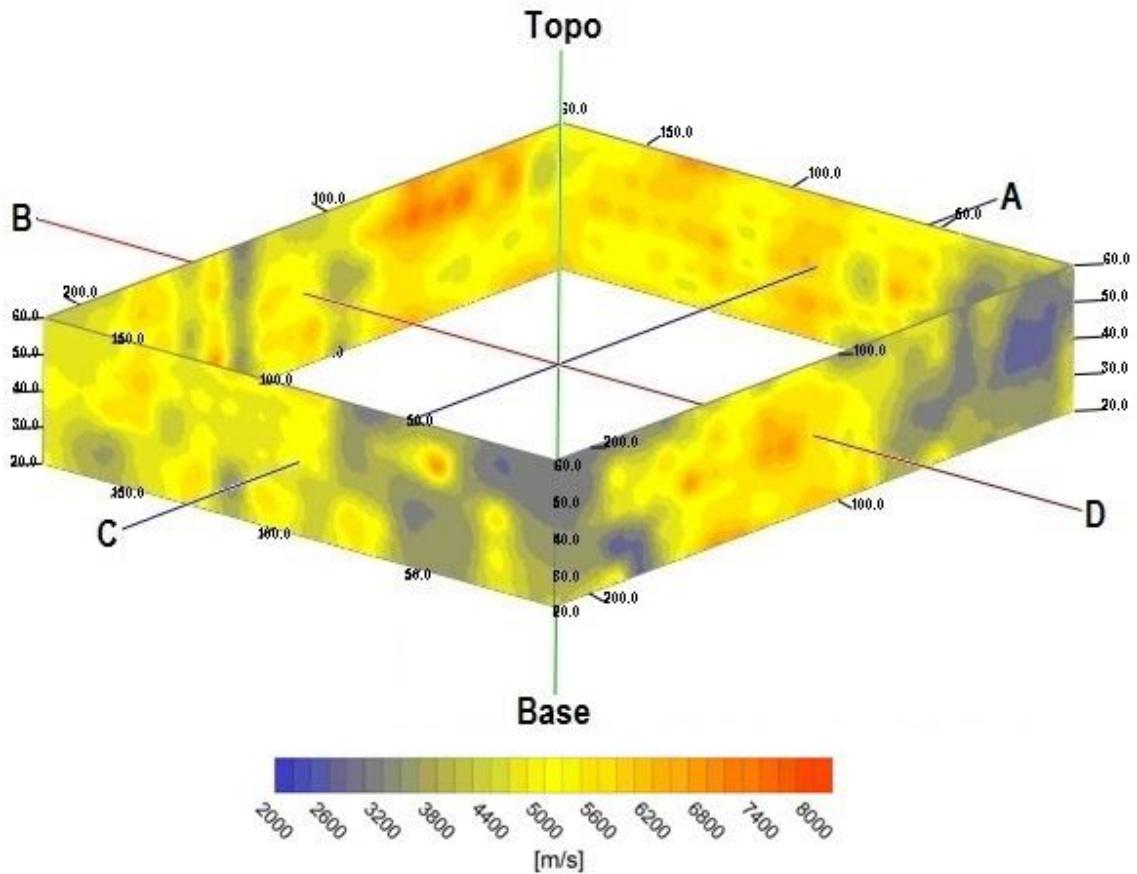


Figura 6.14 - Modelo da distribuição de velocidades no bloco a três dimensões, com vista das Faces C e D.

A figura 6.15 foi elaborada, extrapolando-se os valores obtidos do ensaio 1 com as três profundidades de investigação diferentes, para o interior do bloco.

Nela pode-se observar zonas de velocidade de propagação mais baixas, entre os 2500 e 3000m/s, junto das arestas de encontro das faces A com D e D com C. Esta informação poderá dar indicação de partes do bloco com maior fracturação interna, a adicionar à que é visível por observação do bloco.

Outra destas zonas de velocidade de propagação também mais baixa, observa-se na face B, no alinhamento vertical designado como (iv), já descrito na secção 6.2.2. Na figura 6.15 este alinhamento é prolongado para o interior do bloco, até à superfície de topo, o que vem de encontro ao observado e descrito na secção referida.

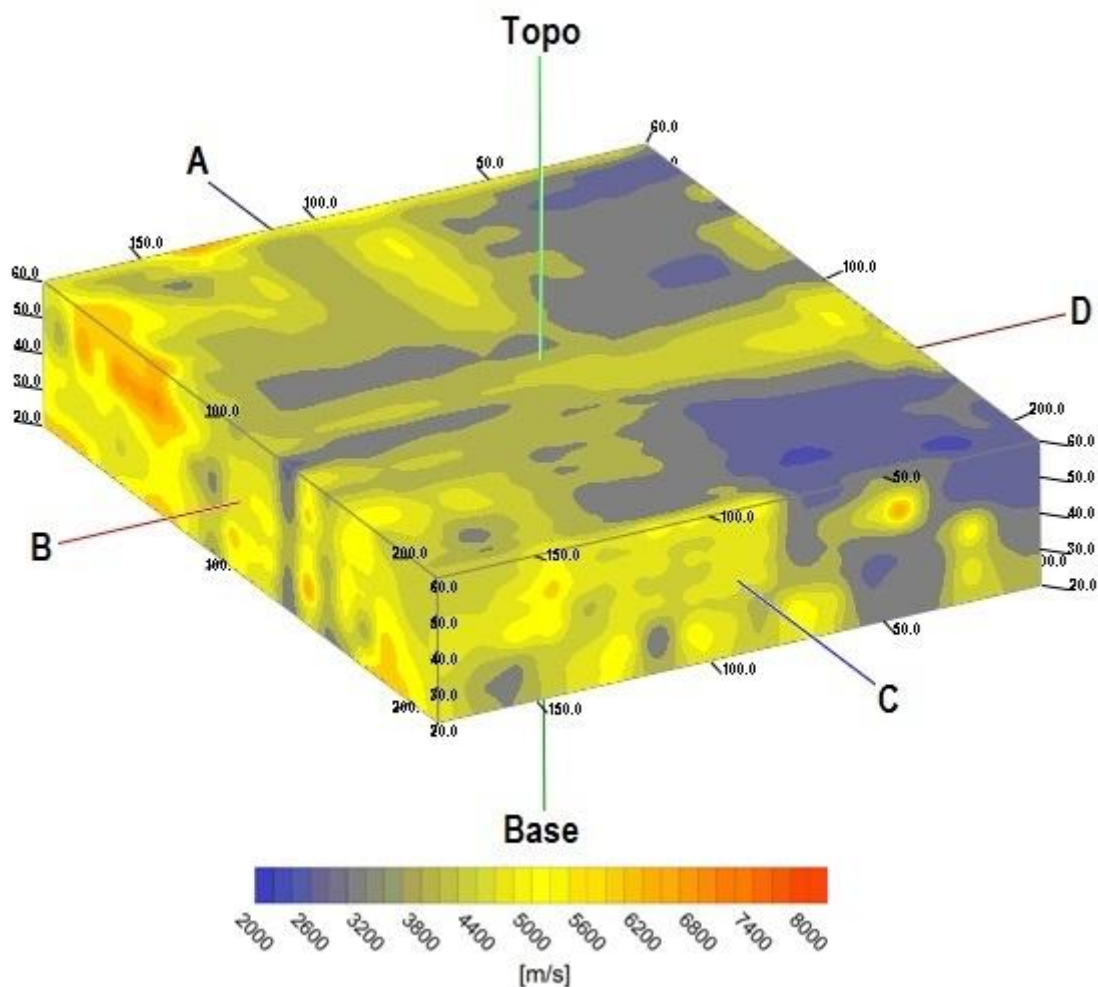


Figura 6.15 - Modelo da distribuição de velocidades no bloco a três dimensões, com valores das medições extrapolados para o seu interior.

Será de ter em conta que a interpretação feita ao interior do bloco, apenas se baseia na extrapolação de valores. Esta informação só poderá ser confirmada com o corte do bloco em chapas, o que até à data de finalização do presente trabalho não foi possível.

6.4. Ensaio por Transmissão Directa

A figura 6.16 corresponde ao ensaio por transmissão directa, considerado como ensaio 3 (ver secção 4.3.3). O mapa (d) diz respeito ao ensaio da face A para a face C, com uma extensão do trajecto de 2,22m e o mapa (e) ao ensaio da face D para a face B, com extensão do trajecto de 1,82m.

Pelo conjunto dos dois mapas, pode-se observar um intervalo de velocidades (dos 2000 aos 5000 m/s) muito idêntico ao observado nos mapas do ensaio 1 a maior profundidade, identificados como mapa (c). Mas neste ensaio a relação dos mapas, com o que é observado em campo não é evidente. Este insucesso pode dever-se à grande extensão do trajecto entre transdutores, já que o nível de sinal recebido durante as medições observou-se sempre muito baixo. Segundo o manual de instruções operacionais do equipamento, os melhores resultados para este método obtêm-se quando o nível do sinal recebido estiver em torno de 75% e neste ensaio o nível de sinal recebido apenas rondou os 5%.

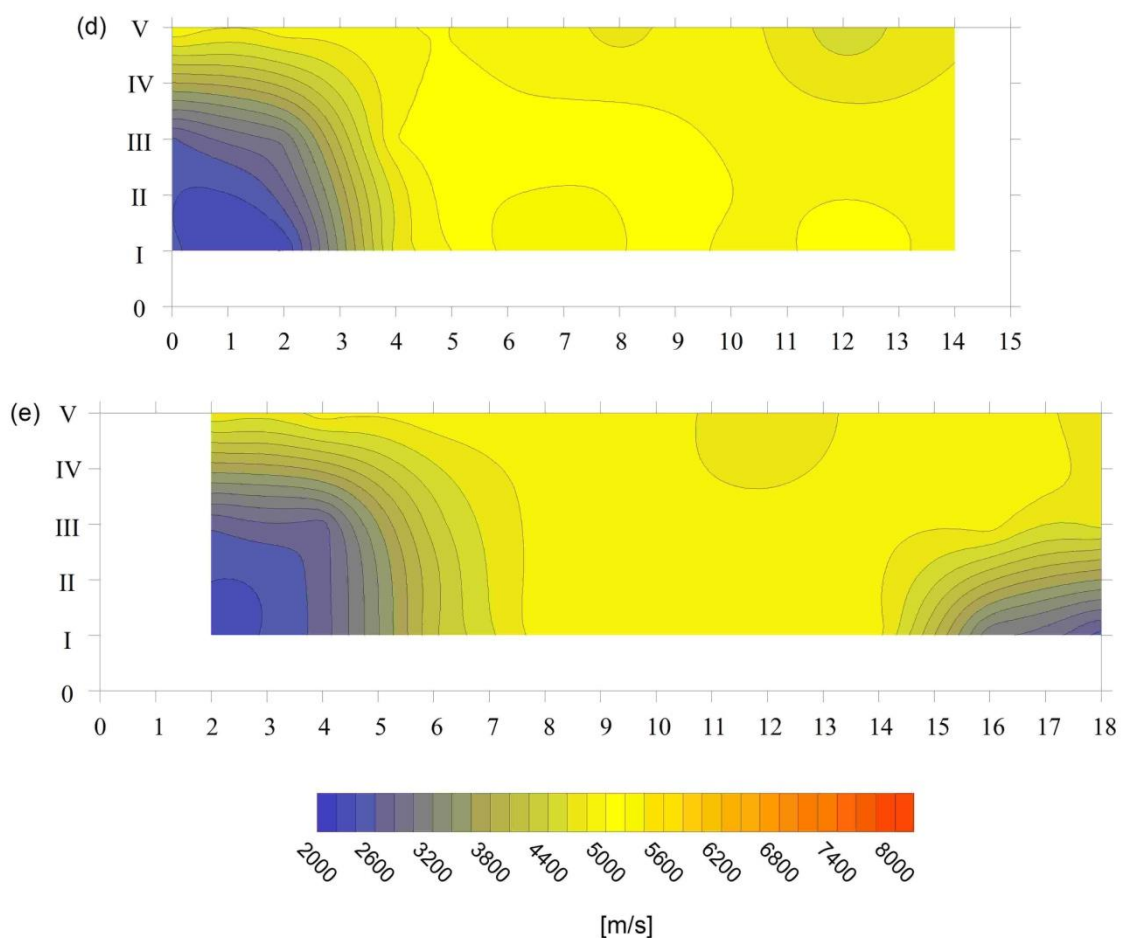


Figura 6.16 - Resultados do ensaio 3, com respectivas grelhas de apoio às medições, onde o mapa (d) corresponde ao ensaio da Face A para a Face C e o mapa (e) da Face D para a Face B.

Capítulo **7**

Considerações Finais

7. Considerações Finais

O ensaio por ultra-som é utilizado essencialmente na caracterização de provetes de pequena dimensão, onde em função de casuais dificuldades teóricas, se assume o meio como homogéneo e isotrópico devido à distância reduzida entre os transdutores. Nestes casos, considera-se que as ondas recebidas são apenas ondas directas e não reflectidas.

O principal objetivo do presente trabalho consistiu na avaliação de um bloco de rocha ornamental por meio de um ensaio não destrutivo – ensaio por ultra-som. Este estudo pretendia avaliar características tais como o estado de alteração, as diferenças na mineralogia e tamanho de grão do bloco, para detecção e localização de eventuais descontinuidades no seu interior.

No estudo preliminar a diversos blocos com composição mineralógica, tamanho e forma diferentes foi possível executar alguns tipos de transmissão do feixe sónico, com várias geometrias dos transdutores. Este estudo foi essencial para testar a qualidade dos resultados obtidos e verificar as capacidades, limitações e dificuldades de aplicação do método e do próprio equipamento. O estudo preliminar permitiu constatar que apenas três dos ensaios efectuados tinham viabilidade para a caracterização e avaliação de um bloco de rocha com as dimensões típicas, sendo eles os ensaios de transmissão directa e de transmissão de superfície com disposição dos transdutores tipo mapeamento e tipo T fixo e R móvel. Deste modo testou-se essencialmente a aplicação de ondas reflectidas a blocos de rocha de grandes dimensões.

Os resultados obtidos da aplicação destes três ensaios a um só bloco de calcário permitiram concluir que a distribuição de valores de velocidade de propagação do ensaio 1 (transmissão de superfície/mapeamento), apresenta uma relação directa com o que é observado na face, essencialmente quando o espaçamento entre transdutores é de 10cm. Neste, foi possível detectar e localizar fracturas visíveis e não visíveis na face do bloco e variações no tamanho do grão. De notar que o modelo da distribuição de velocidades elaborado a três dimensões apresentou boas correlações entre as diferentes faces ensaiadas.

Do ensaio 2 (transmissão de superfície/T fixo e R móvel), a diferença na inclinação das rectas de tendência também permitiu detectar e localizar algumas das fracturas,

variações no tamanho do grão, embora só seja visível nas fracturas mais evidentes. Para um afastamento entre transdutores superior a cerca de um metro, a informação obtida já não era comparável com a informação obtida pelo ensaio 1 (transmissão de superfície/mapeamento), devido à profundidade de investigação para esta distância ser bastante distinta entre estes dois ensaios.

O insucesso dos resultados obtidos pelo ensaio 3 (transmissão directa), justifica-se pela grande extensão de trajecto entre transdutores que resultou num fraco sinal recebido.

Tendo em conta os objectivos da presente dissertação e os resultados apresentados e discutidos na secção 6, podem ser retiradas as conclusões seguintes:

- Da aplicação dos três tipos de ensaio, foi o ensaio 1 (transmissão se superfície/mapeamento), com os transdutores a 10cm, que forneceu os resultados mais fáceis de interpretar e estabelecer uma relação mais próxima com o observado nas faces do bloco.
- Do ensaio 1, com espaçamento entre transdutores de 10cm, pode-se observar que: valores de velocidade de propagação das ondas entre 7500 e 6500m/s correspondem a zonas do bloco com grão mais grosseiro e matriz mais fina, de baixa porosidade; valores de velocidade de propagação das ondas entre 6000 e 5000m/s correspondem a zonas do bloco com granulometria mais homogénea e fina; e valores de velocidade de propagação das ondas entre 4500 e 3500m/s correspondem a zonas de fracturação.
- Em zonas cujo tamanho de grão é maior, a atenuação do sinal deveria ser maior, e provocar a diminuição na velocidade de propagação. Dos ensaios realizados, tal não se observou, constatou-se que a velocidade de propagação aumentou, podendo este facto ser justificado pela matriz mais fina existente nestas zonas das faces do bloco.
- Neste trabalho a importância do ensaio 2 (transmissão de superfície/T fixo e R móvel), residiu apenas na confirmação da informação obtida no ensaio 1, porque quando a distância entre transdutores é superior a cerca de um metro os valores das medições obtidos podem não ser considerados fiáveis.
- O elevado grau de rugosidade das superfícies é uma característica impeditiva à realização dos ensaios, devido à superfície de contacto com os transdutores ser reduzida.
- Em relação à orientação das descontinuidades verificou-se que, independentemente da orientação destas em relação ao feixe de som, é

possível a sua detecção pelo facto de se estar a utilizar ondas reflectidas (ensaio 1 e 2) e não directas.

Devido ao bloco não ter sido cortado em chapas até à data de finalização deste trabalho, não foi possível efectuar a correlação entre as descontinuidades detectadas e as efectivas. Também por este motivo não foi possível relacionar os dados obtidos com o estado de alteração do material no interior do bloco, apesar de se ter conseguido observar uma relação da velocidade de propagação com a granulometria na superfície da face do bloco. A situação ideal teria sido a comparação da informação recolhida com a informação de cada uma das chapas.

A quantidade de medições realizadas, em cada uma das faces ensaiadas, foi elevada e morosa. Para que este ensaio se tornasse mais rentável, o número de medições realizadas devia ser menor, mas para esta situação teriam de se efectuar estudos complementares para aferir os resultados.

Para o tratamento de dados foi necessário o dispêndio de algum tempo, sendo fundamental para estudos posteriores a optimização de um suporte informático adequado ao ensaio de modo a tornar esta técnica uma ferramenta de apoio à decisão de abandonar o bloco ou torná-lo num bloco comercial.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

American Society for Nondestructive Testing (ASNT) (1981). Nondestructive Testing, ultrasonic. Classroom Training Handbook CT-6-4, second edition. General Dynamics, Convair Division, 277 páginas.

Andreucci, R. (2011). Ensaio por Ultra-Som, Aplicação Industrial. Edição Julho 2011, Abendi, 98 páginas.
Acedido a Junho de 2013, em: www.abendi.org.br

Associação Empresarial de Portugal (AEP), Câmara de Comércio e Indústria. Rochas Ornamentais. Departamento de Estudos e Desenvolvimento, Março de 2003, 17 páginas.

Azerêdo, A.C.; Formalização da Litologia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). Comunicações Geológicas, 2007, t.94, pp.29-51. INETI 2007.

Bramanti, M., Bozzi, E. (2001, 8 Junho). A Procedure to Detect Flaws inside Large Sized Marble Blocks by Ultrasound. Subsurface Sensing Technologies and Applications, Vol.2, No.1. Plenum Publishing Corporation, 13 páginas.

Carvalho, J. (2007). Rochas Ornamentais, Pedras Naturais ou Pedras Dimensionais? Boletim de Minas, 42 (2), páginas 157 a 159.
Acedido a Julho de 2013, em: <http://repositorio.ineg.pt>

Carvalho, J. M. F., Lisboa, J. V., Prazeres, C. M., Sardinha, R. J. (2012). Rochas Ornamentais do Maciço Calcário Estremenho: Breve Caracterização dos Recursos, dos Centros de Produção e Delimitação Preliminar da Áreas Potenciais. Boletim de Minas, 47 (1), páginas 5 a 26.
Acedido a Julho de 2013, em: <http://repositorio.ineg.pt>

Drury, J. C. (1992). Ultrasonic Flaw Detection for Technicians. OIS Power & Nuclear Division, 201 páginas.

Blitz, J. (1971). Ultrasonics: Methods and Applications. London, Butterworths, 151 páginas.

El-Gohary, M. A. (2012, 21 Dezembro). Evaluation of Treated and Un-treated Nubia Sandstone Using Ultrasonic as a Non Destructive Technique. Journal of Archaeological Science, Vol.40 (4) 2013, páginas 2190 a 2195.

Leong, E., Yeo, S., Rahardjo, H. (2004). Measurement of Wave Velocities and Attenuation using an Ultrasonic Test System. Can. Geotech. J.41, páginas 844 a 860.

Lima, C & Menezes, J. E. (2008). Textos de Apoio de Geologia de Engenharia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Proceq (2011). Pundit Lab/Pundit Lab+, Instrumento Ultrassónico. Instruções Operacionais, 31 páginas.

Velho, J. L., Gomes, C. (1997). A aplicação de Ultrassons na Caracterização de Corpos Rochosos: O Caso de Quartzitos. Geociências, Rev. Univ. Aveiro, Vol.11, Fasc.(1 e 2), páginas 171 a 179.

James Instruments, Inc. (1996). V-Meter Mark II Instruction Manual, Non-destructive testing Systems, Chicago, Illinois, 58 páginas.

Sítios na Internet Consultados:

Bodare, A. (2009). Non Destructive Test Methods of Stone and Rock. Geo Texts & Publications.

Acedido a Fevereiro de 2013, em:

<http://www.geoforum.com/knowledge/texts/bodare/index.asp>

Mapa de Portugal

Acedido a Junho de 2013, em:

<http://www.mapadeportugal.net/indicedistritos.asp>

NDT, Resource Center. Introduction to Ultrasonic Testing.

Acedido a Janeiro de 2013, em:

http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm

Proceq

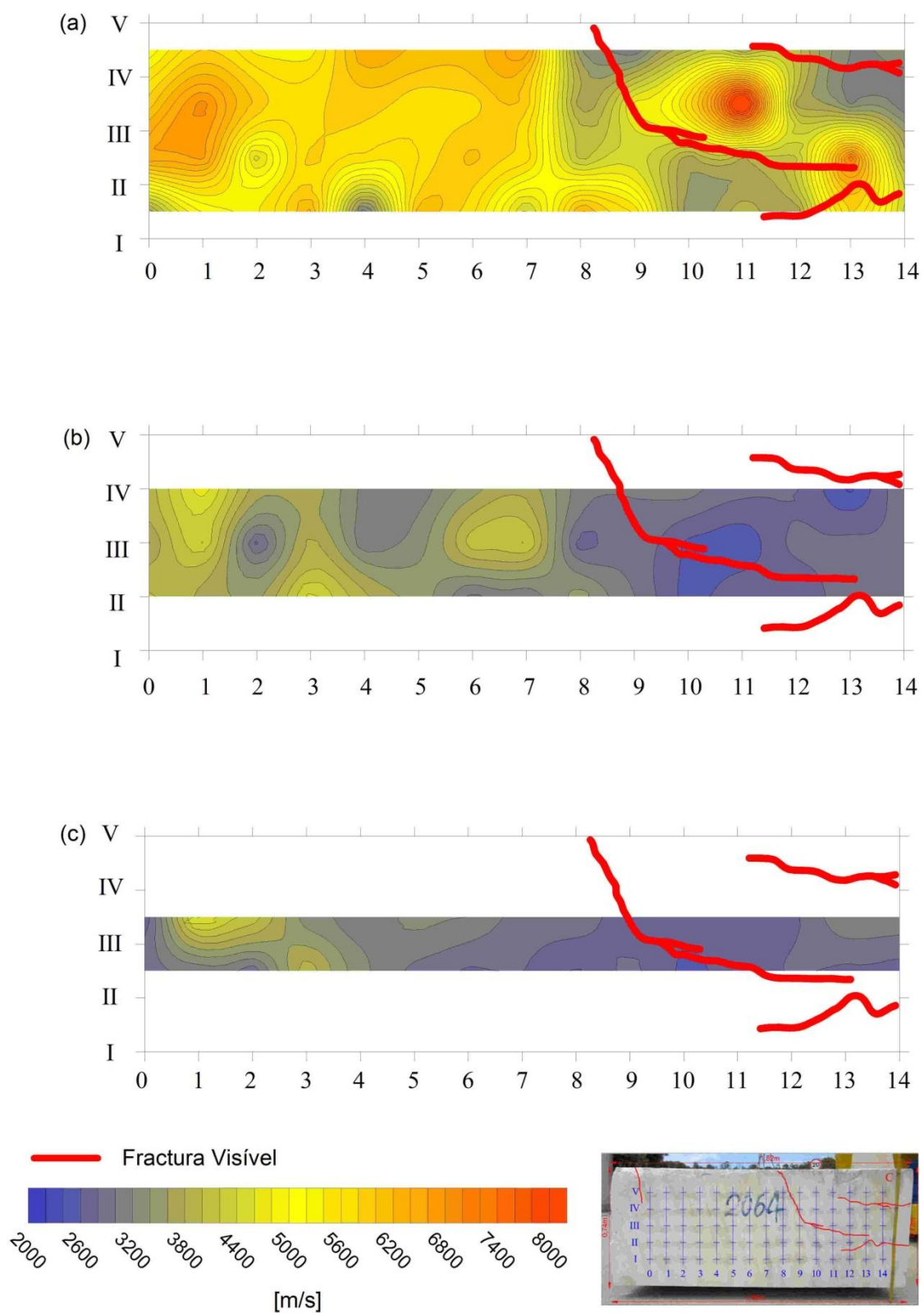
Acedido a Dezembro de 2012, em:

<http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/ultrasonic-testing.html>

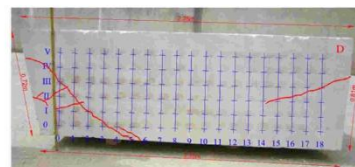
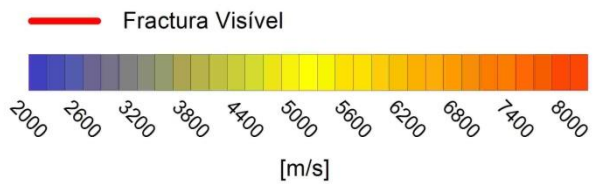
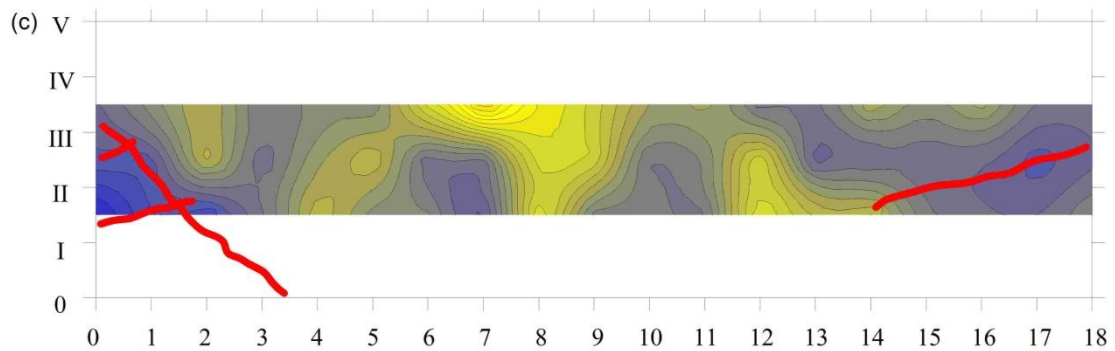
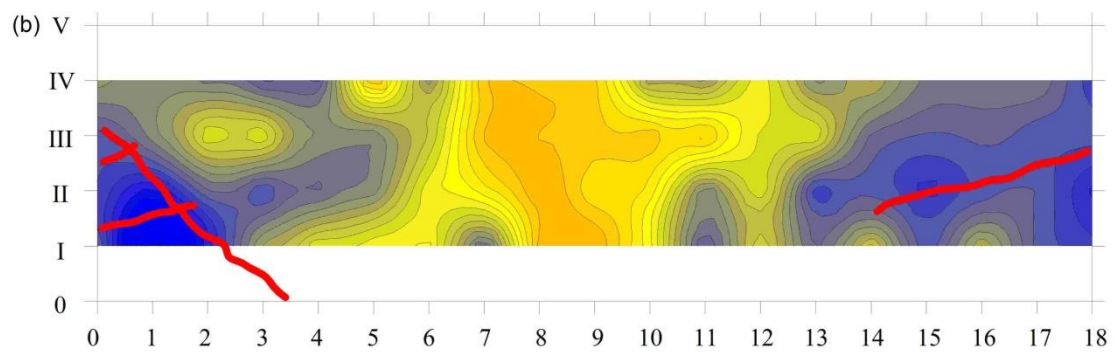
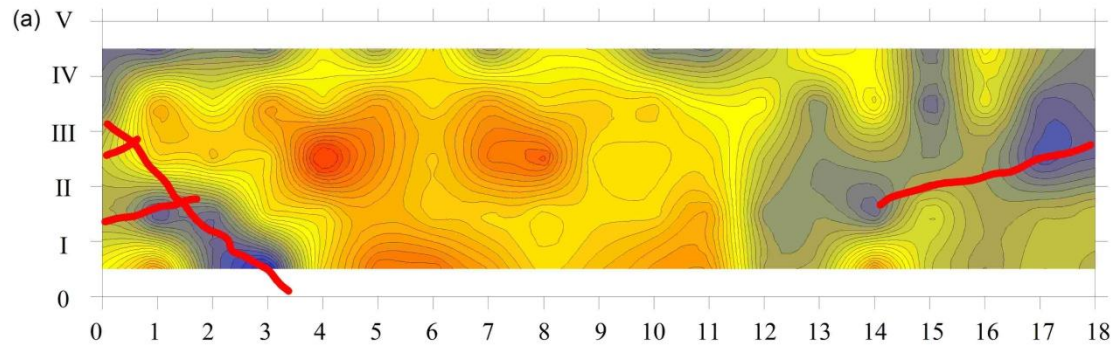
ANEXOS

Anexo I – Resultados do Ensaio 1

Anexo I.1 - Resultados do ensaio 1 na Face C com respectiva grelha de apoio às medições e fracturas evidenciadas.



Anexo I.2 - Resultados do ensaio 1 na Face D com respectiva grelha de apoio às medições e fracturas evidenciadas.



Anexo II – Valores Obtidos pelo Ensaio 1 (Transmissão de Superfície/Mapeamento)

Anexo II.1 - Face A

Ensaio 1 (Transmissão de Superfície/Mapeamento) - Face A																		
Espaçamento entre linhas de 10cm																		
Medição	Altura (cm)	Tempo (µs)																
		Coluna 0	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	
1ª	0 - I	5	17,1	12,7	16,5	16,7	17,1	18,0	28,3	ND	16,1	15,8	15,5	16,2	16,8	16,7	15,7	16,5
2ª	I - II	15	15,9	14,4	14,8	ND	25,1	14,5	14,8	13,9	13,2	15,4	14,3	14,1	15,9	14,7	16,9	16,4
3ª	II - III	25	15,3	16,7	39,1	24,9	13,8	12,5	26,1	18,0	14,1	14,0	17,3	13,1	13,9	14,9	14,0	13,7
4ª	III - IV	35	33,9	23,4	27,8	17,6	14,3	16,0	16,7	14,7	15,0	17,0	15,2	16,9	16,1	14,8	14,7	16,2
5ª	IV - V	45	17,8	17,8	19,6	16,6	17,1	18,8	17,0	15,5	16,2	16,5	16,8	13,7	13,3	17,8	18,1	17,8
Espaçamento entre linhas de 20cm																		
1ª	0 - II	10	63,8	61,6	64,8	61,7	58,4	60,6	60,7	59,8	36,8	41,9	70,7	50,4	67,1	51,3	55,6	48,5
2ª	I - III	20	64,3	52,7	60,5	85,2	86,6	55,9	55,7	46,6	54,1	47,5	69,6	47,7	58,8	62,7	54,6	58,1
3ª	II - IV	30	82,3	65,4	84,7	73,9	54,9	43,4	57,2	41,9	34,7	42,5	64,6	53,6	43,3	42,8	53,0	42,6
4ª	III - V	40	74,2	69,8	63,7	59,3	55,7	46,8	56,7	46,0	47,2	49,3	56,9	48,1	36,6	37,4	48,2	52,1
Espaçamento entre linhas de 30cm																		
1ª	0 - III	15	114,7	87,1	80,3	105,7	120,8	102,7	124,5	66,0	79,2	84,5	115,7	90,9	102,2	105,0	74,2	102,5
2ª	I - IV	25	105,8	62,3	113,2	99,8	105,4	75,4	99,3	60,9	72,8	60,5	115,1	71,5	96,0	108,7	72,5	104,0
3ª	II - V	35	89,8	92,2	110,9	110,3	103,1	76,1	105,1	56,5	56,7	76,6	102,9	75,7	65,6	103,7	100,3	98,6

ND – Não Determinado

Anexo II.2 - Face B

Ensaio 1 (Transmissão de Superfície/Mapeamento) - Face B																				
Espaçamento entre linhas de 10cm																				
Medição	Altura (cm)	Tempo (µs)																		
		Coluna 0	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16	Coluna 17	
1ª	0 - I	5	15,3	15,9	18,9	18,5	16,7	14,8	15,9	19,3	29,3	16,8	18,9	17,8	31,3	18,5	28,1	27,3	15,6	14,7
2ª	I - II	15	20,0	19,9	19,5	22,7	21,0	17,8	17,7	19,9	20,7	14,1	15,3	14,7	29,7	11,8	24,7	17,3	27,8	15,1
3ª	II - III	25	17,6	17,2	16,7	20,4	17,4	16,0	17,1	28,9	27,2	17,0	17,3	14,9	25,5	15,2	27,8	16,1	17,0	16,6
4ª	III - IV	35	23,8	12,9	19,5	12,1	12,4	11,7	13,7	15,9	19,9	18,6	17,8	19,3	33,9	14,0	20,8	17,1	15,7	19,8
5ª	IV - V	45	17,1	16,6	15,7	16,9	14,9	13,5	17,9	19,9	20,5	23,3	21,7	21,2	38,8	17,4	24,5	20,1	17,0	25,1
Espaçamento entre linhas de 20cm																				
1ª	0 - II	10	34,5	33,5	35,8	35,5	37,4	35,6	38,4	37,9	52,2	36,9	45,7	56,9	68,0	52,8	54,9	44,9	42,1	39,2
2ª	I - III	20	33,3	57,9	37,7	36,1	37,7	36,2	38,6	36,7	63,5	64,5	65,4	58,0	53,4	43,0	50,1	32,7	53,6	35,9
3ª	II - IV	30	67,8	35,3	33,3	34,2	34,6	36,3	38,1	34,3	66,9	46,1	38,6	41,7	61,4	58,1	42,9	44,5	54,1	41,9
4ª	III - V	40	45,9	31,4	32,4	35,2	52,9	37,9	49,1	50,3	41,3	53,4	52,3	42,1	62,7	36,5	53,0	35,5	35,5	36,9
Espaçamento entre linhas de 30cm																				
1ª	0 - III	15	66,4	58,0	66,5	56,9	91,3	75,1	65,2	62,1	102,2	102,3	104,3	109,9	119,9	86,6	102,9	58,3	65,6	86,6
2ª	I - IV	25	64,3	56,5	62,1	61,0	61,9	101,5	75,2	64,5	73,7	64,1	68,7	74,6	107,1	101,8	77,7	54,9	71,8	89,7
3ª	II - V	35	64,9	66,4	56,3	58,7	78,9	94,7	78,5	76,5	109,6	82,5	67,1	69,5	103,2	63,7	76,7	69,5	55,3	64,1

Anexo II.3 - Face C

Ensaio 1 (Transmissão de Superfície/Mapeamento) - Face C																	
Espaçamento entre linhas de 10cm																	
Medição	Altura (cm)	Tempo (µs)															
		Coluna 0	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13	Coluna 14	
1ª	I - II	15	27,5	19,9	18,6	15,9	33,9	16,2	17,7	23,4	15,9	17,9	29,2	25,1	27,7	17,1	23,0
2ª	II - III	25	15,2	15,0	22,4	17,0	18,0	17,9	16,5	17,5	24,5	22,3	27,4	26,9	24,0	13,9	26,1
3ª	III - IV	35	17,0	14,5	16,8	17,4	17,0	17,9	17,6	16,9	27,6	20,4	17,5	11,1	27,0	31,5	33,2
4ª	IV - V	45	19,9	17,2	18,8	18,9	15,6	16,2	16,4	15,2	29,5	33,0	25,3	26,7	24,4	31,3	29,5
Espaçamento entre linhas de 20cm																	
1ª	I - III	20	49,6	53,7	56,6	44,6	51,9	56,5	68,5	66,1	57,0	66,4	79,5	71,3	76,0	68,7	71,4
2ª	II - IV	30	55,7	45,3	73,4	51,7	65,9	60,5	48,4	47,2	74,9	67,5	78,2	82,6	69,5	70,0	70,0
3ª	III - V	40	51,4	42,2	54,2	53,4	64,0	65,3	57,3	53,5	64,6	65,9	64,3	69,8	71,1	85,2	67,1
Espaçamento entre linhas de 30cm																	
1ª	I - IV	25	104,9	98,5	105,6	75,6	91,6	101,7	108,6	106,8	116,7	104,1	117,2	112,8	106,0	109,1	111,2
2ª	II - V	35	114,2	64,6	72,7	91,5	100,3	91,0	93,7	103,1	102,2	113,2	114,5	107,7	110,0	94,2	95,7

Anexo II.4 - Face D

Ensaio 1 (Transmissão de Superfície/Mapeamento) - Face D																					
Espaçamento entre linhas de 10cm																					
Medição	Altura (cm)	Tempo (µs)																			
		Coluna 0	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16	Coluna 17	Coluna 18	
1ª	0 - I	5	19,7	14,6	36,3	64,3	17,3	13,5	13,6	15,1	17,6	16,2	15,0	14,7	26,5	25,3	14,9	24,0	27,9	23,7	26,0
2ª	I - II	15	26,1	42,7	36,1	17,9	18,1	16,0	17,1	17,6	18,3	17,4	17,6	15,4	29,0	27,6	36,8	21,1	26,8	25,1	23,7
3ª	II - III	25	23,4	17,3	16,6	18,0	11,6	14,5	16,9	13,7	13,0	18,5	18,5	17,6	23,9	29,5	27,3	29,8	27,7	41,9	35,7
4ª	III - IV	35	33,2	15,5	20,7	14,8	18,4	14,9	17,6	15,0	17,7	17,0	16,9	19,8	19,4	30,4	17,8	37,3	20,7	37,4	33,2
5ª	IV - V	45	35,7	38,6	30,3	33,3	20,2	27,0	17,8	28,3	20,4	21,1	31,7	32,5	24,2	18,6	19,6	35,2	19,4	26,8	31,9
Espaçamento entre linhas de 20cm																					
1ª	0 - II	10	61,9	211,3	80,2	49,2	41,9	40,4	39,7	60,8	33,9	33,3	39,4	63,5	43,6	60,2	44,7	66,5	47,6	64,0	70,2
2ª	I - III	20	66,7	86,7	59,0	67,8	59,6	54,3	40,3	37,6	33,3	37,3	37,4	55,9	41,7	71,5	63,7	73,7	65,4	62,4	78,3
3ª	II - IV	30	64,6	54,0	41,7	41,5	53,0	55,3	45,4	34,1	34,6	35,4	34,8	34,9	42,0	41,5	59,7	62,9	61,1	65,6	64,5
4ª	III - V	40	51,3	55,0	56,6	63,8	63,0	33,6	51,4	34,5	34,9	35,2	49,1	51,1	40,4	54,2	47,4	56,5	56,3	55,5	69,7
Espaçamento entre linhas de 30cm																					
1ª	0 - III	15	171,0	124,8	134,6	101,1	75,9	90,9	92,9	117,7	65,7	97,2	96,0	101,5	65,2	75,6	74,9	98,1	105,3	107,4	93,5
2ª	I - IV	25	117,3	119,5	76,7	104,9	84,6	75,2	104,1	104,3	66,9	68,8	100,5	92,8	68,3	112,1	105,9	106,3	105,6	120,6	109,0
3ª	II - V	35	108,3	90,8	79,1	100,3	91,3	92,3	67,1	51,5	62,8	69,7	83,5	81,8	102,4	101,7	79,8	91,2	81,5	100,6	101,2

Anexo III – Valores Obtidos pelo Ensaio 2 (Transmissão de Superfície/T fixo e R móvel)

Anexo III.1 - Face A

Ensaio 2 (Transmissão de Superfície/T fixo e R móvel) - Face A												
Sentido Directo (da esquerda para a direita)								Sentido Inverso (da direita para a esquerda)				
Medição	Distância (cm)	Tempo (µs)						Medição	Distância (cm)	Tempo (µs)		
		Linha 0	Linha I	Linha II	Linha III	Linha IV	Linha V			Linha 0	Linha II	Linha IV
X1	10	17,4	17,0	16,9	16,4	16,6	24,3	X1	10	28,2	17,1	16,5
X2	20	40,3	35,5	34,9	62,6	54,5	65,8	X2	20	58,8	37,8	36,9
X3	30	64,0	63,0	54,5	119,2	86,9	86,7	X3	30	78,9	58,1	69,5
X4	40	77,4	76,1	115,6	154,2	122,7	142,6	X4	40	144,8	97,8	89,6
X5	50	96,7	186,1	181,1	191,6	180,6	168,2	X5	50	161,6	147,6	136,1
X6	60	114,1	226,7	217,1	249,1	220,6	216,0	X6	60	192,5	168,3	162,1
X7	70	234,8	268,5	256,8	268,6	257,8	246,5	X7	70	209,9	260,7	169,6
X8	80	263,6	295,3	296,6	309,0	293,9	285,1	X8	80	227,6	296,7	226,6
X9	90	331,8	361,5	337,5	353,2	317,4	332,9	X9	90	339,5	331,2	329,3
X10	100	382,8	387,8	384,9	418,6	366,8	385,5	X10	100	377,1	385,8	362,6
X11	110	405,2	432,0	414,5	426,4	403,3	397,4	X11	110	412,6	415,8	408,1
X12	120	464,1	447,3	463,8	449,2	446,8	437,5	X12	120	454,0	474,7	412,1
X13	130	503,3	499,0	489,1	500,0	485,5	482,8	X13	130	490,4	512,4	481,5
X14	140	542,5	541,7	527,5	537,5	527,1	519,4	X14	140	540,1	537,6	507,0
X15	150	580,7	635,9	568,0	608,0	563,3	556,2	X15	150	578,9	642,8	571,2

Anexo III.2 - Face B

Ensaio 2 (Transmissão de Superfície/T fixo e R móvel) - Face B												
Sentido Directo (da esquerda para a direita)								Sentido Inverso (da direita para a esquerda)				
Medição	Distância (cm)	Tempo (µs)						Medição	Distância (cm)	Tempo (µs)		
		Linha 0	Linha I	Linha II	Linha III	Linha IV	Linha V			Linha I	Linha III	Linha V
X1	10	28,7	14,5	11,9	14,5	31,8	25,9	X1	10	28,9	16,4	25,3
X2	20	53,1	47,2	39,7	40,5	65,0	37,8	X2	20	57,7	37,5	51,1
X3	30	54,1	68,5	68,5	74,4	104,3	97,3	X3	30	102,4	72,3	73,4
X4	40	84,3	88,9	107,7	137,9	141,1	118,8	X4	40	148,6	81,3	97,2
X5	50	104,8	150,3	170,8	176,5	179,0	192,5	X5	50	181,9	139,7	178,2
X6	60	168,5	169,7	202,1	215,5	219,2	224,8	X6	60	214,6	159,1	140,5
X7	70	246,4	255,4	253,4	248,3	263,2	245,9	X7	70	263,6	190,5	181,6
X8	80	274,4	284,0	294,5	289,0	308,5	295,8	X8	80	208,0	233,6	215,6
X9	90	318,0	325,9	333,5	334,6	344,3	346,3	X9	90	331,1	253,8	334,8
X10	100	326,7	365,7	361,1	383,1	387,3	382,7	X10	100	362,6	382,6	378,2
X11	110	354,9	405,4	399,5	422,7	423,9	414,6	X11	110	373,6	292,0	414,5
X12	120	449,8	442,2	455,8	454,6	457,9	477,6	X12	120	393,2	312,3	453,2
X13	130	454,4	ND	490,3	495,2	503,5	499,4	X13	130	486,0	489,9	505,5
X14	140	522,4	517,2	535,9	533,0	541,7	541,3	X14	140	515,9	500,9	545,0
X15	150	553,4	574,6	561,9	566,7	582,4	574,3	X15	150	561,9	525,8	581,1
X16	160	585,7	612,1	595,7	603,0	614,8	613,5	X16	160	596,3	602,0	610,6
X17	170	620,7	621,2	635,9	641,2	656,8	657,3	X17	170	698,8	646,9	662,6

ND – Não Determinado

Anexo III.3 - Face C

Ensaio 2 (Transmissão de Superfície/T fixo e R móvel) - Face C											
Sentido Directo (da esquerda para a direita)					Sentido Inverso (da direita para a esquerda)						
Medição	Distância (cm)	Tempo (µs)			Medição	Distância (cm)	Tempo (µs)				
		Linha I	Linha III	Linha V			Linha I	Linha II	Linha III	Linha IV	Linha V
X1	10	16,0	16,4	15,4	X1	10	24,3	17,2	20,1	33,9	33,7
X2	20	46,9	36,5	48,4	X2	20	64,1	42,6	42,7	58,9	65,4
X3	30	64,1	76,2	81,4	X3	30	103,0	57,5	69,3	104,1	115,2
X4	40	143,4	98,5	112,8	X4	40	133,7	103,0	106,4	134,6	140,1
X5	50	176,8	138,4	176,9	X5	50	177,6	144,8	176,6	164,4	180,6
X6	60	223,1	177,4	212,2	X6	60	210,7	175,5	215,3	223,4	221,9
X7	70	263,8	238,9	247,3	X7	70	243,5	208,7	249,2	244,6	258,0
X8	80	298,5	269,9	282,5	X8	80	298,3	252,5	287,2	291,6	292,9
X9	90	334,3	312,8	342,2	X9	90	319,5	265,2	334,6	325,7	336,3
X10	100	369,8	362,5	374,3	X10	100	364,8	376,1	362,3	359,9	373,8
X11	110	411,2	411,0	427,1	X11	110	403,6	402,5	422,1	408,3	419,9
X12	120	449,1	445,2	467,8	X12	120	485,7	453,8	447,3	448,8	442,2
X13	130	483,4	484,8	496,5	X13	130	490,1	480,3	481,5	477,1	478,1
X14	140	511,1	517,8	512,9	X14	140	525,0	514,7	517,6	512,3	539,5

Anexo III.4 - Face D

Ensaio 2 (Transmissão de Superfície/T fixo e R móvel) - Face D												
Sentido Directo (da esquerda para a direita)								Sentido Inverso (da direita para a esquerda)				
Medição	Distância (cm)	Tempo (µs)						Medição	Distância (cm)	Tempo (µs)		
		Linha 0	Linha I	Linha II	Linha III	Linha IV	Linha V			Linha I	Linha III	Linha V
X1	10	37,0	20,1	26,0	36,6	18,9	25,4	X1	10	36,0	26,0	27,6
X2	20	62,2	82,1	59,5	56,6	52,5	52,7	X2	20	79,2	56,1	67,2
X3	30	120,4	113,2	84,9	98,9	87,2	71,8	X3	30	117,1	101,0	121,9
X4	40	231,4	152,7	135,8	131,8	125,5	96,5	X4	40	150,3	140,0	153,8
X5	50	246,6	175,9	166,0	174,4	169,2	103,4	X5	50	190,8	174,8	194,4
X6	60	281,6	211,0	203,1	209,7	203,9	109,5	X6	60	230,1	217,6	232,8
X7	70	336,6	276,7	242,1	248,4	241,7	146,8	X7	70	261,7	251,5	254,1
X8	80	347,0	289,1	280,7	287,1	280,0	168,8	X8	80	301,8	289,9	308,3
X9	90	383,8	327,1	328,0	321,4	315,6	200,9	X9	90	328,1	329,0	322,7
X10	100	414,5	366,1	360,9	366,0	349,7	282,3	X10	100	360,8	374,7	395,5
X11	110	468,3	403,5	415,8	400,9	406,9	295,1	X11	110	435,3	411,2	435,3
X12	120	506,9	440,3	442,5	447,7	439,7	453,3	X12	120	465,4	426,4	445,1
X13	130	522,5	494,8	482,9	485,6	489,2	496,8	X13	130	487,6	444,5	507,4
X14	140	582,3	519,5	530,3	516,2	521,9	484,1	X14	140	527,9	517,8	532,3
X15	150	627,4	574,2	593,7	560,0	577,0	588,7	X15	150	567,4	566,7	573,7
X16	160	670,7	613,5	585,3	602,1	591,1	605,0	X16	160	601,1	598,6	600,3
X17	170	778,4	656,1	628,9	632,5	645,1	642,7	X17	170	673,4	642,0	659,9
X18	180	970,0	703,5	678,4	673,1	732,4	688,6	X18	180	700,0	672,0	699,0

Anexo IV – Valores Obtidos pelo Ensaio 3 (Transmissão Directa)

Anexo IV.1 - Face A para Face C

Ensaio 3 (Transmissão Directa) - Face A para Face C			
Extensão do Trajecto de 2,22m			
Ponto (Coluna, Linha)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Nível de sinal (%)
(0 , I)	909,2	2442	4
(0 , III)	865,1	2566	3
(0 , V)	443,6	5005	2
(2 , I)	1009,4	2199	3
(2 , III)	728,5	3047	3
(2 , V)	449,6	4938	2
(4 , I)	475,1	4673	2
(4 , III)	444,3	4997	4
(4 , V)	445,9	4979	8
(6 , I)	423,1	5247	2
(6 , III)	439,3	5053	2
(6 , V)	451,8	4914	2
(8 , I)	425,7	5215	3
(8 , III)	433	5127	3
(8 , V)	469,9	4724	2
(10 , I)	448,4	4951	6
(10 , III)	446,6	4971	2
(10 , V)	451,9	4913	4
(12 , I)	440,1	5044	2
(12 , III)	450,6	4927	3
(12 , V)	497,3	4464	2
(14 , I)	446,1	4976	2
(14 , III)	449,5	4939	3
(14 , V)	466	4764	2

Anexo IV.2 - Face D para Face B

Ensaio 3 (Transmissão Directa) - Face D para Face B			
Extensão do Trajecto de 1,82m			
Ponto (Coluna, Linha)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Nível de sinal (%)
(2 , I)	789,7	2311	2
(2 , III)	693,2	2633	2
(2 , V)	382,9	4766	2
(4 , I)	677,9	2692	3
(4 , III)	669,4	2726	3
(4 , V)	371,2	4916	2
(6 , I)	438,5	4162	3
(6 , III)	424,6	4298	2
(6 , V)	369,8	4935	8
(8 , I)	370,7	4923	3
(8 , III)	374,8	4869	2
(8 , V)	374,0	4880	8
(10 , I)	371,5	4913	4
(10 , III)	376,5	4847	3
(10 , V)	374,2	4877	4
(12 , I)	375,0	4867	5
(12 , III)	375,8	4856	5
(12 , V)	394,3	4628	3
(14 , I)	374,9	4868	3
(14 , III)	376,0	4854	8
(14 , V)	374,9	4868	5
(16 , I)	601,7	3033	2
(16 , III)	372,1	4905	3
(16 , V)	373,7	4884	4
(18 , I)	726,8	2511	2
(18 , III)	390,5	4673	3
(18 , V)	391,7	4659	3