



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP

Ensaaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes

Luís Filipe Barbosa Miranda

Orientador: Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes

Co-Orientador: Professor Doutor Aníbal Guimarães da Costa

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO
PORTO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL

JUNHO 2011

Aos meus pais

RESUMO

A caracterização de alvenarias resistentes, in-situ e de uma forma não/semi-destrutiva, é um assunto de extrema actualidade e que tem vindo a ser alvo de diversos estudos e projectos de investigação. No presente trabalho apresentam-se duas metodologias utilizadas na caracterização das alvenarias in-situ: o ensaio de macacos planos e os ensaios de propagação de ondas acústicas. Estas metodologias foram aplicadas a edifícios de alvenaria resistente constituída por pedras irregulares de grandes dimensões.

Não são muitos os exemplos disponíveis na bibliografia onde as técnicas não/semi-destrutivas são aplicadas a esse tipo de alvenarias. Por esse motivo, apresenta-se um conjunto de estudos realizados em estruturas de complexidade crescente, que permitiram compreender melhor a aplicação dessas técnicas de ensaio.

Relativamente aos ensaios de propagação de ondas acústicas, analisa-se a influência de diferentes factores na velocidade de propagação de ondas sónicas: tipo de junta (seca ou argamassada), tipo de superfície testada (lisa ou rugosa), presença de reboco e tipo de acoplador do acelerómetro. Utilizam-se duas configurações de ensaio, a directa e a indirecta, e compara-se a velocidade das ondas P, determinada através dos ensaios indirectos e directos, com a velocidade das ondas R, determinada através dos ensaios indirectos num processo de “validação-mútua”.

Ainda no que diz respeito aos ensaios de propagação de ondas acústicas, desenvolve-se uma técnica designada por Método do Impacto Sónico Indirecto (ISIM), que se testa em laboratório e in-situ. Esta técnica permite obter a velocidade das ondas P e R de alvenarias, considerando não apenas os seus elementos principais (pedras) como também os seus elementos secundários (juntas). Utilizando as expressões da teoria da elasticidade procura-se relacionar as velocidades das ondas elásticas com os módulos de elasticidade das alvenarias. Efectua-se ainda uma análise comparativa com os módulos de elasticidade obtidos através de ensaios de compressão simples, em recarga, e com os valores desses módulos obtidos nos ensaios de macacos planos.

Em relação ao ensaio com macacos planos, ao longo do trabalho são realçados aspectos relacionados com o incumprimento das condições que normalizam e regulam a execução do ensaio com macacos planos, analisando-se o seu impacto nos resultados obtidos. A aplicação da técnica em alvenarias foi progressivamente melhorada à medida que se realizavam novos ensaios, nomeadamente através da melhoria da protecção do macaco plano no interior do rasgo e das condições para a sua remoção. As diversas tentativas permitiram chegar a configurações cada vez mais adaptadas às alvenarias de pedra analisadas. Apesar desses esforços, os resultados obtidos foram apenas parcialmente os pretendidos, pelo que se concebeu um novo macaco plano cujo protótipo se espera poder construir em breve.

ABSTRACT

In situ characterization of masonries in a non or semi destructive way is a very actual subject and several research works are being developed on this topic. In this work two different methodologies used in the in situ characterization of masonries were presented and widely studied: the flat jack test and the acoustic wave's propagation test. These methodologies were applied in buildings made by masonries with large and irregular stones.

It was not possible to find in the literature too many examples where these tests were applied in this type of masonries. For this reason, this work presents a set of calibrations and tests performed in structures of growing complexity that allowed a better understanding of the specific features of these methodologies in stone masonry walls.

In terms of acoustic wave's propagation tests, the influence of several factors on sonic wave's propagation velocity was analyzed such as: type of joint (dry or filled with mortar), type of surface (smooth or rough), presence of plaster and, type of coupling between wall and accelerometer. Using two different test configurations (direct or indirect), a mutual validation was pursued. For that purpose, P wave velocities obtained through indirect and direct tests were compared with R wave velocity obtained by indirect tests.

Moreover, a new technique named Indirect Sonic Impact method (ISIM) was developed in the field of acoustic wave's propagation test, being tested in situ and in the laboratory. This technique provides P and R wave velocities in masonries, considering not only the main elements (stones) as well as the secondary elements (joints). Using the elasticity theory expressions, the elastic wave velocities can be related with the masonries Young modulus which can be compared with the same parameters obtained in unconfined compression tests (in reloading), and in flat jack tests.

In terms of the flat jack tests, several features related to the non-accomplishment of the standards that control the execution of the flat jack test, were identified during this work and their impact in the obtained results was analyzed. The application of this technique in masonries was improved at each test. One of the implemented improvements was in the protection of the flat jack inside the hole and in providing an easier removal of the flat jack. These improvements lead to better adapted configurations for these masonries walls. Despite these efforts, the obtained results were not as good as expected. Consequently, an option for a new flat jack was considered, whose prototype will be built soon.

AGRADECIMENTOS

Terminado o trabalho de Doutoramento, não posso deixar de exprimir os mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que possibilitaram e contribuíram para a sua realização:

- ✓ ao professor João Miranda Guedes, pela orientação e correcção da presente dissertação;
- ✓ ao professor Aníbal Costa por criar as condições necessárias à realização deste trabalho de investigação;
- ✓ ao Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da FEUP, a todos os membros, directores e colaboradores que contribuíram de forma decisiva para o trabalho que apresento;
- ✓ à professora Luigia Binda, por me dar a oportunidade de dar os primeiros passos na temática dos ensaios não-destrutivos e me acolher no seio do seu grupo de investigação;
- ✓ ao Arq.º Lorenzo Cantini, por acreditar na metodologia que desenvolvi e pelo trabalho que juntos pudemos realizar nessa temática;
- ✓ aos professores e colegas que me ajudaram com assuntos específicos e me transmitiram conhecimento de base, sem o qual seria impossível realizar este trabalho, em especial: Eng.º Jorge Carvalho (ensaios de propagação de ondas), Professor Luís Martelo (física), Eng.º João Rio (ondas), Eng.º Mário Caetano (polímeros);
- ✓ à minha família e a todos os meus amigos (eles sabem quem são!);
- ✓ a todas as pessoas que desde o início acreditaram em mim, me incentivaram e apoiaram;
- ✓ às instituições que sirvo, que me fazem acreditar em valores maiores, que vão muito para além do trabalho académico e me dão força para continuar!

MUITO OBRIGADO!

ÍNDICE GERAL

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Capítulo 1	1.1
1.1 Generalidades	1.1
1.2 Ensaio não-destrutivo em alvenarias resistentes.....	1.2
1.3 Objectivos.....	1.3
1.4 Estrutura e organização da dissertação	1.3
Capítulo 2	2.1
2.1 Generalidades	2.1
2.2 Tipos de ondas que se propagam num meio material	2.5
2.2.1 Ondas P.....	2.7
2.2.2 Ondas de superfície	2.10
2.2.3 Relação entre ondas P e R	2.12
2.3 Fenómenos que ocorrem com a propagação de ondas	2.15
2.3.1 Dispersão, velocidade de fase e velocidade de grupo.....	2.15
2.3.2 Reflexão e refacção	2.18
2.4 propagação de ondas em alvenarias	2.22
2.4.1 Generalidades.....	2.22
2.4.2 Modo de funcionamento dos equipamentos de propagação de ondas acústicas	2.23
2.4.3 Configurações utilizadas nos ensaios	2.26
2.4.4 Informação complementar dos ensaios de propagação de ondas acústicas 2.32	
2.4.5 Legislação e condicionantes dos ensaios de propagação de ondas acústicas 2.36	
2.5 Determinação de grandezas mecânicas a partir de ensaios acústicos.....	2.38
Capítulo 3	3.1
3.1 Introdução.....	3.1
3.2 Equipamento utilizado.....	3.2
3.2.1 Sistema sónico.....	3.2
3.2.2 Sistema ultra-sónico.....	3.8

3.3	Avaliação da influência de diferentes factores nas velocidades determinadas	3.10
3.3.1	Avaliação da influência do tipo de acoplador	3.10
3.3.2	Avaliação da influência do reboco	3.18
3.3.3	Conclusões.....	3.20
3.4	Ensaio directos e indirectos e de eco-impacto em pedras lisas	3.21
3.4.1	Ensaio directos	3.23
3.4.2	Eco-impacto.....	3.27
3.4.3	Ensaio sónico indirecto	3.28
3.4.4	Discussão dos resultados obtidos.....	3.34
3.4.5	Correlação entre os módulos de elasticidade “estático” e “dinâmico”.....	3.38
3.4.6	Síntese e conclusão dos ensaios realizados nas pedras individuais.....	3.42
3.5	Ensaio directos e indirectos em pedras de paredes irregulares	3.42
3.5.1	Ensaio directos em pedras de paredes irregulares	3.44
3.5.2	Ensaio indirectos em pedras de paredes irregulares.....	3.45
3.6	Análise da influência do atravessamento de juntas na velocidade de propagação das ondas.....	3.48
3.6.1	Generalidades	3.48
3.6.2	Provetes lisos	3.50
3.6.3	Provete rugoso	3.52
3.7	Comentários finais.....	3.59
Capítulo 4	.....	4.1
4.1	Introdução	4.1
4.2	Método do Impacto Sónico Indirecto - ISIM	4.2
4.3	Painéis de alvenaria construídos em laboratório.....	4.5
4.3.1	Material e Método.....	4.5
4.3.2	Resultados.....	4.7
4.3.1	Discussão.....	4.11
4.4	Painéis de alvenaria de pedra: comparação entre ensaios sónicos e ensaios mecânicos.....	4.14
4.4.1	Material e método.....	4.15
4.4.2	Caracterização prévia dos painéis	4.17
4.4.3	Comparação do módulo de elasticidade de PP2 através de ensaios mecânicos e de ensaios sónicos	4.20
4.4.4	Caracterização após os ensaios de corte em PG1 e PG2	4.29
4.5	Ensaio sónicos in-situ	4.31

4.5.1	Torre do Relógio - Caminha	4.32
4.5.2	Edifício do Largo dos Lóios	4.36
4.5.3	Edifício de Mouzinho da Silveira	4.38
4.6	Conclusão.....	4.41
Capítulo 5	.....	5.1
5.1	Introdução.....	5.1
5.2	Desenvolvimento da técnica	5.2
5.3	Tipos de ensaio com macacos planos	5.6
5.3.1	Ensaio simples.....	5.6
5.3.2	Ensaio duplo	5.9
5.4	Avaliação da quantidade de material envolvido num ensaio duplo com macacos planos 5.12	
5.5	Normalização.....	5.17
5.6	Material.....	5.20
5.6.1	Macacos Planos.....	5.20
5.6.2	Máquina de Corte	5.22
5.6.3	Sistema hidráulico.....	5.22
5.6.4	Deformómetro e LVDT	5.23
5.7	Exemplos de aplicação em Portugal	5.24
Capítulo 6	.....	6.1
6.1	Introdução.....	6.1
6.2	Casos de estudo.....	6.2
6.2.1	Edifício António Carneiro	6.2
6.2.2	Edifício do Largo dos Lóios	6.10
6.2.3	Edifício de Mouzinho da Silveira	6.13
6.2.4	Edifício da Sociedade de Reabilitação Urbana – V.N. Gaia	6.20
6.2.5	Edifício da Escola Emídio Garcia	6.27
6.2.6	Síntese e conclusões dos ensaios realizados	6.33
6.3	Macaco de alta deformabilidade e flexibilidade	6.37
Capítulo 7	.....	7.1
7.1	Considerações finais.....	7.1
7.2	Sugestões para desenvolvimentos futuros.....	7.4
Referências Bibliográficas	.....	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração de uma onda que se propaga com velocidade v (Alonso ; Finn, 1999).....	2.2
Figura 2.2 – Espectro electromagnético (NASA, 2011).	2.4
Figura 2.3 – Esquema do Espectro acústico	2.5
Figura 2.4 – Principais tipos de ondas elásticas: a) ondas P; b) ondas S; c) ondas de Love; d) ondas de Rayleigh. Ilustrações retiradas de “Fundamentos de Geofísica” (Miranda, et al.)	2.6
Figura 2.5 – Relação entre Amplitude com a profundidade das Ondas R numa camada homogéneo (Richart, et al., 1970).....	2.11
Figura 2.6 – Propagação de Ondas P e R num corpo de betão - adaptado de (Carino, 2001).....	2.13
Figura 2.7 – Variação dos valores das relações entre as velocidade das ondas P e R e as ondas S num meio elástico semi-finito e para diferentes valores de coeficiente de Poisson (Richart, 1962) conforme referido por (Richart, et al., 1970).....	2.14
Figura 2.8 – Propagação de um pulso de onda num material (Alonso ; Finn, 1999)....	2.15
Figura 2.9 – Propagação de um pulso de uma onda a uma velocidade v num dado meio não dispersivo (Tipler ; Mosca, 2006).	2.16
Figura 2.10 – Propagação de um pulso num meio (a) sem inclusões (b) com 10% de inclusões; adaptado de (Aggelis ; Shiotani, 2007b).	2.18
Figura 2.11 – Reflexão e refração: de uma onda P (imagem à esquerda); das componentes vertical, SV, (imagem do meio) e da componente horizontal, SH, de uma onda S (imagem à direita) (Richart, et al., 1970).....	2.19
Figura 2.12 – Ilustração de um ensaio de ultra-sons.	2.23
Figura 2.13 – Ilustração de um ensaio sónico.	2.24
Figura 2.14 – Ilustração de um ensaio sónico.	2.25
Figura 2.15 – Gráfico típico tempo vs amplitude do impulso (a azul) e da recepção (a rosa).....	2.25
Figura 2.16 – Representação de um ensaio sónico: a) directo; b) semi-directo; c) indirecto.....	2.27
Figura 2.17 – Forma típica do sinal de um ensaio Indirecto (gráfico tempo vs amplitude): 1-chegada das ondas P; 2-chegada das ondas R; 3-Primeiro máximo das ondas R (Qixian ; Bungey, 1996).	2.28
Figura 2.18 – Resultados obtidos com a configuração: a) b) e c) indirecta com o emissor distanciado do receptor por 100mm, 200mm e 250mm, respectivamente; d) directa.	2.29
Figura 2.19 – Ilustração de um ensaio indirecto.	2.30
Figura 2.20 – Resultados obtidos com a configuração: a) b) e c) indirecta com o emissor distanciado do receptor por 100mm, 200mm e 250mm, respectivamente.	2.30

Figura 2.21 – Gráfico tempo vs distância e correspondente regressão linear dos pontos apresentados.	2.31
Figura 2.22 – Reflexões de uma onda P quando encontra uma descontinuidade: a) esquema do percurso da onda no interior da amostra; b) gráfico (no domínio do tempo) resultante das sucessivas reflexões (Carino, 2001, Carino, 2004).	2.33
Figura 2.23 – Espectros resultantes da análise de sinais, obtidos através de uma FFT: a) corpo homogéneo de betão; b) corpo com um vazio (Carino, 2001, Carino, 2004).	2.35
Figura 2.24 – Representação de um vazio de dimensão d , localizado a uma profundidade P , num corpo de espessura T	2.35
Figura 2.25 – Curva tensão vs deformação típica de um granito; adaptado de (Vasconcelos, 2005).	2.39
Figura 2.26 – Influência da velocidade de aplicação da carga na resistência à compressão no betão (Neville, 1963).	2.40
Figura 3.1 – Gama de frequências emitidas pelo martelo com ponteira: (a) de alumínio; (b) de plástico.	3.3
Figura 3.2 – Martelo Utilizado.	3.3
Figura 3.3 – Martelo de maior massa.	3.4
Figura 3.4 – Acelerómetros utilizados.	3.5
Figura 3.5 – Zona estável do acelerómetro utilizado.	3.5
Figura 3.6 – Imagem do condicionador de sinal utilizado.	3.5
Figura 3.7 – Placa NI9233 e esquema de ligação da placa ao “carrier” NI USB-9162 e deste ao computador.	3.6
Figura 3.8 – Interface gráfica do programa utilizado na visualização e tratamento de resultados.	3.6
Figura 3.9 – Grelha utilizada na marcação dos pontos testados em alguns ensaios.	3.7
Figura 3.10 – Esquema utilizado na escolha dos pontos de leitura.	3.7
Figura 3.11 – Ilustração do efeito da taxa de aquisição.	3.8
Figura 3.12 – Equipamento de ultra-sons utilizado.	3.9
Figura 3.13 – Amplitude necessária para que um sinal seja detectado.	3.9
Figura 3.14 – Ilustração das configurações utilizadas: a) tipo 1; b) tipo 2; c) tipo 3.	3.11
Figura 3.15 – Localização dos ensaios ES1, ES2 e ES3 na planta original do edifício sito na rua António Carneiro.	3.12
Figura 3.16 – Ensaio ES1: (a) localização do ensaio, (b) pormenor; resultados: (c) tipo 1; (d) tipo 2; (e) tipo 3.	3.13
Figura 3.17 – Síntese dos resultados obtidos em ES1.	3.14
Figura 3.18 – Ensaio ES2: (a) localização; (b) pormenor; resultados: (c) tipo 1; (d) tipo 2; (e) tipo 3.	3.15
Figura 3.19 – Síntese dos resultados obtidos em ES2.	3.15

Figura 3.20 – Ensaio ES3: (a)localização; (b)pormenor; resultados: (c) tipo 1; (d) tipo 2; (e) tipo 3.	3.16
Figura 3.21 – Síntese dos resultados obtidos em ES3	3.17
Figura 3.22 – Vista dos dois alçados do local testado, com destaque para o ponto 6. .	3.17
Figura 3.23 – Elementos testados: a) localização; b) vista da alvenaria; c) rebaixamento verificado na zona inferior do pano exterior da parede.	3.18
Figura 3.24 – Ensaio sónico: a) locais P1 e P2 vistos do interior; b) locais P1 e P2 vistos do exterior; c) preparação do local P1 (remoção do reboco); d) marcação da matriz de 6x6 pontos em P1.	3.19
Figura 3.25 – Ensaio sónico: a) vista interior de P1 (sem reboco no pano interior); b) vista exterior de P1; c) mapa de velocidades obtido em P1; d) vista interior de P2 (com reboco no pano interior); e) vista exterior de P2; f) mapa de velocidades obtidos em P2.	3.20
Figura 3.26 – Imagens de algumas das pedras ensaiadas.....	3.22
Figura 3.27 – Vista em planta (esquema) e identificação das faces/alçados por E, L, H, M.	3.23
Figura 3.28 – Ilustração dos sentidos de propagação das ondas considerados nos diferentes ensaios directos.	3.24
Figura 3.29 – Resultados obtidos em ensaios sónicos directos, segundo os quatro sentidos testados.....	3.25
Figura 3.30 – PSD de cinco teste realizados ao longo dos pontos de uma das faces. .	3.26
Figura 3.31 – Resultados obtidos através da análise no domínio da frequência dos ensaios sónicos directos segundo os quatro sentidos testados.	3.26
Figura 3.32 – Resultados obtidos nos ensaios ultra-sónicos segundo os quatro sentidos testados.....	3.27
Figura 3.33 – Resultados obtidos em ensaios ultra-sónicos segundo os quatro sentidos testados.....	3.28
Figura 3.34 – Metodologia seguida nos ensaios indirectos para determinação da velocidade das ondas P e R: ponto de impacto a vermelho (I) e pontos de recepção a verde (R).	3.29
Figura 3.35 – Resultados de um ensaio numa face de um corpo de granito: ponto de impacto (martelo) e pontos de recepção (R1; R2; R3 – acelerómetros).....	3.30
Figura 3.36 – Velocidades das ondas P calculadas através do método da média das velocidades.	3.31
Figura 3.37 – Velocidades das ondas R calculadas através do método da média das velocidades.	3.32
Figura 3.38 – Velocidades das ondas P calculada através do método do último ponto.	3.32
Figura 3.39 – Velocidades das ondas R calculadas através do método do último ponto.	3.33
Figura 3.40 – Velocidades das ondas P calculadas através do método da regressão linear.	3.34

Figura 3.41 – Velocidades das ondas R calculadas através do método da regressão linear.	3.34
Figura 3.42 – Análise de sensibilidade do módulo de elasticidade face a outros parâmetros: velocidade.	3.39
Figura 3.43 – Preparação do ensaio ensaio para determinação do módulo de elasticidade (LESE, 2005).....	3.41
Figura 3.44 – Aspecto dos dois alçados principais da parede testada com a numeração colocada: a) alçado H; b) alçado M.	3.43
Figura 3.45 – Resultados qualitativos obtidos nos ensaios sónicos realizados até aqui: a) alçado H; b) mapa de velocidades obtido no alçado H; c) alçado M; d) mapa de velocidades obtido no alçado M.	3.44
Figura 3.46 – Resultados obtidos em cada ponto e nas duas direcções testadas (M para H e H para M).....	3.45
Figura 3.47 – Algumas pedras analisadas através de ensaios indirectos: a) Pedra dos Pontos 7,8,9 e 10; b) Pedra dos Pontos 21 e 22; c) Pedra dos Pontos 25 e 26; d) Pedra dos Pontos 28, 29 e 30.	3.46
Figura 3.48 – Resultados obtidos nos pontos válidos utilizando os vários métodos: directos e indirectos, sónicos e ultra-sónicos.....	3.46
Figura 3.49 – Equipamento utilizado para testar provetes de pedra.	3.48
Figura 3.50 – Ilustração de provete constituído por duas pedras de granito e uma junta.	3.49
Figura 3.51 – Pedras de granito com superfícies lisas: a) vista das pedras agrupadas; b) execução de um ensaio indirecto ascendente.	3.51
Figura 3.52 – Metodologias utilizadas na caracterização das pedras de superfície lisa: a) ensaios indirectos descendentes; b) ensaios indirectos ascendentes; c) ensaios directos.	3.51
Figura 3.53 – Resultados obtidos em ensaios indirectos e directos nos provetes testados.	3.52
Figura 3.54 – Ilustração do procedimento: a) ensaios directos nas pedras; b) pedras divididas em três amostras.	3.52
Figura 3.55 – Configurações de ensaio utilizadas nos ensaios sónicos directos, eco-impacto e indirectos.	3.53
Figura 3.56 – Velocidade obtida na primeira chegada nos ensaios indirectos e directos realizados sobre as amostras com duas faces lisas.	3.54
Figura 3.57 – Algumas fases do ensaio: a) teste de uma única amostra; b) sobreposição de outras amostras; c) vista da pedra D reconstituída.	3.54
Figura 3.58 – Velocidade obtida na primeira chegada nos ensaios indirectos realizados sobre as pedras reconstituídas.....	3.55
Figura 3.59 – Comparação entre as FFT obtidas através de ensaios sónicos directos: a) sem transpor qualquer junta; b) transpondo 2 juntas secas.....	3.56

Figura 3.60 – Colocação da argamassa nas juntas: a) aspecto de um dos componentes utilizados na produção de argamassa de cal; b) enchimento das juntas; c) vista de uma das pedras reconstituídas, com as juntas preenchidas.	3.56
Figura 3.61 – Espectros obtidos através do método do eco impacto num provete de juntas secas (imagem superior) e por um provete com juntas preenchidas por argamassa (imagem inferior).	3.57
Figura 3.62 – Velocidades obtidas através dos três métodos utilizados: ensaios directos; ensaios indirectos (primeira chegada); eco-impacto.	3.58
Figura 3.63 – Velocidade das ondas R ao longo do processo de cura.	3.58
Figura 3.64 – Evolução da velocidade de propagação das ondas, obtida através dos três métodos utilizados ao longo dos 28 dias monitorizados.	3.59
Figura 4.1 – Distinção entre ondas P e R num sinal temporal.	4.3
Figura 4.2 – Ilustração da execução de um ensaio indirecto ao longo de uma coluna de uma parede.	4.4
Figura 4.3 – Resultados obtidos num ensaio realizado sobre uma coluna de um painel de alvenaria.	4.4
Figura 4.4 – Distinção entre ondas P e R num sinal temporal.	4.5
Figura 4.5 – Alvenarias testadas: (a) pedras com superfícies lisas; (b) pedras semi-regulares com superfícies rugosas.	4.6
Figura 4.6 – Procedimento adoptado nos ensaios indirectos: a) imagem do teste; b) esquema do procedimento para impactos nos pontos superiores (à esquerda) e pontos inferiores (à direita).	4.7
Figura 4.7 – Velocidades médias das pedras obtidas em cada painel e tipo de alvenaria.	4.8
Figura 4.8 – Coeficientes de regressão linear obtidos para cada tipo de alvenaria.	4.9
Figura 4.9 – Velocidades obtidas para a alvenaria regular.	4.9
Figura 4.10 – Velocidades obtidas para a alvenaria semi-regular.	4.10
Figura 4.11 – Velocidades obtidas para a alvenaria irregular.	4.10
Figura 4.12 – esquema dos prismas utilizados nos ensaios de Vasconcelos (Vasconcelos, 2005).	4.11
Figura 4.13 - Objecto dos ensaios: (a) edifício de António Carneiro; (b) parede ensaiada.	4.14
Figura 4.14 – Parede testada: a) painel de menores dimensões; b) painel de maiores dimensões.	4.15
Figura 4.15 – Esquema dos painéis de maiores dimensões (PG1 e PG2): a) vista do alçado principal da parede; b) vista do alçado principal da parede.	4.15
Figura 4.16 – Pontos adoptados/colocados numa das faces principais de (a) PG1; (b) PG2; (c) PP2.	4.16
Figura 4.17 – Variação das velocidades das Ondas P e R em cada coluna testada em PG1, PG2 e PP2.	4.18

Figura 4.18 – Variação das velocidades das Ondas P em cada coluna testada em PG1, PG2 e PP2.....	4.19
Figura 4.19 – Variação das velocidades das Ondas R em cada coluna testada em PG1, PG2 e PP2.....	4.19
Figura 4.20 – Vista de PP2 antes do ensaio à compressão: a) Alçado L; b) alçado E...	4.20
Figura 4.21 – Evolução da velocidade das ondas P ao longo do ensaio de compressão (Quadro 4.7).....	4.22
Figura 4.22 – Aspecto dos sinais obtidos na coluna 1 antes do ensaio de compressão.	4.23
Figura 4.23 – Variação da velocidade das ondas R antes, durante e após o ensaio de carga (Quadro 4.8).	4.24
Figura 4.24 – Vista de PP2 depois do Ensaio à Compressão: a) c) abertura de junta; b) d) rotura de pedra.....	4.25
Figura 4.25 – Curva tensão-extensão obtida no ensaio de carga.....	4.26
Figura 4.26 – Curva tensão-extensão obtida no ensaio de carga para os painéis PP2 e PP3 (Almeida, et al., 2010b).....	4.27
Figura 4.27 – Ilustração do ensaio sónico: a) antes da injeção; b) depois da injeção.	4.28
Figura 4.28 – Comparação da velocidade das ondas P antes e depois do ensaio de corte.	4.30
Figura 4.29 – Comparação da velocidade das ondas R antes e depois do ensaio de corte.	4.30
Figura 4.30 – Aspecto do painel PG2 após o ensaio de corte.	4.31
Figura 4.31 – Imagens da Torre do Relógio: a) alçado principal (Sul); b) alçado posterior (Norte).....	4.32
Figura 4.32 – Preparação de um ensaio num elemento com 1.2m de espessura (6x2 pontos).....	4.33
Figura 4.33 – Localização dos ensaios realizados.	4.34
Figura 4.34 – Edifício do Largo dos Lóios: a) vista da fachada principal; b) planta esquemática do rés-do-chão.	4.37
Figura 4.35 – Local e pontos testados.	4.37
Figura 4.36 – Velocidade das ondas P obtida nas leituras em colunas, linhas e diagonais.	4.38
Figura 4.37 – Edifício de Mouzinho da Silveira (B): a) fachada na altura de intervenção; b) vista em planta.	4.39
Figura 4.38 – Locais adoptados para a realização dos ensaios: a) P1_1; b) P1_2, c) P2_1.	4.40
Figura 4.39 – Velocidades das ondas P (formas cheias) e R (formas vazias) obtidas nos três locais testados.....	4.41
Figura 5.1 – Colocação do macaco plano numa parede de alvenaria.	5.2
Figura 5.2 – Desenhos do LNEC (LNEC, 1970): a) macaco plano; b) máquina de corte.	5.3

Figura 5.3 – Estudo sobre estrutura sujeita a cargas excêntricas (Rossi, 1987): a) cargas efectivamente existentes; b) cargas aferidas através do ensaio com macacos planos simples.	5.5
Figura 5.4 – Esquema de ensaio utilizado na calibração dos macacos planos por Rossi (Rossi, 1985): a) ensaio simples; b) ensaio duplo.....	5.6
Figura 5.5 – Ilustração das 3 fases do ensaio simples (vista de frente da parede): a) antes do corte; b) depois do corte; c) aplicação de pressão no macaco.....	5.7
Figura 5.6 – Execução de um ensaio simples.	5.8
Figura 5.7 – Resultados obtidos num ensaio simples: evolução da distância entre os pontos de referência de cada alinhamento vertical em função da pressão efectiva instalada na parede.	5.9
Figura 5.8 – Fases do ensaio duplo: a) situação inicial; b) aumento de pressão simultâneo nos macacos e ilustração do movimento dos LVDT.	5.10
Figura 5.9 – Material utilizado num ensaio duplo: a) conjunto dos aparelhos utilizados; b) pormenor do local do ensaio.....	5.11
Figura 5.10 – Gráfico “tensão vs deformação” obtido num ensaio duplo.	5.12
Figura 5.11 – Distribuição dos LVDTs no ensaio realizado no Museu da Ciência e Tecnologia em Milão (Acito, et al., 2008).	5.13
Figura 5.12 – Distribuição de LVDTs no segundo teste (“Cavallerizze”) (Acito, et al., 2008).	5.15
Figura 5.13 – Aspecto da alvenaria no final do teste: a) abertura de fendas junto ao macaco plano inferior; b) aspecto da alvenaria na zona subjacente ao macaco plano inferior (Acito, et al., 2008).	5.16
Figura 5.14 – Gráfico tensão vs extensão obtido no edifício “Cavallerizze” (Acito, et al., 2008).	5.16
Figura 5.15 – a) modelo não-linear adoptado; b) deformações na direcção vertical; c) deformações na direcção horizontal (Acito, et al., 2008).	5.17
Figura 5.16 – Diferentes tipos de macacos planos (vista esquemática em planta): a) rectangular; b) circular; c) semi-circular.	5.18
Figura 5.17 – Macaco plano utilizado: a) imagem do macaco; b) esquema com as dimensões do macaco (em milímetros).	5.21
Figura 5.18 – Dispositivo utilizado no teste dos macacos planos em laboratório: a) vista geral; b) pormenor.	5.21
Figura 5.19 – Aspecto da máquina de corte.	5.22
Figura 5.20 – Bomba hidráulica: a) vista geral; b) pormenor.	5.22
Figura 5.21 – Deformómetro utilizado na medição dos deslocamentos no ensaio com macacos planos simples: a) conjunto fornecido pelo fabricante; b) deformómetro; c) ponta cónica do deformómetro; d) ponto de referência com depressão cónica; e) ponto de referência e deformómetro.	5.23
Figura 5.22 – LVDT utilizado: a) aspecto do aparelho adquirido; b) aspecto do aparelho após a preparação realizada no LESE.	5.24

Figura 5.23 – Aspecto do tipo de paredes testadas, posicionamento dos rasgos e colocação dos pontos de referência (Gregorczyk ; Lourenço, 2000).	5.25
Figura 5.24 – Comparação entre os valores estimados e os valores obtidos em ensaios simples (Pagaimo, 2004, Roque, 2002, Vicente, 2009).	5.26
Figura 6.1 – Localização do ensaio com macacos planos realizado no edifício de António Carneiro: a) vista em planta; b) vista em alçado.	6.3
Figura 6.2 – Local MP1: a) vista geral da alvenaria; b) vista do local no final do corte; c) vista do corte sem o calço da junta.	6.3
Figura 6.3 – Execução do ensaio no local MP2: a) execução de um corte; b) aspecto final do primeiro corte.	6.4
Figura 6.4 – Evolução das distâncias dos pontos de referência em MP2.	6.4
Figura 6.5 – Evolução relativa das distâncias entre os pontos de referência por patamar de pressão.	6.5
Figura 6.6 – Evolução das distâncias dos pontos de referência em MP2.	6.7
Figura 6.7 – Pormenor do local do ensaio duplo.	6.8
Figura 6.8 – Curvas tensão vs extensão obtidas no ensaio duplo.	6.9
Figura 6.9 – Localização do ensaio com macacos planos: a) vista do exterior do edifício; b) planta esquemática.	6.10
Figura 6.10 – Preparação do ensaio simples: a) local do teste; b) corte; c) aspecto final do corte.	6.11
Figura 6.11 – Resultados obtidos no ensaio simples.	6.11
Figura 6.12 – Fases que se seguiram ao ensaio: a) e b) remoção do macaco; c) aspecto final do macaco plano.	6.12
Figura 6.13 – Utilização da bomba de vácuo: a) bomba de vácuo; b) preparação do macaco.	6.13
Figura 6.14 – Localização do ensaio com macacos planos: a) planta esquemática; b) aspecto da alvenaria ensaiada.	6.14
Figura 6.15 – Ensaio simples de macacos planos: a) após realização do rasgo com os 5 alinhamentos realçados; b) macaco plano e folha de PET colocados.	6.15
Figura 6.16 – Resultados do ensaio simples.	6.15
Figura 6.17 – Aspecto do local testado com os LVDTs de 60cm: a) vista geral; b) pormenor dos LVDTs.	6.17
Figura 6.18 – Curva tensão vs deformação obtida para LVDTs de 60cm de comprimento.	6.18
Figura 6.19 – Curva tensão vs deformação obtida para LVDTs com 1m de comprimento.	6.18
Figura 6.20 – Comparação entre os resultados médios obtidos com LVDTs de 60cm (curva a azul) e com LVDTs de 1m (curva a vermelho).	6.19
Figura 6.21 – Resultados médios obtidos com LVDTs de 60cm (curva a azul) e de 1m (curva a vermelho) colocado em sequência, de modo a ser possível analisar a continuidade das duas curvas.	6.20

Figura 6.22 – Esquema do edifício testado e localização dos ensaios realizados: a) em planta; b) em alçado.	6.21
Figura 6.23 – Chapa de protecção colocada sobre a face superior do macaco plano. .	6.21
Figura 6.24 – Imagens da realização do ensaio simples em MP1: a) medição do afastamento dos pontos de referência antes do corte; b) introdução do macaco plano; c) macaco plano colocado.	6.22
Figura 6.25 – Esquema do edifício testado e localização dos ensaios: a) em planta; b) em alçado.....	6.22
Figura 6.26 – Evolução da distância entre os pontos de referência para os alinhamentos verticais em MP2.	6.23
Figura 6.27 – Evolução da distância entre os pontos de referência para cada patamar de pressão: a) MP1; b) MP2.....	6.23
Figura 6.28 – Ensaio de avaliação da capacidade resistente e da deformabilidade da chapa de protecção na presença de um vazio: a) montagem (vista em planta); b) montagem (vista de perfil); c) vista do esquema de ensaio; d) vista interior do local mais solicitado.	6.25
Figura 6.29 – Chapas de protecção dos macacos: a) geometria (vista em planta); b) esquema de colocação e modo de remoção (corte do plano vertical da parede)..	6.26
Figura 6.30 – Primeira avaliação da modificação introduzida no ensaio com macacos planos: a) edifício objecto de teste; b) sistema de chapas colocado.	6.27
Figura 6.31 – Planta da escola e pormenor do local em que se realizou o ensaio com macacos planos.....	6.28
Figura 6.32 – Preparação do ensaio simples: a) definição dos locais a medir e a cortar; b) colocação dos discos de referência; c) corte; d) abertura suplementar do rasgo; e) aspecto final do rasgo.....	6.29
Figura 6.33 – Evolução dos deslocamentos por patamar de pressão (efectiva).	6.29
Figura 6.34 – Evolução da distância entre dos alinhamentos com a tensão aplicada no ensaio simples.....	6.30
Figura 6.35 – Imagem da zona ensaiada: a) realce das pedras; b) realce dos LVDTs.	6.31
Figura 6.36 – Gráfico tensão vs extensão do LVDT3.	6.32
Figura 6.37 – Gráficos tensão-extensão obtidos no ensaio duplo.....	6.32
Figura 6.38 – Gráfico tensão vs deformação obtido no ensaio: curva média dos LVDTs verticais e curva do LVDT5 (horizontal).	6.33

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Impedâncias acústicas específicas de alguns materiais; adaptado de (Carino, 2004).	2.20
Quadro 2.2 – Dimensões mínimas do provete para diferentes velocidades de propagação e frequências de propagação (BSI, 2004, CEN, 2007).	2.37
Quadro 3.1 – Velocidades médias (m/s) das ondas P.	3.14
Quadro 3.2 – Síntese das velocidades e desvios-padrão (em percentagem) das ondas P obtidas utilizando as configurações directas, eco-impacto e indirectas.....	3.35
Quadro 3.3 – Velocidades das ondas R e respectivos desvios padrão (em percentagem) obtidas nos ensaios indirectos através dos diferentes métodos de análise.....	3.37
Quadro 3.4 – Módulos de elasticidade calculados com base nas velocidades dos ensaios sónicos para as nove pedras lisas testadas.....	3.39
Quadro 3.5 – Módulos de elasticidade determinados através de ensaios mecânicos (LESE, 2005).....	3.41
Quadro 3.6 – Caracterização visual dos pontos de leitura (face H-M).	3.43
Quadro 3.7 – Média das velocidades obtidas nos ensaios validados.	3.47
Quadro 4.1 – Velocidades de propagação das ondas nas pedras e respectivos módulos de elasticidade, com base numa massa volúmica de $\rho=2600\text{kg/m}^3$ e num coeficiente de Poisson de $\nu=0.3$	4.8
Quadro 4.2 – Velocidades e correspondentes módulos de elasticidade obtidos com base nos ensaios sónicos para uma massa volúmica de $\rho=2400\text{kg/m}^3$ e um coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$	4.11
Quadro 4.3 – Módulo de elasticidade obtido para as pedras e para diferentes tipos de prismas testados (Vasconcelos, 2005).	4.12
Quadro 4.4 – Comparação dos módulos de elasticidade obtidos nos painéis (E_w) e nas pedras dos painéis (E_s).	4.13
Quadro 4.5 – Velocidade das ondas P (em m/s).	4.17
Quadro 4.6 – Velocidade das ondas R (em m/s).	4.17
Quadro 4.7 – Velocidades obtidas no ensaio directo em pedras.	4.21
Quadro 4.8 – Velocidades obtidas em ensaios indirectos.	4.23
Quadro 4.9 – Velocidades obtidas em ensaios indirectos.	4.25
Quadro 4.10 – Velocidades das ondas P e R obtidas em PG1 e PG2 após o ensaio de corte.	4.29
Quadro 4.11 – Síntese dos ensaios realizados.	4.35
Quadro 5.1 – Síntese do estudo realizado sobre diferentes painéis (Rossi, 1985).	5.4
Quadro 5.2 – Redução da deformação medida ao longo do alinhamento vertical (yy) (Acito, et al., 2008).	5.14
Quadro 5.3 – Alguns aspectos das normas da ASTM e da RILEM.....	5.19

Quadro 6.1 – Valores de anulamento da distância dos alinhamentos utilizados no ensaio simples.....	6.6
Quadro 6.2 – Síntese de resultados obtidos nos edifícios estudados.....	6.34

SIGLAS E ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

LESE – Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural;

NCREP – Núcleo de Conservação e Reabilitação d'Edifícios e Património;

NDT – “Non Destructive Testing”;

ISIM – Método do Impacto Sónico Indirecto;

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial;

V_P - velocidade de propagação da Onda P (m/s);

V_S - velocidade de propagação da Onda S (m/s);

V_R - velocidade de propagação da Onda R (m/s);

δ - densidade do material (kg/m^3);

u - coeficiente de poisson dinâmico (adimensional);

E - módulo de elasticidade ou de Young (Pa);

G - módulo de rigidez (Pa);

c_p – velocidade de fase;

w – frequência angular;

k_0 – número da onda;

EC – Ensaio de Carga;

MHS – Movimento Harmónico Simples;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Actualmente, Portugal conta com cerca de 5.700.000 fogos para habitação, divididos por 3.500.000 edifícios. Este número, embora elevado quando comparado com o número de habitantes, não tem parado de aumentar, com a construção de mais 600.000 fogos nos últimos 10 anos. Mas, a mudança a que se tem assistido em Portugal, iniciou-se a partir das décadas de 1980 e 1990 e trouxe consequências extremamente nefastas a Portugal, com uma construção baseada em estruturas de betão armado realizadas, essencialmente, na periferia das grandes cidades.

Esse novo fluxo de construção levou a um crescente abandono dos centros históricos das cidades, já que os novos edifícios construídos na periferia apresentavam preços e condições apelativas, enquanto os edifícios mais antigos eram vistos como ultrapassados e incapazes de garantir bons padrões de conforto e qualidade. Assim, aos poucos os centros históricos das cidades esvaziaram-se, apenas com algumas (re)ocupações pontuais e, em geral, com origem em classes economicamente mais desfavorecidas.

A desertificação do centro das cidades causou danos no seu tecido social, cultural, económico e ambiental, que hoje se notam claramente, nomeadamente: a insegurança, a exclusão social nesses centros, o aumento do tráfego nas cidades, o perigo de derrocada dos edifícios entretanto abandonados, o endividamento das famílias (contração de empréstimos), etc....

De acordo com dados do Instituto Nacional de Estatística, na década de 2000 tem-se assistido a uma redução dos licenciamentos para obras de construção: passou-se de 63587 edifícios licenciados no ano 2000, para 30587 no ano 2009. Esta forte redução dos licenciamentos de habitação nova tem tendência a continuar dada a conjuntura económica a que hoje se assiste em Portugal e que motivou o aumento das restrições dos ban-

cos à concessão de crédito. Ainda assim, na última década o número de construções novas foi cerca do dobro do aumento do número de cidadãos residentes em Portugal.

Com um número tão elevado de edifícios construídos e com a tendência de redução da construção nova que se tem vindo a verificar, a sociedade portuguesa tem necessariamente que se concentrar no edificado existente. Parece ser clara a necessidade de uma mudança drástica nas orientações da indústria da construção em Portugal, sendo a aposta na reabilitação de edifícios uma das saídas para esta indústria em Portugal.

Dando ainda maior consistência à necessidade de reabilitar, um estudo realizado no âmbito dos Censos 2001 indica que, do total do edificado português, cerca de 40% dos edifícios necessita de obras de reabilitação, ou seja, há mercado para a reabilitação. A necessidade de obras de reabilitação é maior nos edifícios mais antigos, facto a que não será alheia a sempre intensa actividade de construção das últimas décadas e o abandono do centro das cidades e, conseqüentemente, dos edifícios mais antigos. Segundo os Censos 2001, cerca de 70% dos edifícios existentes tinha paredes de alvenaria resistente, e destes, mais de metade tinha lajes de betão armado.

Actualmente, os edifícios antigos do centro das cidades começam a ser vistos, não como locais sem conforto e pouco actuais, mas como locais privilegiados para viver. Para além dos aspectos positivos inerentes à reabilitação, a sociedade portuguesa começa agora a perceber que, os edifícios antigos fazem parte da sua cultura e identidade.

1.2 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS EM ALVENARIAS RESISTENTES

Sempre que se intervém em património edificado é necessário fazer a sua caracterização material e estrutural, que sirva de base ao estudo/intervenção a realizar. Esse estudo pode ser motivado por factores tão diversos como (Binda ; Saisi, 2001): reabilitação do edifício para o mesmo ou diferente uso; monitorização estrutural; determinação do coeficiente de segurança... Uma caracterização deficiente dos elementos existentes pode originar uma das seguintes situações: o reforço adoptado ser insuficiente, podendo ser posta em causa a segurança dos utentes e do próprio edifício; o edifício ser reforçado para além do necessário, aumentando o custo e intrusividade da obra.

As recomendações do “Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios” (ICOMOS, 2001) sugerem que os trabalhos de reabilitação no património, incluindo os de caracterização, envolvam acções pouco intrusivas. Neste sentido, a presente dissertação pretende dar um contributo ao desenvolvimento de técnicas de ensaio não/semi-destrutivas que possibilitem a caracterização de alvenarias resistentes.

No presente trabalho utilizam-se os ensaios sínicos e os ensaios com macacos planos para caracterizar alvenarias resistentes. Estas duas técnicas adoptam-se, frequentemente, de forma complementar, embora também se possam utilizar de forma iso-

lada. Quando se utilizam de forma complementar, os ensaios sónicos são realizados em primeiro lugar com a finalidade de caracterizar qualitativamente a alvenaria em profundidade e avaliar a representatividade do local em que se pretende fazer o ensaio com macacos planos. Em elementos de alvenaria de grande espessura e múltiplos panos, o ensaio com macacos planos tem um carácter local, já que apenas permite a caracterização da sua zona mais externa (Binda, et al., 2003).

1.3 OBJECTIVOS

Na presente dissertação pretendeu-se estudar a aplicabilidade do ensaio com macacos planos e dos ensaios de propagação de ondas acústicas, em especial o ensaio sónico, na caracterização de paredes de alvenaria resistente, construídas com pedra de grandes dimensões.

Pretendeu-se analisar a aplicabilidade do ensaio com macacos planos à luz das normas em vigor, e identificar as limitações/dificuldades desta técnica no tipo de alvenaria testado. Ao longo dos ensaios realizados procurou-se, continuamente, melhorar a aplicação desta técnica, adaptando-a melhor às condições in-situ em estudo.

No caso do ensaio sónico, partindo da velocidade de propagação das ondas P e R, procurou-se obter uma quantidade de informação maior do que aquela que até agora é disponibilizada por ensaios deste tipo. Em particular, procurou-se estudar a dinâmica de propagação das ondas elásticas em materiais muito simples, como é o caso de pedras de formas regulares, e depois em materiais mais complexos, com o objectivo final de estimar o módulo de elasticidade das alvenarias de pedra.

1.4 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação que se apresenta é composta por 7 capítulos. No Capítulo 1 apresentam-se considerações gerais e enquadra-se o tema da dissertação no contexto actual.

No Capítulo 2 apresentam-se algumas considerações acerca da propagação de ondas em sólidos; faz-se uma referência especial às ondas que são mais utilizadas nos ensaios sónicos realizados no âmbito da dissertação: as ondas de compressão (P) e as ondas de Rayleigh (R). Além disso, apresentam-se os fenómenos de reflexão e refacção. É dada uma atenção especial à propagação de ondas em alvenarias, ao tipo de configurações existentes para a realização dos ensaios, à informação complementar que é possível obter e à determinação das grandezas mecânicas a partir de ensaios acústicos.

No Capítulo 3 passa-se à apresentação dos ensaios sónicos realizados neste trabalho. Inicia-se com a apresentação do equipamento utilizado e apresenta-se um conjunto de ensaios com vista a avaliar a influência de algumas variáveis na velocidade de pro-

pagação de ondas sónicas. Depois, apresentam-se vários ensaios com vista a testar situações de complexidade crescente: primeiro pedras individuais, depois pedras pertencentes a alvenaria e, posteriormente, conjuntos construídos em laboratório, formados por pedras e juntas regulares. Este último teste marcou a transição com a matéria estudada no Capítulo 4, no qual se apresenta o estudo de alvenarias numa perspectiva global.

O Capítulo 4 é direccionado para a apresentação de uma técnica de caracterização mecânica de alvenarias resistentes, que se designou de Método do Impacto Sónico Indirecto (ISIM). Esta técnica baseia-se na propagação de ondas acústicas de superfície e aplica-se na caracterização mecânica de diferentes tipos de alvenarias. Foram realizados testes em laboratórios e in-situ. Em laboratório os resultados obtidos foram cruzados com os resultados de ensaios destrutivos e outros realizados in-situ; nem sempre foi possível validar os resultados dos ensaios sónicos, mas, nessas situações, avaliou-se a sua coerência através da realização de ensaios utilizando diferentes configurações. Pontualmente foram apenas utilizados ensaios directos, que possibilitaram obter uma caracterização meramente qualitativa da parede.

No Capítulo 5 apresenta-se o segundo grande tema da dissertação: o ensaio com macacos planos. Começa-se por fazer uma retrospectiva da evolução dos macacos planos e explicam-se as suas potencialidades. Depois, expõem-se e discutem-se as duas normas em vigor e, posteriormente, apresenta-se o material utilizado. Finalmente, faz-se uma referência a três estudos que envolveram a utilização da técnica em Portugal.

No Capítulo 6, apresenta-se o estudo dos casos práticos em que se interveio em edifícios Portugueses, apresentando-se os resultados obtidos e as dificuldades sentidas na sua realização. Depois, referem-se os problemas e limitações que se notaram no decorrer dos ensaios e o procedimento seguido para os limitar ou mesmo resolver totalmente. Este Capítulo culmina com a apresentação sintética de um novo macaco plano que se pretende de alta deformabilidade e sensibilidade.

Finalmente, no Capítulo 7 apresentam-se as conclusões do trabalho realizados e sugerem-se desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2

ONDAS E ENSAIOS ACÚSTICOS

2.1 GENERALIDADES

Um dos ensaios realizados no âmbito da presente dissertação – ensaio sónico - envolve a propagação de ondas acústicas num determinado corpo. Para a sua compreensão é importante conhecer os fenómenos que estão na sua génese e que podem influenciar os resultados obtidos. Por este motivo, apresenta-se no presente Capítulo, um conjunto de aspectos, de complexidade crescente, que culminam com a apresentação do ensaio e das suas potencialidades.

Na natureza, os materiais são constituídos por um conjunto de partículas ligadas entre si. Quando um material está em repouso, não estando a ser solicitado por forças exteriores, as partículas que o constituem estão na posição de equilíbrio. No entanto, na presença de forças externas as partículas são afectadas, oscilando em torno do seu ponto de equilíbrio, num movimento que acaba também por influenciar as partículas adjacentes (e vice-versa).

O movimento das partículas pode ser descrito com base na teoria ondulatória, embora uma partícula assuma, quase sempre, várias oscilações simultaneamente. O movimento oscilatório mais simples da natureza é o movimento harmónico simples, que é definido por uma sinusóide. A equação do movimento harmónico simples caracteriza o movimento de uma partícula no tempo t , que se desloca ao longo de um plano segundo uma lei de amplitude A , frequência f e constante de fase δ . Essa lei pode ser definida de uma forma genérica pela Equação 2.1.

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \delta) \quad \text{Equação 2.1}$$

Na natureza é frequente existirem movimentos um pouco mais complexos do que o movimento harmónico simples. Esses movimentos são resultados de sobreposição de várias oscilações mais simples que podem ter orientação, frequência, fase diversas.

A energia responsável pela vibração de partículas no interior de um corpo é transportada por ondas. As ondas harmónicas são a base do movimento ondulatório e, por isso, a sua compreensão serve para a compreensão dos restantes tipos de movimentos de ondas, já que permite representar o movimento de qualquer tipo de ondas, periódicas ou não-periódicas. A imagem que se apresenta na Figura 2.1 ilustra uma onda harmónica que se propaga num dado instante de tempo a uma velocidade v , com um comprimento de onda λ e uma amplitude A . A forma sinusoidal apresentada seria diferente no caso de oscilações sobrepostas dado que resultaria de uma formulação mais complexa.

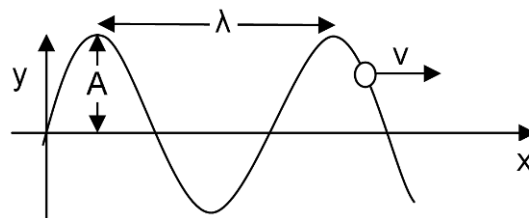


Figura 2.1 – Ilustração de uma onda que se propaga com velocidade v (Alonso ; Finn, 1999).

A oscilação apresentada na Figura 2.1 pode ser definida por uma função seno. O seu movimento segundo o eixo dos y pode ser descrito para qualquer posição “ x ” através da Equação 2.2:

$$y(x) = A \text{sen}\left(2\pi \frac{x}{\lambda} + \delta\right) \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

- ✓ A - amplitude;
- ✓ λ - comprimento de onda;
- ✓ δ - constante de fase.

Substituindo $\frac{2\pi}{\lambda}$ por k (número de onda), a Equação 2.2 pode ser escrita na forma da Equação 2.3:

$$y(x) = A \text{sen}(kx + \delta) \quad \text{Equação 2.3}$$

A quantidade de energia transportada por uma onda pode ser mais ou menos importante, consoante o caso: a energia associada às ondas sonoras pode não ser suficiente para provocar a vibração do tímpano (e assim não recebe a informação contida nessas ondas), ou ser de tal forma elevada que provoque lesões na capacidade de audição de um indivíduo. De outra forma: a energia associada às ondas sísmicas pode ser irrelevante, por não ser sentida, ou destruidora.

A importância da energia transportada por uma onda depende da sua amplitude mas também da sua frequência. A frequência (f) é o inverso do período (T) que corresponde ao intervalo de tempo que um dado ponto demora a completar uma oscilação completa, por exemplo, a adquirir duas vezes consecutivas a amplitude A segundo uma dada direção (ver Figura 2.1). Assim, a frequência corresponde ao número de ciclos que uma partícula executa por segundo e as suas unidades são o s^{-1} , ou seja, o Hz. A Equação 2.4 apresenta algumas das relações da frequência com outras grandezas que caracterizam a propagação de ondas.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda} \quad \text{Equação 2.4}$$

onde:

- ✓ f – frequência (Hz);
- ✓ T – período (s);
- ✓ v – velocidade de propagação (m/s);
- ✓ λ – comprimento de onda (m).

As ondas não são estáticas; são animadas de uma certa velocidade que lhes confere movimento. A posição do ponto de uma onda pode ser definida pela Equação 2.5.

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad \text{Equação 2.5}$$

onde:

- ✓ ω – frequência angular $\omega = 2\pi f$ (rad/s);
- ✓ k – número da onda.

As ondas podem ser classificadas tendo em conta diferentes critérios. Uma possível divisão consiste em distinguir ondas periódicas de não-periódicas. As ondas não-periódicas possuem um movimento aleatório, imprevisível e complexo, por oposição às

ondas periódicas que se caracterizam por terem um movimento que se repete periodicamente.

As ondas podem também ser divididas em ondas estacionárias e ondas progressivas. As ondas estacionárias caracterizam-se por a sua energia estar confinada a uma certa região do espaço, como é exemplo o caso de uma onda numa corda de uma guitarra. As ondas progressivas caracterizam-se por a propagação da sua energia não estar confinada a fronteiras, induzindo às partículas de um corpo movimentos em torno das respectivas posições de equilíbrio, movimentos esses que são consideravelmente menores quando comparados com o espaço em que a onda se desenvolve. São exemplos de ondas progressivas as ondas sonoras que se propagam no ar ou as ondas sísmicas (Eisberg ; Lerner, 1982).

A divisão que tem mais interesse no âmbito da presente dissertação talvez seja a que distingue as ondas mecânicas das ondas electromagnéticas. As ondas electromagnéticas necessitam de um campo eléctrico e de um campo magnético para se propagar; têm uma vantagem em relação às ondas mecânicas: a sua propagação no vácuo é possível. Como exemplos práticos de tecnologias que utilizam a radiação electromagnética podem citar-se, por exemplo, o georadar, as câmaras de infra-vermelhos, o raio-x, raio-gama, entre outros. Refira-se que os dois primeiros exemplos têm tido uma aplicação crescente no campo dos ensaios não-destrutivos em património construído. Na Figura 2.2 é apresentada uma ilustração do espectro electromagnético que associa o comprimento de diferentes tipos de ondas a dimensões de objectos conhecidos.

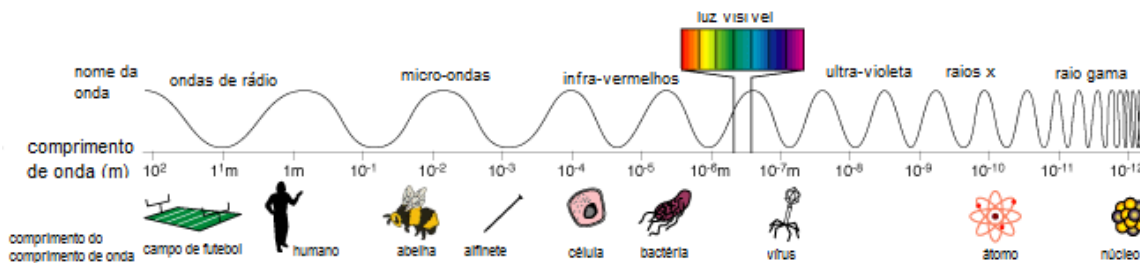


Figura 2.2 – Espectro electromagnético, adaptado de (NASA, 2011).

As ondas mecânicas, utilizadas nos ensaios sónicos e ultra-sónicos realizados no âmbito da presente dissertação, compreendem um conjunto de movimentos que ocorrem na natureza e que por acção de forças de diferentes tipos acabam por se anularem, restabelecendo as partículas às suas posições de equilíbrio através de forças elásticas (Gerthsen, et al., 1998). Como desvantagem em relação às ondas electromagnéticas, as ondas mecânicas não se propagam no vácuo, necessitando de um meio para se propagar.

As ondas acústicas pertencem ao grupo das ondas mecânicas. A classificação de uma onda em onda acústica depende da frequência de propagação que lhe está associada. A Figura 2.3 apresenta o espectro acústico de uma forma esquemática, onde se distinguem três zonas: (a) sónica, que pertence ao espectro acústico, tem uma gama de frequências que vai desde 20Hz a 20kHz; (b) abaixo dos 20Hz, as ondas acústicas designam-se por infra-sónicas; (c) acima dos 20kHz até aos 200kHz designam-se por ondas ultra-sónicas.

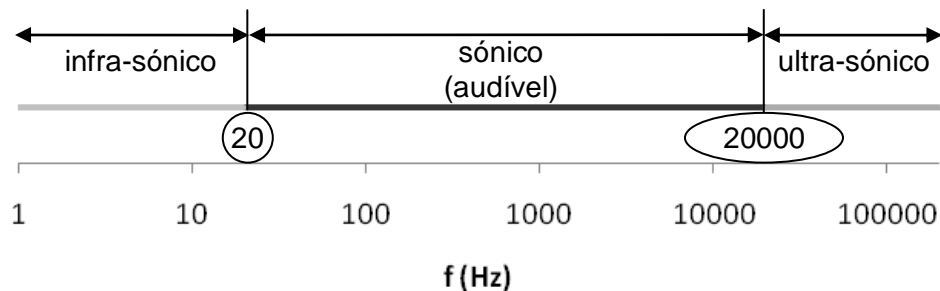


Figura 2.3 – Esquema do Espectro acústico

As ondas acústicas propagam-se nos diferentes meios com velocidades características. Note-se que quando se fala em velocidade de propagação não se refere quais os tipos de ondas envolvidos nessa velocidade. Contudo, a literatura quase sempre privilegia as ondas mais rápidas, as ondas P, para caracterizar um dado material. Por exemplo, no ar a velocidade de propagação do som é de 340m/s; na água de 1460m/s; na madeira entre 1000 a 4900m/s e no aço cerca de 5000m/s (Center, 2011).

Porém, em meios sólidos, como os que se estudam na presente dissertação, as ondas P não são o único tipo de ondas que se propagam. Existem ondas de outros tipos que merecem ser explicadas de seguida.

2.2 TIPOS DE ONDAS QUE SE PROPAGAM NUM MEIO MATERIAL

As ondas que se propagam no meio material podem ser sub-divididas de acordo com dois parâmetros fundamentais: ondas interiores (“body waves”), que se propagam no interior dos materiais, e ondas superficiais, que se propagam à superfície dos materiais. Num ensaio sónico o impacto de um martelo sobre um material é responsável pela geração de alguns desses tipos de ondas que se distinguem entre si pelo modo como se propagam. Entre os tipos de ondas que se verificam num sólido, destacam-se os seguintes:

- ✓ ondas longitudinais (de compressão, primárias ou simplesmente ondas P) – propagam-se, em meios sólidos, líquidos ou gasosos, através de movimentos de compressão e extensão segundo a direcção longitudinal, paralelamente à direcção de propagação. Ao passar para um novo meio de propa-

gação as ondas P alteram a sua velocidade. São as ondas mais rápidas de entre as ondas mecânicas ou elásticas;

- ✓ ondas transversais (de distorção, de corte, secundárias ou simplesmente ondas S) – propagam-se através da vibração das partículas na direcção perpendicular à propagação. Este tipo de ondas tem a particularidade de não existir em meios líquidos ou de rigidez ao corte nula;
- ✓ ondas de Rayleigh – são ondas superficiais. Apresentam um movimento elíptico retrógrado, semelhante ao movimento de uma onda no mar e afectam a camada superficial mas também a(s) camada(s) subjacente(s), embora o seu efeito decresça exponencialmente com o aumento da profundidade (Ferreira, 2003, Miranda, et al., 2000);
- ✓ ondas de Love – apenas se registam num meio em que a superfície superior está em contacto com o ar e a superfície inferior com um meio em que a velocidade da onda S é superior. Produzem corte no plano horizontal, perpendicularmente à direcção de propagação da onda.

Na Figura 2.4 apresentam-se os modos de propagação dos quatro tipos de ondas elásticas a que se fez referência.

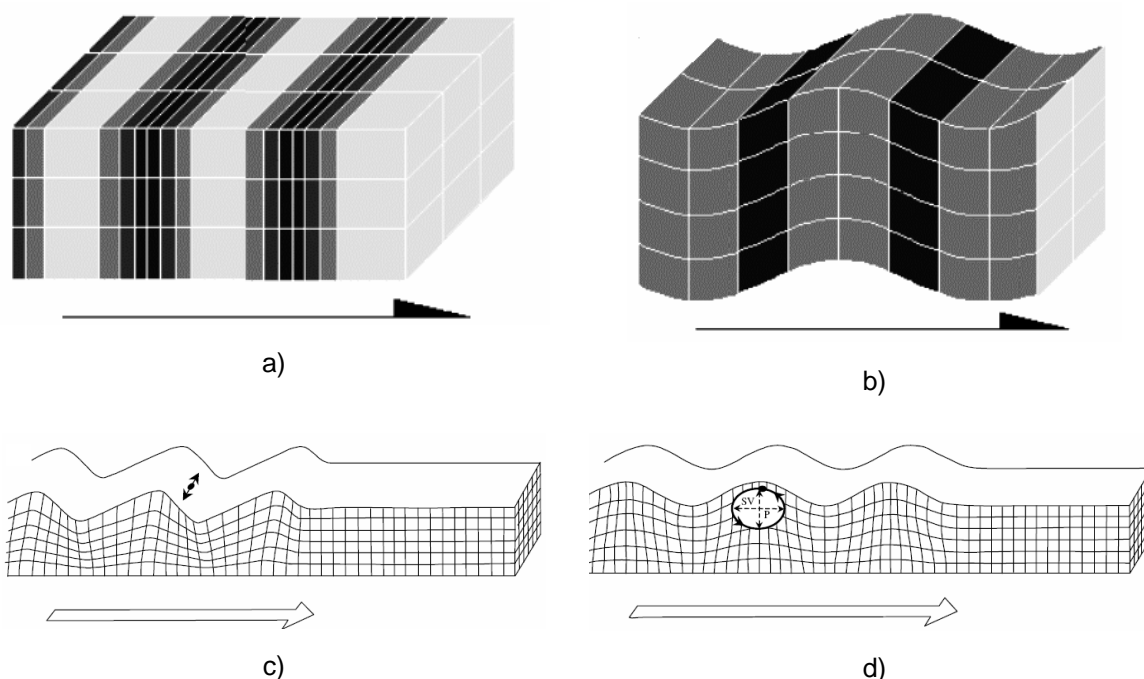


Figura 2.4 – Principais tipos de ondas elásticas: a) ondas P; b) ondas S; c) ondas de Love; d) ondas de Rayleigh. Ilustrações retiradas de “Fundamentos de Geofísica” (Miranda, et al., 2000)

A identificação dos diferentes tipos de ondas dá ao investigador informações diferentes, já que o seu modo de propagação afecta a sua velocidade, energia e comprimen-

to de onda. Qualquer uma destas grandezas podia ser avaliada na presente dissertação. Contudo, para limitar o âmbito do trabalho a desenvolver, incidiu-se essencialmente na velocidade de propagação das ondas.

A velocidade de propagação das ondas está relacionada com as propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Em particular, por motivos que se irão explicar, neste trabalho utilizaram-se dois tipos de ondas: ondas longitudinais e ondas superficiais. Estes dois tipos de ondas e a sua relação com as grandezas físicas e mecânicas são, por esse motivo, alvo de uma descrição mais detalhada.

2.2.1 Ondas P

A equação que descreve um movimento ondulatório que se propaga a uma velocidade v ao longo do eixo dos xx é a que se apresenta na Equação 2.6:

$$\frac{\delta^2 \xi}{\delta t^2} = v^2 \frac{\delta^2 \xi}{\delta x^2} \quad \text{Equação 2.6}$$

A tensão σ de um cilindro de secção transversal A , sujeito a uma força F de tracção segundo o eixo do cilindro é dada pela Equação 2.7:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 2.7}$$

A força aplicada ao cilindro é responsável pela deformação que este sofre. A deformação ξ imposta pela força F ao cilindro por unidade de comprimento x permite obter a deformação do cilindro e pode ser determinada pela Equação 2.8.

$$\varepsilon = \frac{\delta \xi}{\delta x} \quad \text{Equação 2.8}$$

O Módulo de Elasticidade (E) de um material permite relacionar a tensão de um material com a respectiva deformação através da chamada Lei de Hooke que se apresenta na Equação 2.9.

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Equação 2.9}$$

A combinação das equações apresentadas permite escrever a Equação 2.10 (Alonso ; Finn, 1999).

$$F = EA \frac{\delta \xi}{\delta x} \quad \text{Equação 2.10}$$

O incremento de comprimento do cilindro quando submetido à força F é o integral dos alongamentos parciais dos vários segmentos que o compõe. Num segmento do cilindro de comprimento dx , num dado instante, é possível ter uma força F numa das faces e uma força F' noutra face (em sentido contrário). A força que actua nesse segmento é a diferença $dF = F - F'$, também obtida através da força δF dividida por cada infinitésimo δx pertencente à secção de comprimento dx .

Assumindo que a massa da secção de comprimento dx é dm , considerando uma massa volúmica de ρ , e que o volume dessa secção é dV pode-se escrever que $dm = \rho dV$, ou seja $dm = \rho A dx$. A aceleração da massa dm é dada pela segunda derivada do alongamento da secção do cilindro em ordem ao tempo. A equação $F = ma$ pode ser escrita da forma que se apresenta na Equação 2.11.

$$\frac{\delta F}{\delta x} dx = \rho A dx \frac{\delta^2 \xi}{\delta t^2} \quad \text{Equação 2.11}$$

Derivando a equação Equação 2.10 em ordem a x e igualando-a à Equação 2.11 pelo termo $\frac{\delta F}{\delta x}$ obtém-se a Equação 2.12.

$$\frac{\delta^2 \xi}{\delta t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\delta^2 \xi}{\delta x^2} \quad \text{Equação 2.12}$$

A Equação 2.6 e Equação 2.12 permitem determinar a velocidade v a que o campo de deformação ξ se propaga com a direcção da força F e da onda que se encontra na génese da sua propagação (direcção longitudinal). Como se viu anteriormente, a velocidade com que a propagação viaja num meio material e que tem a direcção da excitação que esteve na sua origem, corresponde à velocidade de propagação das ondas P (V_p). A Equação 2.13 permite obter essa velocidade para um material homogéneo e isotrópico e de coeficiente de Poisson zero $\nu = 0$ (i.e. indeformável na direcção transversal).

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Equação 2.13

Partindo das relações e deformações num corpo isotrópico, a equação Equação 2.13 pode ser reescrita em função das constantes de Lamé λ e G dadas pela Equação 2.14 e pela Equação 2.15 que se apresentam de seguida (Azevedo, 1996).

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

Equação 2.14

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Equação 2.15

Para se compreender melhor esta afirmação, considere-se um cubo sujeito a três tensões principais – $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - cada uma orientada segundo os eixos x_1, x_2 e x_3 . Essas tensões provocam deformações – $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - segundo as mesmas direcções principais. A Equação 2.16 permite obter as deformações provocadas pelas tensões σ_1, σ_2 e σ_3 ao longo das direcções principais.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} \\ & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} \\ SIM. & & \frac{1}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Equação 2.16

A Equação 2.16 pode ser escrita em função da tensão da forma seguinte:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & B \\ & A & B \\ SIM. & & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$

Equação 2.17

sendo:

$$\checkmark \quad A = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\checkmark \quad B = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

A tensão principal σ_1 é escrita na forma $\sigma_1 = A\varepsilon_1 + B\varepsilon_2 + B\varepsilon_3$. Considerando agora que o coeficiente de Poisson é não nulo e que o cubo se encontra impedido de se deformar nas direcções transversais x_2 e x_3 , ou seja $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$, então, em substituição da Equação 2.9, aparece $\sigma_1 = A\varepsilon_1$. Nesta situação, a Equação 2.13 converte-se em:

$$v_p = \sqrt{\frac{A}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad \text{Equação 2.18}$$

2.2.2 Ondas de superfície

As ondas de superfície apenas são geradas na presença de um bordo livre e podem ser, essencialmente, de dois tipos: ondas de Love e ondas de Rayleigh. A principal diferença entre ondas de Rayleigh e ondas de Love é que as primeiras caracterizam-se por um movimento elíptico vertical, enquanto as ondas de Love apresentam um movimento horizontal e transversal ao movimento da onda (relativamente à direcção do impacto, similar ao apresentado para as ondas S). Este facto faz com que as ondas de Love não possuam componente vertical, ou seja, para fora da superfície (Mussett ; Khan, 2000). Além disso, ao contrário das ondas de Love, as ondas R podem-se propagar em corpos constituídos apenas por uma camada de material.

Uma onda R propaga-se à superfície de um sólido num movimento elíptico retrógrado, como se ilustra na Figura 2.4 d). Este tipo de ondas é gerado quando existe uma superfície livre de um meio elástico de corpo contínuo. As ondas de Rayleigh foram introduzidas, pela primeira vez, em 1885 por John Strutt Lord of Rayleigh (Rayleigh, 1885) como forma de explicar as ondas que se propagavam ao longo da superfície plana de um sólido elástico. A descoberta das ondas R (Rayleigh, 1885) foi usada na sismologia para explicar porque é que só após a chegada das ondas P e S (bem conhecidas na época) se dava o efeito mais devastador, de maiores amplitudes de vibração (maior energia).

As ondas R podem ser vistas como uma sobreposição de uma onda longitudinal com uma onda de corte, propagando-se à mesma velocidade mas tendo diferentes leis

de atenuação com a profundidade. A sua amplitude varia com a profundidade e com o comprimento de onda.

A Figura 2.5 ilustra a forma de atenuação das componentes, horizontal e vertical, para diferentes valores de coeficientes de Poisson. O respectivo estudo foi realizado por Lamb, em 1904 (Lamb, 1904) e, mais tarde, foi desenvolvido por Richart (Richart, et al., 1970). Pela Figura 2.5 percebe-se que a amplitude das ondas R reduz-se com o aumento da profundidade. A Figura 2.5 apresenta uma outra variável que influencia a amplitude das ondas R em profundidade: o comprimento de onda. Assim, mesmo para $z \neq 0$ a amplitude pode ser muito próxima da amplitude à superfície desde que o comprimento da onda responsável pela perturbação seja muito superior a essa profundidade ($z/L_R \approx 0$; onde L_R é o comprimento de onda da onda R).

Outra observação interessante que resulta da análise da Figura 2.5 é que, para valores pertencentes ao intervalo $0 < z/L_R < 0.2$ a componente vertical das ondas R é superior à amplitude que a mesma tem à superfície. Finalmente, verifica-se que a amplitude das ondas R depende do coeficiente de Poisson. No caso da Figura 2.5 apresentam-se valores para coeficientes de Poisson de 0.25, 0.33, 0.40, 0.50.

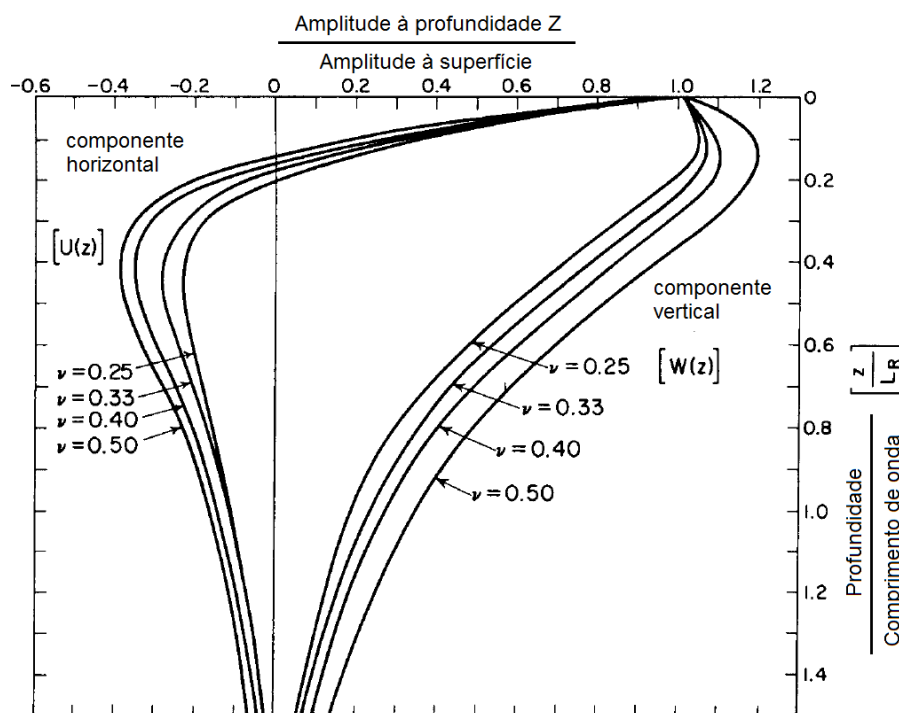


Figura 2.5 – Relação entre Amplitude com a profundidade das Ondas R numa camada homogénea, adaptado de (Richart, et al., 1970).

À semelhança das restantes ondas elásticas, também as ondas R podem ser relacionadas com parâmetros físicos e mecânicos do material em que se propaga: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e densidade. A Equação 2.19 apresenta essa rela-

ção cuja dedução se dispensa, por ser complexa (Rayleigh, 1885) e ter vindo a merecer uma discussão ao longo dos tempos (Mechkour, 2002, Nkemzi, 1996, Rayleigh, 1885).

$$V_r = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \nu)}} \quad \text{Equação 2.19}$$

2.2.3 Relação entre ondas P e R

Uma dada partícula que pertence a um determinado corpo pode sofrer o efeito de vários tipos de ondas. A este respeito, Lamb (Lamb, 1904) referiu que uma partícula que se encontra à superfície experimental, em primeiro lugar, a chegada das ondas P e, após um período de quietude, a chegada das ondas S. Lamb designou estes dois eventos por “tremor menor”. Após a chegada das ondas S dá-se o “tremor maior”, que corresponde à oscilação seguinte que tem uma amplitude muito superior e que corresponde à chegada das ondas R. Na sequência desta observação foram feitos estudos mais precisos. Miller (Miller ; Pursey, 1955) conforme referido por (Richart, et al., 1970), concluiu que para um impacto num meio homogéneo, isotrópico e elástico, as ondas R adquirem a maior quantidade de energia, cerca de 67%, enquanto os outros dois tipos possuem apenas 26%, no caso das ondas S, e 7%, no caso das ondas P

Após o impacto, as ondas propagam-se sofrendo atenuações que diferem entre si. À superfície, a atenuação (também designada por amortecimento geométrico) das ondas R é relativamente baixa, valendo $1/r^{1/2}$ (onde r corresponde à distância à fonte), enquanto que as ondas P e S perdem energia à razão de $1/r^2$ (à superfície). Esta diferença significativa explica o facto de à passagem mais tardia dos sismos (que corresponde à passagem das ondas R), estar associado o maior grau de destruição. Em síntese, as ondas R para além de terem a maior percentagem de energia atenuam-se muito mais lentamente do que as ondas P e S. Fora da zona superficial do material, tanto as ondas P como as ondas R atenuam a sua amplitude à razão de $1/r$, ou seja, as ondas P atenuam-se mais lentamente e as ondas R mais rapidamente.

Recentemente, foi realizado um estudo pelo National Institute of Standards and Technology (Carino, 2001) em que se identificaram as velocidades relativas das Ondas P e R (entre outras) para um corpo de betão com um coeficiente de Poisson de 0.2. Para o caso estudado (betão com um coeficiente de Poisson de 0.2), verificou-se que as ondas P são as mais velozes, seguidas das ondas R, que se propagam a 56% da velocidade de propagação das ondas P. Embora não tenham sido representadas, refere-se, a título de curiosidade, que as ondas S neste meio se propagam a 62% da velocidade das ondas P.

A Figura 2.6 ilustra os resultados obtidos no mesmo ensaio, indicando o local em que se aplicou o impacto (emissor) e a posição que as primeiras ondas P e R a ser geradas tinham num determinado instante. Ainda na Figura 2.6, nota-se que a perturbação gerada pelo impacto se afasta do ponto do impacto viajando: (a) à superfície sob a forma da onda R (mais lenta) que se propaga em forma de círculo de raio crescente quando se observa a superfície de impacto de frente (semelhante à propagação das ondas num lago quando se atira uma pedra sobre a água em repouso); e (b) dentro do corpo (“body wave”) formando um “movimento esférico” com centro no ponto de emissão (impacto) e de raio crescente.

A relação matemática entre as ondas P e as ondas R apenas entra em linha de conta com o coeficiente de Poisson. Essa relação, válida para meios homogêneos, elásticos e semi-finitos, é apresentada na Equação 2.20.

$$\frac{V_p}{V_r} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)} \cdot \frac{(1+\nu)^2}{(0.87 + 1.12\nu)^2}} \quad \text{Equação 2.20}$$

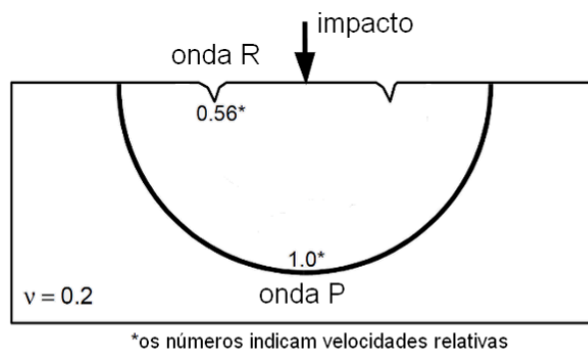


Figura 2.6 – Propagação de Ondas P e R num corpo de betão - adaptado de (Carino, 2001).

A Equação 2.20 tem vantagens inegáveis, já que dispensa o conhecimento da massa volúmica do material em estudo para calcular qualquer uma das velocidades V_p . No caso da Equação 2.18 e da Equação 2.19, para se conhecer a velocidade das ondas P, ou R é necessário conhecer outras grandezas a que não se tem acesso rigoroso.

Apresenta-se na Figura 2.7 a relação entre a velocidade das ondas P e R e a onda S, V_p/V_s e V_r/V_s , em função do coeficiente de Poisson, para meios homogêneos, elásticos e semi-finitos. Embora sejam diferentes, verifica-se que as velocidades das ondas R (V_r) e S (V_s) são muito próximas, o que faz com que a relação V_r/V_s seja próxima da uni-

dade¹. Tendo em conta essa proximidade de valores, podem-se tirar algumas conclusões entre V_r e V_p , directamente da Figura 2.7. Assim, verifica-se que V_p/V_r varia menos para coeficientes de Poisson baixos (até cerca de 0.25) do que para valores de coeficientes de Poisson elevados (em especial a partir de 0.4).

O coeficiente de Poisson das pedras de granito anda em torno dos 0.2 a 0.3; as argamassas antigas, por vezes já degradadas, possuem frequentemente mais vazios que lhes proporcionam uma maior capacidade para o rearranjo das partículas com expansões laterais reduzidas (baixo coeficiente de Poisson), ao contrário das pedras. Este comportamento vai-se reflectir nas características das próprias alvenarias que irão assumir um comportamento intermédio ao da pedra e da argamassa, isto é, um coeficiente de Poisson sempre inferior ao da pedra que se considera em geral inferior a 0.3. Assim e de acordo com a Figura 2.7, a relação entre V_p e V_r está compreendida em $1.5 < (V_p/V_r) < 2$.

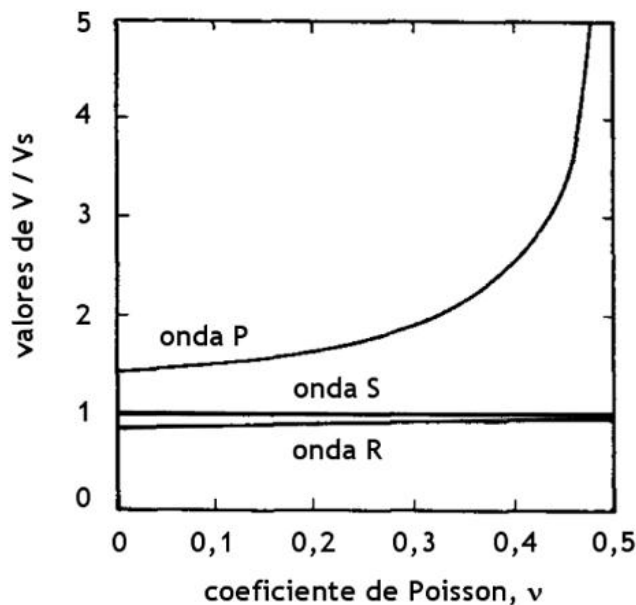


Figura 2.7 – Variação dos valores das relações entre as velocidades das ondas P e R e as ondas S num meio elástico semi-finito e para diferentes valores de coeficiente de Poisson (Richart, 1962) conforme referido por (Richart, et al., 1970).

¹ Por curiosidade: (para $\nu=0$) a relação V_r/V_s é de 0.874; para ($\nu=0.5$) é de 0.955. Na prática é comum adoptar-se $V_R = 0.94V_S$.

2.3 FENÓMENOS QUE OCORREM COM A PROPAGAÇÃO DE ONDAS

2.3.1 Dispersão, velocidade de fase e velocidade de grupo

As velocidades das ondas elásticas são diferentes em meios com diferentes características. Em meios dispersivos as ondas adquirem propriedades que tornam o conceito de velocidade, tal como se conhece, um pouco vago. Para se entender melhor o significado de meio dispersivo irá falar-se do que ocorre a uma perturbação que se propaga num dado material.

Um impacto (por exemplo de um martelo) na superfície de um material transmite-lhe um pulso de onda, isto é, uma perturbação que se propaga através desse meio. O pulso de onda é um fenómeno não periódico e limitado no tempo que requer uma distribuição de frequências contínua designada por pacote de onda para a sua síntese harmónica (Alonso ; Finn, 1999). Se o pulso tiver uma duração muito curta, a faixa de frequências necessária para o descrever é muito elevada, e vice-versa.

Apesar de um pulso poder ser representado por um grupo de ondas harmónicas de diferentes frequências, difere de uma onda harmónica porque esta tem amplitude constante (o pulso tem amplitude variável) e duração infinita (o pulso tem duração finita). A Figura 2.8 ilustra um pulso de ondas.

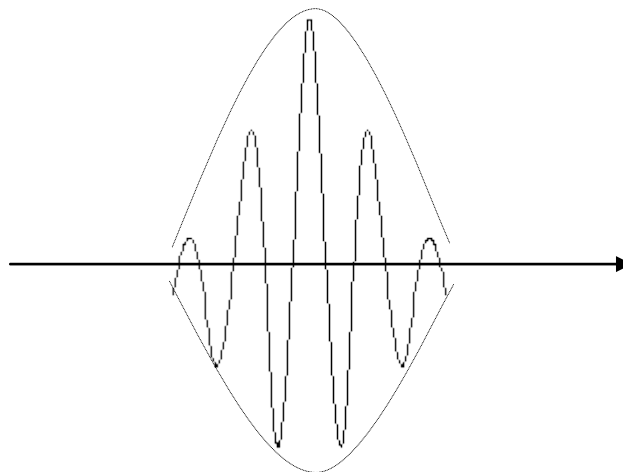


Figura 2.8 – Propagação de um pulso de onda num material (Alonso ; Finn, 1999).

Se um pulso de onda for induzido num corpo em repouso, essa perturbação é transmitida pelas partículas que a sofreram às partículas adjacentes. Na Figura 2.9 representa-se a evolução de um pulso no tempo e no espaço onde o sistema de eixos Oxy permanece fixo e o sistema de eixos $O'x'y'$ move-se com a velocidade v do pulso. Decorrido um intervalo de tempo $t' = t + \Delta t$ o pulso irá ocorrer mais à frente no referencial no ponto $x' = x + \Delta x$ (tem a direcção positiva do eixo dos xx).

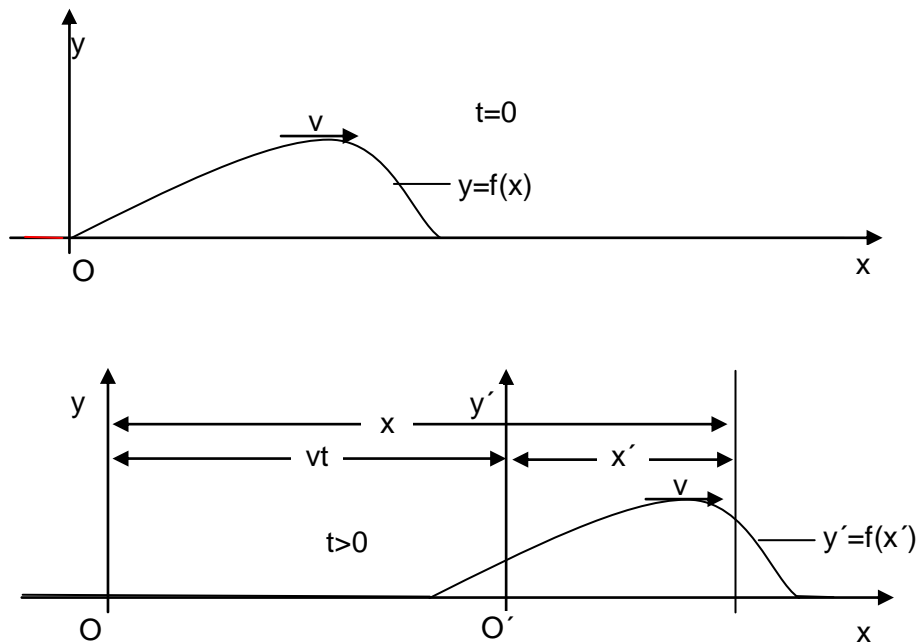


Figura 2.9 – Propagação de um pulso de uma onda a uma velocidade v num dado meio não dispersivo (Tipler ; Mosca, 2006).

A equação que define a nova posição do pulso é a chamada função de onda e representa-se pela Equação 2.21.

$$y = f(x - vt) \tag{Equação 2.21}$$

Para que um pacote de onda mantenha a forma durante o seu deslocamento, todas as ondas harmónicas que dele fazem parte necessitam de se deslocar com a mesma velocidade. Como resultado, o pacote de onda aparecerá na nova posição (O') com a mesma forma com que tinha aparecido na posição anterior (O). Quando esta situação ocorre diz-se que não há dispersão (o meio não é dispersivo).

A situação descrita na Figura 2.9 refere-se à propagação de um pacote de onda num meio não dispersivo. Contudo, as situações que ocorrem na natureza podem ser diversas, isto é, por vezes a forma do pulso vai sendo alterada de acordo com as características do meio em que o pulso se propaga (Tipler ; Mosca, 2006) (Elmore ; Heald, 1985, Gerthsen, et al., 1998, Ingard, 1988). Nessa situação diz-se que ocorre dispersão.

A dispersão das ondas é um fenómeno que ocorre quando se dá a passagem das ondas por um meio dispersivo. Com a dispersão as ondas alteram a sua forma inicial, dividindo-se nas várias componentes espectrais que compõem o pulso. Se um pulso ou pacote de onda alterar a sua forma significa que a velocidade das ondas é dependente da respectiva frequência.

Dois conceitos importantes para a compreensão do fenômeno da dispersão são a velocidade de fase e a velocidade de grupo. A velocidade de fase pode ser definida como a velocidade a que uma componente de um pulso viaja num determinado meio sem alterar a sua forma, isto é, mantendo a sua constante de fase - δ (Rio, 2006).

Quando se analisa um pulso, como o que se apresentou na Figura 2.9, através da medição da velocidade com que ele percorre um determinado espaço, não se está a medir necessariamente a velocidade de fase mas sim a velocidade de propagação do grupo de ondas – denominada de velocidade de grupo - que o compõe (Alonso ; Finn, 1999).

Se a velocidade de propagação for independente da frequência, todas as frequências do pulso caminharão à mesma velocidade sendo, neste caso, a velocidade de grupo igual à velocidade de fase e a forma do pulso mantém-se inalterada. O meio em que esta situação é possível serve, unicamente, para “guiar” um pulso e por isso designa-se por “meio não dispersivo”.

Por outro lado, se um meio for dispersivo, significa que a velocidade de propagação de cada componente do sinal é diferente consoante a frequência que lhe está associada. Neste caso, pode-se concluir que o máximo do pulso se propaga à velocidade de grupo que é diferente da velocidade de fase (maior ou menor) e a forma do pulso vai progressivamente alongando. Dependendo da gama de frequências e da heterogeneidade do material, pode ocorrer maior ou menor dispersão.

Para avaliar a influência que diferentes níveis de heterogeneidade têm na velocidade de propagação e na frequência dos pulsos de onda (que não podem ser entendidos como velocidade de grupo ou de fase mas são utilizados correntemente em ensaios não destrutivos) foi realizado um estudo (Aggelis ; Shiotani, 2007b) sobre cubos de argamassa em que se utilizaram inclusões de pequenas placas de vinil em diferentes percentagens de volume até um máximo de 10%. Para esta situação, verificou-se uma diminuição em 18% e 32% da velocidade do pulso das ondas P e R, respectivamente; as ondas R demonstraram ser mais sensíveis à presença de inclusões apresentando também maior dispersão de resultados do que as ondas P.

A Figura 2.10 apresenta o efeito que uma amostra (a) sem inclusões e (b) com inclusões, têm no sinal obtido. Pode-se dizer que no caso da Figura 2.10 a), a velocidade de grupo é igual à velocidade de fase (a forma da onda emitida é idêntica à forma da onda recebida), enquanto no caso da Figura 2.10 b) essa situação não ocorre, já que as diferentes componentes do pulso não viajam todas à mesma velocidade e, portanto, a velocidade de grupo é diferente da velocidade de fase.

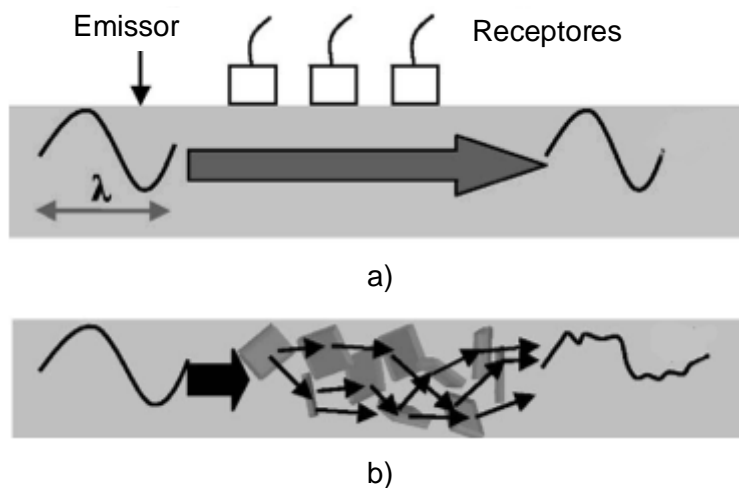


Figura 2.10 – Propagação de um pulso num meio (a) sem inclusões (b) com 10% de inclusões; adaptado de (Aggelis ; Shiotani, 2007b).

Num estudo sobre estruturas danificadas verificou-se que após a respectiva injeção com argamassas, a velocidade de propagação das ondas P e R aumentou em 5%, o que demonstra a sensibilidade a este procedimento de reparação. Contudo, o valor da frequência central do pulso recebido era superior em 15% na estrutura reparada (9.6kHz a 11.1kHz), isto é, a frequência central recebida demonstrou neste estudo ser um parâmetro mais sensível à injeção de fendas (Aggelis, et al., 2009). No mesmo estudo, verificou-se que a velocidade de propagação das ondas P medida na estrutura danificada, dependia da distância percorrida, sugerindo a existência de dispersão. Este efeito, que não se notava para as ondas R, era anulado para a estrutura reparada (injectada).

2.3.2 Reflexão e refração

Segundo a teoria da reflexão das ondas, quando uma onda que se propaga num material encontra uma interface é reflectida e refractada. A reflexão das ondas elásticas ocorre de modo semelhante ao das ondas de luz por um espelho: o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. A incidência de uma onda P ou da componente vertical (para fora do plano) de uma onda S (também representada por SV) numa fronteira gera quatro ondas: duas SV e duas P. A incidência da componente horizontal das ondas S (também representadas por SH, oscilação no plano) gera duas ondas SH (uma reflectida e uma refractada). A Figura 2.11 faz uma síntese deste fenómeno.

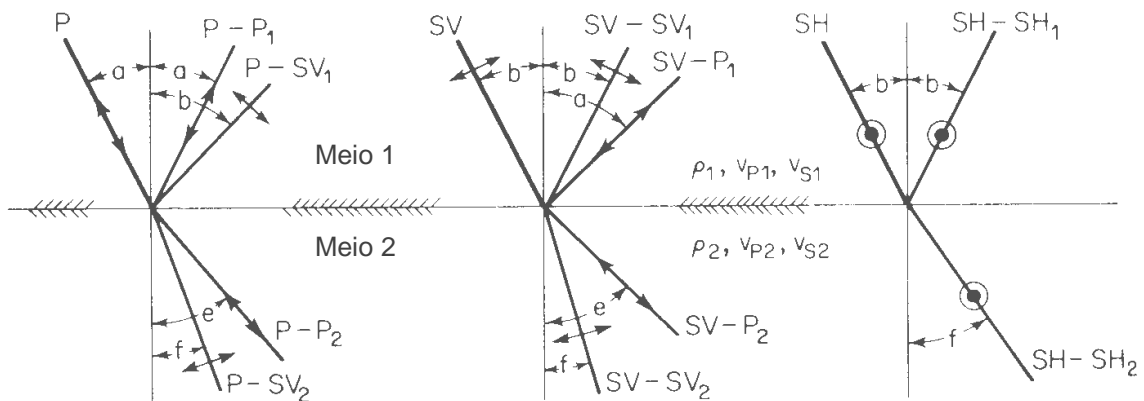


Figura 2.11 – Reflexão e refração: de uma onda P (imagem à esquerda); das componentes vertical, SV, (imagem do meio) e da componente horizontal, SH, de uma onda S (imagem à direita) (Richart, et al., 1970).

A Equação 2.22 relaciona os ângulos das ondas incidentes, reflectidas e refractadas de acordo com o apresentado na Figura 2.11.

$$\frac{\text{sen}(a)}{V_{P1}} = \frac{\text{sen}(b)}{V_{S1}} = \frac{\text{sen}(e)}{V_{P2}} = \frac{\text{sen}(f)}{V_{S2}} \quad \text{Equação 2.22}$$

A amplitude das ondas reflectidas depende da impedância acústica dos materiais. Esta propriedade relaciona-se com a densidade do material e com a velocidade de propagação do tipo de ondas que se pretende estudar. Maiores impedâncias acústicas estão associadas a maiores densidades dos materiais, logo a maiores velocidades das ondas elásticas. A impedância de um meio é dada pela Equação 2.23:

$$Z = \rho C \quad \text{Equação 2.23}$$

Onde:

- ✓ Z – impedância acústica;
- ✓ ρ - densidade;
- ✓ C – velocidade das ondas cuja impedância se pretende calcular.

No Quadro 2.1 apresentam-se algumas das impedâncias acústicas específicas de alguns materiais.

Em termos práticos, quando uma onda se propaga num determinado meio (meio 1) e encontra uma interface com outro meio (meio 2), a quantidade de energia reflectida será maior se a impedância do meio 1 for muito superior à impedância do meio 2. A quantidade de energia reflectida depende, para além da impedância dos meios de propagação, (a) do ângulo de incidência, (b) da distância desde a interface até ao emissor e (c) da atenuação da onda ao longo do seu percurso (Carino, 2004).

Quadro 2.1 – Impedâncias acústicas específicas de alguns materiais; adaptado de (Carino, 2004).

Material	Densidade (kg/m ³)	Velocidade das Ondas P (m/s)	Impedância Acústica específica (kg/m ² .s)
Ar	1.205	343	0.413
Betão	2300	3000-4500	6.9-10.4x10 ⁶
Granito	2750	5500-6100	15.1-16.8x10 ⁶
Calcário	2690	2800-7000	7.5-18.8x10 ⁶
Mármore	2650	3700-6900	9.8-18.3x10 ⁶
Quartzito	2620	5600-6100	14.7-16.0x10 ⁶
Solo	1400-2150	200-2000	0.28-4.3x10 ⁶
Aço	7850	5940	46.6x10 ⁶
Água	1000	1480	1.48x10 ⁶

A amplitude de uma onda reflectida numa dada interface é máxima se a onda incidente formar um ângulo de 0° com a perpendicular a essa interface (a=0 na Figura 2.11). A Equação 2.24 apresenta a relação entre a amplitude de uma onda incidente e a amplitude de uma onda reflectida segundo um ângulo de 90° (normal) com uma interface (Carino, 2004). Verifica-se que o coeficiente de reflexão R_n tende para -1 (reflexão total da onda; o sinal menos corresponde à alteração de sentido da onda reflectida em relação à onda incidente) com o aumento de Z_1 e/ou a diminuição de Z_2 .

$$R_n = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{Equação 2.24}$$

Onde:

- ✓ R_n – coeficiente de reflexão para um ângulo de incidência perpendicular;
- ✓ Z_1 - impedância acústica específica do meio original;
- ✓ Z_2 - impedância acústica específica do meio vizinho.

A título de exemplo, considere-se uma onda que se propaga no granito e que encontra uma interface com o ar; considere-se ainda que o ângulo de incidência da onda com essa interface é perpendicular (a=0, de acordo com a Figura 2.11). Substituindo as

constantes Z_1 e Z_2 da equação Equação 2.24 tendo por base os valores correspondentes aos materiais referidos que constam do Quadro 2.1 ($Z_1=15.1 \times 10^6$; $Z_2=0.0413$), obtém-se um valor de $R_n=-1$. Este resultado significa que a energia da onda incidente é reflectida, praticamente na sua totalidade e que a nova onda tem sentido oposto à onda incidente.

No exemplo apresentado, a energia da onda reflectida é elevada porque a impedância do meio de propagação da onda incidente é muito superior à impedância do meio de propagação vizinho ($Z_1 \gg Z_2$). No caso de se verificar a situação oposta, ou seja, de a impedância do meio 1 ser muito inferior à impedância do meio 2, a onda, seria refractada, praticamente na sua totalidade ($R_n=1$). Numa situação intermédia, parte da onda seria reflectida e outra parte refractada.

Quando o ângulo de incidência numa interface não é normal à interface ($\alpha \neq 0$) o procedimento para o cálculo das ondas reflectidas não é tão imediato. Imagine-se uma onda P que se propaga no granito e incide numa interface granito/ar segundo um ângulo de 30° com a normal a essa interface ($\alpha=30^\circ$). O cálculo dos ângulos das ondas reflectidas pode ser realizado utilizando a Equação 2.22, tendo como referência que $V_p=5500\text{m/s}$ e $V_s=0.62 \times V_p$. O ângulo β que a onda S será reflectida (identificado por β na Figura 2.11) será de cerca de 18° . Contudo, não se conhece a quantidade de energia das ondas reflectidas.

Um fenómeno similar ao ilustrado para a reflexão de ondas em interfaces granito/ar também ocorre quando uma onda se cruza com defeitos, por exemplo, vazios nos materiais. A dimensão mínima para que um vazio seja “detectado”, isto é, para que se dê a reflexão das ondas que sobre ele incidem, depende da relação do comprimento da onda emitida com a dimensão desse vazio. Como regra geral, a dimensão do vazio deve ser maior ou igual ao comprimento da onda que se propaga (Carino, 2004). Por exemplo, para que um vazio com 0.2m de diâmetro existente num corpo de betão ($v_p=4000\text{m/s}$) seja detectado, é necessário que a frequência da onda emitida seja no mínimo $f=20\text{kHz}$ (o comprimento de onda (λ) é igual ao quociente entre a velocidade (v) e a frequência (f) das ondas propagadas, ou seja, $\lambda=v/f$).

Se uma onda tiver um comprimento superior à dimensão do objecto a detectar, reflectir-se-á de uma forma mais reduzida nesse objecto, o que torna mais difícil essa “detecção”. Por outro lado, quanto menor o comprimento de onda, melhor se podem detectar objectos de pequenas dimensões. A posição de um objecto pode ser determinada através da reflexão de uma onda, com uma incerteza igual ao comprimento da onda emitida (Carino, 2001).

De uma outra perspectiva, para que um vazio seja transponível pelas ondas acústicas, estas devem ter um comprimento de onda superior à dimensão do vazio. Isto explica o sucesso que as ondas de frequência mais baixa (como as utilizadas nos ensaios sísmicos) sejam mais utilizadas em materiais heterogéneos. A explicação para este facto resi-

de na facilidade que as ondas de menor frequência têm em transpor os obstáculos próprios dos corpos heterogéneos. Entende-se, assim, porque razão os ensaios sónicos são tantas vezes utilizados na caracterização de alvenarias (material heterogéneo) em detrimento dos ensaios ultra-sónicos, cujos sinais, frequentemente, não são capazes de viajar desde o emissor até ao receptor. Por outro lado, também se entende porque razão se privilegiam os métodos com maiores frequências (sempre que estes se podem utilizar): a incerteza que lhes está associada é menor já que o seu comprimento de onda é menor (a incerteza é igual ao comprimento da onda utilizada).

2.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM ALVENARIAS

2.4.1 Generalidades

Desde os tempos mais remotos que os ensaios acústicos são utilizados. A percussão de um objecto e a análise do som daí resultante dava indicações acerca do estado de um material. Esta técnica é ainda hoje utilizada na detecção de defeitos ou vazios em materiais (Carino, 2001), como é o caso da madeira.

Em materiais considerados homogéneos (por exemplo o aço) é utilizado, com frequência o ensaio de ultra-sons. Este ensaio foi utilizado pela primeira vez em 1929, com o objectivo de detectar defeitos em materiais metálicos (ASTM-D-4580, 2002) como referido por (Carino, 2004). Ainda em 1938 foram aplicados em alvenarias de betão (Binda, 1995) e em 1942 Firestone nos EUA e Sproule em Inglaterra aplicaram-nos, separadamente, na detecção de vazios (ASTM-E-114, 2002), conforme referido por (Carino, 2004). Ainda no betão, verificou-se ser possível estimar a profundidade de fendas (Andrade, 2007), avaliar a efectividade da reparação de fendas (Aggelis ; Shiotani, 2007a) ou conhecer a espessura de um material (Carino, 2001).

O ensaio de ultra-sons é utilizado na caracterização de granito, desde que as suas faces estejam serradas e assim seja possível garantir um bom acoplamento do emissor e do receptor no material. Em materiais heterogéneos, como é o caso das alvenarias, o ensaio com ultra-sons demonstrou ser inadequado já que emite pulsos que, pelas suas características, não conseguem realizar a viagem que separa o emissor do receptor. Torna-se, nestes casos, necessário utilizar o ensaio sónico que, por gerar ondas de maior comprimento de onda, é mais indicado para este tipo de materiais (como se referiu anteriormente).

Durante anos o ensaio sónico era considerado, juntamente com o ensaio de radar, muito promissor na caracterização de alvenarias (Binda, et al., 2000). Várias tentativas foram feitas com o objectivo de obter as propriedades mecânicas das alvenarias através

do ensaio sónico. Contudo, até hoje apenas se conseguiu obter resultados de carácter qualitativo (Binda, et al., 2001):

- ✓ qualificação da alvenaria através da morfologia da sua secção;
- ✓ detecção de defeitos no seu interior (vazios, fissuras);
- ✓ monitorização das suas características físicas;
- ✓ controlo das intervenções de reparação que utilizam a técnica de injeção.

As principais vantagens dos ensaios sónicos face aos ensaios tradicionais (estáticos) é que: (a) têm carácter não-destrutivo; (b) podem ser realizados in-situ (Martínez-Martínez, et al., 2008); (c) não perturbam os materiais testados, já que não é necessário recolher amostras; (d) a rigidez calculada tem em conta as especificidades da alvenaria “in-situ”, incluindo o nível de confinamento.

2.4.2 Modo de funcionamento dos equipamentos de propagação de ondas acústicas

Os ensaios de propagação de ondas são ensaios não-destrutivos que medem a velocidade de propagação de ondas elásticas num dado material. Utilizam um emissor, através do qual se transmite uma perturbação ao material, e um receptor que, noutro ponto do material, identifica o efeito que essa perturbação tem nesse local. Os ensaios de propagação de ondas elásticas mais utilizados em Engenharia Civil são o ensaio de ultra-sons e o ensaio sónico.

O ensaio de ultra-sons utiliza um emissor que produz pulsos eléctricos de alta voltagem que são convertidos em energia ultra-sónica de alta frequência e um receptor, que faz uma operação inversa, já que recebe a energia das ondas convertendo-a num sinal eléctrico (Center, 2011). Na Figura 2.12 ilustra-se um ensaio de ultra-sons. O tempo que separa os instantes em que o pulso eléctrico é emitido e recebido correspondem ao tempo que as ondas demoram a percorrer a distância (d) que separa o emissor do receptor. Conhecendo esse intervalo de tempo e a distância fica-se a conhecer a velocidade de propagação das ondas no material em estudo que se relaciona com as características do próprio material.

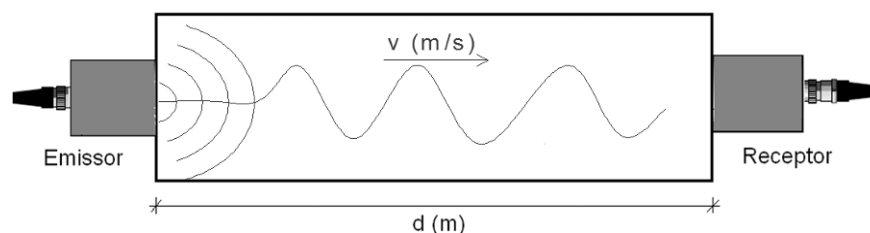


Figura 2.12 – Ilustração de um ensaio de ultra-sons.

No caso do ensaio sónico, o procedimento é semelhante. Contudo, o emissor utilizado é um martelo com que se percute o material em estudo. Como receptores podem ser utilizados: um acelerómetro, um velocímetro ou um sensor de deslocamentos. A ilustração do ensaio sónico é, por isso, muito semelhante à do ensaio de ultra-sons e apresenta-se na Figura 2.13.

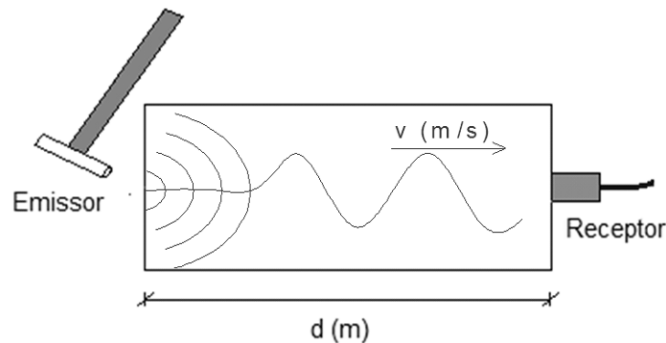


Figura 2.13 – Ilustração de um ensaio sónico.

Tanto no caso do ensaio sónico como no caso do ensaio de ultra-sons existe um sistema informático de controlo, muitas vezes designado por sistema de aquisição (ADC), que lê os instantes da emissão e recepção das ondas. Esse sistema encontra-se normalmente ligado a um computador e pode vir preparado para apenas indicar o intervalo de tempo que a onda demorou a percorrer um material, ou apresentar uma leitura mais completa, em que é possível visualizar e registar todos os movimentos dos sensores (emissor e receptor).

A Figura 2.14 ilustra o equipamento necessário para realizar um ensaio sónico:

- ✓ emissor – no caso do ensaio sónico é utilizado um martelo instrumentado o que torna possível ao utilizador conhecer, em cada momento, a força que exerce (resultado do impacto no material em estudo);
- ✓ receptor – frequentemente é um acelerómetro e regista as acelerações que ocorrem na superfície em que se encontra instalado;
- ✓ placa de aquisição – transforma o sinal do martelo e do acelerómetro num sinal digital (ADC – “analog-to-digital converter”), capaz de ser processado por um computador. Essa conversão é feita a uma determinada taxa de aquisição, ou seja, um determinado número de valores é convertido em digital num dado espaço de tempo. Por exemplo, uma taxa de aquisição de 500kHz significa que o conversor analógico/digital transforma em digital, 500 mil valores por segundo;

- ✓ computador – serve para controlar o ensaio, visualizar e gravar os resultados obtidos.

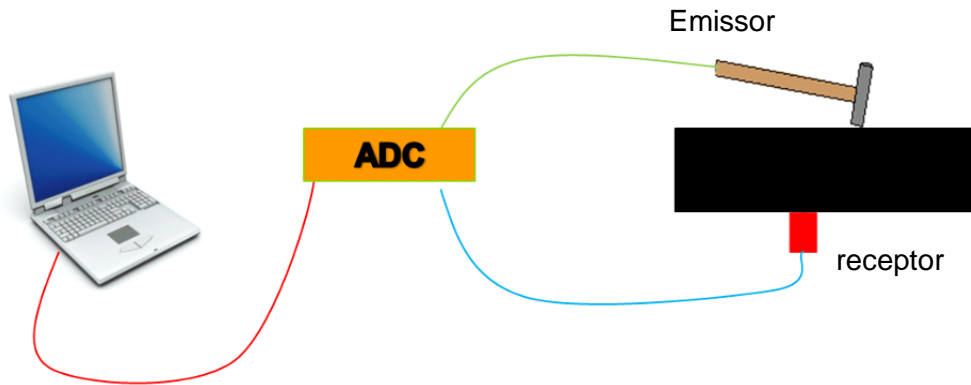


Figura 2.14 – Ilustração de um ensaio sónico.

A Figura 2.15 apresenta a informação a que o utilizador tem acesso, neste caso recolhida num ensaio sónico real. Trata-se de um gráfico que apresenta a amplitude dos sinais recebidos pelos equipamentos ao longo do tempo:

- ✓ a azul apresenta-se a curva do impacto do emissor no material, cuja amplitude parte do zero, aumenta e diminui rapidamente;
- ✓ a cor-de-rosa apresenta-se a onda recebida por um acelerómetro. Como se vê, o acelerómetro permanece em repouso (amplitude zero) enquanto a onda emitida não chega ao local em que este está acoplado. A chegada dessa onda causa oscilações no acelerómetro ao longo do tempo até que se dissipa o que faz com que o sinal do acelerómetro reassuma a amplitude zero.

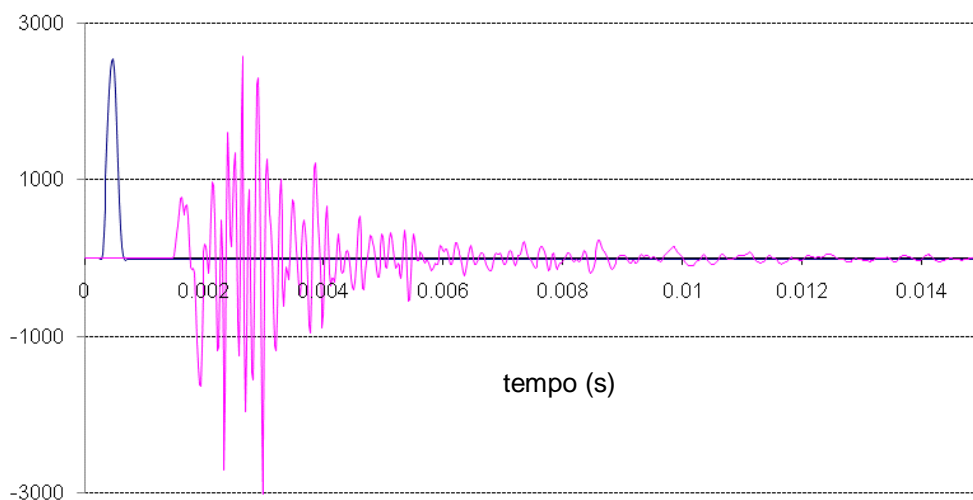


Figura 2.15 – Gráfico típico tempo vs amplitude do impulso (a azul) e da recepção (a rosa).

2.4.3 Configurações utilizadas nos ensaios

Nos pontos anteriores apresentaram-se diversos tipos de ondas que se distinguem pelo modo como se propagam e por terem diferentes velocidades. Quando se obtém uma informação do tipo da Figura 2.15 torna-se difícil, senão mesmo impossível, distinguir os diversos tipos de ondas presentes se não se conhecer mais nada. Neste cenário torna-se complexo tirar conclusões fundamentadas, acerca da propagação de ondas num dado material.

O conhecimento da configuração adoptada no ensaio (posição relativa do emissor e do receptor) auxilia de modo crucial a identificar os diferentes tipos de ondas presentes no sinal e a interpretar os resultados. Na realização de ensaios sónicos podem adoptar-se, fundamentalmente, 3 tipos de configurações no que diz respeito à posição relativa do emissor e do receptor, dependendo do tipo de ondas que se pretende estudar: P, S ou R. Essas configurações apresentam-se na Figura 2.16 e correspondem a:

- ✓ ensaio directo – emissor e receptor colocados em faces opostas (por vezes este ensaio é designado por ensaio por transparência);
- ✓ ensaio semi-directo – emissor e receptor colocados em faces concorrentes;
- ✓ ensaio indirecto – emissor e receptor colocados na mesma face do corpo em estudo (daí este ensaio ser também designado por ensaio de superfície).

De acordo com o exposto anteriormente, as ondas P propagam-se com a direcção do impacto, ou seja, o receptor deve estar nessa direcção para captar o movimento das partículas causado pelas ondas P. O ensaio que utiliza esta configuração é o ensaio directo (Figura 2.16 a)). Como se verá mais à frente, também é possível identificar as ondas P com ensaios de outros tipos mas, nesses casos, também se dá a propagação de outros tipos de ondas o que pode tornar a identificação das ondas P menos imediata.

As ondas S geram movimentos das partículas na direcção transversal à direcção do impacto (Figura 2.4 b)); assim, o acelerómetro deve ser colocado numa face concorrente à face em que se aplica o impacto para detectar o movimento correspondente. O ensaio que adopta essa configuração é o ensaio semi-directo (Figura 2.16 b)).

Finalmente, a propagação das ondas R faz-se na superfície do impacto já que este tipo de ondas apenas se faz notar nessa zona (Figura 2.4 d)). Para ser possível medir o correspondente movimento de partículas é necessário colocar o acelerómetro na mesma superfície em que se realizou o impacto. O ensaio que adopta essa configuração é o ensaio indirecto (Figura 2.16 c)).

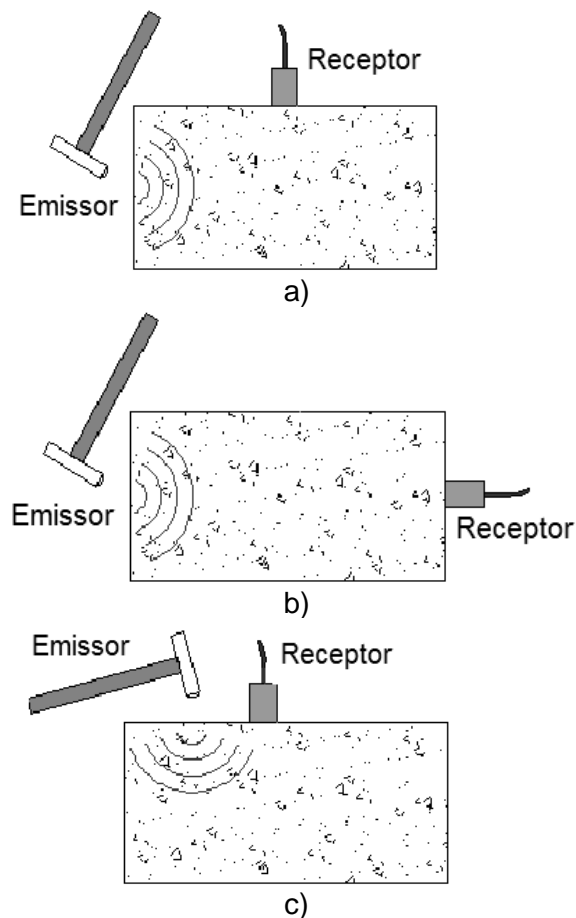


Figura 2.16 – Representação de um ensaio sónico: a) directo; b) semi-directo; c) indirecto.

Na presente dissertação apenas se realizaram ensaios directos e indirectos e apenas se procurou identificar ondas P e R. A identificação das ondas P é imediata através de um ensaio directo: a primeira chegada corresponde à chegada das ondas P. A sua contribuição no sinal recebido pelo acelerómetro unidireccional (que capta os movimentos para fora do plano a que está acoplado) é enorme já que este é o tipo de ondas que gera movimentos nessa direcção. A chegada de uma onda P é possível de identificar já que corresponde ao momento em que o sinal do receptor é diferente de zero.

A identificação das ondas R quando se realiza um ensaio indirecto não é tão imediata, já que à superfície se propagam, também, as ondas P. Contudo, as ondas P são mais rápidas que as ondas R e por isso aparecem mais cedo no sinal recebido pelo acelerómetro. A chegada pelas ondas R (mais lentas) é assinalada pelo aumento da amplitude dos movimentos detectados pelo acelerómetro já que, como se referiu anteriormente, a percentagem da energia que se propaga à superfície associada às ondas R é muito superior à energia dos restantes tipos de ondas.

Dado que a distinção entre ondas P e R não é imediata, faz-se de seguida referência a um estudo realizado sobre um corpo de betão, em que essa distinção foi realizada

com sucesso. Nesse estudo foi utilizado um equipamento de ultra-sons, contudo, todos os pressupostos utilizados são válidos também para um equipamento sónico. Realizaram-se ensaios directos e indirectos; através dos ensaios directos determinou-se a velocidade de propagação das ondas P; conhecendo essa velocidade procurou-se identificar a chegada das ondas P e R num gráfico “amplitude vs tempo” obtido a partir de um ensaio indirecto (Qixian ; Bungey, 1996).

A Figura 2.17 esquematiza o tipo de sinal num gráfico tempo vs amplitude, obtido nos ensaios indirectos e assinala 3 pontos chave nessa identificação:

- ✓ ponto 1 – primeira chegada – corresponde às ondas de maior velocidade, ou seja às ondas P (as ondas R ainda não chegaram);
- ✓ ponto 2 – chegada das ondas R – corresponde à passagem por zero das ondas de maior energia;
- ✓ ponto 3 – primeiro máximo das ondas R – corresponde ao primeiro pico das ondas de maior energia cuja chegada foi assinalada no ponto 2.

No mesmo estudo os autores apresentam sinais resultantes de 4 ensaios: em 3 ensaios foi adoptada a configuração indirecta e num ensaio a configuração directa. A Figura 2.18 apresenta os registos correspondentes. A Figura 2.18 a), b) e c) correspondem a sinais obtidos em ensaios indirectos nos quais se fez variar a distância entre o emissor e o receptor de forma crescente (100mm, 200mm e 250mm). A Figura 2.18 d) apresenta um sinal obtido num ensaio directo na mesma amostra.

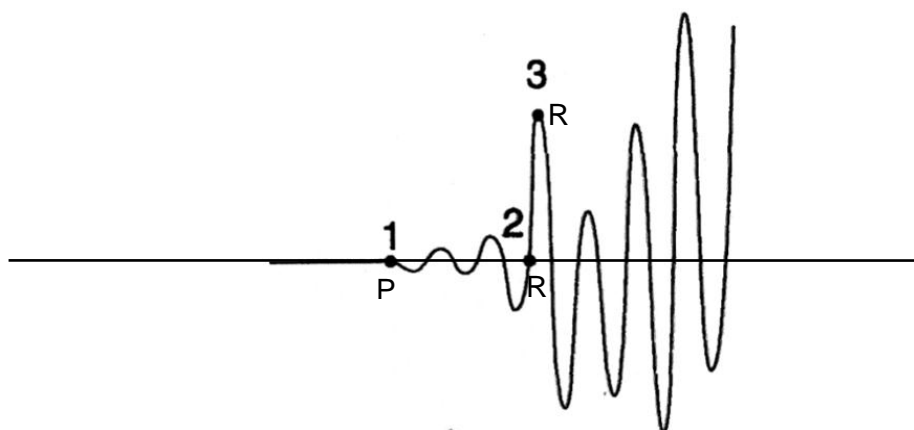


Figura 2.17 – Forma típica do sinal de um ensaio Indirecto (gráfico tempo vs amplitude): 1-chegada das ondas P; 2-chegada das ondas R; 3-primeiro máximo das ondas R (Qixian ; Bungey, 1996).

No ensaio indirecto em que se adoptou a menor distância entre emissor e receptor (100mm) nota-se que a chegada das ondas R é precedida por um menor numero de ciclos das ondas P do que, por exemplo, para a distância entre o emissor e o receptor de

200mm (Figura 2.18 b)). Este efeito é ainda mais notório no caso da Figura 2.18 c) (onde se apresenta um sinal com duração superior aos restantes) com a chegada das Ondas R depois da ocorrência de 3 máximos da onda P.

Como se referiu anteriormente, a energia (amplitude) correspondente às ondas P que se propagam à superfície num ensaio indirecto é reduzida (7%) pelo que, muitas vezes, a identificação da sua chegada não é facilmente perceptível. Contudo, existe uma relação entre a velocidade das ondas P e R que depende apenas do coeficiente de Poisson do material. Torna-se assim possível estimar a velocidade das ondas P conhecendo a velocidade das ondas R, e vice-versa (desde que se conheça o coeficiente de Poisson). Adicionalmente, não é de excluir a realização de um ensaio directo de modo a validar os resultados obtidos através do ensaio indirecto.

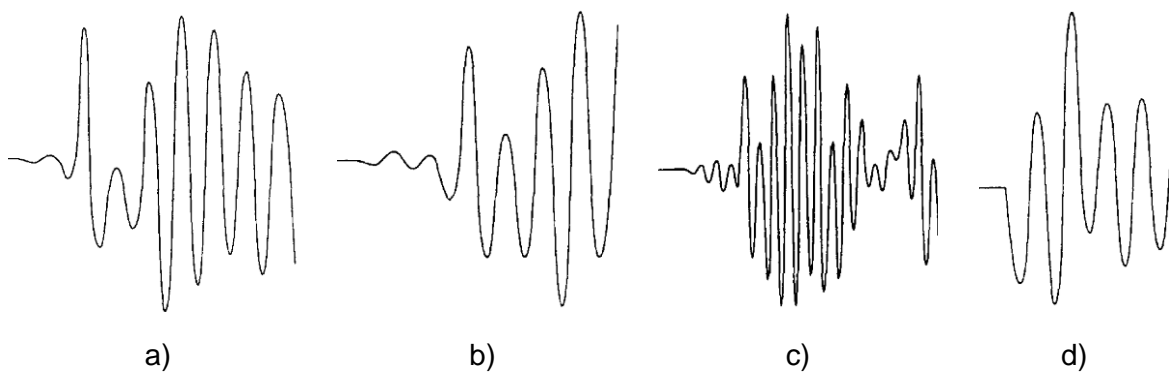


Figura 2.18 – Resultados obtidos com a configuração: a) b) e c) indirecta com o emissor distanciado do receptor por 100mm, 200mm e 250mm, respectivamente; d) directa.

Em relação ao estudo apresentado deve reconhecer-se que não é fácil identificar o instante de chegada das ondas R, que pode não ser exactamente aquele que se apresentou na Figura 2.17 (Qixian ; Bungey, 1996) já que quando se dá a chegada das ondas R as ondas P já estão presentes no sinal. Assim, o instante em que a onda de maior energia passa por zero pode não corresponder exactamente à chegada das ondas R já que o sinal recebido corresponde à soma da contribuição das ondas P e das ondas R.

O facto descrito parece, contudo, não ter grande influência na determinação da velocidade das ondas R. No tratamento de resultados dos ensaios indirectos, fixa-se um ponto no sinal obtido pelo acelerómetro, por exemplo o ponto em que a onda de maior energia passa por zero (que pode não corresponder à chegada das ondas R). Num ponto mais afastado do emissor, determina-se o tempo que um ponto com as mesmas características demorou a percorrer a nova distância e assim sucessivamente, num procedimento que é contemplado na normalização dos ensaios indirectos (BSI, 2004, CEN, 2007) e que a Figura 2.19 ilustra.

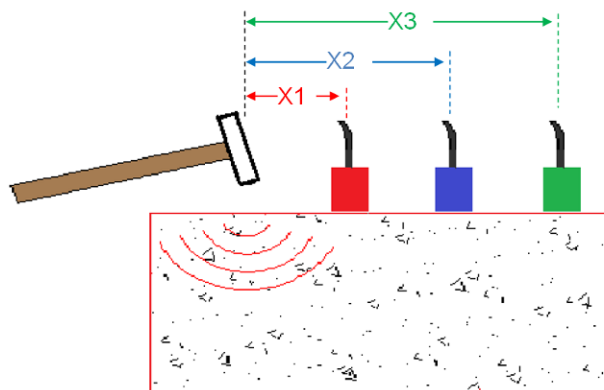


Figura 2.19 – Ilustração de um ensaio indirecto.

Um procedimento do tipo do apresentado na Figura 2.19 pode ser realizado com 1 único receptor ou mais. No caso de apenas se dispor de um receptor, o ensaio será mais moroso e o cruzamento de resultados obtidos nos diferentes pontos não será imediato já que será necessário aplicar um impacto por cada ponto de leitura e, como se compreenderá, é difícil que esses impactos tenham exactamente as mesmas características (no caso do ensaio sónico).

Imagine-se que o ensaio ilustrado na Figura 2.19 gera os sinais que se apresentam na Figura 2.20 com o acelerómetro vermelho, azul e verde. Mesmo sem a garantia que o momento em que a onda R cruza o eixo dos xx corresponde à sua chegada, determinando os tempos de propagação e conhecendo a respectiva distância ao emissor, é possível determinar a velocidade da onda R. Para que isto seja possível são necessários, no mínimo, dois pontos. Contudo, a robustez da determinação aumenta com o número de pontos utilizados. A Figura 2.20 salienta o instante em que o sinal cruzou o eixo dos xx já com a contribuição das ondas R para cada um dos acelerómetros de acordo com o ilustrado na Figura 2.19.

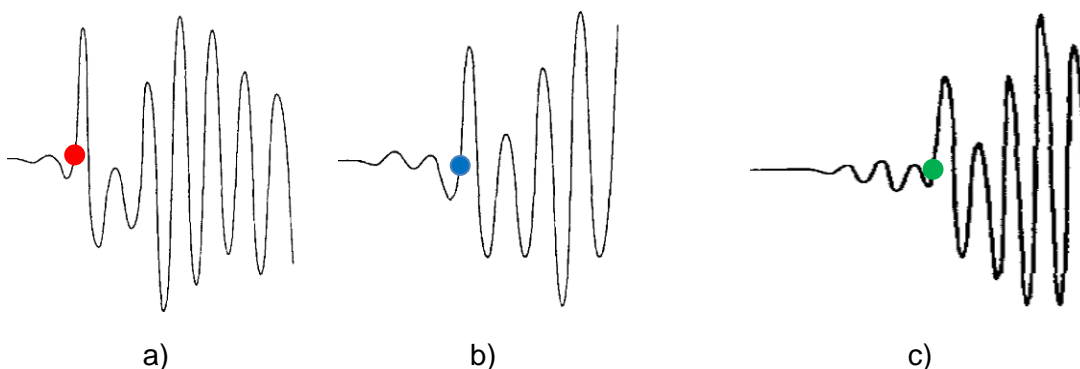


Figura 2.20 – Resultados obtidos com a configuração: a) b) e c) indirecta com o emissor distanciado do receptor por 100mm, 200mm e 250mm, respectivamente.

A obtenção da velocidade associada ao ensaio ilustrado pela Figura 2.19 e aos pontos assinalados a vermelho, azul e verde na Figura 2.20 a), b) e c), respectivamente, permite construir um gráfico tempo (s) vs distância (m) do tipo do que se apresenta na Figura 2.21. Após a marcação dos pontos obtidos nos ensaios, é traçada uma recta utilizando o método de regressão linear. A inclinação dessa recta corresponde à velocidade (m/s) das ondas R, que neste caso é 5267m/s, para um coeficiente de regressão linear de $r^2=0.99$.

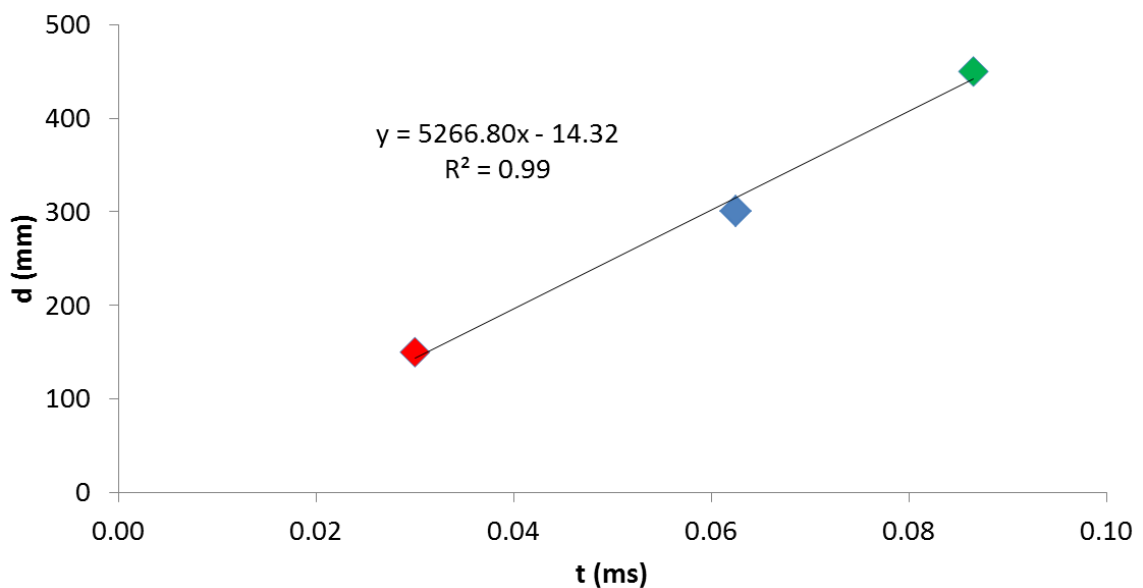


Figura 2.21 – Gráfico tempo vs distância e correspondente regressão linear dos pontos apresentados.

Embora seja fictício, o exemplo que se apresentou ilustra o procedimento a realizar para a obtenção da velocidade das ondas R. Este procedimento é mais valioso no caso de elementos heterogéneos já que, tendo em conta valores obtidos em diferentes pontos, é possível determinar um valor que represente uma tendência, evitando assim erros devidos a especificidades pontuais do material a testar. Pelos mesmos motivos, a determinação da velocidade das ondas P através de ensaios indirectos, deve ser sujeita ao mesmo procedimento.

Em síntese, a determinação das velocidades das ondas nos ensaios indirectos deve seguir o procedimento sugerido pelas normas (BSI, 2004, CEN, 2007) segundo o qual se identifica, sistematicamente, um ponto das ondas R, ou a chegada das ondas P nas leituras para distâncias, entre o emissor e receptor, crescentes ao longo de um segmento. Depois, constrói-se um gráfico “distância vs tempo” onde se colocam os pontos obtidos em cada leitura e traça-se a recta que melhor se ajusta a esses pontos. O declive dessa recta corresponde à velocidade de propagação das ondas R, ou P consoante os pontos determinados no tratamento de resultados.

As conclusões que se retiram do exposto sugerem que se adopte a configuração (directa; indirecta; semi-directa) mais conveniente para o tipo de onda que se pretende identificar. Contudo, muitas vezes o utilizador apenas pode utilizar uma configuração por condicionantes do local que se verifica, por exemplo, quando apenas tem acesso a uma face do material em estudo. Neste cenário o utilizador não pode realizar um ensaio directo, sendo forçado a realizar um ensaio indirecto.

2.4.4 Informação complementar dos ensaios de propagação de ondas acústicas

Os ensaios de propagação de ondas acústicas permitem determinar a velocidade de diferentes tipos de ondas elásticas. Contudo, os sinais emitidos e recebidos possuem mais informação para além da que é habitualmente determinada. De facto, a prática tem evidenciado que o sinal que resulta de um ensaio acústico é como uma impressão digital do material em que se propaga, como tinha sido verificado por outros autores (Binda, et al., 1997): as sucessivas repetições de um ensaio nas mesmas condições (e no mesmo ponto) apresentam sucessivamente gráficos tempo vs amplitude idênticos.

O sinal do impacto é caracterizado por um conjunto de frequências, ou seja, um pacote de onda, como se viu anteriormente. As frequências transmitidas pelo emissor, no caso do ensaio sónico, estão directamente relacionadas com a duração do impacto: um pequeno tempo de contacto contém frequências mais altas e vice-versa. O sinal emitido passa depois pelo material em estudo e, se o meio for dispersivo, o sinal sofre modificações até chegar ao receptor (como se viu anteriormente).

O modo como materiais em diferentes estados de conservação influencia os sinais foi estudado em 1997 através de ensaios sónicos directos por investigadores do Politécnico de Milão (Binda, et al., 1997). Esses ensaios procuraram comparar alvenarias construídas em laboratório: (a) sem dano, (b) com dano, ou (c) reparadas. Para isso os investigadores analisaram, para além da velocidade de propagação das ondas no material em estudo, a frequência do sinal. Verificou-se que a frequência dos elementos diminui com o aumento do dano no material em que as ondas acústicas se propagam.

Uma outra utilização do tratamento dos sinais do receptor no domínio da frequência consiste na determinação de espessuras de elementos ou no conhecimento da profundidade a que se encontra uma descontinuidade, designadamente através do eco-impacto. Este método teve um grande desenvolvimento na década de 1980 devido ao colapso de algumas estruturas de betão armado durante a construção (edifícios e pontes). A aposta da divisão de estruturas do Instituto de Normalização e Tecnologia dos Estados Unidos da América (EUA) passou a centrar-se nos ensaios não-destrutivos (Sansalone, 1997).

O princípio subjacente ao Eco-Impacto é que uma onda P produzida numa superfície de teste sofre múltiplas reflexões entre a superfície de teste e uma descontinuidade

(Carino, 2001). De cada vez que essa onda chega à superfície de teste, induz um deslocamento da superfície que é detectado pelo receptor. A Figura 2.22 apresenta: a) uma representação das reflexões das ondas no interior do elemento testado, isto é, a onda gerada pelo emissor ao entrar em contacto com a face oposta do corpo é reflectida, chega à face de impacto e volta a ser reflectida, e assim sucessivamente; b) a representação dos movimentos do receptor num gráfico tempo vs voltagem (relacionada com a amplitude).

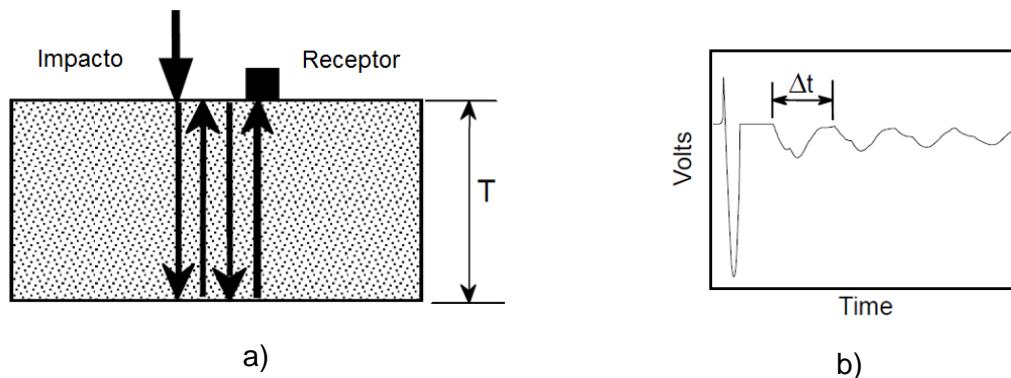


Figura 2.22 – Reflexões de uma onda P quando encontra uma descontinuidade: a) esquema do percurso da onda no interior da amostra; b) gráfico (no domínio do tempo) resultante das sucessivas reflexões (Carino, 2001, Carino, 2004).

Como se pode observar na Figura 2.22 b) o receptor tem um movimento que se aproxima de uma sinusóide. Esse movimento é fruto da compressão/descompressão do material que se encontra em contacto com o acelerómetro, como resultado da chegada/partida das ondas P. Como se viu anteriormente, a uma sinusóide encontra-se associada uma frequência. Neste caso, a frequência corresponde ao número de chegadas por segundo das ondas P à superfície onde o acelerómetro se encontra instalado. O termo frequência tem, neste contexto, um significado comum que corresponde à frequência de chegada das ondas que se distingue do conceito proveniente da Física.

Pelo exposto pode-se compreender que o intervalo de tempo entre duas chegadas sucessivas das ondas P à superfície de impacto, corresponde ao tempo de viagem das ondas P no material. Sabendo que a distância percorrida é duas vezes a espessura do corpo em estudo (saída da face de impacto, chegada e reflexão na face oposta, chegada à face do impacto) pode-se determinar a velocidade das ondas P no material em estudo.

O intervalo que separa duas chegadas consecutivas pode ser determinado de um modo simples e rigoroso através da análise das frequências presentes no sinal recebido. Essas frequências podem ser determinadas, por exemplo, através de uma operação matemática usual no tratamento de sinais digitais que se designa por FFT (do inglês Fast Fourier Transform). O conhecimento dessas frequências, em especial da frequência que corresponde às sucessivas reflexões das ondas nas superfícies do material, em conjunto

com o conhecimento da respectiva espessura T (ver Figura 2.22) permite calcular a velocidade de propagação das ondas P nesse material através da Equação 2.25, que relaciona a frequência (f) e a velocidade das ondas P (V_p) com a espessura da amostra (T) (Carino, 2004).

$$V_p = 2T \times f \quad \text{Equação 2.25}$$

onde:

- ✓ V_p - velocidade de propagação das ondas P no meio considerado (m/s);
- ✓ T - profundidade da interface (m);
- ✓ f - frequência (Hz).

A fórmula anterior foi revista em 1997, já que se concluiu que a velocidade V_p era, afinal, 96% da velocidade real das ondas P no material. Este coeficiente devia-se a um pequeno atraso causado pelas sucessivas reflexões das ondas P quando se propagavam ao longo da espessura de um elemento (Carino, 2004). Em elementos de outro tipo, por exemplo pilares de secção circular ou vigas de secção quadrada, a velocidade é 92% e 87% da velocidade real, respectivamente (Sansalone, 1997).

A técnica do eco-impacto, além de permitir determinar a velocidade de propagação num corpo sólido também permite determinar a espessura de um elemento, desde que se conheça a velocidade de propagação das ondas P nesse material, como se depreende através da análise da Equação 2.25. O mesmo raciocínio utilizado para a determinação da espessura do material é adoptado para a detecção e localização de vazios.

A Figura 2.23 apresenta um exemplo de aplicação da detecção de um vazio utilizando a técnica do eco-impacto. A Figura 2.23 a) representa um ensaio realizado num elemento de betão com 0.5m de espessura sem qualquer vazio. A frequência obtida através do sinal do receptor foi de 3.42kHz e corresponde às sucessivas reflexões das ondas P que se propagam ao longo da espessura do corpo. A Figura 2.23 b) apresenta um corpo com as mesmas características mas com um vazio a cerca de metade da sua profundidade; para a análise deste caso pode pensar-se numa laje com 0.25m de espessura (em vez dos 0.5m do caso da Figura 2.23 a)).

À luz da Equação 2.25 a frequência deve aumentar para o dobro no caso do elemento de betão com um vazio, já que a relação das distâncias das interfaces de reflexão é cerca de metade. Analisando o espectro corresponde à situação da Figura 2.23 b) verifica-se que, de facto, a frequência principal do sinal aumentou de 3.42kHz para 7.32kHz.

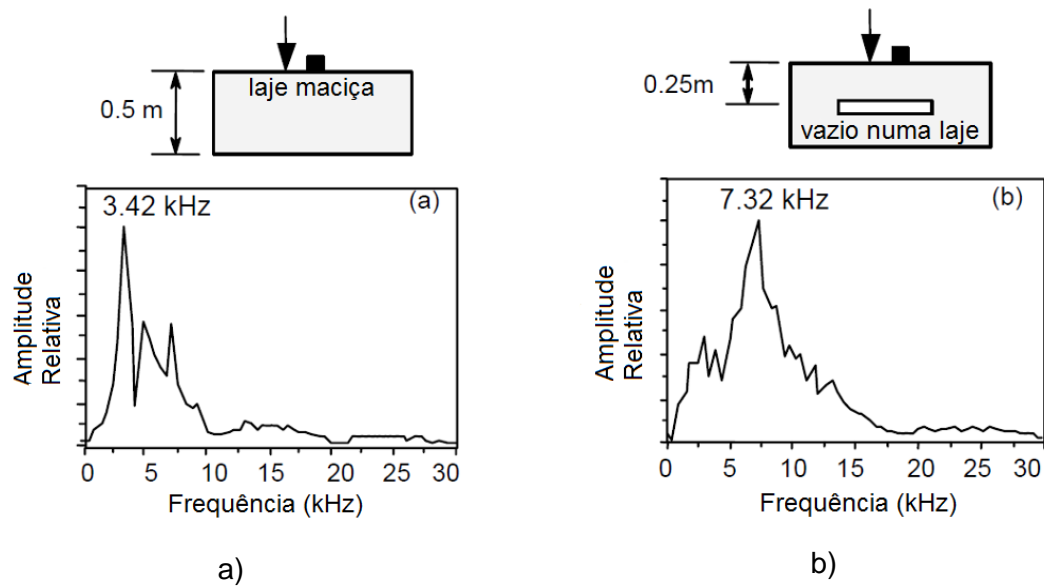


Figura 2.23 – Espectros resultantes da análise de sinais, obtidos através de uma FFT: a) corpo homogéneo de betão; b) corpo com um vazio, adaptado de (Carino, 2001, Carino, 2004).

Na obtenção das reflexões das ondas P por eco-impacto, o emissor deve estar colocado na mesma face do receptor com um afastamento máximo de $0.4T$ (sendo T a espessura do elemento).

A dimensão do vazio é, como se referiu anteriormente, essencial para que se possa detectar a sua presença. Através do eco-impacto, o vazio representado na Figura 2.24 pode ser detectado se a sua dimensão lateral (d) superar $1/3$ da sua profundidade (P). Se a dimensão lateral do vazio for superior a 1.5 vezes a profundidade a que este se encontra ($d > 1.5P$), a resposta será como se a espessura do material fosse a profundidade a que o vazio se encontra ($P=T$). Se a dimensão lateral do vazio estiver compreendida entre $1/3$ e 1.5 vezes a profundidade a que aquele se encontra ($1/3P < d < 1.5P$), é possível conhecer em simultâneo a espessura do material testado (T) e a respectiva profundidade (P) (Carino, 2001).

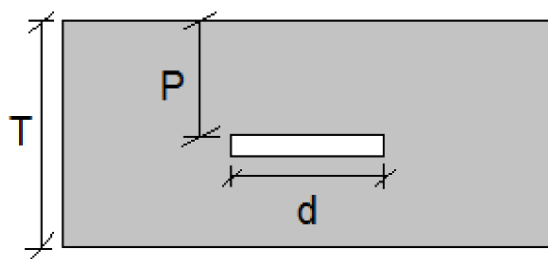


Figura 2.24 – Representação de um vazio de dimensão d , localizado a uma profundidade P , num corpo de espessura T .

2.4.5 Legislação e condicionantes dos ensaios de propagação de ondas acústicas

Não existe regulamentação que normalize a execução de ensaios sínicos. Por serem ensaios de natureza similar, faz-se de seguida uma pequena síntese das normas existentes para os ensaios com ultra-sons. Refere-se, a título de exemplo:

- ✓ NP EN 12504-4-2007 – “Ensaio do betão em estruturas – Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons”;
- ✓ ASTM C 597-02 – “Standard Test method for pulse velocity through concrete”;
- ✓ ASTM D 2845-00 – “Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock”;
- ✓ ASTM C 1383-04 – “standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method”;
- ✓ BS 1881-203-1986 – “testing concrete – Part 203: recommendations of measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete”;
- ✓ BS EN 14579-2004 – “Natural stone test methods – determination of sound speed propagation”.

Na determinação da velocidade de propagação das ondas acústicas deve-se ter em conta o teor de humidade, o percurso das ondas, a forma e dimensão do provete, as fissuras e os vazios (BSI, 2004).

- ✓ Teor de humidade – diferentes teores de humidade num dado material podem causar variações até 50% nos valores de velocidades obtidos, quando comparados com a determinação num provete seco. Num estudo recente verificaram-se diferenças importantes quando se utilizavam provetes secos e provetes saturados (Vasconcelos, 2005).
- ✓ Percurso das ondas – deve ser suficientemente longo para que a velocidade determinada não seja influenciada pelas heterogeneidades da pedra. Como indicação, o comprimento do percurso das ondas deve ser pelo menos igual ao comprimento das ondas emitidas.
- ✓ Forma e dimensão do objecto de estudo – a forma do provete não influencia a velocidade de propagação das ondas acústicas. Contudo, a menor dimensão lateral dos provetes deve ser, no mínimo, igual ao comprimento de onda. Se esta condição não se verificar, a velocidade obtida será afectada de um erro. No fundo, uma onda deve “caber” completamente no provete. A título de exemplo: para um impacto com uma frequência central de 2kHz, que gera a propagação de ondas P no granito a uma velocidade de

4000m/s, é necessária uma dimensão lateral mínima de 2m. Caso contrário, a velocidade medida pode ser inferior à real (ASTM, 2009, BSI, 2004). Note-se que frequências de vibração elevadas geram resultados mais exactos mas os sinais recebidos sofrem maior atenuação ao longo do seu percurso.

Através da Equação 2.26 pode-se determinar a dimensão mínima do provete que corresponde ao comprimento de onda λ .

$$v = \lambda f \quad \text{Equação 2.26}$$

onde:

- ✓ v - velocidade da onda propagada;
- ✓ λ - comprimento de onda;
- ✓ f - frequência da onda.

O Quadro 2.2 apresenta algumas combinações entre a frequência do transmissor (frequência das ondas emitidas), a velocidade de propagação das ondas no material em estudo e a dimensão lateral mínima recomendada do provete.

Em materiais anisotrópicos a velocidade de propagação das ondas sónicas é diferente nas suas direcções principais. A título de exemplo refere-se que no caso da madeira o módulo de elasticidade na direcção perpendicular às fibras pode ser cerca de 1/20 do módulo de elasticidade na direcção longitudinal às fibras o que faz com que os valores das velocidades de propagação das ondas sonoras sejam também muito diferentes (Green;, et al., 1999).

Quadro 2.2 – Dimensões mínimas do provete para diferentes velocidades de propagação e frequências de propagação (BSI, 2004, CEN, 2007).

Frequência do transdutor (kHz)	Velocidade de propagação das ondas acústicas (m/s)		
	V=3500	V=4000	V=4500
	Dimensão lateral mínima recomendada do provete (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

2.5 DETERMINAÇÃO DE GRANDEZAS MECÂNICAS A PARTIR DE ENSAIOS ACÚSTICOS

Como se viu anteriormente, utilizando as expressões que relacionam a velocidade de propagação das ondas acústicas em materiais (Equação 2.18 e Equação 2.19), é possível determinar o seu módulo de elasticidade (desde que se conheçam outras grandezas). Embora as equações que relacionam a velocidade de propagação das ondas elásticas com grandezas mecânicas tenham sido formuladas para meios isotrópicos, elásticos, homogêneos e infinitos, têm sido utilizadas em meios de outro tipo.

O desconhecimento de expressões mais adequadas para o cálculo de grandezas mecânicas a partir da velocidade de propagação de ondas acústicas em materiais, motivou a aplicação dessas expressões na presente dissertação. Concretamente, estas foram utilizadas no cálculo de módulos de elasticidade a partir de velocidades de propagação de ondas acústicas em pedras e em alvenarias (pedras e juntas incluídas). Este tipo de procedimento, embora seja usual, é questionável já que há estudos que apresentam elementos diversos sobre a aplicabilidade dos ensaios acústicos na determinação do módulo de elasticidade dos materiais, como se verá de seguida.

No presente ponto fazem-se várias referências ao betão, por se tratar de uma pedra artificial com características idênticas às do granito e por o número de referências bibliográficas ser mais significativo.

Em amostras de betão comprovou-se a existência de diferenças entre os módulos de elasticidade determinados por via estática (ensaios de compressão) e por via dinâmica (ensaios de propagação de ultra-sons) (BSI, 1986). Estas diferenças levaram a que o módulo de elasticidade obtido através da velocidade de propagação de ondas acústicas se designe de módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade obtido através de ensaios estáticos se designe por módulo de elasticidade estático. Valores de referência apresentados na norma BS 1881-203 de 1986 (BSI, 1986), também para betão, apresentam valores superiores para o módulo de elasticidade dinâmico quando comparado com o módulo de elasticidade estático.

Em estudos realizados sobre pedras, foram obtidas conclusões semelhantes: o módulo de elasticidade dinâmico é diferente do estático, fornecendo, tipicamente valores mais elevados. Em 1994 foi realizado um estudo que visava comparar o módulo de elasticidade dinâmico com o estático de pedras de vários tipos (Christaras, et al., 1994). Cada tipo de rocha foi testado através de dois métodos dinâmicos (um sónico e um ultra-sónico) e um método estático. Os resultados obtidos através dos dois métodos acústicos foram semelhantes. Nos dois (sónico e ultra-sónico) verificou-se uma tendência para o módulo de elasticidade dinâmico ser superior ao estático em pouco mais de 3GPa. Em particular no granito, foi obtida uma excelente correlação entre os valores dinâmicos (sónico e ultra-sónico) e estático: 65GPa; 64GPa e 64GPa, respectivamente.

Vasconcelos (Vasconcelos, 2005) determinou que o módulo de elasticidade estático de granitos aumenta linearmente com a velocidade de propagação das ondas P segundo a relação $E=19.87V_p-27813$ [MPa; m/s] para um coeficiente de correlação linear de $r^2=0.84$. Utilizando a expressão apresentada na Equação 2.18 para o cálculo do módulo de elasticidade e valores consentâneos com outros parâmetros determinados no mesmo estudo (massa volúmica de 2600kg/m^3 ; coeficiente de Poisson de 0.3) obtém-se um módulo de elasticidade dinâmico de 30.9GPa para uma velocidade de propagação das ondas P de 4000m/s. Através da expressão obtida por Vasconcelos (Vasconcelos, 2005) obtém-se, para a mesma velocidade de propagação, um módulo de elasticidade estático de 52GPa, ou seja, consideravelmente superior ao dinâmico (ao contrário do previsto).

Num documento dedicado às propriedades das pedras naturais (construction, 1997) e noutros estudos, refere-se que o módulo de elasticidade dinâmico corresponde à tangente do ângulo da curva tensão vs deformação na origem, isto é, quando o material está sujeito a pequenas deformações. Neville, em relação ao betão, defende uma ideia similar, afirmando que o módulo de elasticidade dinâmico é sempre superior ao estático.

Na Figura 2.25 apresenta-se a curva tensão vs deformação típica de um granito. Como ocorre no betão, quando se fala de módulo de elasticidade, em rigor fala-se do módulo de elasticidade da zona elástica da curva (a vermelho na Figura 2.25). Quando essa zona não existe fala-se em módulo de elasticidade tangente (a verde na Figura 2.25) que, contudo, tem um valor prático limitado, já que varia significativamente com o nível da carga aplicada (Neville, 1995). Quando se fala em pequenas deformações fala-se no maior módulo de elasticidade do material.

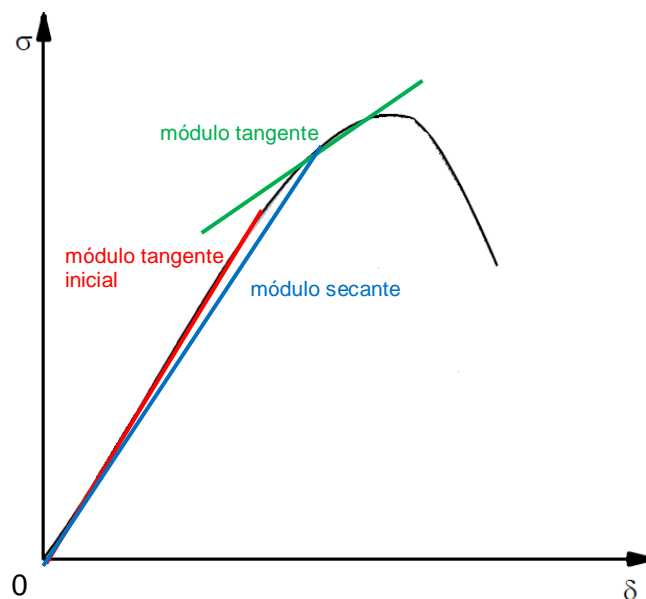


Figura 2.25 – Curva tensão vs deformação típica de um granito; adaptado de (Vasconcelos, 2005).

Um ensaio de propagação de ondas, para além gerar poucas deformações conta com um outro efeito que pode contribuir para que este método seja responsável pela obtenção de maiores valores do módulo de elasticidade: a aplicação da carga é extremamente rápida.

O efeito da velocidade de carga tem sido estudado no betão e já há vários anos (Neville, 1963) se sabe que a resistência à compressão do betão diminui com a diminuição da velocidade de aplicação da carga (em flexão obteve-se resultados similares). Pensava-se, na altura, que este efeito estava relacionado com o aumento da deformação devido à fluência. Na Figura 2.26 apresenta-se a curva obtida através de resultados experimentais, em que se pode ver o efeito que a velocidade de aplicação da carga tem na resistência do betão.

A curva apresentada foi obtida com base na velocidade de 0.2MPa/s, valor frequentemente adoptado na realização de ensaios de compressão de provetes de betão à luz das normas aplicáveis (ASTM C39-93; BS 1881:Part116:1983). Para uma carga aplicada mais lentamente, durante 30 a 240 minutos, o material sofre rotura para um valor de carga de 84% a 88% da carga de rotura de um ensaio em que a velocidade é de 0.2MPa/s. Quando uma estrutura é carregada a uma velocidade extremamente lenta a rotura dá-se para uma carga ainda menor, cerca de 70%.

Chappuis (Chappuis, 1987) refere que o aumento de resistência se traduz num módulo de elasticidade superior e que o módulo de elasticidade secante no pico (Figura 2.25 a azul) aumenta em 40% para grandes velocidades de deformação. A explicação para o aumento do módulo de elasticidade foi também abordada por Faria (Faria, 1994) que relaciona esse aumento com fenómenos de inércia ao nível da partícula constituinte do material. Como consequência da menor deformação sofrida pelo material para velocidades elevadas, também o processo de micro-fissuração é sensível à taxa de deformação imposta (Faria, 1994).

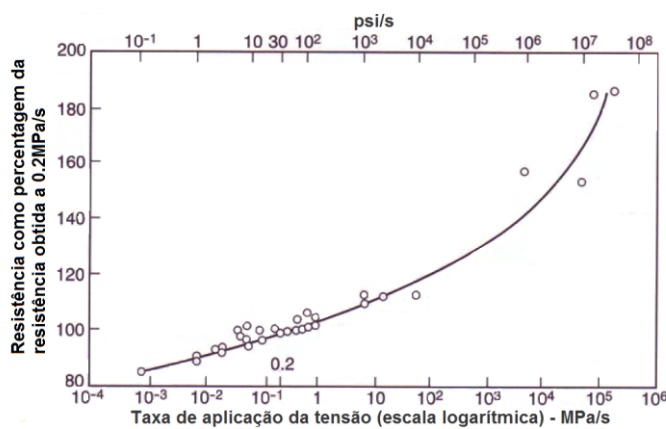


Figura 2.26 – Influência da velocidade de aplicação da carga na resistência à compressão no betão (Neville, 1963).

Em síntese, há incertezas relativamente ao módulo de elasticidade determinado através de ensaios de propagação de ondas acústicas nos materiais, como granito e betão, que convém clarificar com base em novos ensaios. Teoricamente, o módulo de elasticidade retirado deste tipo de ensaios será elevado e terá, pelo menos, o maior valor do módulo de elasticidade estático que, como se viu na Figura 2.25, é variável ao longo de um ensaio de carga. No caso das alvenarias é expectável que essa tendência se mantenha e a presente dissertação pretende contribuir para o esclarecimento deste ponto.

CAPÍTULO 3

ENSAIOS ACÚSTICOS PRÉVIOS

3.1 INTRODUÇÃO

Depois de se estudar a teoria da propagação de ondas, e de se perceber as limitações e potencialidades dos métodos de propagação de ondas acústicas, aplicaram-se os ensaios sónicos às alvenarias, numa abordagem progressivamente mais complexa. Na transposição da teoria para a prática, foi extremamente útil a experiência conseguida com um estágio no grupo de investigação da professora Luigia Binda, no Politécnico de Milão, em Itália. O conhecimento adquirido permitiu o primeiro contacto com o equipamento e com os procedimentos de ensaio. Esse conhecimento permitiu a identificação do material a adquirir e a construção do programa informático de aquisição e análise utilizado.

Nas aplicações realizadas com a tecnologia sónica, procurou-se avaliar e definir condições de aplicação e de ensaio a observar no futuro. Em concreto, para pedras de superfície rugosa, analisou-se a influência que o bom contacto entre o emissor/receptor e o material em estudo tem nos resultados obtidos. Outro aspecto que se procurou esclarecer, foi a influência que a presença de reboco na superfície das alvenarias tem na velocidade das ondas elásticas. Esta questão é particularmente pertinente, uma vez que a remoção do reboco implica a destruição de parte do material da alvenaria, faz com que o ensaio demore mais tempo a ser realizado e exige meios e custos para a execução dessa operação.

No âmbito do presente estudo preliminar, procurou-se também perceber as diferenças que os vários métodos de ensaio e análise (apresentados mais à frente) têm na velocidade de propagação das ondas: em pedras lisas e em pedras rugosas. Na realização desses ensaios foram utilizados, sempre que possível, o sistema sónico e o sistema ultra-sónico e foram adoptadas duas configurações (posição relativa emissor/receptor)

que possibilitaram a determinação de características diferentes mas, simultaneamente, complementares dos materiais em estudo: ensaios directos e ensaios indirectos. Com base na velocidade de propagação das ondas, foram estimados os módulos de elasticidade das pedras lisas testadas que, por sua vez, foram comparados com os valores obtidos em ensaios mecânicos realizados com a mesma finalidade.

Finalmente, a pensar na transposição da técnica para o estudo das alvenarias, foi avaliada a influência das juntas nos resultados obtidos através de ensaios sónicos directos, indirectos e de eco-impacto. Nesse âmbito, foi testada a sensibilidade da técnica sónica à monitorização do processo de endurecimento das argamassas de juntas de proveites compósitos (pedra+junta).

3.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO

3.2.1 Sistema sónico

No ensaio realizado com a tecnologia sónica começou por se utilizar um sistema sónico do fabricante Dytran®. Trata-se de um sistema bastante completo que inclui dois acelerómetros de características diferentes, um martelo e dois condicionadores de sinal. Este sistema é idêntico ao utilizado no Politécnico de Milão, Itália.

O martelo pesa 100 gramas, podendo induzir frequências de vibração na estrutura de diferentes valores, dependendo do tipo de ponteira que se utiliza: borracha, plástico ou alumínio. É instrumentado por uma célula de carga que informa o utilizador sobre a força que é aplicada no martelo em cada instante.

A frequência de vibração induzida pelo emissor é um factor muito importante no sucesso do ensaio. Como foi referido no Ponto 2.4.4, se a frequência for baixa propaga-se melhor no material já que consegue ultrapassar vazios e outras descontinuidades com maior facilidade. Contudo, se a frequência for demasiado baixa é necessário que a mínima dimensão lateral da amostra seja elevada (como se viu anteriormente). A título de curiosidade apresentam-se na Figura 3.1 as curvas de comportamento do martelo com dois tipos de ponteira (alumínio e plástico) na gama de frequências (Hz) do pacote de onda induzido pelo impacto do martelo; nas abcissas apresenta-se o valor das frequências e nas ordenadas a respectiva amplitude.

Através da análise dos gráficos constata-se que com a ponteira de alumínio (Figura 3.1 a)) é possível enviar uma gama de frequências mais alargada para os materiais (pelo menos até 2kHz) enquanto com a ponteira de plástico as frequências acima de 1kHz são transmitidas com menor amplitude. O sistema sónico utilizado contém ainda uma ponteira de borracha que apresenta uma gama de frequências mobilizadas ainda mais baixa do

que a ponteira de plástico (Figura 3.1 b)). Assim, como se pretendia um sinal com uma gama de frequências elevada, utilizou-se a ponteira de alumínio.

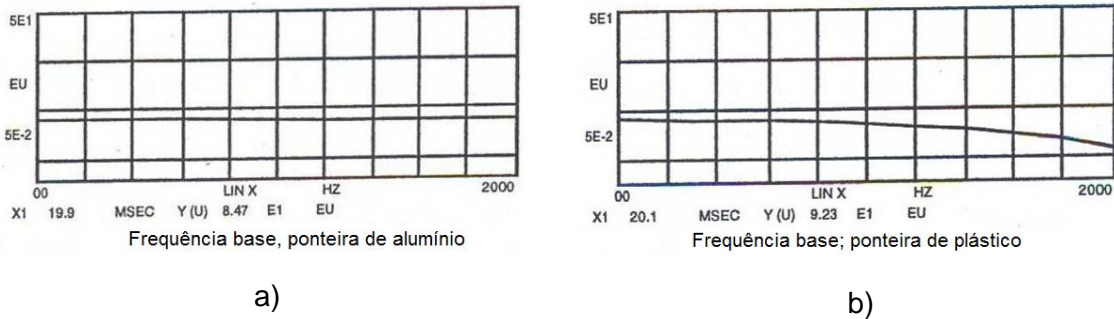


Figura 3.1 – Gama de frequências emitidas pelo martelo com ponteira: (a) de alumínio; (b) de plástico.

Um parâmetro que se pode também controlar com o martelo utilizado é a energia do impacto. Para aumentar essa energia o martelo dispõe de uma massa suplementar que se pode colocar na sua extremidade posterior. Com essa massa o martelo gera impactos de maior amplitude mas de frequência mais baixa, já que o aumento da massa é também responsável pelo aumento do seu tempo de contacto. Na Figura 3.2 apresenta-se o martelo utilizado com a ponteira de alumínio, a massa suplementar e a conexão BNC visível.



Figura 3.2 – Martelo Utilizado.

Os dois pontos mais delicados do martelo são a conexão BNC e a ponteira de alumínio. Após cerca de 3 anos de utilização do martelo a ponteira considerou-se danificada. Por outro lado, a conexão BNC degradou-se com o tempo e passou a não garantir a estabilidade do sinal. Após os 3 anos, foi mesmo necessário proceder à substituição do martelo, já que a conexão BNC gerava ruído no sinal do martelo que inviabilizava a reali-

zação do teste. Para além, o martelo deixou de garantir a solidez na ligação da ponteira, já que a ligação roscada deixou de funcionar de forma eficaz.

A necessidade de garantir uma maior quantidade de energia de impacto levou a que, na aquisição de um novo martelo instrumentado, se procurasse um equipamento com maior massa, tendo o cuidado de escolher aquele que garantisse a gama de frequências mais elevada. Adquiriu-se então um martelo com uma massa de cerca de 320gramas com a possibilidade de aumentar até às 520gramas através da utilização da massa suplementar. Este novo martelo possui também uma ligação BNC e quatro tipos de ponteiras, tendo-se optado nos testes pela ponteira de alumínio, já que esta garantia tempos de contactos menores e por isso maiores frequências. Na Figura 3.3 pode ver-se o martelo utilizado e um gráfico com as características das diferentes ponteiras; a ponteira dura (“ponteira utilizada”) é a que consegue emitir uma gama de frequências mais elevada, até cerca de 6kHz.

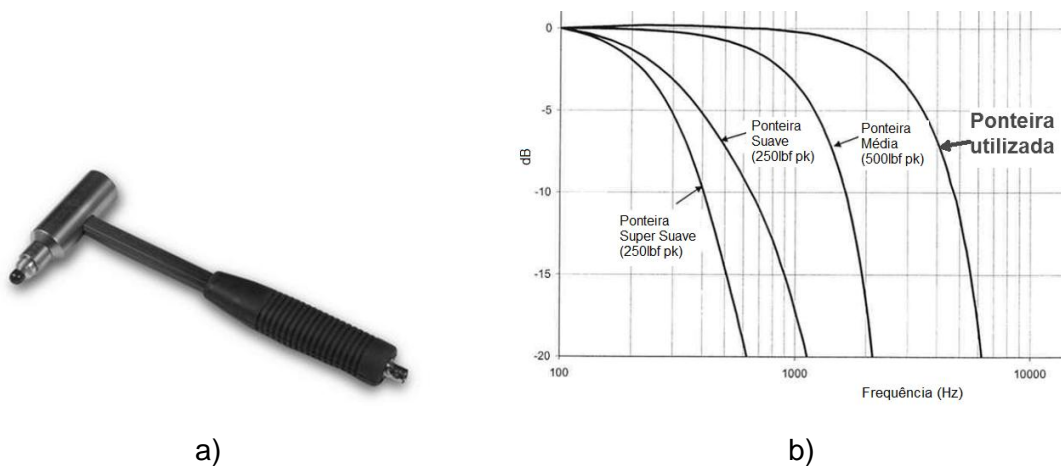


Figura 3.3 – Martelo de maior massa: a) imagem do martelo; b) comportamento do martelo com os diferentes tipos de ponteiras.

Para além dos martelos instrumentados foram utilizados acelerómetros com 2.5gramas de massa e capacidade para ler acelerações até 500g. Na Figura 3.4 pode ver-se o acelerómetro utilizado e: a sua pequena dimensão que permite uma boa adaptação às irregularidades da superfície dos materiais. Nos testes realizados e nos casos em que se entendeu ser útil, o acoplamento do acelerómetro fez-se com vaselina entre a superfície ensaiada e o acelerómetro, como é sugerido por outros autores (Carino, 2004).

A curva da amplitude de resposta do acelerómetro utilizado na maior parte dos ensaios, apresenta-se na Figura 3.5. A resposta do acelerómetro em regime estável vai até aos 10kHz, o que garante a qualidade dos sinais recebidos dentro dessa gama de frequências. Por outro lado, a frequência de ressonância do acelerómetro, 45kHz, encontra-se fora do intervalo de leitura do acelerómetro, havendo assim a garantia que o acelerómetro não seria influenciado por essa frequência. Note-se que o acelerómetro podia registar acelerações superiores a 10kHz. Contudo, a partir desses valores a frequência é

afectada por factores de amplificação/redução desconhecidos (o eixo “% deviation” no gráfico deixaria de ser zero).



Figura 3.4 – Acelerómetros utilizados.

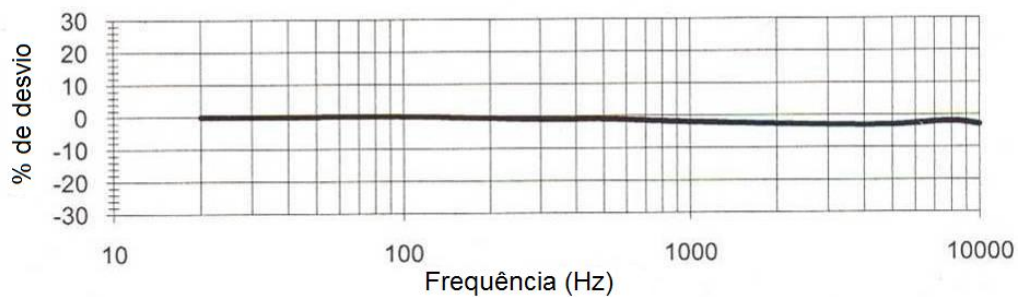


Figura 3.5 – Zona estável do acelerómetro utilizado.

O fornecimento de energia, o condicionamento e a amplificação de sinal do martelo e dos acelerómetros foram conseguidos por condicionadores de sinal fornecidos pelo fabricante. Ajustando o ganho dos equipamentos foi possível uma confrontação mais fácil dos sinais provenientes do martelo e do acelerómetro já que em muitos casos a amplitude dos sinais das leituras são muito díspares. Na Figura 3.6 apresenta-se um condicionador de sinal semelhante aos utilizados.



Figura 3.6 – Imagem do condicionador de sinal utilizado.

Na transformação dos sinais analógicos, recebidos pelo acelerómetro e pelo martelo, em sinais digitais, utilizou-se uma placa de aquisição NI6210 da National Instru-

ments®. A taxa de aquisição desta placa de aquisição é de 250kHz a dividir pelo número de canais utilizados.

A prática mostrou que, por vezes, o isolamento dos sinais dos diferentes canais não era feito convenientemente pela placa NI6210 e, por esse motivo, passou-se a utilizar a placa de aquisição NI9233. Esta placa possui uma taxa de aquisição de 50kHz por canal, independentemente do número de canais utilizados. Dispõe de 4 ligações BNC e pode ser ligada à porta USB de um computador através de um dispositivo denominado de “carrier” cuja referência é NI-USB-9162. A Figura 3.7 apresenta uma imagem da placa utilizada, bem como do esquema de ligação adoptado.



Figura 3.7 – Placa NI9233 e esquema de ligação da placa ao “carrier” NI USB-9162 e deste ao computador.

Os sinais do sistema sónico foram adquiridos no domínio do tempo através de um programa construído em LabView®. Todo o procedimento foi idealizado pelo autor da presente dissertação e materializado pelo Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da (LESE) da FEUP. Na Figura 3.8 pode ver-se o aspecto do programa utilizado que, refira-se, tem sido alvo de contínuas melhorias.

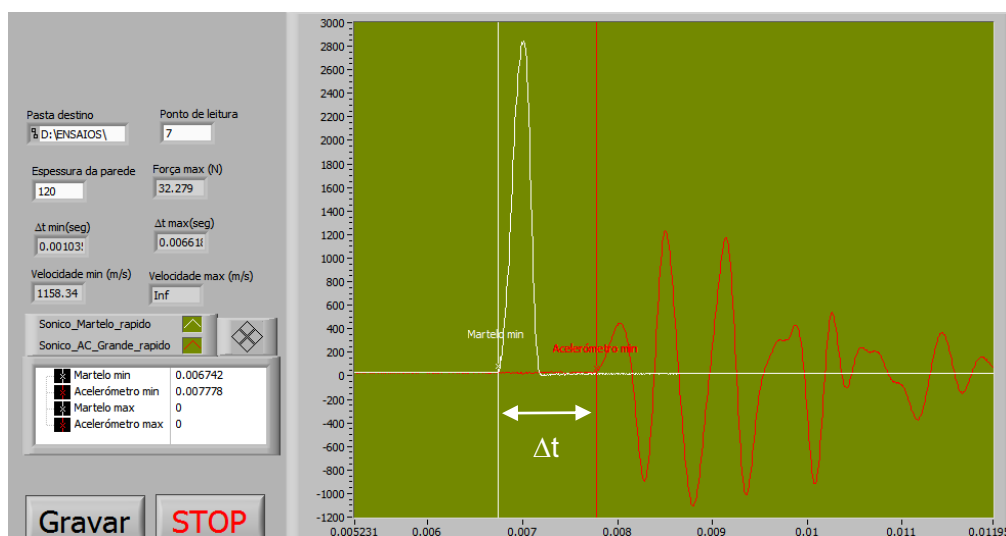


Figura 3.8 – Interface gráfica do programa utilizado na visualização e tratamento de resultados.

Esse programa calcula automaticamente os instantes de início de impacto e de recepção do sinal pelo acelerómetro. Contudo, em alguns casos esses instantes não são calculados correctamente, sendo por isso imprescindível que um utilizador com experiência em ensaios deste tipo, valide os resultados gerados automaticamente ou, se for o caso, proceda, manualmente, às alterações necessárias.

Sempre que se considerou útil, foi utilizada uma grelha de 6x6 pontos, para assinalar os locais a testar de uma forma fácil e rápida, garantindo assim o mesmo espaçamento entre esses pontos e melhorando a correspondência que se pretendia nos ensaios directos. A grelha utilizada apresenta-se na Figura 3.9 e é semelhante à utilizada pelo Politécnico de Milão, era composta por 36 pontos espaçados 15cm entre si 15cm (na vertical e na horizontal) distribuídos numa matriz de 6 linhas e 6 colunas.

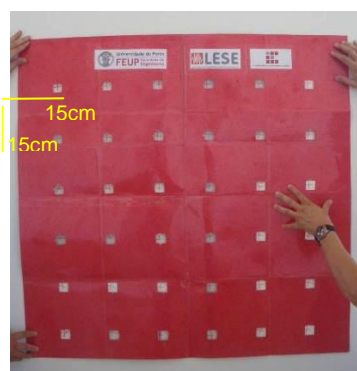


Figura 3.9 – Grelha utilizada na marcação dos pontos testados em alguns ensaios.

O programa informático reproduzia também a grelha apresentada na Figura 3.9. Trata-se de um quadro interactivo, que se apresenta na Figura 3.10, através do qual o utilizador pode escolher o ponto que pretende registar. Cada um dos pontos analisados passava pelo controlo de um técnico que os aprovava ou reprovava, consoante os casos. A reprovação de um teste implicava a nova leitura no ponto em causa.



Figura 3.10 – Esquema utilizado na escolha dos pontos de leitura.

3.2.2 Sistema ultra-sónico

Embora o uso deste equipamento não tenha sido privilegiado na presente dissertação, aproveitou-se o facto de se encontrar disponível para se cruzar os seus resultados com os resultados obtidos através dos ensaios sónicos. Houve interesse em confrontar alguns resultados com o sistema ultra-sónico já que este equipamento apresenta uma taxa de aquisição muito elevada, cerca de 10MHz, bem superior à utilizada no método sónico baseado na análise temporal.

Os efeitos que a taxa de aquisição pode ter na exactidão dos resultados ilustram-se na Figura 3.11, onde se apresenta um sinal correcto (Figura 3.11 a)) que quando lido com uma dada taxa de aquisição pode dar uma informação consideravelmente diferente ao utilizador (Figura 3.11 b)).

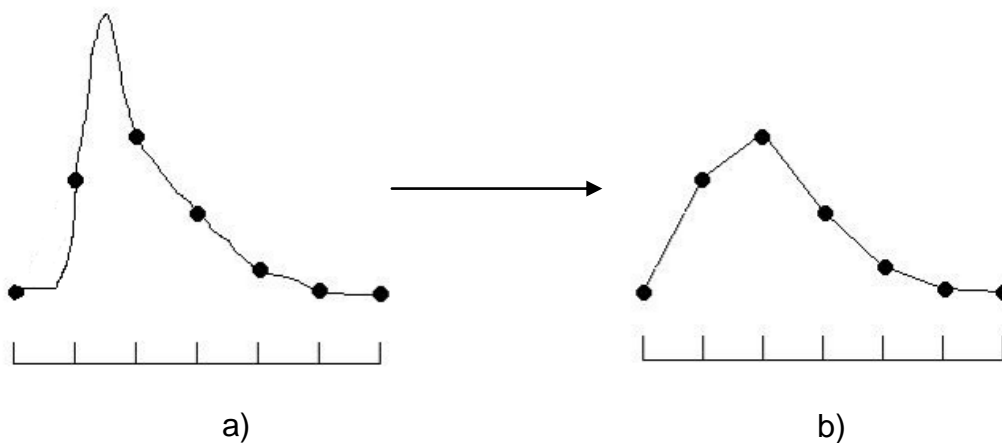


Figura 3.11 – Ilustração do efeito da taxa de aquisição.

Passar de uma taxa de aquisição de 50kHz para 10MHz, significa aumentar em 200 vezes por segundo o número de pontos lidos num segundo, aumentando assim o rigor das medições. Além desta inegável vantagem, este equipamento emite pulsos que geram ondas cuja frequência central é cerca de 54kHz, valor aconselhado pelo fabricante para elementos de betão cujas características não diferem significativamente do granito testado. Na Figura 3.12 apresenta-se uma imagem do equipamento utilizado.

Os transdutores (emissor/receptor) utilizados não são adequados para testar superfícies rugosas; a sua área de contacto com o material a testar é elevada, o que inviabiliza o seu correcto acoplamento a essas superfícies. Por este motivo, em grande parte dos casos a amplitude do sinal emitido não foi suficiente para ser detectada pelo receptor, mesmo em curtas distâncias de propagação (0.3m) e por isso esta técnica mostrou-se inútil para a grande maioria das estruturas de alvenaria de pedra testadas.



Figura 3.12 – Equipamento de ultra-sons utilizado.

O equipamento de ultra-sons, por ser um sistema fechado, isto é, um sistema em que o utilizador só acede à informação final, não permite verificar se o intervalo de tempo que lê corresponde aos instantes de tempo pretendidos pelo utilizador. O equipamento regista o instante em que o pulso de ondas é gerado e regista o instante em que o receptor recebe movimentos do material maiores que um determinado valor (valor de disparo) programado internamente. Imagine-se o sinal da Figura 3.13: se a amplitude da onda P for superior ao valor do disparo (linha a vermelho) o equipamento devolverá um instante que corresponde à passagem da onda P (Figura 3.13 a)); se a energia lida pelo equipamento correspondente à passagem da onda P for inferior ao valor do disparo (situação causada, por exemplo, por superfícies irregulares), mas a energia lida na passagem das ondas R for superior a esse valor de disparo, por exemplo, o equipamento devolverá um instante que corresponde à passagem das ondas R pelo ponto de leitura (Figura 3.13b)); se o sinal recebido pelo receptor tiver uma amplitude inferior ao valor de disparo (linha a vermelho na Figura 3.13), o equipamento de ultra-sons dará uma mensagem de erro.

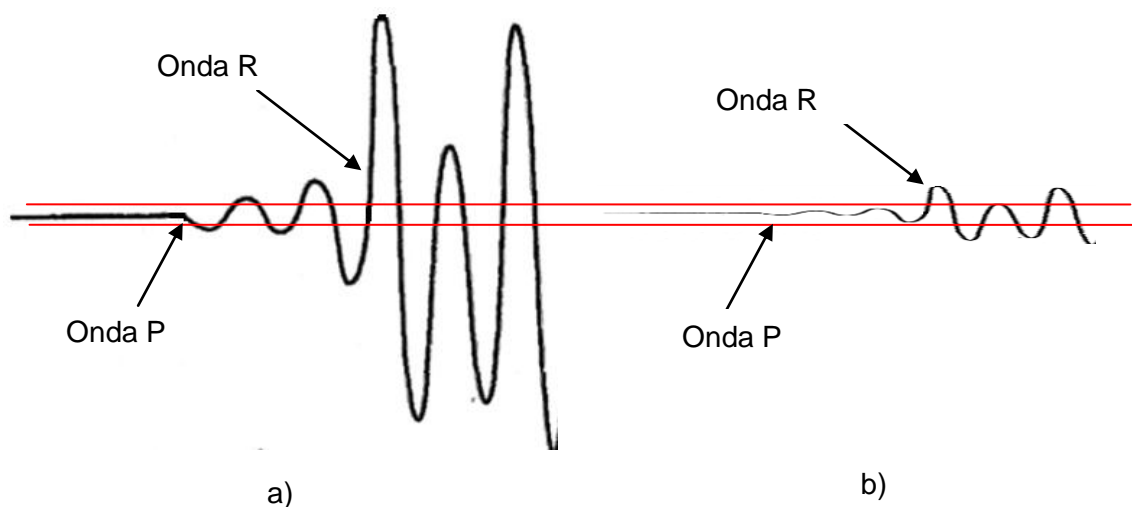


Figura 3.13 – Amplitude necessária para que um sinal seja detectado.

Como o equipamento de ultra-sons utilizado apenas informa o utilizador acerca do intervalo de tempo que onda demorou a percorrer a distância que separa o emissor do receptor este nunca terá conhecimento da onda considerada nessa leitura (sistema fechado). Este facto pode levar a que se possam cometer erros importante na determinação de ondas com equipamentos de ultra-sons, especialmente em ensaios indirectos onde, como se viu anteriormente, intervêm diferentes tipos de ondas (P e R).

3.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES FACTORES NAS VELOCIDADES DETERMINADAS

Após a preparação do equipamento a utilizar nos ensaios de propagação de ondas acústicas, foi realizado um conjunto de ensaios com vista a definir as melhores condições de execução dos testes. Avaliou-se a influência da utilização de diferentes tipos de acopladores na velocidade de propagação das ondas elásticas medida. Além disso, também se avaliou a influência da presença de reboco na superfície testada, já que se suspeitava que este material pudesse ter uma influência importante nos resultados. Neste estudo foram utilizados ensaios sónicos directos.

3.3.1 Avaliação da influência do tipo de acoplador

A utilização de um elemento acoplador, como óleo, gel de petróleo, gel solúvel em água, borracha moldável, gordura, é recomendada no caso de ensaios de ultra-sons em materiais com um grau de homogeneidade importante, como é o caso do betão (ASTM, 2007, Carino, 2004, Tallavó, et al., 2009). Este tipo de agente melhora o contacto entre a superfície do material em estudo e os transdutores, já que contribui para a eliminação do ar entre essas duas superfícies. Note-se que é usual a utilização do agente de acoplamento, mesmo quando se testam materiais polidos. A importância da sua utilização tem a ver com a diferença da impedância acústica entre o granito e o ar (anteriormente abordada). Se não se utilizar um gel de acoplamento as ondas têm que transpor essa camada de ar até chegarem ao acelerómetro, provocando uma redução na energia do sinal recebido induzindo um tempo emissão-recepção superior ao do material.

A questão da utilização do agente acoplador, entre a superfície do material testado e o acelerómetro coloca-se, já que esta operação contribui para o aumento da duração do tempo do ensaio. Além disso, muitas vezes a degradação que se verifica na camada superficial da parede dificulta a colocação de acoplador.

De modo a tentar perceber de que forma é que a utilização de acoplador, no caso específico dos ensaios sónicos em alvenarias, pode influenciar os resultados obtidos, foi realizada uma campanha de ensaios sónicos directos numa parede de pano único de um edifício localizado na rua de António Carneiro, no Porto. O objectivo do estudo realizado

foi identificar a influência que os diferentes tipos de acoplador tinham nas velocidades das ondas elásticas.

Realizaram-se testes em que o acelerómetro se colocou sem qualquer tipo de material a interpor a sua superfície e a superfície do material testado, e outros em que se utilizava um acoplador. Foram utilizados três tipos de configurações, que se ilustram na Figura 3.14 e se descrevem de seguida:

- ✓ tipo 1 – acelerómetro colocado directamente sobre a superfície da pedra, sem recurso a qualquer material;
- ✓ tipo 2 – colocação de uma camada de vaselina para facilitar o contacto entre o acelerómetro e a superfície da pedra;
- ✓ tipo 3 – colocação de uma chapa junto às superfícies da pedra, e colocação do acelerómetro sobre essa chapa. Colocação de vaselina nas duas interfaces.



Figura 3.14 – Ilustração das configurações utilizadas: a) tipo 1; b) tipo 2; c) tipo 3.

Os três tipos de acopladores foram utilizados simultaneamente em três locais diferentes do mesmo edifício indicados na planta do edifício apresentado na Figura 3.15 por: ES1, ES2 e ES3. Estes três locais referem-se a alvenarias de granito de pano único, com pedras irregulares e juntas de argamassa de cal.

Refira-se que se os valores de velocidade obtidos fossem superiores nos casos em que eram utilizados acopladores, isso significaria que o procedimento de teste correspondente melhorava o contacto entre o acelerómetro e o material em estudo. Essa eventual diferença de velocidade pode estar relacionada com a esperada diferença de amplitude dos sinais recebidos, isto é, com a dificuldade em detectar as primeiras chegadas no caso da não utilização de acoplador. Note-se que os resultados obtidos devem ser observados na globalidade, já que o material em análise é um material natural – granito – ao qual se encontra associada alguma variabilidade.

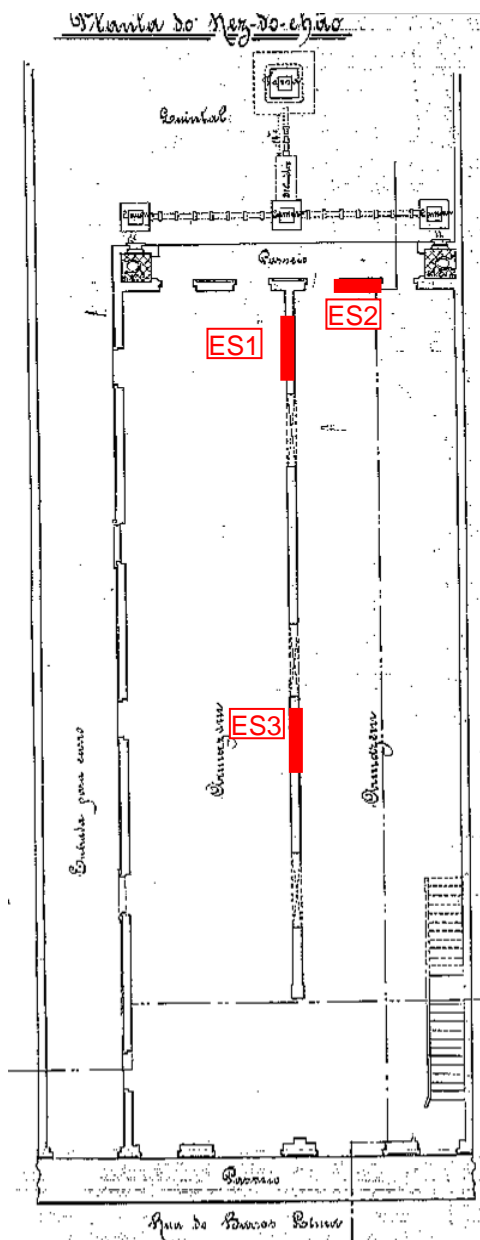


Figura 3.15 –Localização dos ensaios ES1, ES2 e ES3 na planta original do edifício sito na rua Antônio Carneiro.

Nos pontos seguintes apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos três locais testados.

Local ES1

Na Figura 3.16 apresentam-se o esquema utilizado no ensaio no local ES1 e os resultados obtidos para os três tipos de acopladores. Esses resultados são materializados

por isolinhas de velocidade: os tons vermelhos correspondem a velocidades mais elevadas e os tons azuis a velocidades mais baixas.

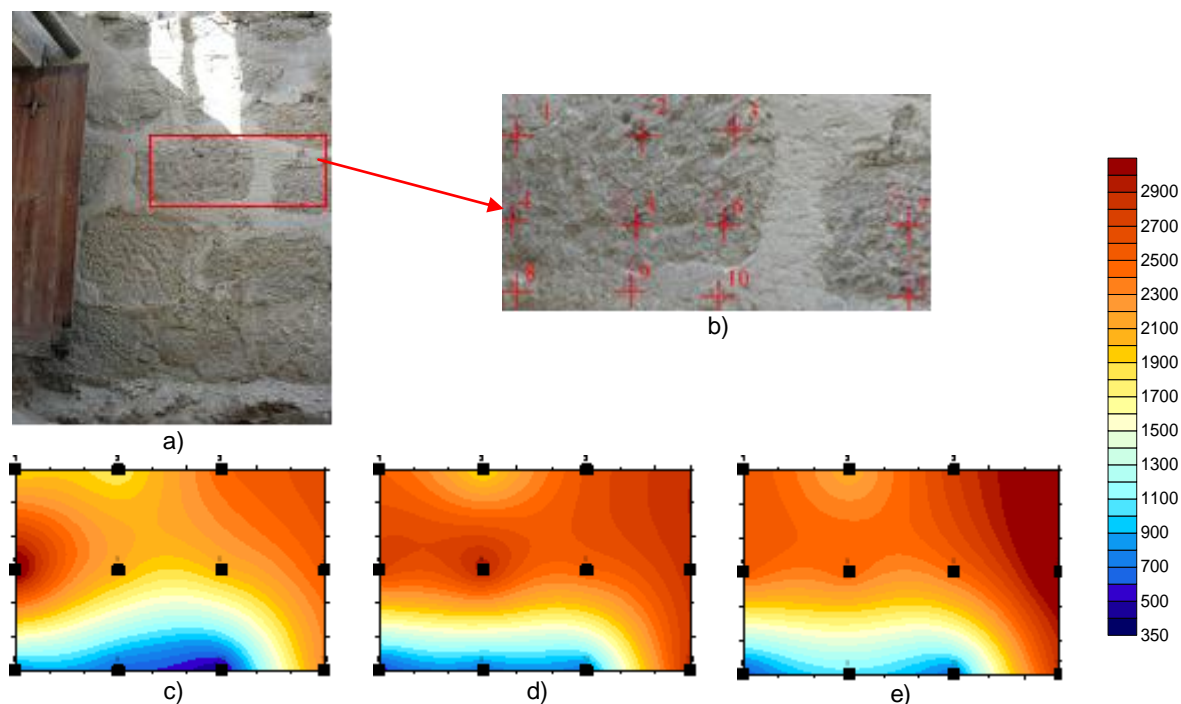


Figura 3.16 – Ensaio ES1: (a) localização do ensaio, (b) pormenor; resultados: (c) tipo 1; (d) tipo 2; (e) tipo 3.

Observando os gráficos de isolinhas apresentados na Figura 3.16 verifica-se haver uma boa coerência entre os resultados utilizando os três tipos de acopladores. Além disso, percebe-se que existe, nas três situações (tipos 1, 2 e 3), uma zona de velocidades muito baixas (a azul). Cruzando a imagem das isolinhas com a imagem da superfície do ensaio (Figura 3.16, b)), percebe-se que esse local corresponde a uma zona de junta, ao contrário dos restantes que, por isso, apresentam velocidades mais altas.

Na Figura 3.17 apresentam-se os resultados obtidos vistos de uma outra perspectiva, onde é possível comparar-se a velocidade obtida utilizando os diferentes tipos de acopladores. Verifica-se que, tendencialmente, os acopladores do tipo 2 e 3, apresentam velocidades superiores. Verifica-se também que a diminuição da velocidade na zona da junta é importante (vale cerca de 80%) passando a velocidade nesses locais a ser de cerca de 500m/s. Esta gama de velocidades encontra-se tipicamente em zonas de juntas.

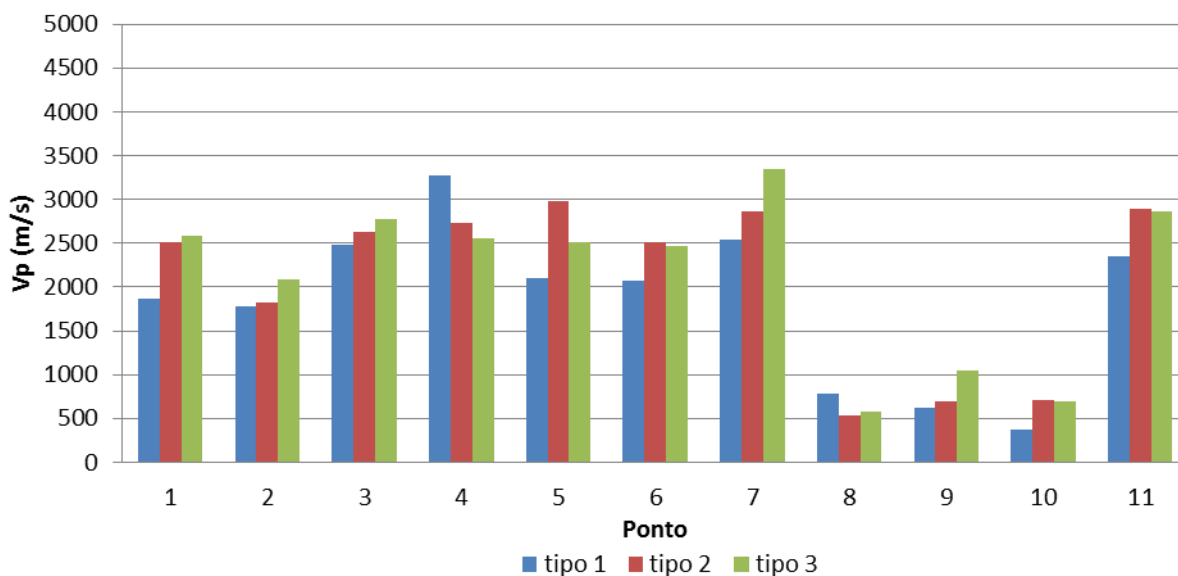


Figura 3.17 – Síntese dos resultados obtidos em ES1.

O Quadro 3.1 salienta as diferenças nos valores das velocidades médias de propagação resultantes de existirem, ou não, pontos de leitura colocados nas juntas da parede, já que compara a velocidade obtida na parede com e sem a contribuição das juntas. Verifica-se que os 3 dos 11 pontos que foram colocados sobre juntas, contribuíram para baixar a velocidade média de propagação em cerca de 20%. Além disso, nota-se que os acopladores dos tipos 2 e 3 produzem velocidades mais elevadas, o que vem de encontro às recomendações da bibliografia (Carino, 2004).

Quadro 3.1 – Velocidades médias (m/s) das ondas P.

Acoplador	Vp (m/s) (tendo em conta o efeito das juntas)	Vp (m/s) (sem ter em conta o efeito das juntas)	ΔVp (m/s)
Tipo 1	1841	2309	468
Tipo 2	2079	2617	538
Tipo 3	2137	2648	511

Local ES2

Na Figura 3.18 apresenta-se uma vista do local ES2, bem como os mapas de velocidade obtidos.

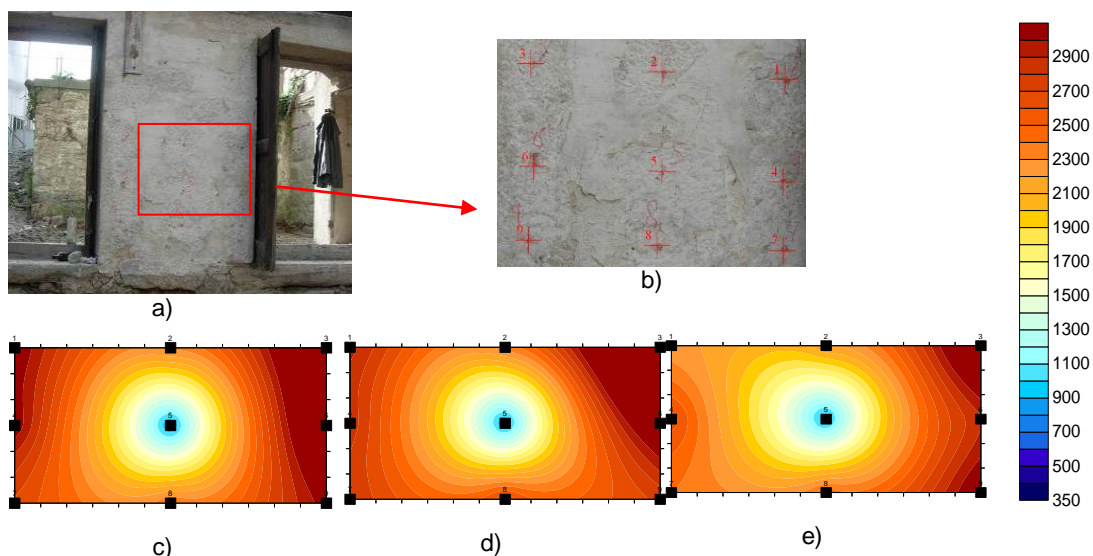


Figura 3.18 – Ensaio ES2: (a)localização; (b)pormenor; resultados: (c) tipo 1; (d) tipo 2; (e) tipo 3.

Mais uma vez, as isolinhas obtidas são coerentes para os três tipos de acopladores testados. A fotografia do local, apresentada na Figura 3.19 a), não fazia prever que os pontos testados apresentassem valores de velocidade tão díspares. Note-se que, embora o ponto 5 pareça estar colocado sobre a superfície de uma pedra, a respectiva velocidade de propagação das ondas elásticas encontra-se ao nível das velocidades das obtidas para as juntas, o que indicia a presença de um vazio nesse local. O gráfico da Figura 3.19 põe em evidência os resultados obtidos.

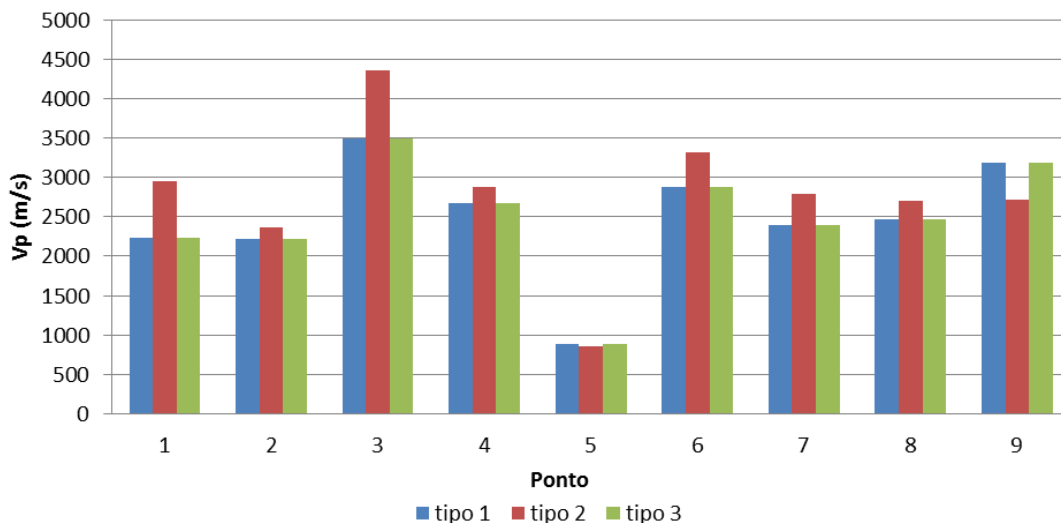


Figura 3.19 – Síntese dos resultados obtidos em ES2.

A análise da Figura 3.19 sugere que o acoplamento tipo 2 foi o que forneceu maiores velocidades médias de propagação das ondas P ($V_p=2770\text{m/s}$). Utilizando os outros

dois tipos de acopladores chegou-se a velocidades médias um pouco inferiores ($V_p=2500\text{m/s}$).

Local ES3

O ensaio realizado no local assinalado por ES3 contemplou pontos apenas em superfícies de pedras; os pontos foram colocados em 8 pedras diferentes. A Figura 3.20 apresenta o local ensaiado e as respectivas isolinhas de velocidade obtidas utilizando os três tipos de acopladores. Através da sua análise percebe-se que o acoplamento do tipo 3 deu origem, no local ES3, a velocidades mais elevadas que os outros dois tipos de acoplamentos. Contudo, o aspecto de mapas obtidos é muito semelhante.

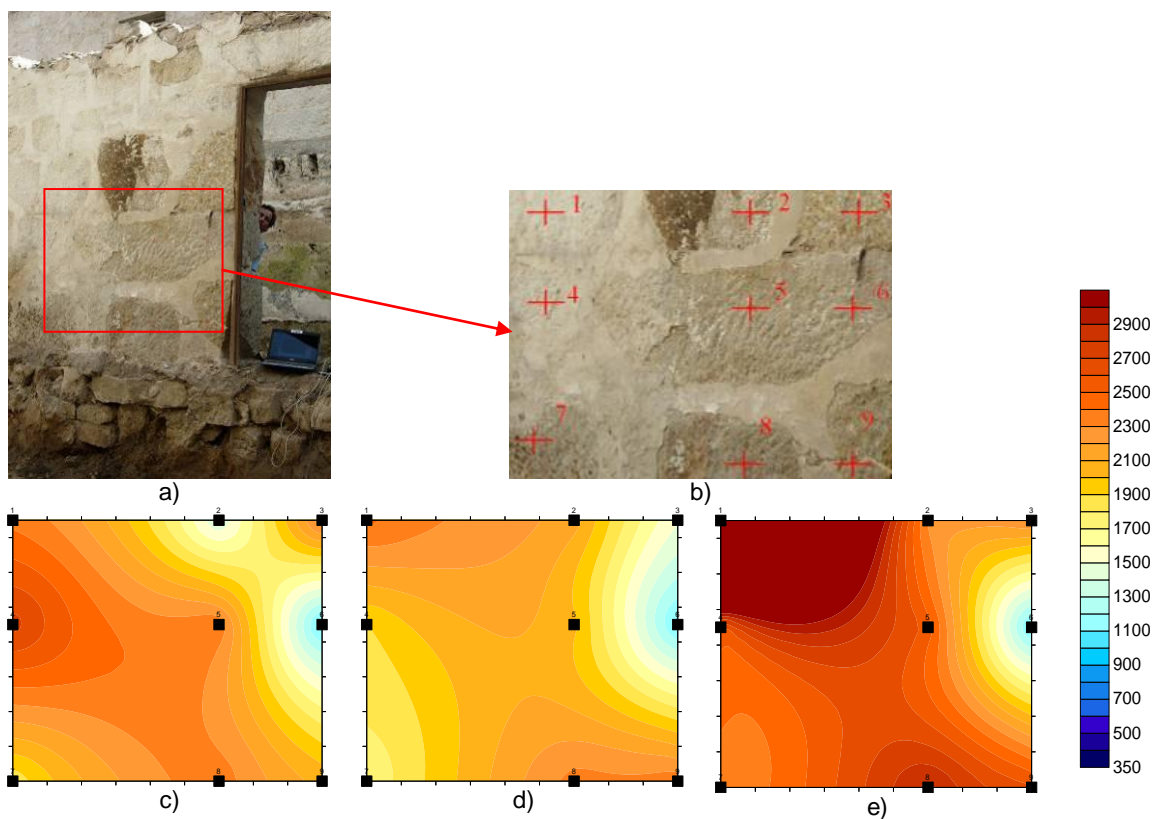


Figura 3.20 – Ensaio ES3: (a)localização; (b) pormenor; resultados: (c) tipo 1; (d) tipo 2; (e) tipo 3.

Numa análise mais pormenorizada, é possível confirmar esta afirmação pela observação da Figura 3.21.

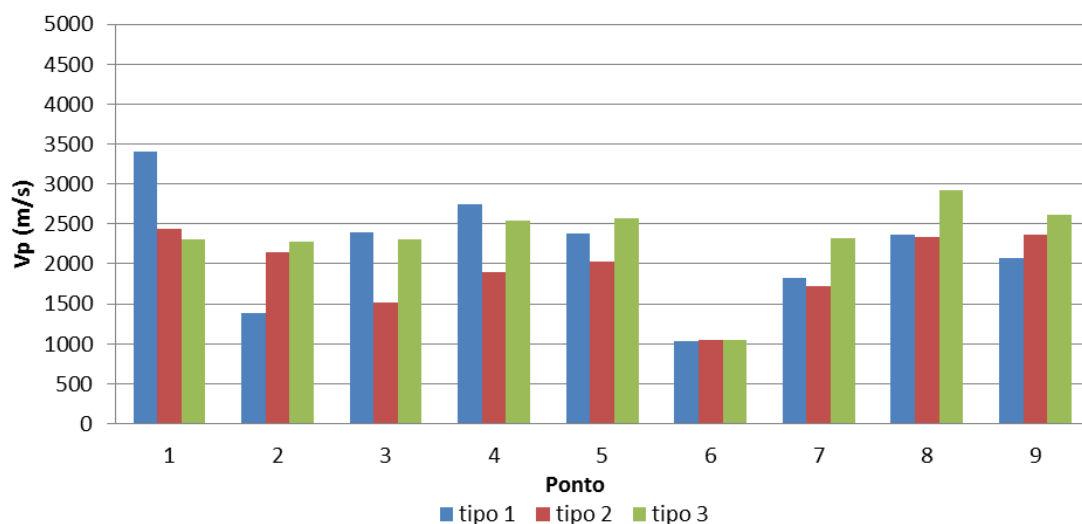


Figura 3.21 – Síntese dos resultados obtidos em ES3

De facto, o acoplador produziu velocidades superiores em cerca de 300m/s às velocidades obtidas com os outros dois tipos de acopladores estudados. Contudo, e ao contrário do que seria de esperar, em alguns pontos (pontos 3 e 4) a velocidade obtida pelo acelerómetro sem qualquer tipo de acoplador (tipo 1) foi a mais elevada, sendo em mais de 50% dos pontos, superior à velocidade obtida pelo acoplador do tipo 2.

Um aspecto interessante que resulta da análise dos resultados obtidos, está relacionado com a velocidade obtida no ponto 6; o facto de ser muito inferior à dos restantes pontos, apesar do ponto se encontrar sobre uma superfície de pedra nos dois alçados da parede, como se pode ver através da Figura 3.22, faz suspeitar que nesse ponto exista um defeito local. Esse defeito, a existir, será local (por exemplo uma fenda que atravessava apenas aquela zona da pedra), uma vez que a velocidade obtida noutra ponto da mesma pedra (ponto 5) resultou em velocidades idênticas às obtidas nas outras pedras, isto é, cerca de 2500m/s.



Figura 3.22 – Vista dos dois alçados do local testado, com destaque para o ponto 6.

3.3.2 Avaliação da influência do reboco

A grande maioria das alvenarias encontra-se protegida com uma camada de reboco. A caracterização in-situ destes elementos envolve na maioria dos casos a remoção desse reboco de modo a pôr à vista o seu aparelho e permitir uma avaliação da sua tipologia. No entanto, a remoção do reboco é um processo moroso e degrada os elementos principais de uma alvenaria, sendo particularmente difícil nos casos em que o reboco se encontra fortemente ligado à superfície desses elementos.

No presente ponto pretendeu-se avaliar se a presença de reboco nas superfícies da parede condiciona os resultados obtidos através dos ensaios sónicos. Para isso, foram realizados ensaios sónicos directos que visaram obter as diferenças registadas em testes realizados em dois locais da mesma alvenaria que, por serem adjacentes, deveriam apresentar sensivelmente as mesmas características.

Na Figura 3.23 (a)) apresenta-se o enquadramento dos locais testados (P1 e P2). Foi escolhido um edifício com uma alvenaria constituída por pedras de granito irregulares, juntas preenchidas com pequenos calços (também de granito) e argamassa de cal; a Figura 3.23 b) ilustra o aspecto da alvenaria.

A espessura da alvenaria era de 50cm. Contudo, na parte inferior do pano exterior da alvenaria verificava-se um acabamento ligeiramente diferente, realizado com pedra muito bem talhada, aplicada com um rebaixamento de cerca de 4cm em relação à superfície rebocada da parede (Figura 3.24 c)).

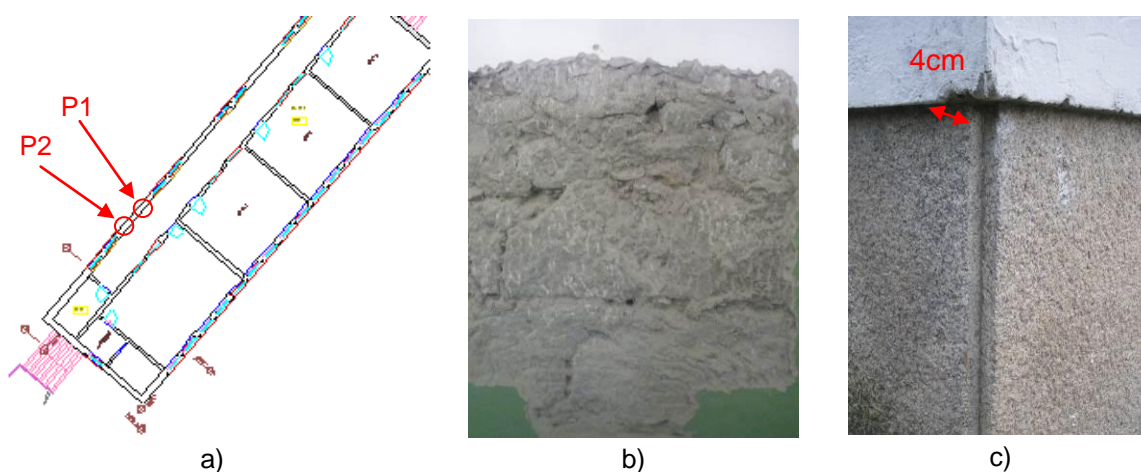


Figura 3.23 – Elementos testados: a) localização; b) vista da alvenaria; c) rebaixamento verificado na zona inferior do pano exterior da parede.

O paramento interior (Figura 3.24, a)) possuía reboco fortemente ligado às pedras. Num dos locais testados (P1) o reboco foi retirado, e no outro (P2) manteve-se intacto. No exterior não foi feita qualquer remoção de reboco. Os ensaios sónicos directos foram

realizados sobre matrizes de pontos (6x6 pontos) que distavam cerca de 15cm entre si e tinham correspondência directa interior/exterior – ensaios directos.

A Figura 3.24 apresenta imagens dos locais e da preparação do ensaio. A parede do troço P1 apresentava espessuras (depois de removido o reboco pelo interior) de 43cm nas 3 linhas inferiores de pontos (alinhamentos horizontais) e 46cm nos restantes 3 alinhamento horizontais (superiores). O troço P2 apresentava uma espessura superior à do troço P1, em cerca de 4cm, já que neste local não se retirou o reboco do pano interior.

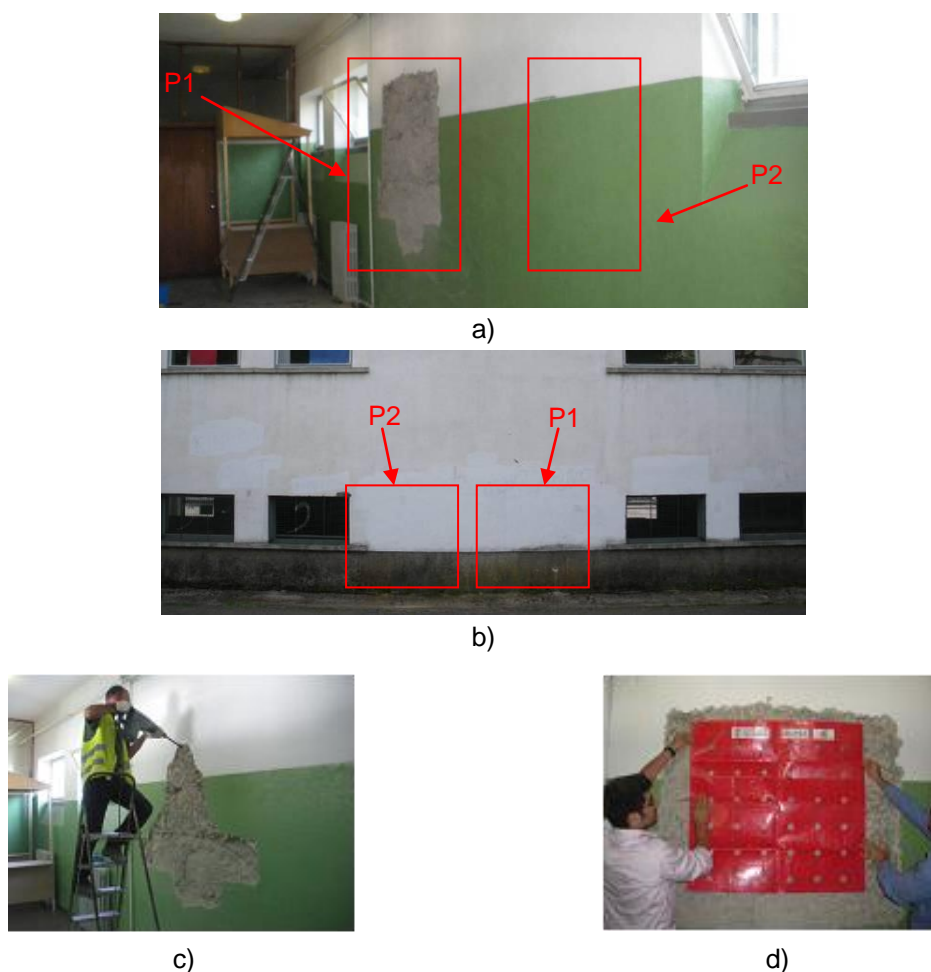


Figura 3.24 – Ensaio sónicos: a) locais P1 e P2 vistos do interior; b) locais P1 e P2 vistos do exterior; c) preparação do local P1 (remoção do reboco); d) marcação da matriz de 6x6 pontos em P1.

A Figura 3.25 apresenta os resultados obtidos nos dois locais testados, P1 e P2. Os mapas de velocidade devem ser analisados com algum critério, já que para respeitar o espaçamento regular imposto pela utilização da grelha de 6x6 pontos, alguns dos pontos testados localizavam-se sobre cunhas ou juntas.

A heterogeneidade, perceptível pela observação dos mapas de velocidades (Figura 3.25) é uma característica das alvenarias testadas e resulta da sobreposição de elemen-

tos de propriedades muito distintas. As ondas que atravessam a parede apresentam valores de velocidade máxima de cerca de 2800m/s, exibindo em termos médios valores de 1800m/s para o conjunto da parede. Esta gama de velocidades foi obtida nos dois locais testados: em P1 (sem reboco no pano interior) e em P2 (com reboco no pano interior). Assim, num caso semelhante ao apresentado, em que há boa ligação do reboco à alvenaria, o reboco não parece ter influência nos resultados.

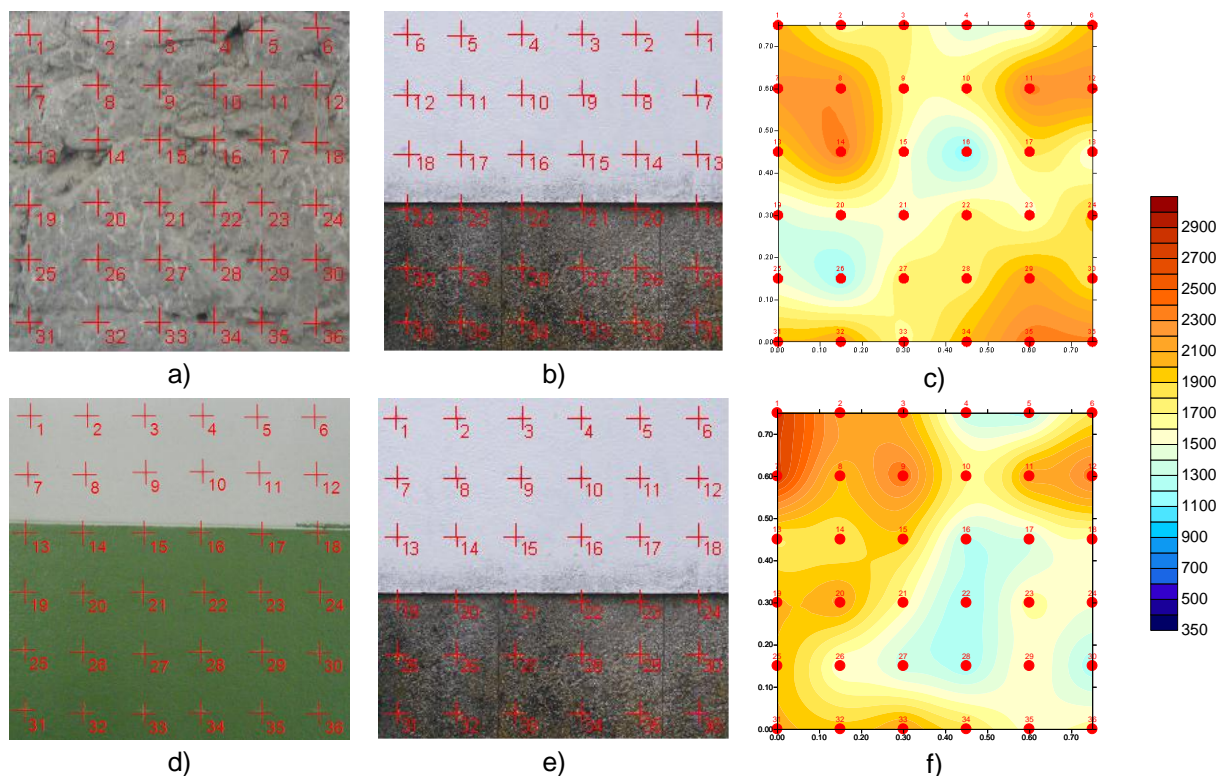


Figura 3.25 – Ensaio sónico: a) vista interior de P1 (sem reboco no pano interior); b) vista exterior de P1; c) mapa de velocidades obtido em P1; d) vista interior de P2 (com reboco no pano interior); e) vista exterior de P2; f) mapa de velocidades obtidos em P2.

3.3.3 Conclusões

No pequeno estudo realizado acerca da influência do acoplador nos resultados obtidos, caracterizaram-se alvenarias através de ensaios directos. Os resultados obtidos não permitem afirmar que deva ser adoptado um dos sistemas de acoplamento estudados, em especial, já que não se verificaram diferenças consistentes nos resultados obtidos. Assim, conclui-se que não há um procedimento ideal para a realização deste tipo de testes, sobretudo em superfícies rugosas. Note-se ainda que a variabilidade registada nas alvenarias de pedra faz com que o hipotético grau de melhoramento nos resultados que resulta da inclusão de um agente acoplador reduza a sua importância.

Por outro lado, a forte irregularidade registada na superfície de algumas pedras é um factor que dificulta a realização do ensaio. Ainda assim, verificou-se que as dimensões reduzidas do acelerómetro utilizado permitiram garantir, na maioria das situações testadas, um contacto aceitável com o material em estudo.

Relativamente à influência que a presença de reboco tem na velocidade de propagação das ondas elásticas, verificou-se que no caso de este se encontrar fortemente ligado à alvenaria (como no situação apresentada) não é expectável obterem-se os resultados muito diferentes dos obtidos no mesmo material sem a presença de reboco. Contudo, em situações em que não haja uma boa ligação do reboco à alvenaria, é de esperar que os resultados sejam influenciados pela presença do reboco. Nestas situações, aconselha-se a remoção prévia do reboco sempre que se pretenda realizar um ensaio sónico.

3.4 ENSAIOS DIRECTOS E INDIRECTOS E DE ECO-IMPACTO EM PEDRAS LISAS

Antes da realização de um ensaio de propagação de ondas acústicas, uma das questões que se coloca é “que configuração de ensaio utilizar?”. Como se referiu anteriormente, as configurações estão relacionadas com os objectivos que se pretendem alcançar e com condicionalismos de acessibilidade aos locais onde se realizam os ensaios. Contudo, mesmo tendo em conta esse conhecimento, coloca-se a questão do modo como as velocidades determinadas através dos diferentes métodos se podem relacionar com as propriedades mecânicas dos materiais, tão importantes para os projectistas.

A utilização do ensaio directo é extremamente importante e encontra-se bem difundida na caracterização da secção transversal das alvenarias. Contudo, como se viu anteriormente, os resultados estão fortemente relacionados com a relação entre os pontos colocados sobre juntas e sobre pedras. A tentativa de caracterizar os dois materiais para obter as características de uma alvenaria num âmbito global, pode gerar erros importantes, dependendo da maior ou menor relação entre o número de pontos colocados sobre juntas e sobre pedras. Este facto põe em causa a utilidade da grelha que é comum adotar-se na realização de ensaios de ensaios sónicos.

O significado dos resultados obtidos quando se tem em conta pontos colocados sobre juntas é difícil de perceber. Por este motivo, a forma mais objectiva de caracterizar uma alvenaria ao longo da sua secção transversal é colocando os pontos testados sobre os seus elementos principais com o objectivo de: no caso de paredes múltiplas se caracterizar melhor o material de enchimento; no caso de paredes simples se caracterizar eficazmente os elementos principais das alvenarias.

Os ensaios directos em alvenarias permitem caracterizá-las ao longo de planos horizontais ao longo da espessura. Contudo, a componente vertical da alvenaria, que de-

termina o seu comportamento quando sujeita às cargas principais que sobre ela actuam, só pode ser realizada através de um método em que a velocidade de propagação das ondas medida seja o resultado do atravessamento de juntas e de pedras ao longo de planos verticais. Poder-se-ia, por exemplo, utilizar um ensaio directo com a emissão no topo superior da parede e a recepção na base. Contudo, tal não é possível já que, na esmagadora maioria das situações, não se consegue aceder àqueles locais. O ensaio indirecto surge assim como uma alternativa na caracterização das alvenarias num âmbito global.

A utilização de ensaios indirectos requer, contudo, o domínio dos resultados obtidos por essa via. Pelo contrário, os ensaios directos são correntemente utilizados e os seus resultados comumente aceites. Como forma de ganhar um maior domínio na interpretação dos resultados dos ensaios indirectos fez-se um conjunto de ensaios em condições muito controladas, num material que se pode considerar homogéneo: o granito. Foram realizados ensaios utilizando diferentes configurações directa (ensaio de referência) e indirecta e diferentes equipamentos: sistema sónico e ultra-sónico. No caso dos ensaios indirectos foram testados vários métodos de análise e além disso foram comparados os resultados obtidos à superfície (ensaios indirectos) e através do interior do material (ensaios directos). Além disso, pretendeu-se testar a técnica do eco-impacto e verificar se, utilizando o sistema sónico, é possível aceder à velocidade das ondas P no granito. Finalmente, pretendeu-se determinar qual a melhor forma de análise dos resultados parciais obtidos através de ensaios indirectos. Serão os ensaios indirectos representativos do interior do material?

Foram utilizados 9 provetes de pedras de faces serradas e com grande regularidade dimensional, $60 \times 80 \times 20 \text{ cm}^3$. Na Figura 3.26 apresentam-se imagens de algumas das pedras testadas.



a)



b)

Figura 3.26 – Imagens de algumas das pedras ensaiadas.

Às faces de dimensão $60 \times 20 \text{ cm}^2$ foi atribuída a designação de L e E e às faces de dimensão $80 \times 20 \text{ cm}^2$ a designação de H e M. A Figura 3.27 apresenta a planta esquemática de uma pedra com as designações adoptadas.

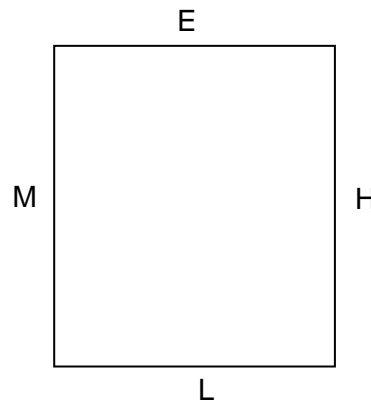


Figura 3.27 – Vista em planta (esquema) e identificação das faces/alçados por E, L, H, M.

Foram feitas três campanhas de ensaios nas 4 faces (designadas por M, H, L, E): (a) ensaios directos; (b) eco-impacto; (c) ensaios indirectos. Pretendeu-se a máxima precisão, pelo que se procurou eliminar o máximo de factores passíveis de influenciar os resultados e, por isso, tanto os transdutores do sistema ultra-sónico como os acelerómetros do sistema sónico, foram acoplados ao material em estudo com a ajuda de vaselina que era, simultaneamente, útil na sua fixação.

3.4.1 Ensaio directos

Os ensaios directos visaram a determinação da velocidade das ondas P segundo três metodologias:

- ✓ ensaio sónico directo no domínio do tempo (velocidade representada por V_{pd}) – em que se determina o intervalo de tempo que separava o instante da emissão do da recepção (abordagem típica de um ensaio sónico);
- ✓ ensaio sónico directo com análise no domínio da frequência (velocidade representada por V_{pf}) – transformando o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, através de uma FFT, de modo a identificar a frequência das sucessivas reflexões nas faces perpendiculares à direcção do impacto; o princípio subjacente a esta técnica é idêntico ao do eco-impacto, abordado anteriormente;
- ✓ Ensaio com ultra-sons (velocidade representada por V_{pu}) – com o objectivo de obter um termo de comparação de resultados; sendo um equipamento

fechado, com maior taxa de aquisição, maior frequência de propagação. O seu uso tem como objectivo servir de termo de comparação.

Os ensaios directos foram realizados de acordo com o esquema da Figura 3.28, ou seja, com a recepção e o impacto nos pontos centrais dos quatro alçados das pedras, segundo os 4 sentidos representados: de M para H; de H para M; de E para L; de L para E. Cada teste foi repetido 5 vezes.

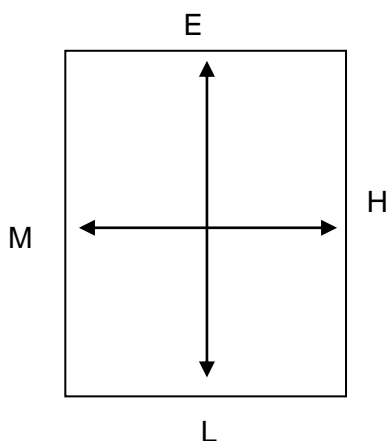


Figura 3.28 – Ilustração dos sentidos de propagação das ondas considerados nos diferentes ensaios directos.

Ensaio sónico directo no domínio do tempo - V_{pd}

Os ensaios sónicos directos permitiram aferir a velocidade de propagação das ondas P analisando os instantes de emissão e recepção das ondas no domínio do tempo. Como comprova a Figura 3.29, verificou-se uma boa correspondência entre os resultados obtidos nas quatro faces de todas as pedras. As principais diferenças encontraram-se nas pedras P1 e P6. Esta situação sugere que o material tem características de isotropia.

Comparando os resultados obtidos nas diferentes pedras, verificou-se que todas tinham, aproximadamente, as mesmas propriedades sónicas, com a excepção da pedra 1 cuja velocidade de propagação era um pouco inferior às restantes.

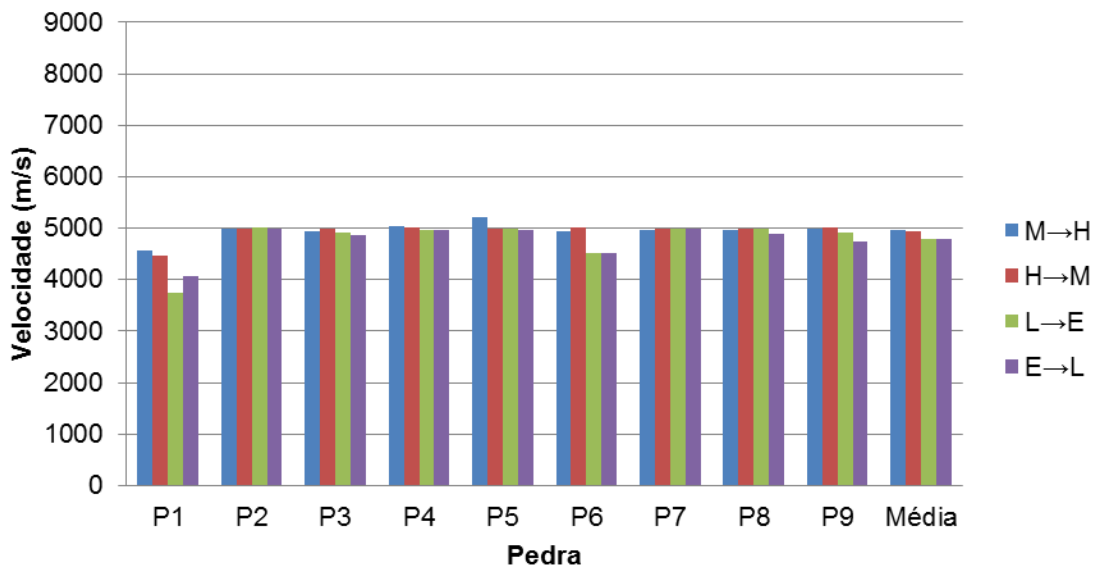


Figura 3.29 – Resultados obtidos em ensaios sónicos directos, segundo os quatro sentidos testados.

Ensaio sónico directo no domínio da frequência - V_{pf}

Utilizando os resultados obtidos nos ensaios sónicos directos no domínio do tempo e tentando tirar partido das sucessivas reflexões das ondas P nas superfícies das pedras, conforme se referiu anteriormente e ilustrou na Figura 2.22, analisaram-se os sinais obtidos no domínio da frequência utilizando um método em tudo semelhante ao do eco-impacto. Na prática, fez-se uma PSD (Power spectrum density) ao sinal temporal obtido e sobrepôs-se o resultado de cada ponto, obtendo-se gráficos semelhantes ao apresentado na Figura 3.29. Segundo o critério adoptado, a frequência que se admitia corresponder à reflexão mais importante nos objectos testados correspondia à frequência cuja amplitude fosse no mínimo igual a metade da amplitude máxima. No exemplo apresentado na Figura 3.29 a frequência que respeita as condições é $f=2637\text{Hz}$. Para o cálculo da velocidade de propagação das ondas P, utilizou-se a Equação 2.25, a que corresponde uma velocidade de $V_p=2df=2 \times 0.6 \times 2637=4219\text{m/s}$.

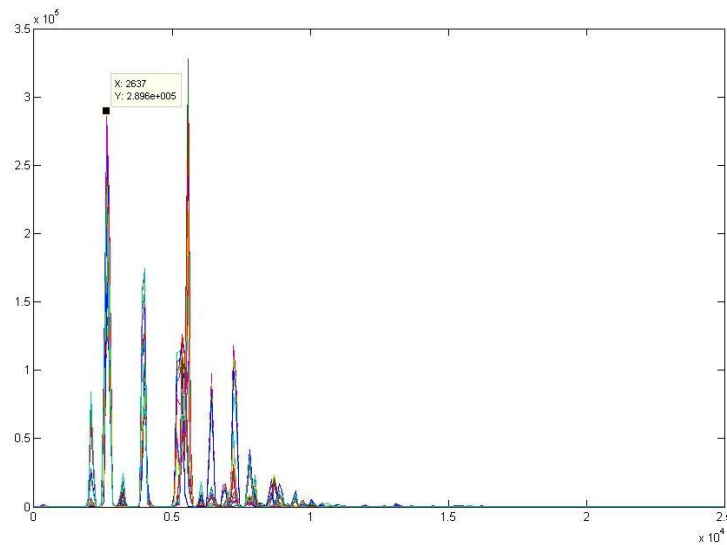


Figura 3.30 – PSD de cinco teste realizados ao longo dos pontos de uma das faces.

A Figura 3.31 apresenta os resultados obtidos. Verifica-se que, em geral, nas viagens maiores (L→E e E→L) as velocidades tiveram valores semelhantes entre si e dentro da gama prevista para o material testado. Contudo, nas viagens menores (H→M e M→H) foram registadas, em várias ocasiões, velocidades que não poderiam corresponder à velocidade das ondas P no material em estudo, já que eram demasiado elevadas (superiores a 8000m/s). O conjunto de velocidades tão díspares para a mesma pedra (repare-se, por exemplo, na pedra 6), indicam que a utilização deste método pode originar erros ou discrepâncias importantes.

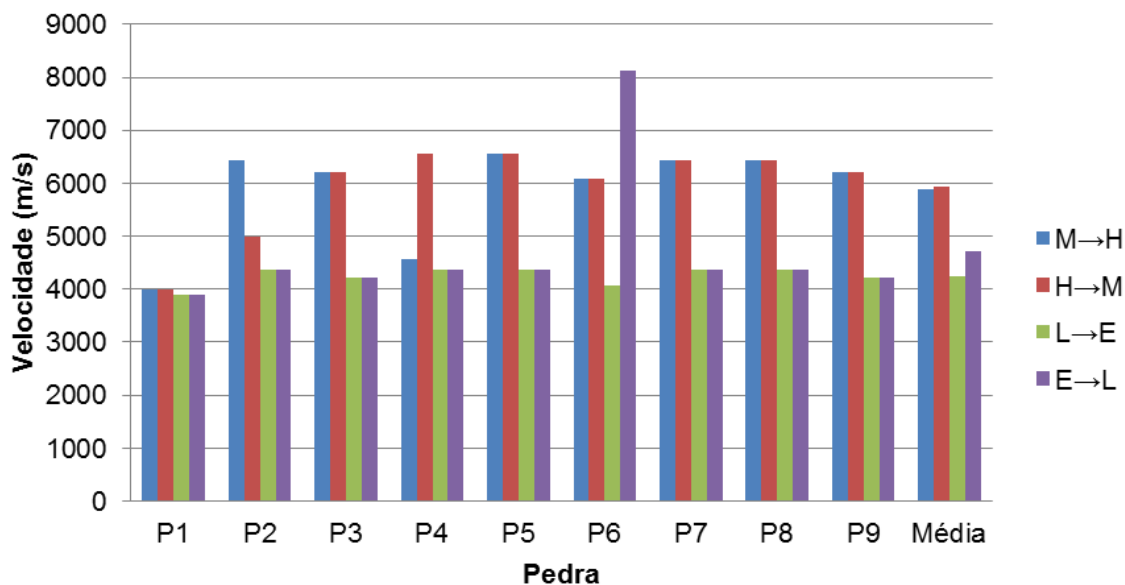


Figura 3.31 – Resultados obtidos através da análise no domínio da frequência dos ensaios sísmicos directos segundo os quatro sentidos testados.

Ensaio com ultra-sons

Os ensaios com ultra-sons foram realizados segundo as direcções indicadas na Figura 3.28 e também no ponto central de cada face. Com esta técnica pretendeu-se obter resultados que pudessem ser contrapostos com os obtidos com o sistema sónico. Na Figura 3.32 apresentam-se as velocidades medidas que, mais uma vez, indicam haver uma boa coerência entre as velocidades medidas nas diferentes direcções e sentidos de cada pedra (isotropia). Além disso, verifica-se a uniformidade de resultados entre as diferentes pedras e, mais uma vez, velocidades de propagação inferiores na pedra 1.

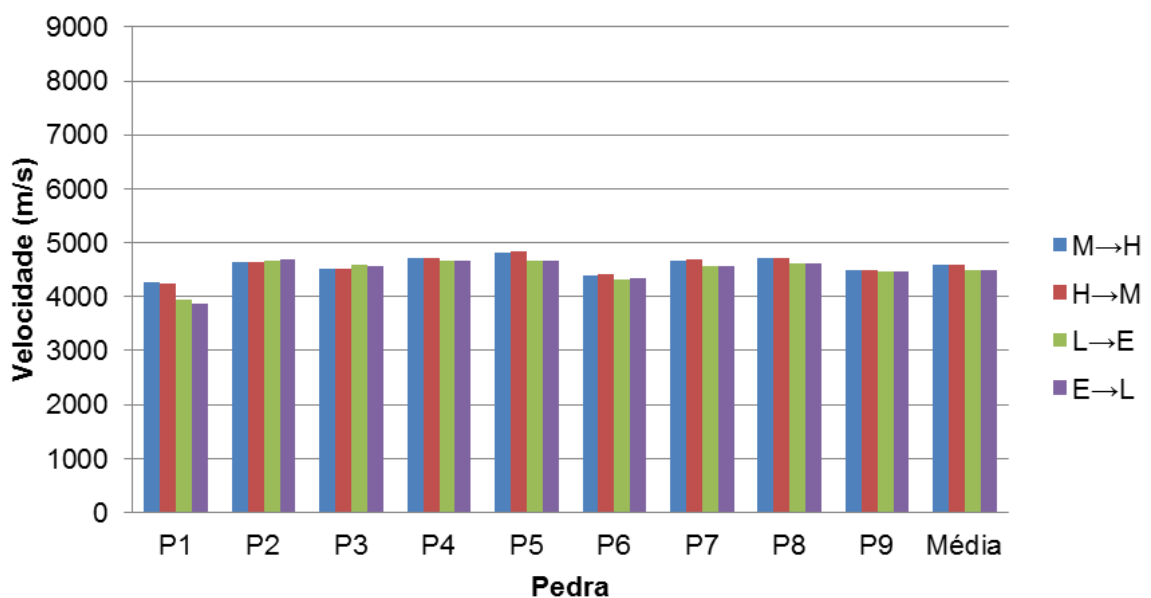


Figura 3.32 – Resultados obtidos nos ensaios ultra-sónicos segundo os quatro sentidos testados.

3.4.2 Eco-impacto

Embora o eco-impacto permita obter a velocidade das ondas P, já que se baseia no tempo de propagação das ondas que têm a mesma direcção do impacto, o método do eco-impacto é, em rigor, um ensaio indirecto, já que o emissor e o receptor são colocados na mesma superfície (Figura 2.23). Dada esta situação especial, optou-se por colocar os resultados do eco-impacto num ponto próprio.

Nos testes realizados, aplicou-se um impacto no centro das faces de menor dimensão e fez a recepção do sinal na mesma face. Para cada face testada, o ensaio foi repetido 5 vezes e os resultados obtidos expressam a média das velocidades que essas repetições permitiram obter.

A Figura 3.33 apresenta os resultados obtidos segundo os quatro sentidos testados que, tal como se verificou para o ensaio sónico directo e o ensaio com ultra-sons, são bastante coerentes entre si. Contudo, uma vez mais, pode verificar-se que há alguma tendência para que nos sentidos L→E e E→L as velocidades sejam ligeiramente inferiores. A análise da Figura 3.33 permite ainda concluir que todas as pedras apresentam uma velocidade muito semelhante e, tal como se verificou anteriormente, também o ensaio de ultra-sons indica que a pedra P1 apresenta uma velocidade inferior, relativamente às restantes.

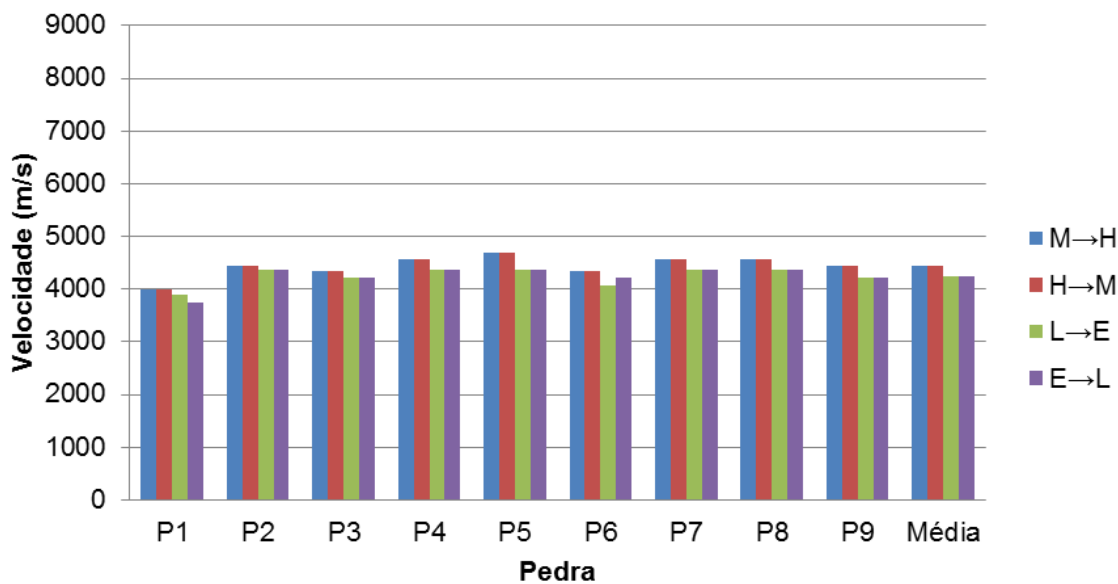


Figura 3.33 – Resultados obtidos em ensaios ultra-sónicos segundo os quatro sentidos testados.

3.4.3 Ensaio sónico indirecto

Para a execução do ensaio sónico indirecto foram marcados 5 e 7 pontos nas faces de 60x20cm² (faces E e L) e de 80x20cm² (faces H e M), respectivamente. Esses pontos, ilustrados na Figura 3.34, foram espaçados 10cm entre si. Em cada uma das 9 pedras foram realizados 2 ensaios por face (M, H, L e E). O procedimento adoptado ilustra-se na Figura 3.34 para as faces de maiores dimensões (H e M) e de menores dimensões (E e L): (i) impacto à esquerda (ponto a vermelho na Figura 3.34 a) e b)) recepção nos pontos à direita para distâncias sucessivamente superiores (pontos a verde); (ii) impacto à direita (a vermelho na Figura 3.34 c) e d)) e recepção nos pontos à esquerda (a verde).

Um ensaio indirecto permite, em geral, a determinação da velocidade das ondas R. Contudo, como se referiu no Ponto 2.4.3, através de ensaios deste tipo é possível aceder à velocidade das ondas P que se propagam à superfície do material.

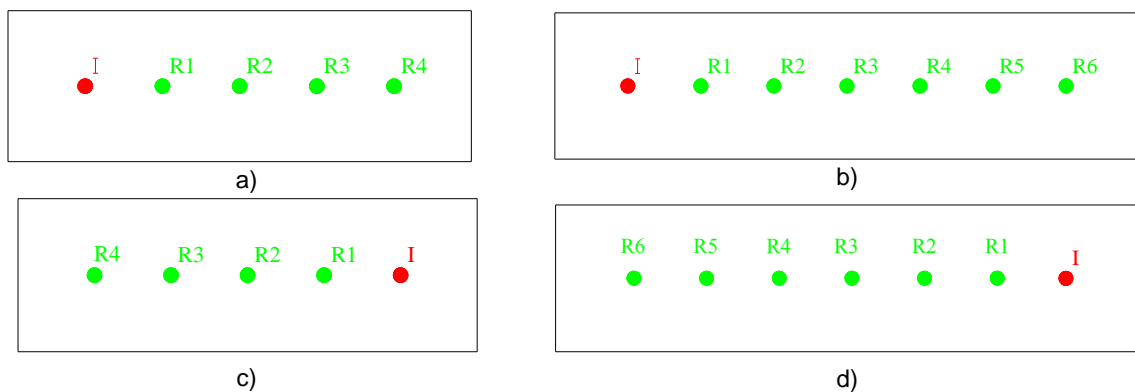


Figura 3.34 – Metodologia seguida nos ensaios indirectos para determinação da velocidade das ondas P e R: ponto de impacto a vermelho (I) e pontos de recepção a verde (R).

A identificação da chegada das ondas P fez-se de uma forma relativamente simples e muito objectiva, já que se lhe fez corresponder a primeira chegada (no domínio do tempo). De modo a confirmar a validade desta operação, o valor agora obtido para a velocidade das ondas P foi confrontado com a velocidade anteriormente obtida através de ensaios directos (ondas P).

A identificação das ondas R seguiu a metodologia apresentada anteriormente (Figura 2.20). A validação dos resultados foi feita tendo em conta três critérios definidos para o método do Impacto Sónico (ISIM) que se apresentarão mais à frente. Esses critérios baseiam-se nos factos seguintes (Miranda, et al., 2010):

- ✓ as ondas R têm maior energia à superfície (Figura 2.20) e são mais lentas do que ondas P (Richart, et al., 1970);
- ✓ o tempo de propagação das ondas desde o ponto de impacto até aos pontos de recepção cresce à medida que a distância entre eles aumenta;
- ✓ a relação entre a velocidade das ondas R e P, para materiais com coeficientes de Poisson entre os 0.2 e os 0.3, é próxima de $V_r/V_p=0.5$, como se ilustrou na Figura 2.6 (Carino, 2001).

A Figura 3.35 ilustra o modo como se interpretaram os resultados dos ensaios indirectos. A metodologia baseou-se no procedimento ilustrado na Figura 2.20 e na Figura 2.21. Para o mesmo impacto, diferentes recepções foram obtidas em diferentes pontos localizados a diferentes distâncias ao longo de um dado eixo (R1; R2; R3). A perturbação gerada pelo martelo chega primeiro aos acelerómetros mais próximos do ponto do impacto. Por se tratar de um ensaio de superfície, é possível reconhecer a chegada das ondas P (primeiras a chegar) seguidas das ondas R (reconhecidas pelo maior conteúdo de energia).

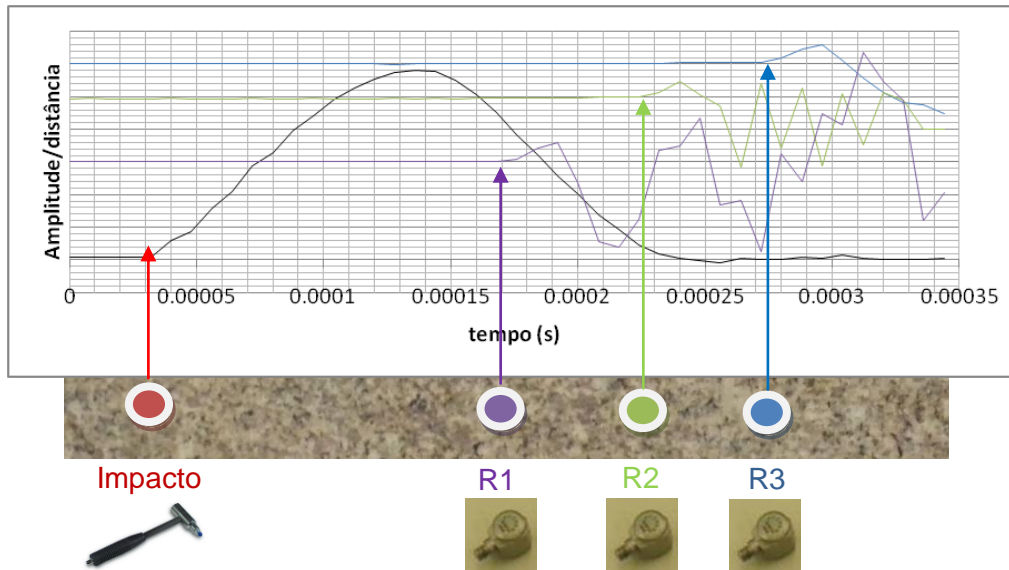


Figura 3.35 – Resultados de um ensaio numa face de um corpo de granito: ponto de impacto (martelo) e pontos de recepção (R1; R2; R3 – acelerómetros).

Os resultados obtidos foram analisados em termos de velocidades através de três métodos diferentes designados por:

- ✓ média das velocidades (também representado por V_{pmv} , se for relativo às ondas P, ou V_{rmv} , se for relativo às ondas R) – segundo o qual se determinou a velocidade com que a onda percorreu a distância que separava o emissor do receptor em cada um dos pontos identificados na Figura 3.34. Cada face com $60 \times 20 \text{ cm}^2$ contou com 8 resultados (4 correspondentes a um impacto à esquerda - Figura 3.34 a) - e 4 a um impacto à direita - Figura 3.34 c)); do mesmo modo, cada face com $80 \times 20 \text{ cm}^2$ contou com 12 pontos; foram tratados um total de 720 resultados (360 para ondas P e 360 para ondas R). No final determinou-se a média dessas velocidades;
- ✓ último ponto (também representado por V_{pup} , se for relativo às ondas P, ou V_{rup} , se for relativo às ondas R) – em que se fez a análise da velocidade dos pontos mais distantes do ponto de impacto, tendo em conta que um percurso maior implica um erro menor. Neste caso foram contabilizados apenas 2 pontos por face (os mais distantes do ponto de impacto) que totalizaram no final a análise de 144 resultados;
- ✓ regressão linear (também representado por V_{prl} , se for relativo às ondas P, ou V_{rrl} , se for relativo às ondas R) – segundo o qual se fez a leitura em cada um dos pontos de recepção da face testada construindo-se, depois, um gráfico *tempo vs distância* sobre o qual se determinou uma regressão linear

cujo declive corresponde à velocidade das ondas. Este procedimento foi descrito anteriormente (Figura 2.21) e utilizou os mesmos 720 resultados que foram utilizados no método da média das velocidades.

Método da Média das Velocidades

A Figura 3.36 apresenta as velocidades das ondas P obtidas em cada uma das faces testadas, calculadas através do método da média das velocidades. Verifica-se que os resultados obtidos são muito semelhantes aos dos ensaios directos (entre 4000m/s e 5000m/s). Não se regista nenhuma tendência marcante nas velocidades obtidas nas quatro faces de cada pedra; a pedra P1 é a que apresenta o menor valor de velocidade; a pedra P6 é a que apresenta os resultados mais díspares de todas as pedras testadas.

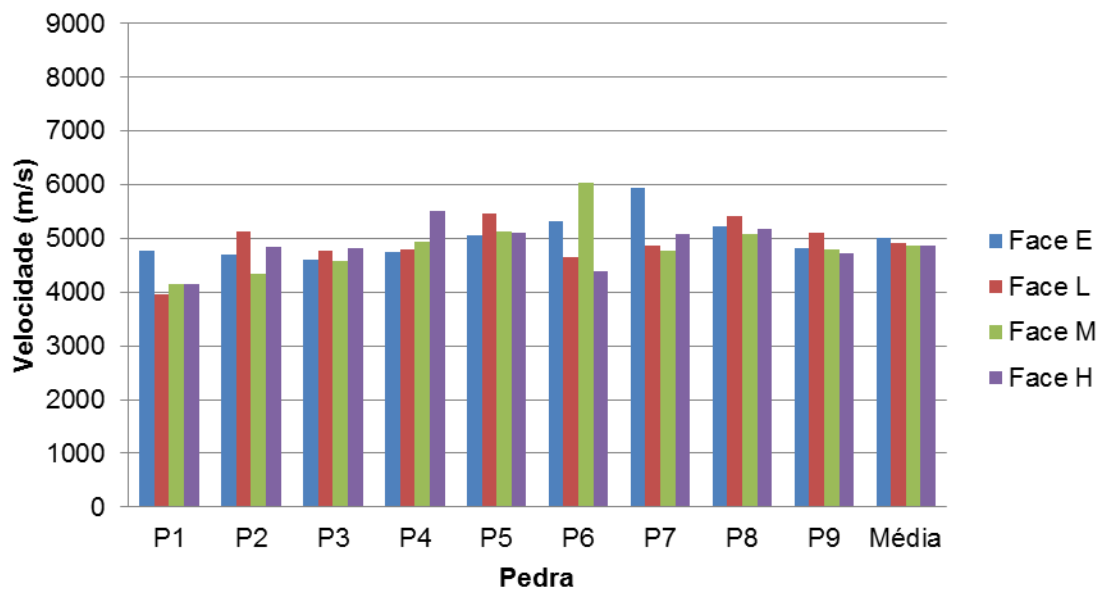


Figura 3.36 – Velocidades das ondas P calculadas através do método da média das velocidades.

Após a análise da velocidade das ondas P apresentam-se, na Figura 3.37, as velocidades das ondas R obtidas através da mesma metodologia. Todas as considerações feitas para as ondas P são válidas no caso das ondas R. A relação entre as velocidades das ondas R e P foi, em média, de $V_r/V_p=0.48$ a que corresponde um coeficiente de Poisson de 0.32.

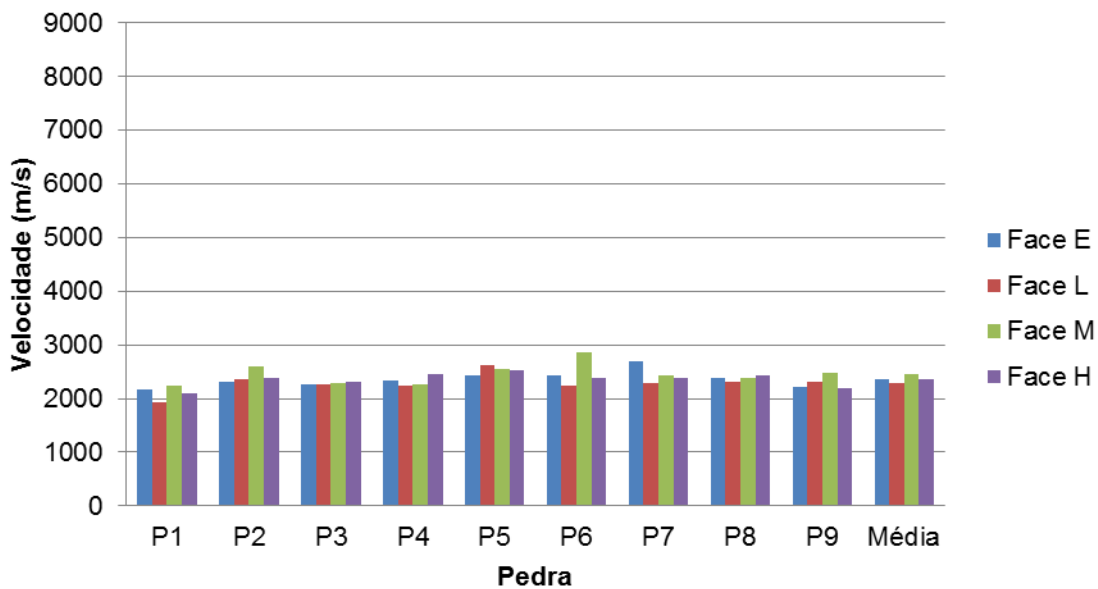


Figura 3.37 – Velocidades das ondas R calculadas através do método da média das velocidades.

Método do Último Ponto

Na Figura 3.38 apresentam-se as velocidades das ondas P obtidas através do método do último ponto em cada uma das quatro faces de cada pedra. Verifica-se uma dispersão importante nos valores obtidos que pode traduzir uma maior imprecisão deste método.

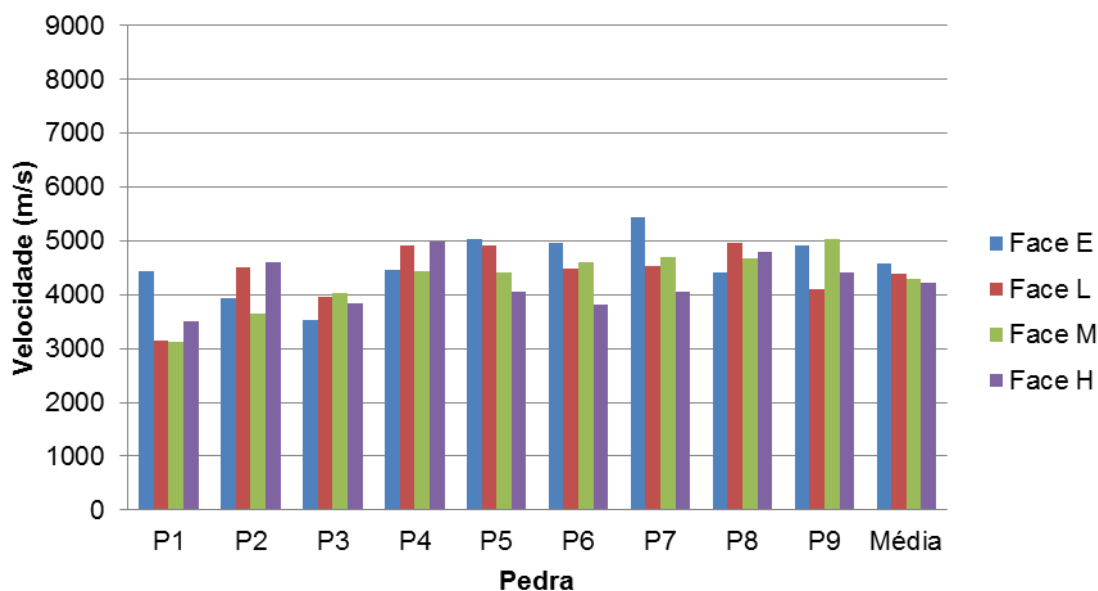


Figura 3.38 – Velocidades das ondas P calculada através do método do último ponto.

Para a dispersão de resultados verificada deve também contribuir o menor número de amostras utilizadas para o seu cálculo (1/5) quando comparado com os restantes métodos utilizados (média das velocidades e regressão linear). Uma outra razão para a dispersão observada está relacionada com o facto de as ondas P terem menor energia do que as ondas R e, por esse motivo, serem mais difíceis de detectar. Esta hipótese ganha mais consistência quando se analisam as velocidades das ondas R que se apresentam na Figura 3.39. De facto, para o mesmo número de amostras, a dispersão observada é menor neste caso (mesmo tendo em conta que a velocidade das ondas R é cerca de metade da das ondas P).

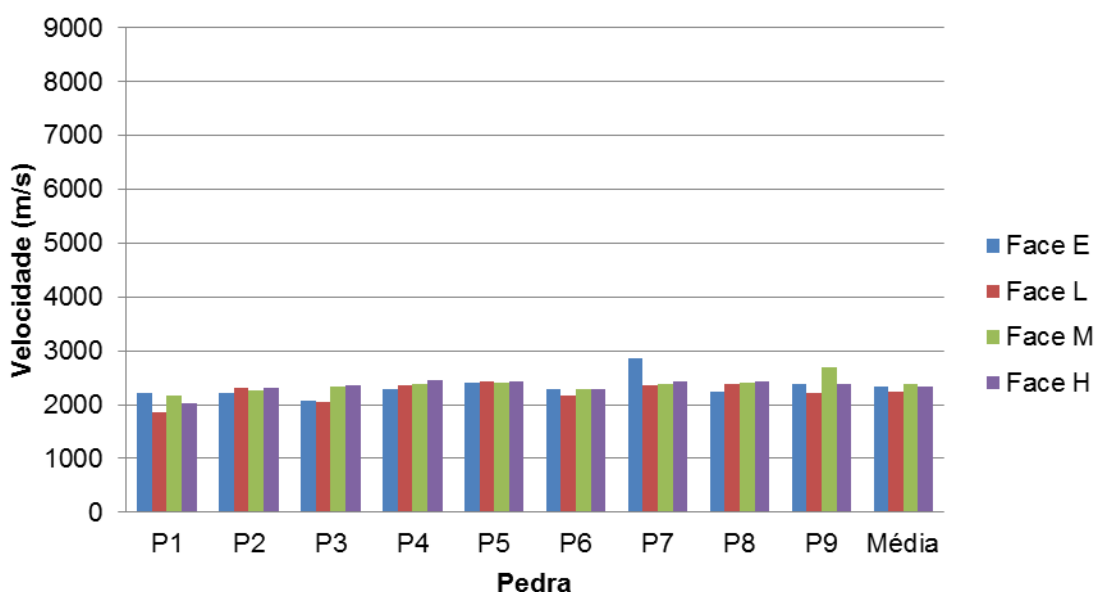


Figura 3.39 – Velocidades das ondas R calculadas através do método do último ponto.

Regressão Linear

O método da regressão linear, anteriormente apresentado, foi aplicado também às quatro faces de cada uma das nove pedras testadas. Na Figura 3.40 apresentam-se as velocidades das ondas P obtidas através deste método. Verifica-se que, à semelhança do exemplo anterior, existe uma importante dispersão nos resultados obtidos.

Embora para o cálculo de cada velocidade com base neste método sejam contabilizados resultados de vários testes, na verdade, cada face conta apenas com dois valores (um em cada sentido), tal como acontece no caso do método do último ponto, o que pode justificar a dispersão observada. Além disso, a energia associada à passagem das ondas P é, por vezes, muito reduzida dificultando a sua identificação, o que pode gerar erros maiores do que na identificação das ondas R (Cascante, et al., 2008).

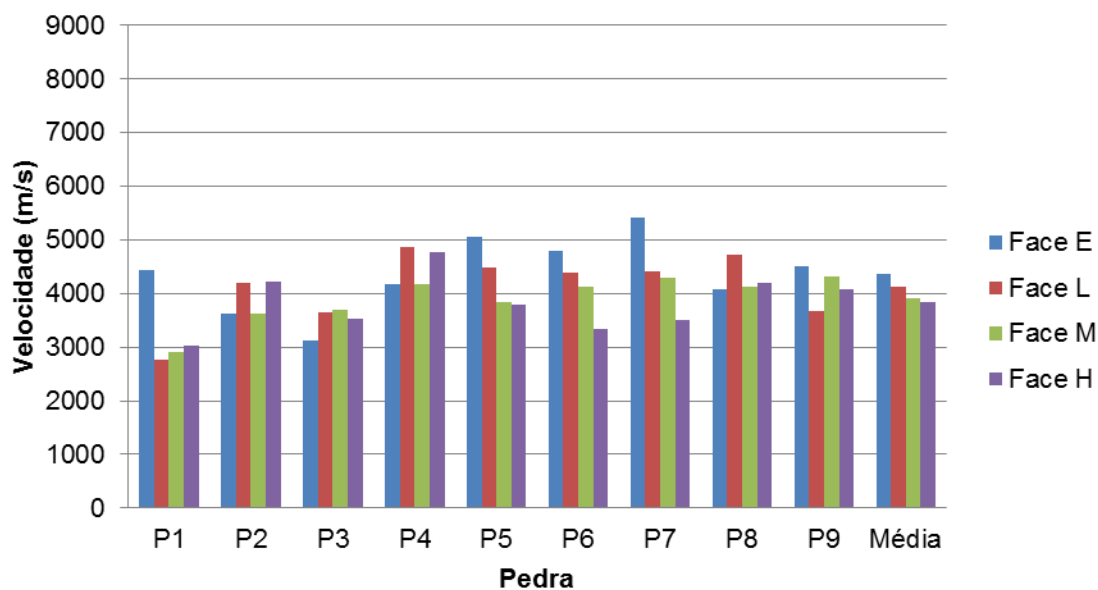


Figura 3.40 – Velocidades das ondas P calculadas através do método da regressão linear.

As velocidades obtidas para as ondas R, que se apresentam na Figura 3.41 não evidenciam uma dispersão tão acentuada de resultados que é consentânea com a dificuldade de validação das ondas P que se referiu anteriormente.

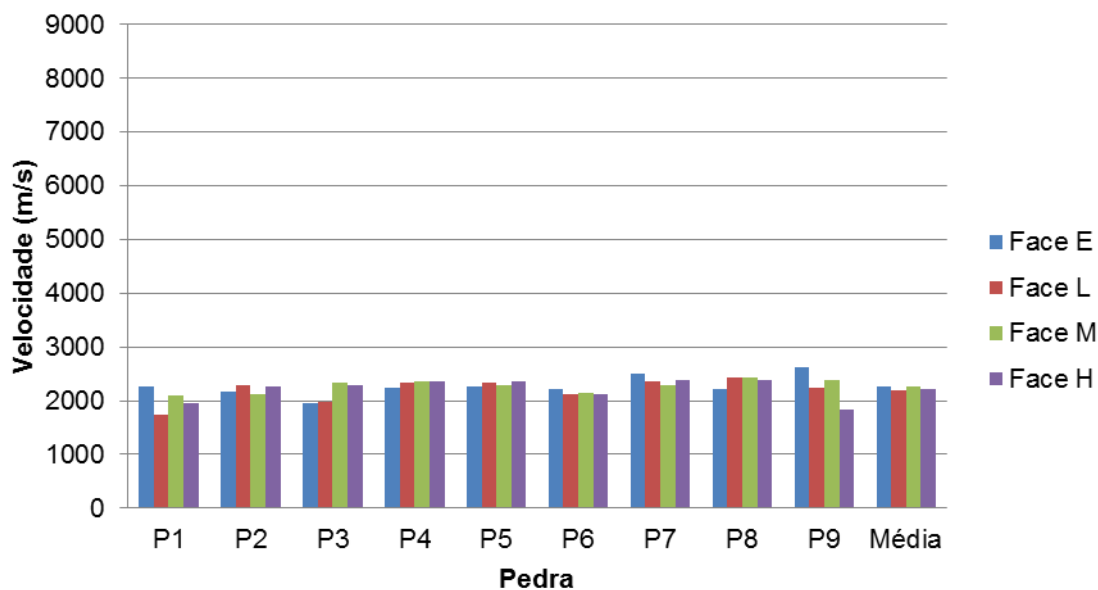


Figura 3.41 – Velocidades das ondas R calculadas através do método da regressão linear.

3.4.4 Discussão dos resultados obtidos

Depois de apresentados os resultados obtidos através de diferentes configurações de ensaio (ensaios directos, eco-impacto, ensaios indirectos), utilizando diferentes equi-

pamentos (sónico e ultra-sónico) e diferentes métodos de análise, é necessário fazer uma análise comparativa de modo a perceber qual dos métodos forneceu os resultados mais fiáveis.

De modo a auxiliar a análise dos resultados na sua globalidade, apresenta-se no Quadro 3.2 uma síntese dos resultados médios obtidos em cada pedra. Esta análise mostra que na maioria dos métodos se verificou haver uma grande coerência nos resultados obtidos nas quatro faces de cada pedra. O Quadro 3.2 espelha ainda um aspecto importante quando se analisa um número elevado de testes, que tem a ver com a reprodutibilidade associada a cada um dos métodos utilizados, que é representada pelo desvio padrão.

Quadro 3.2 – Síntese das velocidades e desvios-padrão (em percentagem) das ondas P obtidas utilizando as configurações directas, eco-impacto e indirectas.

Pedra	Directo (Vpd)	Directo (Vpf)	Directo (Vpu)	Eco-Impacto (Vpe)	Indirecto (Vpmv)	Indirecto (Vpup)	Indirecto (Vpri)
P1	4213 (9%)	3945 (1%)	4074 (5%)	3906 (3%)	4233 (20%)	3550 (18%)	3281 (24%)
P2	5000 (0%)	5045 (19%)	4670 (0%)	4414 (1%)	4718 (16%)	4175 (13%)	3918 (14%)
P3	4932 (1%)	5215 (22%)	4555 (1%)	4278 (2%)	4693 (16%)	3842 (19%)	3503 (26%)
P4	5001 (1%)	4971 (21%)	4693 (1%)	4473 (3%)	5043 (22%)	4697 (9%)	4493 (10%)
P5	5043 (2%)	5469 (23%)	4751 (2%)	4531 (4%)	5175 (19%)	4601 (12%)	4289 (14%)
P6	4747 (6%)	6094 (27%)	4370 (1%)	4237 (3%)	5130 (32%)	4470 (14%)	4163 (16%)
P7	4982 (0%)	5410 (22%)	4619 (1%)	4473 (3%)	5091 (19%)	4685 (20%)	4411 (30%)
P8	4963 (1%)	5410 (22%)	4666 (1%)	4473 (3%)	5204 (16%)	4714 (14%)	4288 (14%)
P9	4914 (3%)	5215 (22%)	4476 (0%)	4336 (3%)	4838 (13%)	4618 (15%)	4146 (13%)
Média	4866	5197	4541	4346	4903	4372	4055

Os resultados dos ensaios directos analisados no domínio da frequência apresentaram uma grande variabilidade e por isso um nível de fiabilidade reduzido, pelo que se pensa que esse método deve ser utilizado com muita prudência. Para além do valor das próprias velocidades médias obtidas em cada pedra serem bastante diferentes, também os respectivos desvios padrão são elevados.

Por outro lado, o método do eco-impacto considera-se mais fiável, pois não entra em linha de conta com aspectos mais sensíveis, como a definição dos instantes de partida e chegada das ondas (no caso dos ensaios sónicos) já que o resultado que apresenta é expresso em função do valor de frequência do espectro da leitura do acelerómetro. As velocidades determinadas através da técnica do eco-impacto originam resultados um

pouco inferiores aos dos ultra-sons (cerca de 5% a 10%, dependendo da forma do material) (Carino, 2001, Sansalone, 1997).

As velocidades determinadas através da técnica do eco-impacto são inferiores às obtidas através do equipamento de ultra-sons. Em relação ao desvio-padrão, tanto os ensaios directos como o eco-impacto apresentam desvios-padrão baixos (menores que 5%). O ensaio que apresenta o menor desvio-padrão é o ensaio directo realizado com ultra-sons. A relativamente baixa taxa de aquisição do sistema sónico utilizado, cujos efeitos foram ilustrados na Figura 3.11, pode ter sido a causa para as diferenças registadas nos ensaios directos com os sistemas sónico e de ultra-sons.

Pelo exposto depreende-se que o ensaio de ultra-sons poderia ser adoptado em todos os testes para a determinação da velocidade das ondas P em granitos. Contudo, não é possível a aplicação desta técnica em alvenarias já que a energia do sinal associada a um ensaio de ultra-sons é insuficiente (na maioria dos casos) para chegar ao receptor. Como se referiu anteriormente, as altas frequências têm maior dificuldade em propagar-se em meios mais heterogéneos do que as baixas frequências (associadas a um ensaio sónico).

A determinação da velocidade das ondas P também foi feita através de ensaios indirectos, como se referiu. Considerando que a velocidade mais fiável das ondas P no material estudado corresponde ao valor obtido através da técnica de ultra-sons e tendo em conta que à superfície a velocidade de propagação das ondas deve ser um pouco inferior à velocidade das ondas que se propagam no interior do material (como consequência da maior degradação a que um material está normalmente sujeito à superfície), é de esperar que a velocidade das ondas P obtida através dos ensaios indirectos seja, senão menor, pelo menos igual à velocidade obtida através dos ensaios directos e do método do eco-impacto.

Analisando as velocidades das ondas P obtidas através dos diferentes métodos dos ensaios indirectos, verifica-se que apenas os métodos do último ponto e da regressão linear satisfazem esta condição, pelo que se considera que estes fornecem resultados consonantes com os ensaios directos e, como tal, mais fiáveis do que o método da média das velocidades.

Em geral, verifica-se que os ensaios indirectos apresentam desvios padrão mais elevados do que os ensaios directos e do que o eco-impacto. Pela sua maior fiabilidade, a utilização de ensaios directos para a determinação das ondas P pode ser adoptada, sempre que possível, como forma de validar os resultados dos ensaios indirectos.

A velocidade das ondas R foi aferida através de ensaios indirectos. O Quadro 3.3 apresenta o valor das velocidades médias e respectivos desvios padrão para os diferentes métodos de análise utilizados. A primeira conclusão que resulta da sua análise é que

a reprodutibilidade dos resultados obtidos através de ensaios indirectos na análise das ondas R é maior (menor desvio padrão) do que a que se verificou para as ondas P.

Os valores de velocidade das ondas R obtidos consideram-se, nos três casos de análise, muito próximos do valor considerado padrão, já que a sua relação com a velocidade das ondas P determinadas através dos ensaios de ultra-sons (V_{pu}) se encontra dentro de limites coerentes com coeficientes de Poisson plausíveis:

- ✓ $V_{rmv}/V_{pu}=0.52$
- ✓ $V_{rup}/V_{pu}=0.51$
- ✓ $V_{rrl}/V_{pu}=0.49$

Às relações apresentadas entre os resultados da velocidade das ondas R e a velocidade das ondas P corresponde um coeficiente de Poisson entre 0.25 e 0.3.

Na obtenção das ondas R, a dispersão observada nos diferentes métodos de análise é menor para os métodos do último ponto e da regressão linear. Contudo, o número de valores considerados neste último (cerca de 360 resultados) é consideravelmente superior aos considerados no método do último ponto (cerca de 70 resultados). O Quadro 3.3 apresenta os valores de dispersão e das velocidades das ondas R obtidos tendo por base cada um dos métodos utilizados. Verifica-se que as velocidades médias obtidas por cada um dos três métodos utilizados são muito semelhantes.

Quadro 3.3 – Velocidades das ondas R e respectivos desvios padrão (em percentagem) obtidas nos ensaios indirectos através dos diferentes métodos de análise.

Pedra	vr_{mv} (m/s)	vr_{up} (m/s)	vr_{rl} (m/s)
P1	2115 (11%)	2065 (8%)	2011 (11%)
P2	2432 (24%)	2275 (4%)	2206 (6%)
P3	2281 (9%)	2207 (11%)	2138 (14%)
P4	2335 (13%)	2366 (4%)	2327 (5%)
P5	2537 (14%)	2420 (1%)	2307 (5%)
P6	2509 (23%)	2260 (5%)	2148 (3%)
P7	2439 (12%)	2511 (13%)	2377 (9%)
P8	2384 (6%)	2374 (5%)	2362 (6%)
P9	2301 (17%)	2423 (10%)	2273 (19%)
Média	2370	2322	2239

Refira-se que o método da regressão linear tem duas vantagens importantes relativamente ao método do último ponto: (a) quando se analisam estruturas mais complexas, em que a identificação das ondas P e R não é tão imediata como no caso das pedras analisadas, é importante para o utilizador uma referência que pode ser conseguida através da análise de sinais obtidos em pontos cada vez mais distantes do ponto de impacto; (b) em estruturas heterogéneas podem existir defeitos pontuais próximos do único ponto analisado que falseiam as velocidades obtidas; considerando vários pontos na determinação dessa velocidade, reduz-se a importância da presença desses defeitos. Assim, aconselha-se, em especial em elementos de elevada complexidade (como é o caso das alvenarias), que a determinação da velocidade das ondas se faça através do método da regressão linear.

Convém sublinhar que não existe nenhum método de análise infalível e mesmo utilizando dois equipamentos diferentes e vários métodos de análise, a identificação do resultado que se presume ser o mais correcto, não é fácil. Na determinação da velocidade das ondas P, o método do eco-impacto, o ensaio directo com ultra-sons e os ensaios indirectos (último ponto e regressão linear) foram os que forneceram os resultados mais próximos daquele que se considerou como sendo o correcto. Na determinação da velocidade das ondas R, considerou-se que o método mais fiável é o da regressão linear.

Apesar dos bons resultados obtidos através do ensaio com ultra-sons, a experiência adquirida com esta tecnologia tem demonstrado limitações importantes nos ensaios realizados sobre alvenarias. Como se referiu anteriormente, o tipo de sinais emitidos por este equipamento não é capaz de atravessar meios heterogéneos e por isso, como se verá mais à frente, este ensaio não pôde ser sempre utilizado. Finalmente, o ensaio directo, como usualmente se realiza (Vpd) também é relativamente fiável (baixos desvios-padrão) embora forneça velocidades um pouco superiores à considerada correcta.

3.4.5 Correlação entre os módulos de elasticidade “estático” e “dinâmico”

De acordo com o exposto no Ponto 2.5, as velocidades de propagação dos diferentes tipos de ondas estão relacionadas com parâmetros de natureza mecânica dos materiais testados, embora se verifique em vários casos (betão; pedra) uma diferença entre os métodos estáticos e dinâmicos. Note-se que a Equação 2.18 e a Equação 2.19 foram determinadas para meios homogéneos, elásticos e semi-finitos e que os materiais estudados na presente dissertação não respeitam essas condições. Tem-se assim a consciência que os resultados obtidos utilizando as velocidades das ondas elásticas não são os mais correctos; contudo, por não se conhecerem equações mais adequadas ao cálculo de grandezas mecânicas através das velocidades das ondas elásticas, optou-se por utilizá-las na determinação do módulo de elasticidade dos 9 blocos de granito testados, que se apresentam no Quadro 3.4. Para o seu cálculo consideraram-se as velocidades obti-

das através do ensaio directo com ultra-sons; um coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$ e uma massa volúmica de $\rho=2600\text{kg/m}^3$ (valor dentro dos valores correntes para granitos (Costa, 2009, Vasconcelos, 2005)).

Quadro 3.4 – Módulos de elasticidade calculados com base nas velocidades dos ensaios sónicos para as nove pedras lisas testadas.

Pedra	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Média
E (GPa)	36	47	45	48	49	41	46	47	43	45

O coeficiente de Poisson e a massa volúmica adoptados podem influenciar os resultados obtidos. Os valores utilizados no cálculo do módulo de elasticidade apresentado no Quadro 3.4 foram estimados tendo em conta os valores correntes daquelas grandezas em granitos. Tendo noção que esta situação é passível de gerar erros, fez-se uma análise de sensibilidade a esses parâmetros. Para isso, utilizaram-se diferentes constantes (massa volúmica, coeficiente de Poisson) no cálculo do módulo de elasticidade a partir da velocidade de propagação das ondas P. Foram utilizadas massas volúmicas de $\rho=3000\text{kg/m}^3$, $\rho=2500\text{kg/m}^3$ e $\rho=2000\text{kg/m}^3$ e duas gamas de velocidade de propagação das ondas P bastante diferentes, uma de $V_p=2000\text{m/s}$ e outra de $V_p=4000\text{m/s}$ (os resultados seriam idênticos se fossem utilizadas ondas R de velocidade correspondente). Apresentam-se na Figura 3.42 os resultados obtidos.

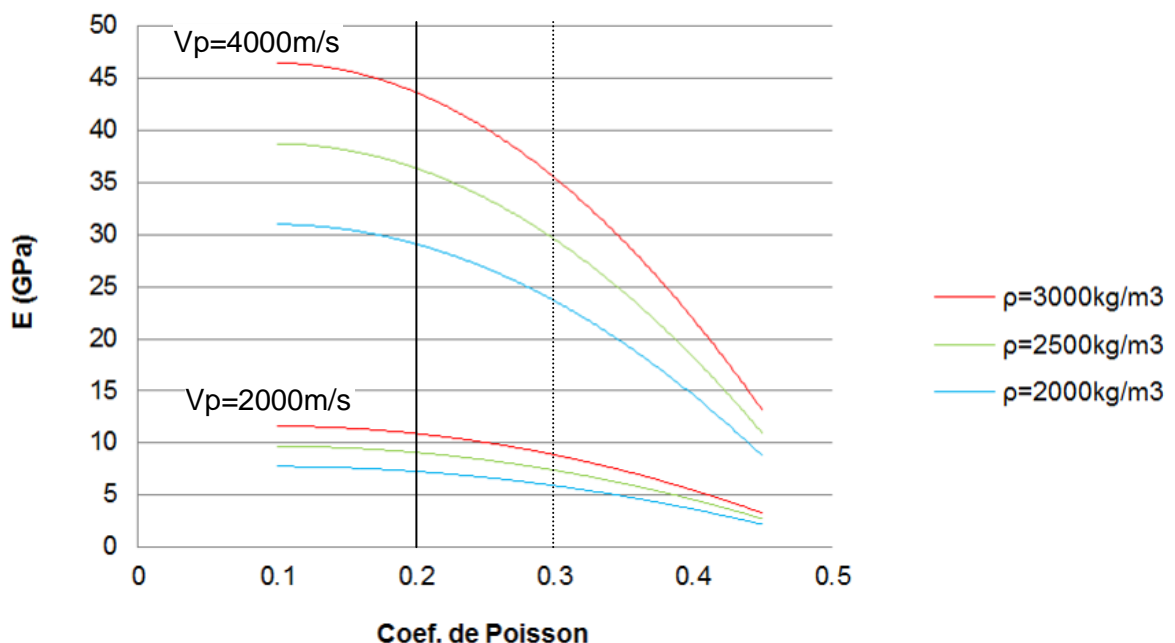


Figura 3.42 – Análise de sensibilidade do módulo de elasticidade face a outros parâmetros: velocidade.

Verificou-se que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da massa volúmica e com a velocidade de propagação das ondas; e diminui com o aumento do coeficiente de Poisson. Verificou-se ainda que uma estimativa errada da massa volúmica, em $\rho=500\text{kg/m}^3$, gera flutuações do módulo de elasticidade de cerca de $E=7\text{GPa}$, que é de cerca de 20%, quando a velocidade das ondas P é de $V_p=4000\text{m/s}$, e de $E=2\text{GPa}$, que também corresponde a aproximadamente 20%, quando essa velocidade é de $V_p=2000\text{m/s}$.

Além disso, verifica-se que uma variação do coeficiente de Poisson dentro de valores correntes, entre $\nu=0.2$ e $\nu=0.3$ (intervalo assinalado na Figura 3.42) gera módulos de elasticidade que podem diferir entre $E=5\text{GPa}$ e $E=8\text{GPa}$ e que correspondem no máximo a cerca de 20% do valor do módulo de elasticidade, para cada massa volúmica utilizada e para a velocidade de propagação das ondas P de $V_p=4000\text{m/s}$. Para velocidades de propagação das ondas P de $V_p=2000\text{m/s}$, as diferenças quando se utiliza um coeficiente de Poisson de $\nu=0.2$ em vez de $\nu=0.3$, são bastante menores, cerca de $E=2\text{GPa}$, mas que correspondem também a 20% do módulo de elasticidade.

Em síntese, as diferenças observadas no módulo de elasticidade calculado com coeficientes de Poisson de $\nu=0.2$ e $\nu=0.3$ diminuem com a diminuição da massa volúmica e da velocidade de propagação das ondas P. Só para se ter uma ideia, para velocidades de propagação das ondas P da ordem dos $V_p=500\text{m/s}$ as diferenças observadas, para o mesmo intervalo de coeficientes de Poisson, seriam inferiores a $E=0.1\text{GPa}$, embora correspondam também a cerca de 20%.

Ainda que se reconheça que seria desejável determinar experimentalmente o coeficiente de Poisson e a massa volúmica de um material, para calcular de forma mais correcta o módulo de elasticidade, verifica-se que, utilizando valores estimados para aquelas constantes, o valor do módulo de elasticidade determinado pela Equação 2.18 e pela Equação 2.19 estima o módulo de elasticidade dinâmico, com erros máximos de cerca de 20%, considerando valores a variar entre $\rho=[2500-3000]\text{kg/m}^3$ e $\nu=[0.2-0.3]$.

De forma a avaliar a relação existente entre o módulo de elasticidade das pedras obtido através de métodos dinâmicos e estáticos utilizaram-se resultados obtidos em ensaios realizados no LESE, no âmbito de um trabalho que decorreu no ano de 2005 (LESE, 2005). Nessa determinação testaram-se carotes de pedras provenientes do mesmo local das pedras ensaiadas pelo método sónico. No total foram testados 4 proveites cilíndricos (com dimensões de acordo com a norma ASTM D 4543 – 85) provenientes da pedra anteriormente designada por P10. Em cada teste, foram realizados 20 ciclos carga/descarga com valores compreendidos entre 1/3 e 1/10 da carga de rotura do proveite. Na Figura 3.43 apresenta-se a preparação do ensaio de determinação do módulo de elasticidade.



Figura 3.43 – Preparação do ensaio para determinação do módulo de elasticidade (LESE, 2005).

Apresentam-se no Quadro 3.5 os resultados obtidos nos quatro ensaios realizados, (LESE, 2005). Pela sua análise verifica-se que o granito é de boa qualidade, já que o seu módulo de elasticidade ronda os 50GPa.

Quadro 3.5 – Módulos de elasticidade determinados através de ensaios mecânicos (LESE, 2005).

Ensaio	1	2	3	4	Média
E (GPa)	52	50	47	48	52

Durante a realização dos ensaios de propagação de ondas, a pedra estudada (P10), já tinha sido submetida à remoção de carotes para ser ensaiada à compressão e por isso encontrava-se danificada. Assim, não foi possível realizar, nesta pedra, o procedimento aplicado para as restantes (P1 a P9), tendo-se apenas realizado alguns ensaios de propagação de ondas com o equipamento de ultra-sons. Esses ensaios forneceram um valor médio de velocidade de propagação das ondas P de $V_p=4634\text{m/s}$ (valor próximo do obtido para as restantes 9 pedras testadas cuja média obtida pela mesma técnica foi de $V_p=4541\text{m/s}$).

Considerando uma massa volúmica de $\rho=2600\text{kg/m}^3$ e um coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$, de acordo com a Equação 2.18, o módulo de elasticidade dinâmico correspondente àquela velocidade é de $E=47\text{GPa}$, um pouco inferior ao resultado obtido através de ensaios estáticos, $E=52\text{GPa}$. Neste caso, o módulo de elasticidade dinâmico para as hipóteses consideradas foi inferior ao estático, à semelhança do que aconteceu em estudos referidos no Ponto 2.5. Não obstante, obteve-se uma considerável aproximação entre os métodos estático e dinâmico.

3.4.6 Síntese e conclusão dos ensaios realizados nas pedras individuais

Existem vários métodos passíveis de ser utilizados na determinação da velocidade das ondas P e das ondas R, sendo que uns são mais fiáveis que outros. No estudo realizado considerou-se que a técnica de ultra-sons era a que apresentava resultados mais fiáveis, muito possivelmente devido à sua mais elevada taxa de aquisição e às frequências mais elevadas das ondas emitidas – situação recomendada para amostras de dimensões reduzidas (BSI, 2004). Embora fossem superiores, as velocidades obtidas com o equipamento sónico apresentavam a mesma ordem de grandeza das velocidades obtidas com o equipamento de ultra-sons.

Verificou-se uma boa concordância entre os resultados obtidos para a velocidade das ondas R e das ondas P, expresso por coeficientes de Poisson correntes para o material em estudo $\nu \approx 0.25$. Concluiu-se que, embora o método do último ponto apresentasse resultados mais próxima aos dos ensaios directos com ultra-sons, a utilização do método da regressão linear podia trazer vantagens na identificação dos diferentes tipos de ondas, em especial em materiais heterogéneos.

A determinação do módulo de elasticidade com base na velocidade de propagação de ondas acústicas pode ser influenciada pelas constantes necessárias à sua determinação e que fazem parte das (Equação 2.18 e Equação 2.19) (coeficiente de Poisson – ν – e massa volúmica ρ). Verificou-se que um erro na determinação dessas constantes tem maior importância para velocidades e massas volúmicas mais elevadas, e coeficientes de Poisson menores. A comparação dos módulos de elasticidade obtidos com base em testes dinâmicos e estáticos apresentavam uma boa concordância, mas com valores dinâmicos tendencialmente inferiores aos estáticos.

3.5 ENSAIOS DIRECTOS E INDIRECTOS EM PEDRAS DE PAREDES IRREGULARES

Foram realizados ensaios directos sobre pedras de um painel de parede designado de PG1. Esse painel será apresentado com maior detalhe no Capítulo 4 pelo que não se fará, neste ponto, a sua apresentação exaustiva. Trata-se de um painel de um edifício antigo de alvenaria de pedra (granito) com 2.4m de altura e 1.6m de largura e cerca de 40cm de espessura, que foi cortado e transportado para o LESE. As pedras da alvenaria apresentavam formas irregulares e superfícies rugosas. Para a realização dos ensaios directos e indirectos marcou-se uma grelha de 36 pontos nos seus alçados principais (à frente designados por M e H) distribuídos ao longo de seis linhas e seis colunas (Miranda, et al., 2010), tal como se apresenta na Figura 3.44. O facto de se ter adoptado um espaçamento constante entre os pontos fez com que parte deles ficasse colocada sobre juntas e não sobre pedras.

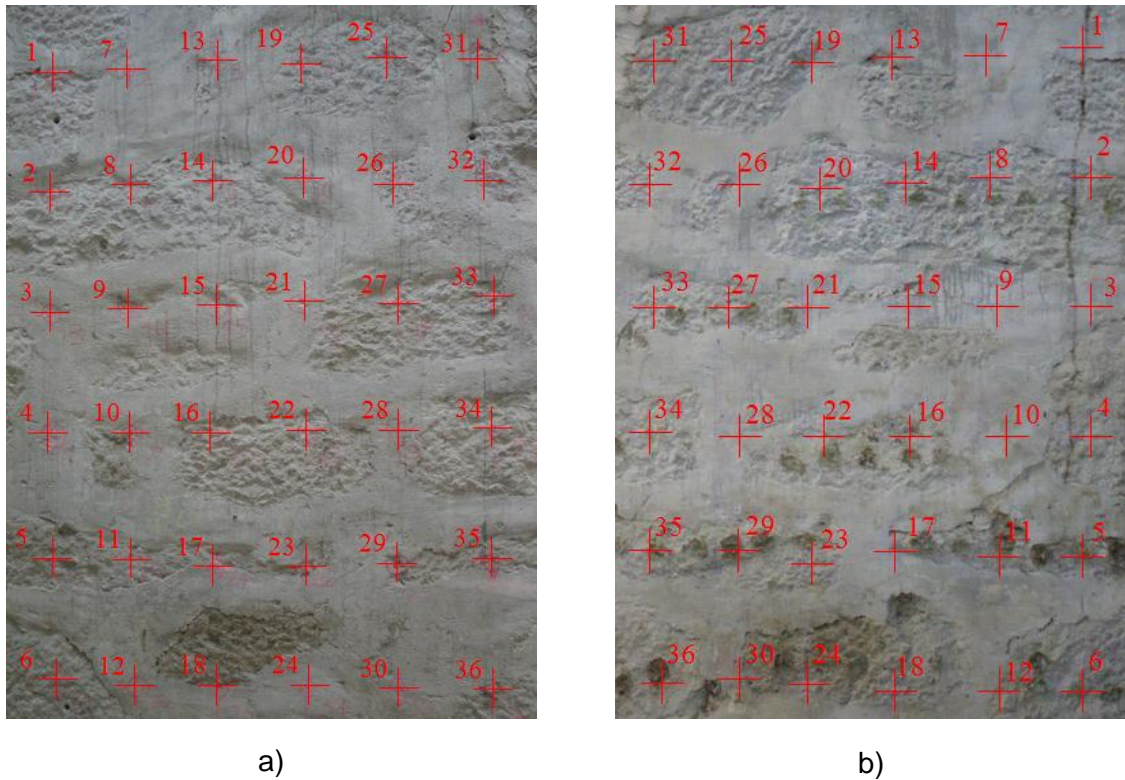


Figura 3.44 – Aspecto dos dois alçados principais da parede testada com a numeração colocada: a) alçado H; b) alçado M.

O Quadro 3.6 resume as características dos pontos, aferidas visualmente para cada alçado (J-junta; P-Pedra). Sempre que o ponto se encontrava, indubitavelmente, na superfície de uma pedra, atribuía-se para o ponto a letra “P”. Nos restantes casos, atribuía-se a letra “J”. O primeiro símbolo refere-se à face M e o segundo à face H. Assim, um ponto caracterizado por “J-P” significa que está sobre uma junta na face M e sobre uma pedra na face H.

Quadro 3.6 – Caracterização visual dos pontos de leitura (face H-M).

Ponto	1	2	3	4	5	6
Coluna 1	J-J	P-P	J-J	J-P	P-P	P-P
Coluna 2	J-J	P-P	J(?) - J	J-J	P-P	J-J
Coluna 3	J-J	P-P	J-J	P-P	J-J	J-P
Coluna 4	P-P	J-P	J-J	P-P	J-P	J-P
Coluna 5	P-P	P-P	P-P	J-J	J-P	J-J
Coluna 6	J-P	P-P	P-J	P-P	P-P	J-P

3.5.1 Ensaio directos em pedras de paredes irregulares

Os ensaios directos foram realizados ao longo da secção transversal da alvenaria, nas duas direcções: de H para M e de M para H. Os resultados foram tratados e, por interpolação, foi construído um mapa de isolinhas de velocidade das ondas P. Nesses mapas, apresentados na Figura 3.45 os tons vermelhos estão associados a velocidades mais rápidas e os tons azuis a velocidades mais lentas.

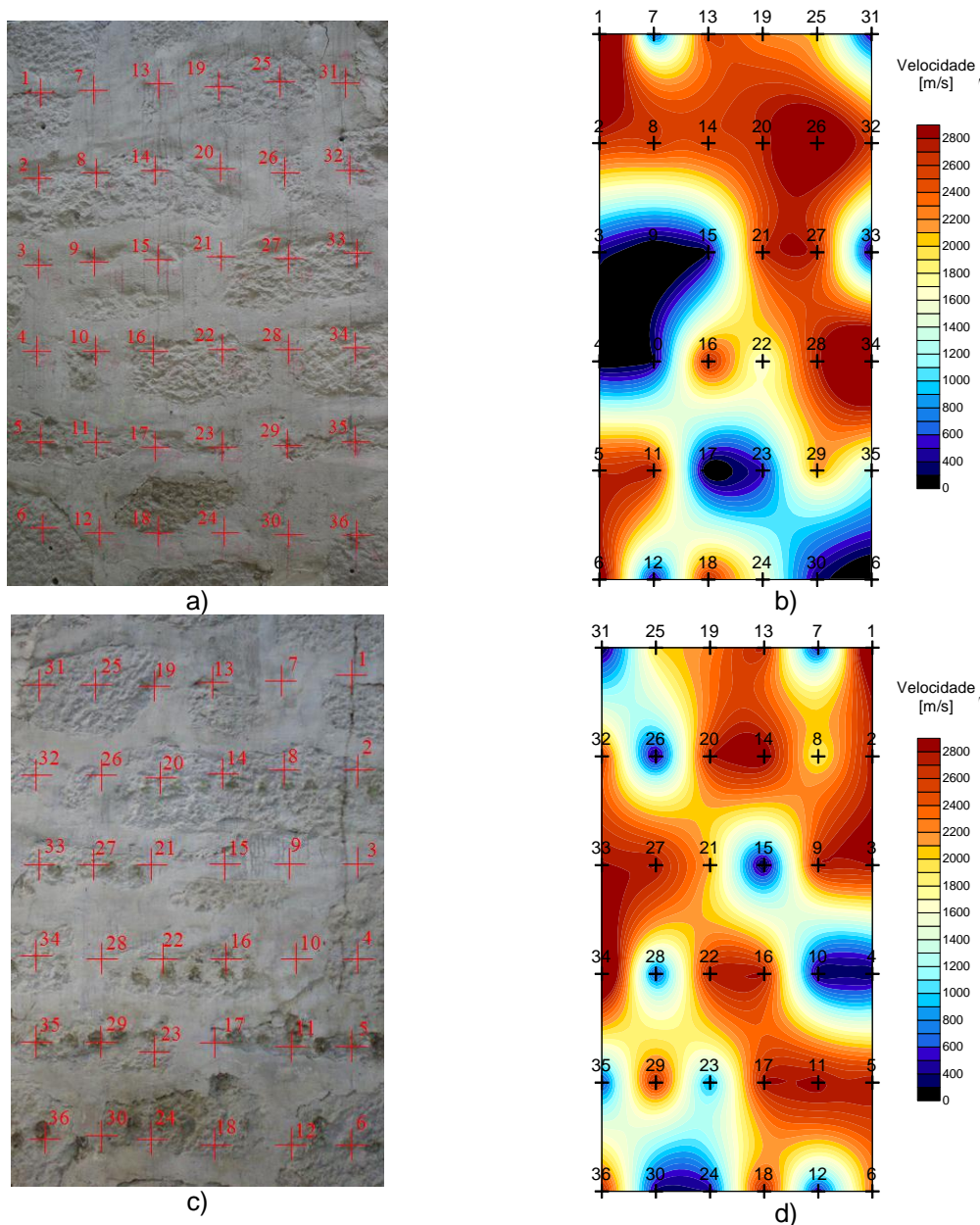


Figura 3.45 – Resultados qualitativos obtidos nos ensaios sónicos realizados até aqui: a) alçado H; b) mapa de velocidades obtido no alçado H; c) alçado M; d) mapa de velocidades obtido no alçado M.

As velocidades das ondas P obtidas em cada direcção testada e em cada um dos 36 pontos foram comparadas entre si e consideraram-se válidas variações inferiores a

20% em relação à média dos dois valores obtidos (de M para H e de H para M). Também se estabeleceu um intervalo de valores que ocorriam com maior frequência. O gráfico da Figura 3.46 ilustra os resultados obtidos em cada face e a sua distribuição.

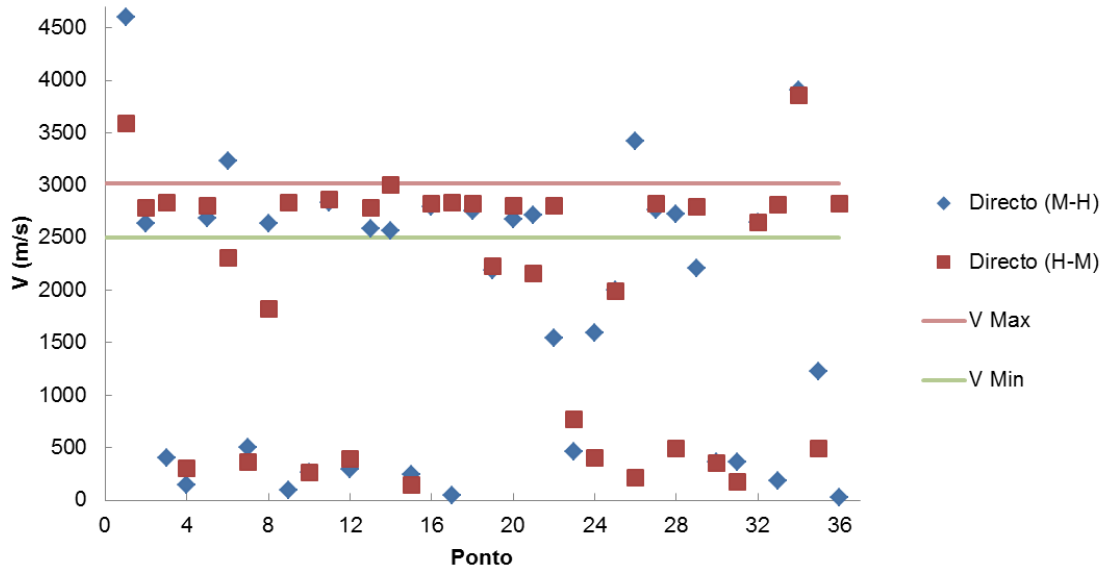


Figura 3.46 – Resultados obtidos em cada ponto e nas duas direcções testadas (M para H e H para M).

As velocidades apresentam uma dispersão considerável e, claramente, dois conjuntos de valores: um conjunto com velocidades entre $V_p=2500\text{m/s}$ e $V_p=3000\text{m/s}$ e outro conjunto com velocidades significativamente menores que não se tiveram em conta no cálculo do módulo de elasticidade das pedras, associado à presença de juntas. O intervalo de velocidades definido pela maioria dos resultados ($V_p=2500\text{m/s}$ a $V_p=3000\text{m/s}$) corresponde a um módulo de elasticidade estimado de, aproximadamente, $E=16\pm 3\text{GPa}$, considerando uma densidade de $\rho=2600\text{kg/m}^3$ e um coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$.

3.5.2 Ensaio indirectos em pedras de paredes irregulares

Foram realizados ensaios indirectos nas pedras que cumpram os três critérios seguintes: possuir velocidades médias dentro do intervalo $V_p=[2500-3000]\text{m/s}$ apresentado na Figura 3.46; não apresentar velocidades nos dois sentidos diferentes em mais de 20%; ter dimensões que possibilitassem a adopção de mais de 3 pontos de leitura espaçados em 0.1m.

A Figura 3.47 ilustra o procedimento utilizado que é, aliás, idêntico ao utilizado nos ensaios indirectos realizados sobre pedras lisas (apresentados no Ponto 3.4.3): no ponto mais à esquerda foi aplicado o impacto, nos pontos à direita foi registado esse impacto. Os ensaios foram realizados com o equipamento sónico em faces serradas (as faces laterais do topo do painel que resultaram do corte para serem transportadas para o LESE)

e em faces rugosas e adicionalmente, sempre que possível, com o equipamento de ultrasons.

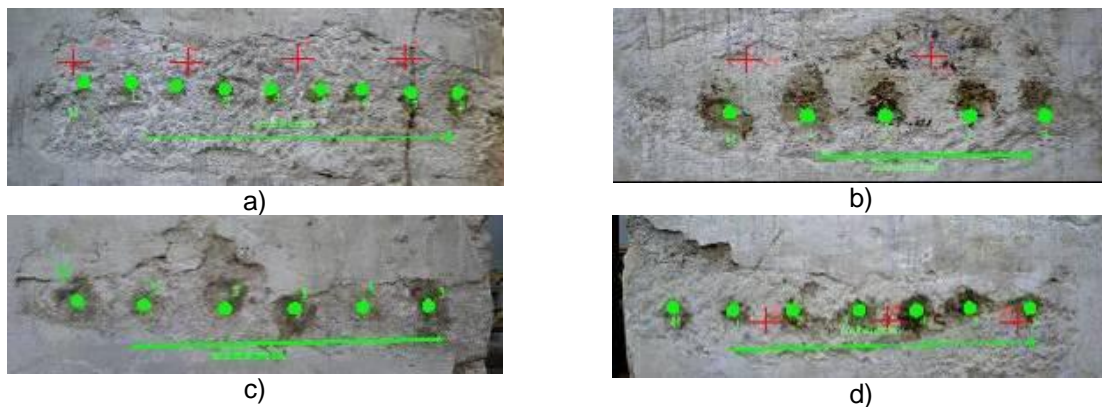


Figura 3.47 – Algumas pedras analisadas através de ensaios indirectos: a) Pedra dos Pontos 7,8,9 e 10; b) Pedra dos Pontos 21 e 22; c) Pedra dos Pontos 25 e 26; d) Pedra dos Pontos 28, 29 e 30.

Para além da velocidade das ondas P também se determinou, em alguns casos, a velocidade das ondas R, tendo-se estabelecido um limite superior e inferior de acordo com o que tinha ficado definido no exemplo anterior ($E=16\pm 3\text{GPa}$) a que corresponde uma velocidade de, aproximadamente, $V_r=[1300-1550]\text{m/s}$ (utilizando a Equação 2.20).

O gráfico da Figura 3.48 ilustra os resultados obtidos nos ensaios das pedras cuja velocidade, determinada por via directa, se validou, isto é, em que se verificou uma diferença igual ou inferior a 20% nos resultados obtidos nos sentidos: de M para H e de H para M; as ondas P são representadas por formas geométricas “cheias” e as ondas R são representadas por formas geométricas “vazias”.

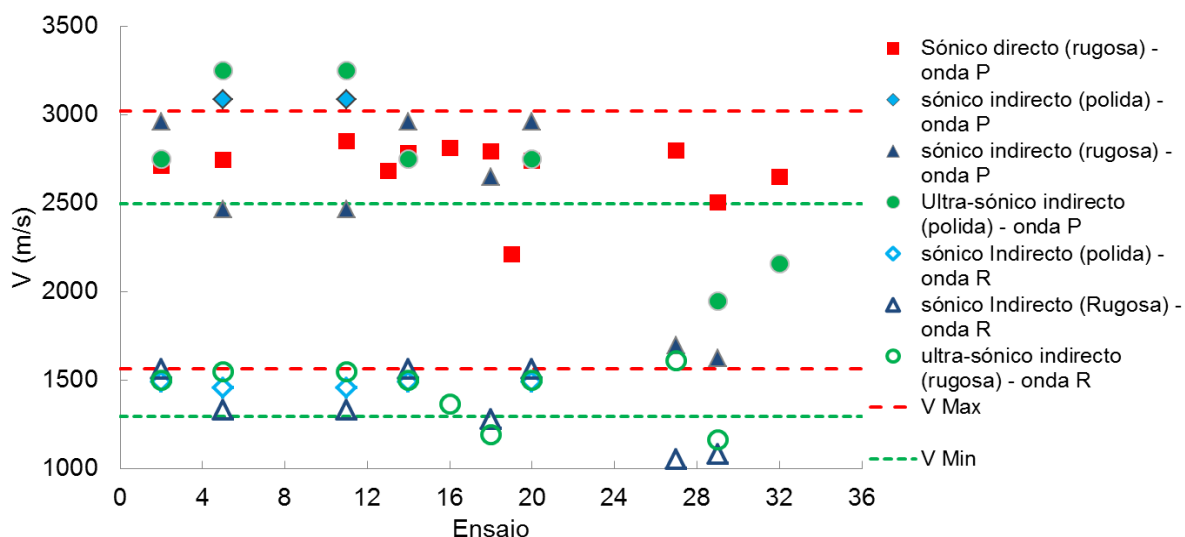


Figura 3.48 – Resultados obtidos nos pontos válidos utilizando os vários métodos: directos e indirectos, sónicos e ultra-sónicos.

Utilizando o sistema sónico, foi possível distinguir as ondas P das ondas R com uma boa aproximação nas superfícies rugosas. Pelo contrário, em superfícies serradas, nem sempre foi possível obter os resultados nos pontos validados por dificuldades de análise dos sinais, já que não era clara a distinção entre ondas P e R. Quando isso foi possível verificou-se que a relação entre as ondas P e R se encontrava dentro do esperado ($V_r/V_p \approx 0.5$). Além disso, verificou-se que a velocidade das ondas P obtidas por via directa e indirecta era semelhante.

O sistema ultra-sónico forneceu resultados diferentes em superfícies rugosas (menores velocidades e da ordem das velocidades espectáveis para as ondas R) e superfícies lisas (maiores velocidades e da ordem das velocidades das ondas P). Recorda-se que este equipamento é “fechado” tendo o utilizador acesso apenas ao tempo de propagação de uma onda. Essa onda não é identificada, pelo que, no caso da superfície serrada, por haver um melhor contacto entre o transdutor e a pedra foi possível identificar a chegada da onda P. Contudo, na superfície rugosa, uma vez que esse contacto não é perfeito, o equipamento não foi capaz de detectar a chegada de uma onda de pequena energia, como é o caso da onda P que se propaga à superfície. Esta situação foi, aliás, descrita no Ponto 3.2.2 e está ilustrada na Figura 3.13.

No Quadro 3.7 apresenta-se a média das velocidades obtidas em cada método utilizado.

Quadro 3.7 – Média das velocidades obtidas nos ensaios validados.

Equipamento	Tipo de ensaio	Superfície	Vp (m/s)	Vr (m/s)
Sónico	directo	rugosa	2673	-
sónico	indirecto	serrada	3087	-
sónico	indirecto	rugosa	2474	1345
ultra-sónico	indirecto	serrada	2673	-
ultra-sónico	indirecto	rugosa	-	1456
<i>média</i>	-	-	2726	1401

Através do Quadro 3.7 verifica-se que a velocidade média das ondas P é de 2726m/s, cerca do dobro da obtida para as ondas R que foi de 1401m/s. A esta relação entre as velocidades das ondas P e R corresponde um coeficiente de Poisson de 0.28. Utilizando este valor e uma massa volúmica de 2600kg/m^3 , obtém-se um módulo de elasticidade de 15.1GPa.

Em pedras provenientes da mesma parede realizaram-se ensaios de compressão simples sobre provetes (Almeida, et al., 2010b) segundo a norma aplicável (IPQ, 2007b) utilizando a máquina - MTS-815 rock mechanic test system with Flextest Controller, que se apresenta na Figura 3.49.



Figura 3.49 – Equipamento utilizado para testar provetes de pedra.

Nos ensaios estáticos foi obtido um módulo de elasticidade médio de 26GPa. Este resultado, aparentemente, contraria o disposto que indica que o módulo de elasticidade dinâmico é superior ao estático. No entanto, ter-se-ia que realizar uma análise mais cuidada e dirigida para poder concluir-se sobre estas relações. Recorde-se que esta não foi a única ocasião em que tal sucedeu, como se referiu por exemplo no caso da análise de pedras lisas.

3.6 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ATRAVESSAMENTO DE JUNTAS NA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS

3.6.1 Generalidades

O efeito das juntas na velocidade de propagação de ondas elásticas tem vindo a ser estudado utilizando ensaios sínicos directos (Abbaneo, et al., 1995). O conhecimento das juntas das camadas de enchimento dá indicações importantes acerca da secção transversal das alvenarias (Binda, et al., 2007, Binda, et al., 2008). Contudo, é também importante perceber a influência que as juntas dos elementos principais de um pano de alvenaria têm na velocidade de propagação das ondas elásticas medidas ao longo da vertical.

A análise das juntas num pano de parede põe desde logo um problema: como realizar um ensaio ao longo de um pano vertical de uma alvenaria? O ideal seria realizar um ensaio directo que pudesse atravessar a alvenaria ao longo da sua altura. Contudo, tal não é possível já que o utilizador, na maioria dos casos, não tem acesso ao topo e à base da parede. De modo a poder contar com a leitura de ondas que atravessam uma alvena-

ria ao longo do seu plano vertical, parece assim ser necessária a realização de ensaios indirectos, cuja aplicabilidade se demonstrou na análise de pedras individuais (ver secção anterior).

A Figura 3.50 apresenta dois blocos de granito que, por simplicidade se assume terem as mesmas características, e uma junta que os separa. A velocidade das ondas P que se propagam através desse sistema pode ser obtida conhecendo o tempo gasto para percorrer a espessura total ($2l_x+l_y$). Teoricamente, essa velocidade é igual à média ponderada das velocidades parciais que as ondas adquirem nos meios de propagação envolvidos - granito e material da junta - e pode ser obtida através da Equação 3.1 que relaciona a distância percorrida em cada material (l_x e l_y) com o tempo de propagação respectivo (t_x e t_y).

$$V_P = \frac{2l_x + l_y}{2t_x + t_y} \quad \text{Equação 3.1}$$

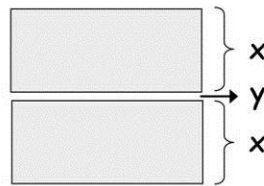


Figura 3.50 – Ilustração de provete constituído por duas pedras de granito e uma junta.

Numa situação em que a superfície de contacto seja tão regular que se dê um ajuste perfeito entre duas pedras de granito (sem argamassa no seu interior), em termos teóricos a velocidade de propagação das ondas elásticas do conjunto corresponde à velocidade de propagação das ondas nas pedras. Contudo, isto não se verifica. Na realidade a velocidade de propagação obtida para o conjunto é inferior à velocidade prevista. Esta situação verifica-se também em relação ao módulo de elasticidade do conjunto que é inferior ao das pedras isoladas (Vasconcelos, 2005).

Para além da análise da influência que as juntas dos panos de alvenaria têm na velocidade de propagação das ondas elásticas, torna-se importante comprovar a relação entre os ensaios directos e indirectos para este caso, e validar a possibilidade da obtenção de resultados semelhantes através destas duas técnicas, como se apresentou nos Pontos 3.4 e 3.5 para o caso das pedras individuais.

Como se referiu anteriormente (Figura 2.20), Quixian (Qixian ; Bungey, 1996) validou a utilização de ensaios indirectos para a obtenção da velocidade das ondas P e R em amostras de betão. Cascante (Cascante, et al., 2008) utilizou ensaios indirectos na caracterização de uma alvenaria extremamente heterogénea, composta por tijolos maciços.

Nesse trabalho, Cascante estava sobretudo interessado em avaliar a uniformidade da alvenaria, estudando, para isso, não só a velocidade de propagação mas também a frequência das ondas recebidas, utilizando percursos horizontais. Binda (Binda, et al., 2007) comparou as características de ondas resultantes de ensaios sínicos indirectos, e verificou que ao longo da direcção vertical a presença de cargas compacta o material da alvenaria e melhora a sua ligação, o que faz com que as velocidades medidas sejam maiores quando comparadas com as velocidades resultantes de testes nos mesmos locais, mas ao longo da direcção horizontal do material. Assim, ensaios indirectos realizados na direcção horizontal ou vertical produzem resultados diferentes.

Tendo consciência que os materiais heterogéneos têm especificidades que têm que ser estudadas e que a velocidade de propagação das ondas pode reflectir essas particularidades, foi realizado um conjunto de ensaios com vista à definição do efeito que diferentes interfaces têm na velocidade de propagação das ondas sínicas. Os ensaios realizados permitiram também avaliar a relação entre configurações directas e indirectas em pedras de granito separadas por juntas.

Foram utilizados dois tipos de provetes: um constituído pelos 10 blocos de granito testados no Ponto 3.4; outro constituído por blocos de granito de superfícies rugosas. Nos pontos seguintes apresenta-se a metodologia utilizada e os resultados obtidos no estudo.

3.6.2 Provetes lisos

Antes do agrupamento dos 10 blocos de granito, cada pedra foi caracterizada através de ensaios sínicos directos, indirectos e de eco-impacto, apresentados pormenorizadamente no Ponto 3.4. A velocidade das ondas P das pedras individuais estava compreendida entre os 4000m/s e os 5000m/s, o que indicava que o granito testado era de boa qualidade (Begonha, 2001). Após terem sido testadas exaustivamente as pedras foram agrupadas, como se apresenta na Figura 3.51. Embora se tenham testado 9 pedras, foi utilizada uma décima como massa que se colocou no topo do provete.

Foram realizados ensaios indirectos fazendo aumentar, sucessivamente, o número de juntas atravessadas ia aumentando; adoptaram-se dois sentidos de propagação: um ascendente e outro descendente. Os ensaios indirectos foram repetidos nos quatro alçados do provete. Os resultados foram comparados com os resultados de 5 ensaios directos que atravessavam todas as pedras.



Figura 3.51 – Pedras de granito com superfícies lisas: a) vista das pedras agrupadas; b) execução de um ensaio indirecto ascendente.

Na Figura 3.52 apresentam-se os métodos utilizados na caracterização do conjunto.

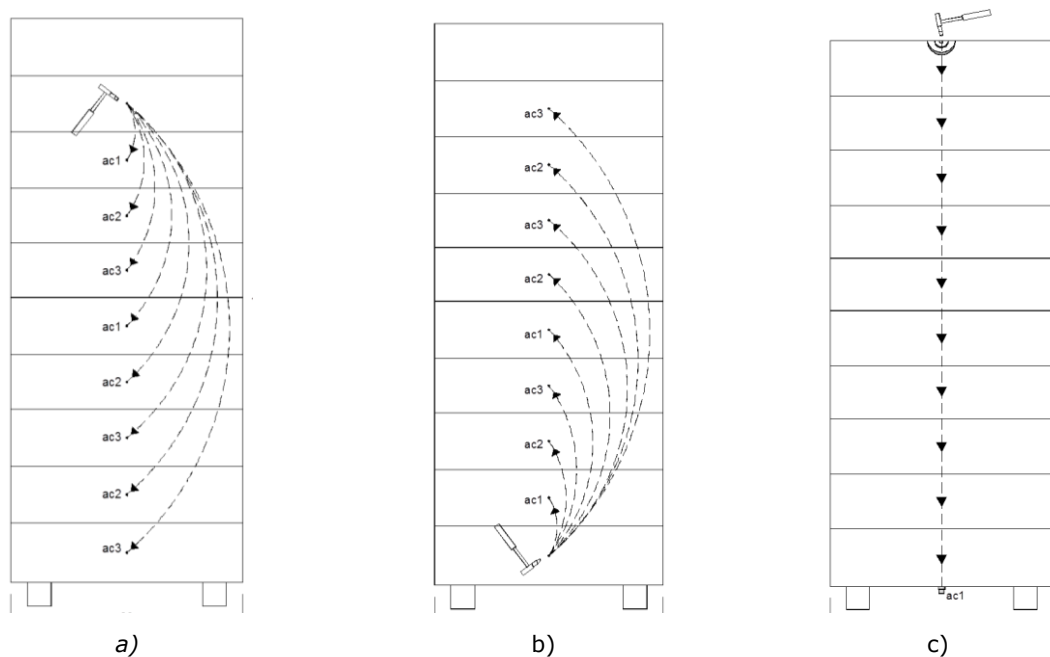


Figura 3.52 – Metodologias utilizadas na caracterização das pedras de superfície lisa: a) ensaios indirectos descendentes; b) ensaios indirectos ascendentes; c) ensaios directos.

Na Figura 3.53 apresentam-se os resultados obtidos no provete liso. A velocidade obtida nos ensaios directos ilustrados pela Figura 3.52 c), foi de 760m/s. Verificou-se que a velocidade obtida através dos ensaios indirectos tendia para valores dessa ordem de grandeza, à medida que o número de juntas atravessadas ia aumentando; a dispersão dos resultados dos ensaios indirectos também diminuía, considerando-se estável após atravessar cerca de 4 a 5 juntas.

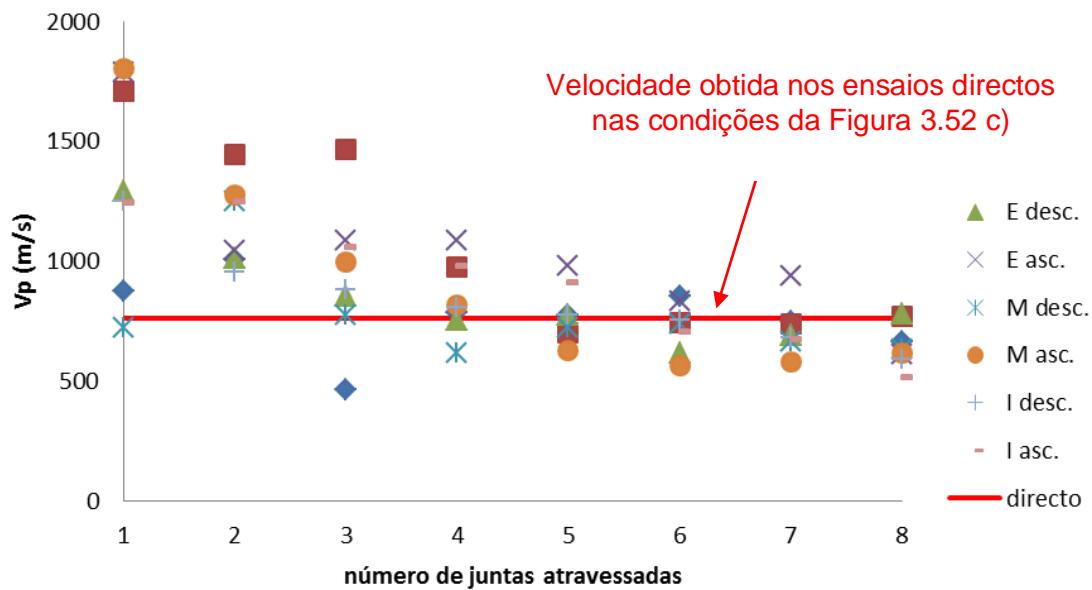


Figura 3.53 – Resultados obtidos em ensaios indirectos e directos nos provetes testados.

3.6.3 Provede rugoso

Foram utilizadas 4 pedras rugosas designadas por A, B, C e D com aproximadamente as mesmas dimensões: $0.85 \times 0.85 \times 0.24 \text{ m}^3$. As pedras apresentavam alguma deterioração superficial, em particular a pedra C que apresentava destacamentos. Após serem estudadas individualmente através de 96 ensaios sónicos directos realizados nas 4 direcções principais das pedras, como se representa na Figura 3.54 a), cada pedra foi cortada em 3 partes iguais (A1, A2, A3; B1, B2, B3; C1, C2, C3; D1, D2, D3), cada uma com cerca de $0.85 \times 0.275 \times 0.24 \text{ m}^3$, de acordo com o esquema da Figura 3.54 b). Cada pedra passou a contar com 4 superfícies; a amostra central de cada pedra tinha duas superfícies serradas (lisas): A2, B2 e C2, D2.

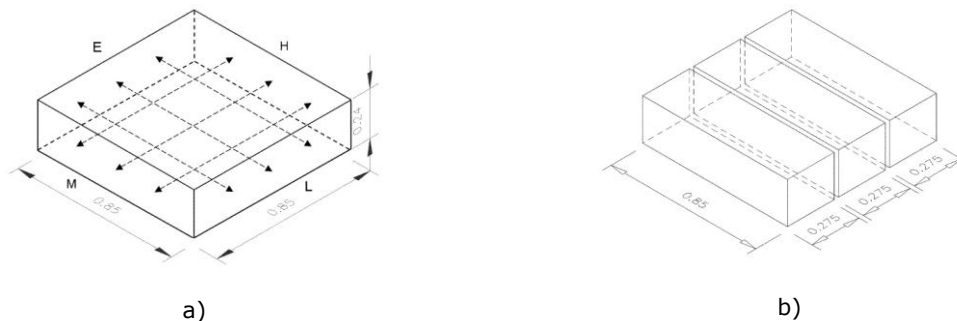


Figura 3.54 – Ilustração do procedimento: a) ensaios directos nas pedras; b) pedras divididas em três amostras.

A velocidade de propagação das ondas P nas pedras, antes do corte, foi aferida através de ensaios sónicos e valia cerca de $V_p=2000\text{m/s}$, com a excepção da pedra C, cuja velocidade foi de apenas $V_p=1300\text{m/s}$. Após o corte, cada amostra foi testada com ensaios sónicos, eco-impacto e ensaios ultra-sónicos e verificou-se a manutenção das velocidades lidas anteriormente antes do corte.

De forma a contabilizar o efeito das juntas na velocidade das ondas elásticas, começou-se por testar as amostras com duas superfícies lisas que, de forma progressiva, foram sendo acopladas com as superfícies serradas em contacto, como a Figura 3.55 ilustra: primeiro testou-se apenas D2, depois D2+C2, D2+C2+B2 e, finalmente, D2+C2+B2+A2.

Para cada configuração, foram realizados diferentes métodos de ensaio: a) ensaios directos, com um percurso perpendicular às juntas e assegurando o seu atravessamento (Figura 3.55 superior); b) eco-impacto, para estudar as reflexões presentes nos sinais recebidos com o objectivo de obter informação complementar (Figura 3.55 superior); c) ensaios indirectos (Figura 3.55 inferior), considerando um percurso em que as ondas elásticas transpunham as juntas das pedras.

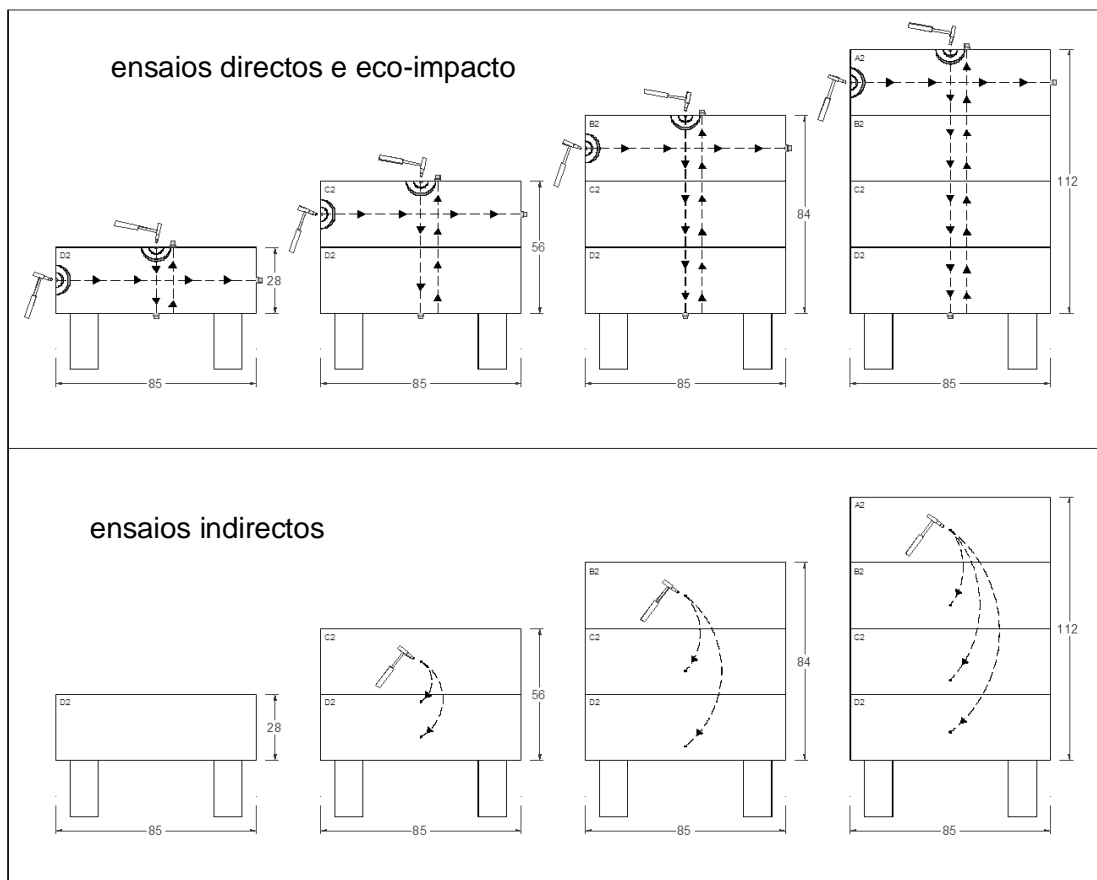


Figura 3.55 – Configurações de ensaio utilizadas nos ensaios sónicos directos, eco-impacto e indirectos.

Como se apresenta na Figura 3.56, verificou-se que a partir do momento em que as ondas tinham que transpor uma ou mais juntas, a velocidade da primeira chegada obtida nos ensaios directos era cerca de 1000m/s, enquanto as velocidades obtidas também na primeira chegada nos ensaios indirectos era de apenas 500m/s. Este facto sugere que a primeira chegada associada aos ensaios indirectos corresponde às ondas R. Conclui-se que através dos ensaios indirectos não foi possível detectar as ondas P, provavelmente devido à sua reduzida energia.

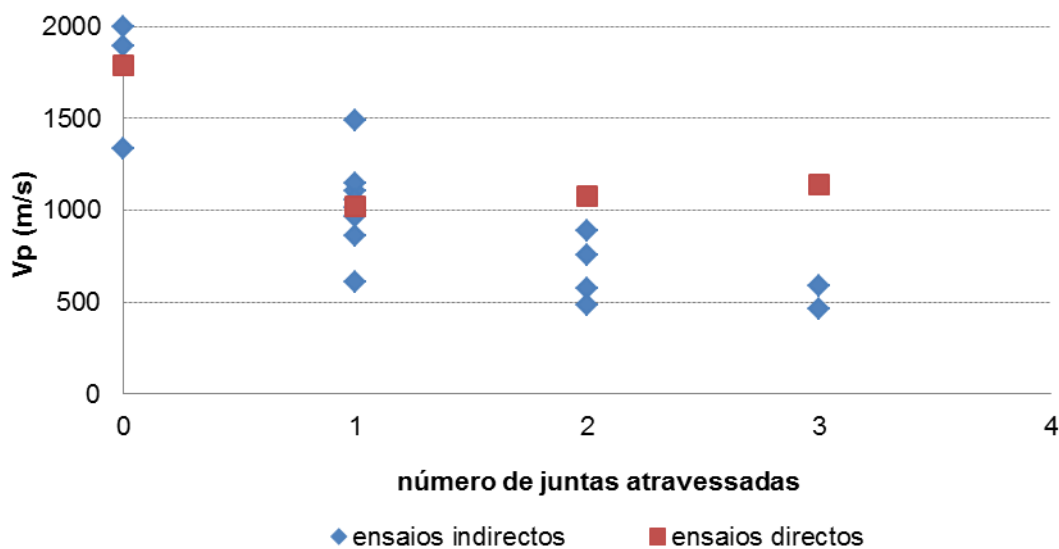


Figura 3.56 – Velocidade obtida na primeira chegada nos ensaios indirectos e directos realizados sobre as amostras com duas faces lisas.

Após o teste utilizando amostras com duas superfícies lisas, as amostras foram agrupadas de acordo com a sua proveniência, reconstituindo a forma original das pedras A, B, C e D, de modo a evitar variáveis resultantes das suas diferentes características (caso da pedra C). Na Figura 3.57 apresenta-se algumas fases do ensaio e na Figura 3.57 c), a pedra D reconstituída.

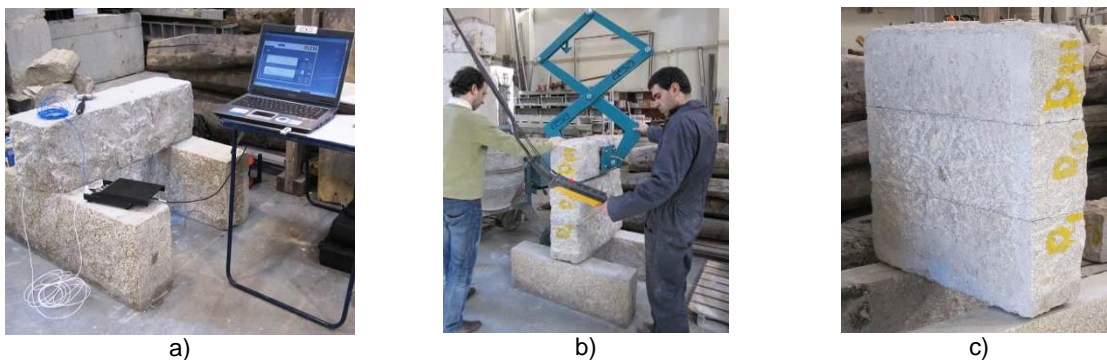


Figura 3.57 – Algumas fases do ensaio: a) teste de uma única amostra; b) sobreposição de outras amostras; c) vista da pedra D reconstituída.

Nas pedras reconstituídas, voltaram-se a realizar ensaios directos, indirectos e de eco-impacto. Os resultados obtidos com a nova configuração foram semelhantes aos do teste anterior. Nos ensaios indirectos, observou-se a tendência para redução progressiva da velocidade da primeira chegada com o aumento do número de juntas, até estabilizar. Como se pode constatar na Figura 3.58, essa estabilização deu-se para uma velocidade que rondava os 600m/s. Uma vez mais, a velocidade obtida através dos ensaios directos rondava os 1000m/s. À semelhança do caso anterior, concluiu-se que, nas condições do ensaio e para as amostras testadas, a primeira chegada obtida nos ensaios indirectos não correspondia à chegada das ondas P devendo, isso sim, corresponder à chegada das ondas R.

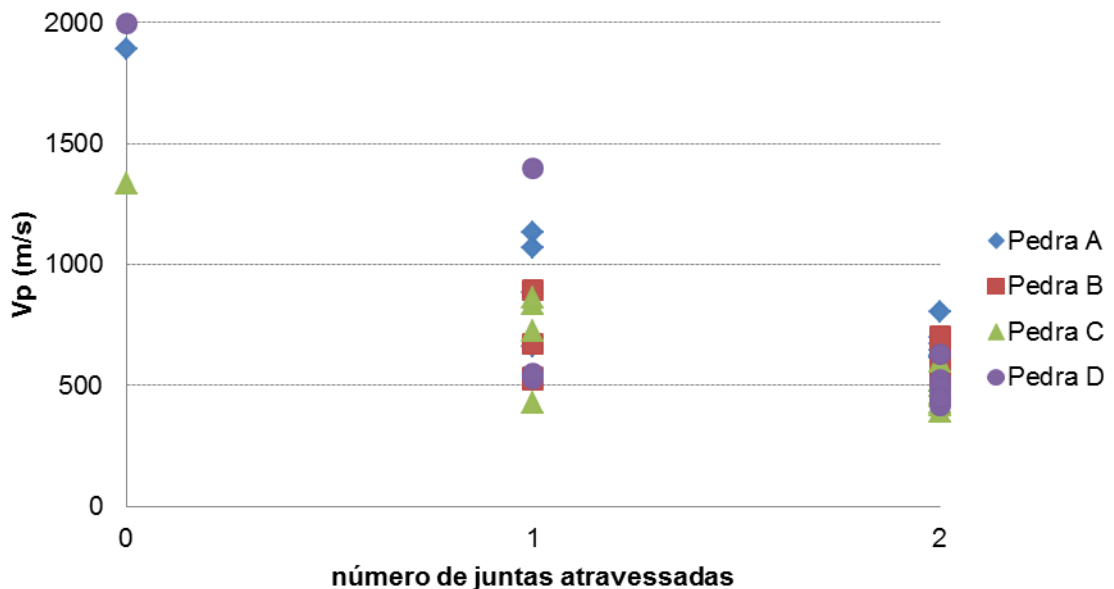


Figura 3.58 – Velocidade obtida na primeira chegada nos ensaios indirectos realizados sobre as pedras reconstituídas.

Nesta análise também se estudou a forma como as juntas alteram as frequências de propagação das ondas. A Figura 3.59 apresenta as frequências obtidas através de FFT aplicadas ao sinal recebido em ensaios directos, primeiro sem que fosse transposta qualquer junta (Figura 3.59 a)) e depois recebendo o sinal após ter transposto 2 juntas (Figura 3.59 b)). Estes resultados sugerem que as juntas funcionam como uma espécie de filtro, que altera do conteúdo em frequência do sinal com a atenuação das frequências de gama mais elevada.

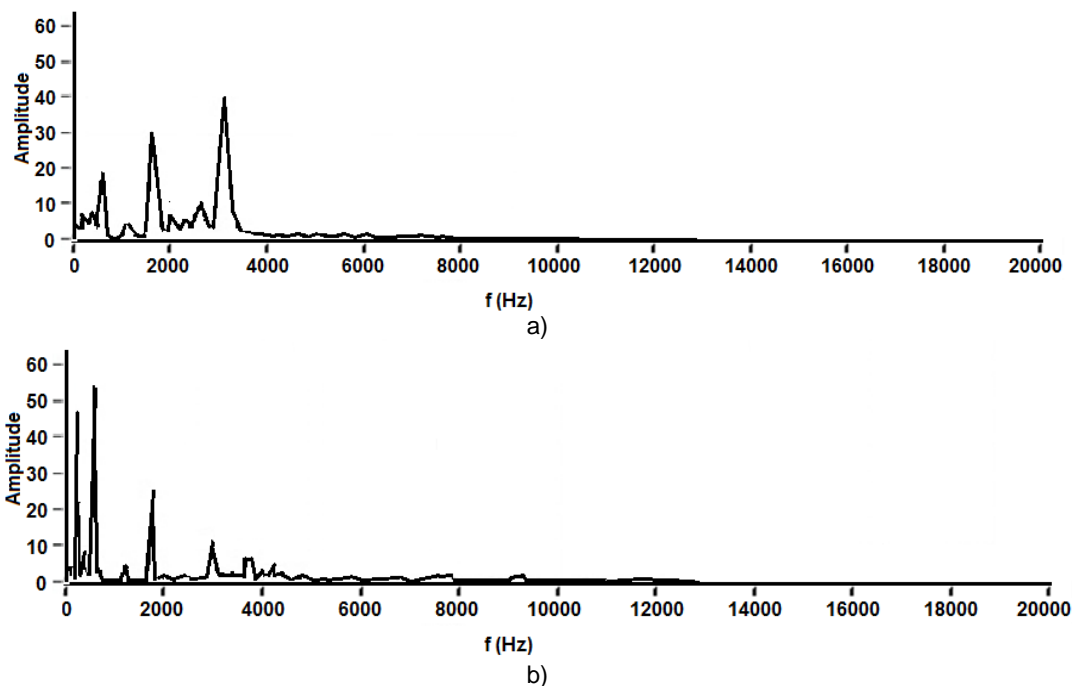


Figura 3.59 – Comparação entre as FFT obtidas através de ensaios sónicos directos: a) sem transpor qualquer junta; b) transpondo 2 juntas secas.

Nos ensaios apresentados anteriormente apenas se consideraram juntas secas. Com o objectivo de melhorar o contacto entre as pedras de modo a simular uma situação real, numa segunda fase as juntas foram preenchidas com argamassa de cal. Realizaram-se ensaios ao longo de cerca de 1 mês, de modo a avaliar o efeito que o endurecimento das argamassas tem na velocidade de propagação das ondas elásticas. Na Figura 3.60 apresentam-se algumas fases do preenchimento de juntas com argamassas de cal e uma vista final de um dos provetes testados (Figura 3.60 c)).

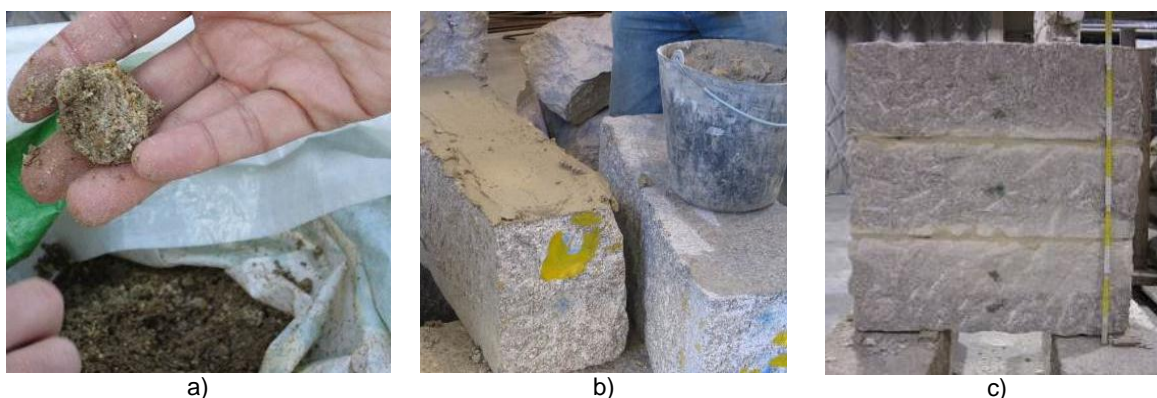


Figura 3.60 – Colocação da argamassa nas juntas: a) aspecto de um dos componentes utilizados na produção de argamassa de cal; b) enchimento das juntas; c) vista de uma das pedras reconstituídas, com as juntas preenchidas.

Em oposição ao que se verificou para o caso das juntas secas, nas situações em que as juntas se encontravam preenchidas por argamassa foi possível distinguir, na FFT resultante do ensaio do eco-impacto, um pico dominante. Este pico era resultado das reflexões que se registavam nas interfaces granito/ar que correspondiam à espessura total do provete. A Figura 3.61 apresenta os resultados obtidos para a pedra A com juntas secas e juntas preenchidas com argamassas após 2 dias de cura.

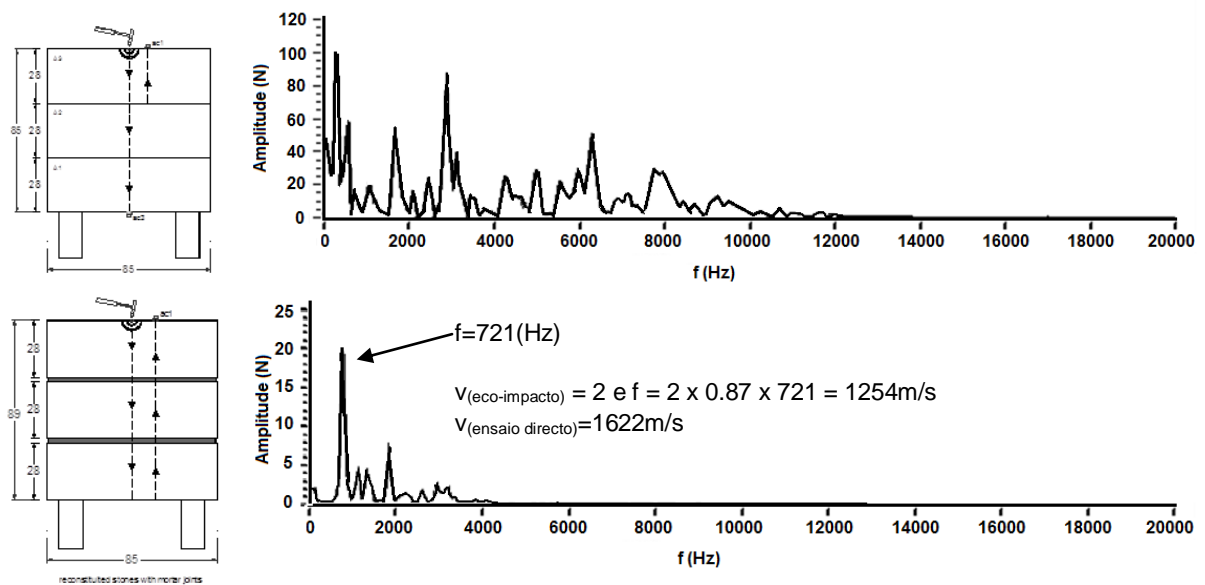


Figura 3.61 – Espectros obtidos através do método do eco impacto num provete de juntas secas (imagem superior) e por um provete com juntas preenchidas por argamassa (imagem inferior).

Em todos os ensaios realizados nos provetes rugosos, a velocidade dos ensaios directos foi superior à velocidade da primeira chegada dos ensaios indirectos e à velocidade determinada no ensaio do eco-impacto. Note-se que a velocidade obtida através do eco-impacto é sempre menor que a real e, por isso, é necessário adoptar um coeficiente que é calculado mediante a forma do provete utilizado. Por exemplo, para uma viga de betão de dimensões regulares a velocidade determinada através da técnica do eco-impacto corresponde, na realidade, a 87% da velocidade real. No caso da estrutura testada não há relações previstas. No entanto, a aplicação desta percentagem seria: $V_p = 1254 / 0.87 = 1441 \text{ m/s}$.

A velocidade de propagação das ondas aumentou consideravelmente apenas dois dias após o preenchimento das juntas e foram notadas algumas diferenças relativamente ao teste com juntas secas: (a) em média, a velocidade determinada nos ensaios sónicos directos aumentou 50%; (b) a velocidade baseada nos ensaios sónicos indirectos aumentou mais de 80%; (c) passou a ser possível testar o provete ao longo de toda a sua espessura utilizando a técnica do eco-impacto (Figura 3.61).

A velocidade das ondas obtidas através dos ensaios directos e dos ensaios indirectos (primeira chegada) passou a ser da mesma ordem de grandeza o que indicava que a

onda medida através dessas duas metodologias era a mesma. A primeira chegada registrada nos ensaios indirectos deixou, por isso, de estar associada às ondas R, para passar a ser associada às ondas P. A Figura 3.62 apresenta a variação da velocidade ao longo do processo de endurecimento das argamassas através dos três métodos utilizados.

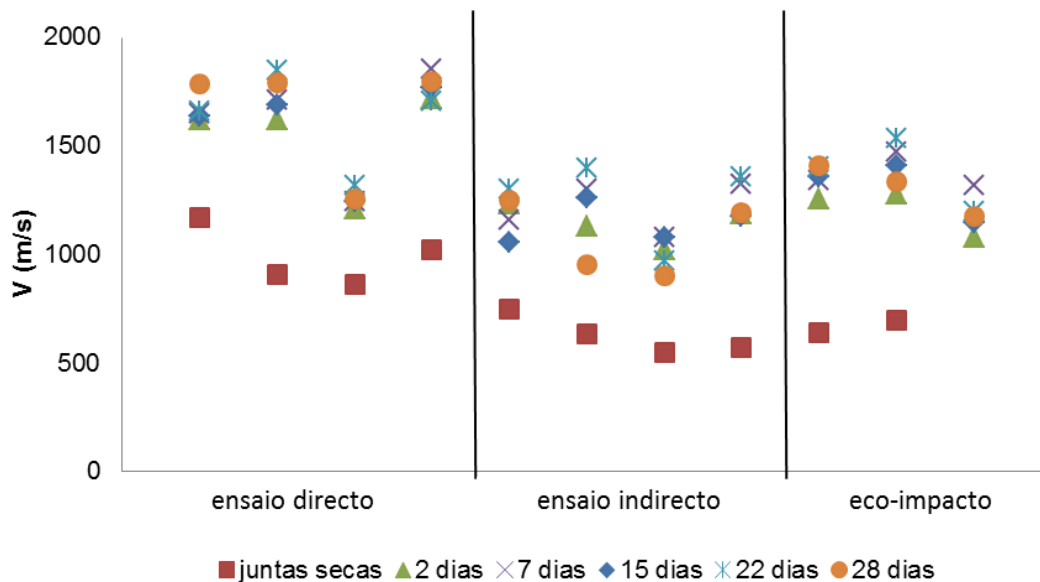


Figura 3.62 – Velocidades obtidas através dos três métodos utilizados: ensaios directos; ensaios indirectos (primeira chegada); eco-impacto.

O preenchimento das juntas permitiu que através dos ensaios indirectos se registassem ambas as ondas P e R. A relação entre a média das velocidades determinadas para estes dois tipos de ondas encontrava-se dentro dos valores esperados: $V_R/V_P=0.52$. A Figura 3.63 apresenta os resultados obtidos para as ondas R ao longo do período monitorizado.

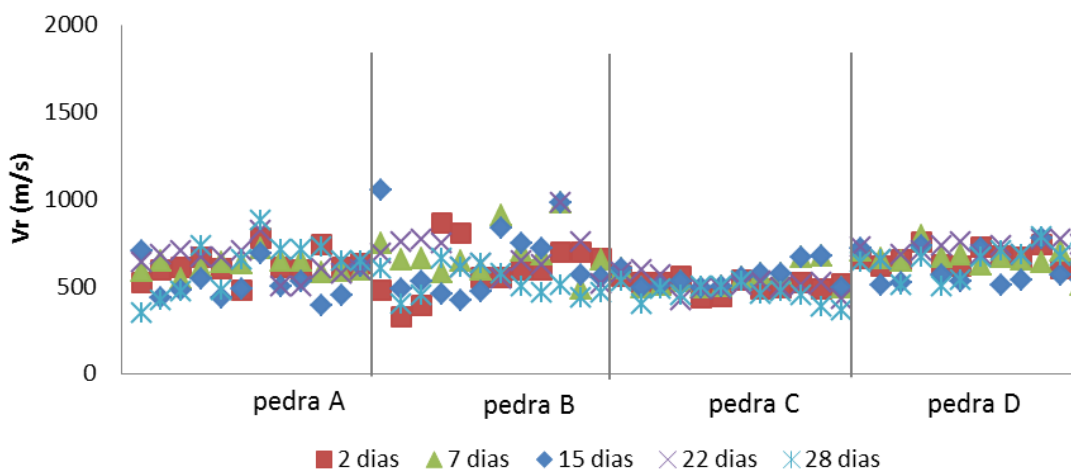


Figura 3.63 – Velocidade das ondas R ao longo do processo de cura.

Para se ter uma ideia mais clara acerca do efeito do processo de cura da argamassa das juntas na velocidade propagação das ondas elásticas, apresentam-se na Figura 3.64, os resultados médios obtidos ao longo dos 28 dias monitorizados. Pode-se verificar que, após um rápido aumento da velocidade obtido apenas dois dias após a colocação da argamassa, a velocidade apresenta uma tendência de crescimento muito mais lenta. Verifica-se ainda que a velocidade mais elevada corresponde à velocidade obtida através dos ensaios directos; a velocidade determinada com base no eco-impacto (sem utilizar qualquer factor de correcção) foi a segunda mais alta; a velocidade obtida com base nos ensaios indirectos (primeira chegada) foi a menor, provavelmente devido à menor qualidade da superfície das pedras, que apresentavam destacamentos importantes.

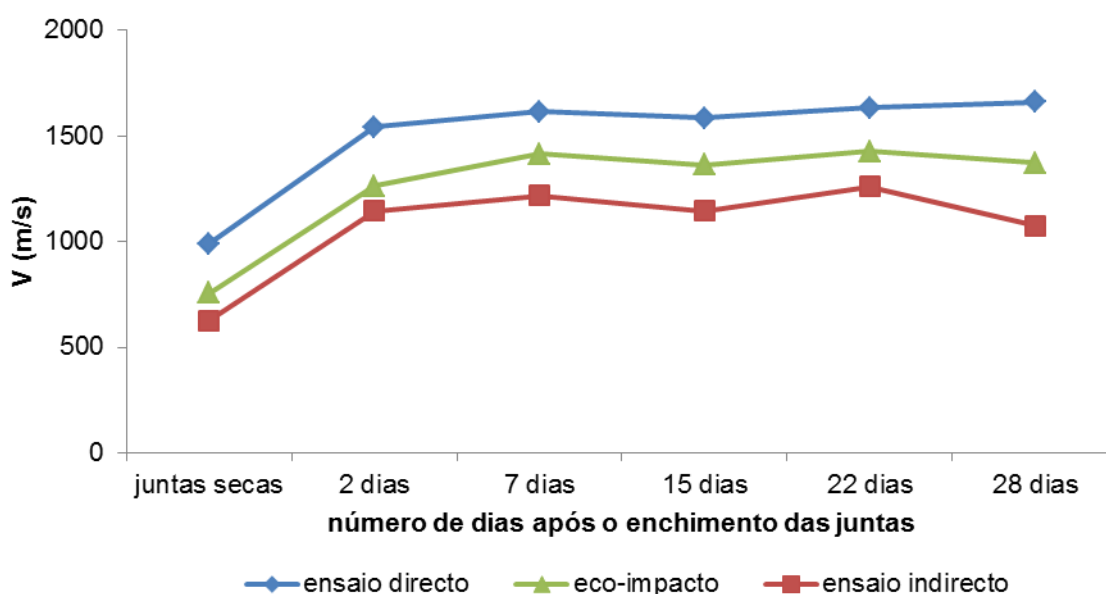


Figura 3.64 – Evolução da velocidade de propagação das ondas, obtida através dos três métodos utilizados ao longo dos 28 dias monitorizados.

3.7 COMENTÁRIOS FINAIS

No presente capítulo apresentaram-se ensaios realizados em estruturas de complexidade crescente. Pretendeu-se ganhar conhecimentos na aplicação dos métodos sónico directo e indirecto, bem como do eco-impacto, em estruturas simples. Em síntese, realizaram-se ensaios para:

- ✓ estudar a influência de acopladores e da presença de reboco na medição das velocidades de propagação das ondas;
- ✓ determinar a velocidade das ondas P e R em pedras regulares e irregulares, através de diferentes metodologias e equipamentos;

- ✓ analisar a influência do atravessamento das juntas na velocidade de propagação das ondas elásticas.

A utilização de acopladores foi avaliada pela utilização de três configurações que promoviam, de forma diferente, o contacto entre o acelerómetro e a parede. Os três dispositivos foram utilizados em três locais. Nos resultados obtidos, não se identificaram vantagens claras para a utilização dos três tipos de acopladores estudados, pelo que se concluiu que os ensaios sónicos em alvenarias podem ser utilizados sem recurso a qualquer tipo de acoplador.

A influência da presença de reboco na superfície da alvenaria a ser testada através de ensaios sónicos foi avaliada em dois locais da mesma parede. Num dos locais o reboco foi retirado e noutro manteve-se intacto. Através da comparação de resultados percebeu-se que a gama de velocidades de propagação das ondas sónicas ao longo da espessura da parede era semelhante. Por este motivo, concluiu-se que nos casos em que o reboco se encontra firmemente ligado à alvenaria, a sua influência na velocidade de propagação das ondas é irrelevante pelo que este não precisa de ser removido.

Nos Pontos 3.4 e 3.5 a velocidade das ondas P e R determinadas através de ensaios directos e indirectos e através dos equipamentos sónico e ultra-sónico são relativamente próximas. Considerou-se que o ensaio directo com ultra-sons e o método do eco-impacto utilizando o sistema sónico, produziram resultados mais fiáveis e por isso considerados de referência. Em relação aos diferentes métodos de análise de resultados dos ensaios indirectos, aquele que utiliza uma única leitura resultante da medição da velocidade no ponto mais distante do impacto (designado por método do último ponto) apresentou os resultados mais próximos dos resultados de referência. Não obstante e como se referiu, na análise de resultados de ensaios indirectos em alvenarias é importante a utilização do método da regressão linear, que considera um conjunto de pontos progressivamente mais afastados. Este método, permite “seguir” a chegada das ondas P e R de modo a ser, mais facilmente, possível identifica-las nos pontos mais afastados e reduz o peso de eventuais defeitos no ponto mais afastado no resultado final. Por estes motivos defende-se que na caracterização de alvenarias este é o método utilizado mais adequado.

O sistema ultra-sónico utilizou-se em ensaios indirectos e na análise de pedras de superfície lisa permitiu a identificação das ondas P, enquanto em superfícies rugosas a velocidade determinada era da ordem de grandeza da velocidade das ondas R. Este facto deve-se à maior energia das ondas R cuja passagem, mesmo com contactos de menor qualidade (superfície rugosa), é passível de ser notada. Concluiu-se que a utilização de equipamentos de ultra-sons comerciais (fechados) deve ser prudente já que o utilizador não tem acesso ao sinal recebido e assim, em ensaios indirectos, não tem possibilidades de saber qual o tipo de onda identificada.

Além do estudo de materiais relativamente homogêneos (pedras de granito) foi feito o estudo de provetes de granito com superfícies lisas e rugosas e com juntas secas e preenchidas por argamassa. Foram utilizados ensaios sônicos directos e indirectos e a técnica do eco-impacto.

Através de ensaios indirectos em provetes com 10 pedras lisas com juntas secas, dado o bom contacto entre a superfície das pedras e os acelerómetros, a primeira chegada registada após serem transpostas cinco juntas correspondeu aproximadamente à primeira chegada de um ensaio directo (ondas P) atravessando 9 juntas, ou seja, foi possível identificar a chegada das ondas P através de ensaios indirectos em pedras lisas.

Por outro lado, em pedras com superfícies rugosas e juntas secas a velocidade correspondente à primeira chegada através de ensaios indirectos foi cerca de metade da velocidade obtida através de ensaios directos (ondas P). Esta situação ter-se-á devido à soma de dois efeitos: (a) juntas secas; (b) difícil contacto entre o material e o acelerómetro (destacamentos à superfície). Estes dois efeitos foram responsáveis pela redução da energia do sinal que chegava ao acelerómetro e este facto fazia-se notar, em primeiro lugar, nas ondas de menor energia – ondas P – não inviabilizando, porém, a identificação das ondas R que, por terem muito mais energia do que as primeiras, continuavam a ser recebidas e correspondiam à primeira chegada notável nos ensaios indirectos.

Após o preenchimento das juntas das pedras rugosas com argamassas de cal, o contacto entre as pedras melhorou, e a velocidade de propagação das ondas aumentou significativamente. Através dos ensaios indirectos, passou a ser possível distinguir a chegada das ondas P e R e a relação obtida entre as duas foi, aproximadamente, a esperada $V_r/V_p=0.5$. A velocidade obtida na primeira chegada dos ensaios indirectos aproximou-se da obtida nos ensaios directos (ondas P), apresentando uma diferença que passou de cerca de 50% (com juntas secas) para os 25% (com juntas preenchidas com argamassas).

Em síntese, o ensaio sónico indirecto permite obter as velocidades das ondas P e R: (a) em provetes com juntas preenchidas por argamassas; (b) em provetes com juntas secas, desde que as condições de contacto entre as pedras e entre o acelerómetro forem excepcionais (como no caso das pedras lisas testadas).

Relativamente ao método do eco-impacto, se por um lado as juntas secas eram responsáveis por um grande número de reflexões que não permitiam, com rigor, atribuir as frequências dominantes do espectro ao efeito de uma determinada interface, quando as juntas foram preenchidas foi possível observar uma frequência dominante que correspondia à reflexão das ondas elásticas após o atravessamento de toda a espessura do provete (incluindo as duas juntas). A velocidade obtida através do método do eco-impacto nestas condições foi cerca de 10% menor do que a velocidade obtida no ensaio directo (ondas P); este resultado foi calculado sem que fosse utilizado qualquer coeficiente para

a correcção da velocidade resultante da técnica do eco-impacto. Concluiu-se que o método do eco-impacto fornece bons resultados em provetes preenchidos com argamassa e resultados pouco fiáveis em provetes com juntas secas.

Durante o processo de endurecimento foi verificada a tendência para o aumento da velocidade de propagação das ondas, embora esta tivesse sido mais notória nos 2 dias após a colocação da argamassa nas juntas. Os ensaios sónicos revelaram ser sensíveis ao endurecimento provocado pela cura das argamassas das juntas dos provetes.

Com o estudo desenvolvido criaram-se as condições de aplicação da técnica em estruturas mais complexas – as alvenarias resistentes – de modo a tentar aceder às suas características mecânicas globais. Essa análise apresenta-se no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

ENSAIOS SÓNICOS SOBRE PAREDES: O MÉTODO DO IMPACTO SÓNICO INDIRECTO

4.1 INTRODUÇÃO

Em todos os casos apresentados até este ponto, procurou-se aceder às características de materiais individuais ou materiais compósitos em condições controladas. O domínio da técnica nestas condições criou informação e conhecimento que agora permite a sua aplicação em situações mais complexas. O estudo de uma alvenaria de pedra, ou de outro tipo, não se pode limitar à análise de alguns dos seus elementos principais (por exemplo as pedras, no caso de uma alvenaria de pedra) mas deve-se alargar ao conhecimento do conjunto dos materiais que a constituem, incluindo as juntas, possível material interno de enchimento, etc.. O conhecimento individual destes materiais dá informação importante sobre a alvenaria. Contudo, as suas propriedades também são influenciadas pelas características da ligação entre os diferentes elementos (Vasconcelos, 2005).

A propagação de ondas em materiais heterogéneos, como é o caso de alvenarias, está associada a reflexões/refracções mas também a fenómeno de dispersão (Aggelis, et al., 2009). Como se referiu, os meios dispersivos são caracterizados pela alteração da forma do sinal emitido (Elmore, Heald, 1985; Gerthsen, et al., 1998; Tipler, Mosca, 2006). Embora o fenómeno de dispersão ocorra na propagação de ondas em meios heterogéneo, a velocidade de grupo é aceite como uma característica global da estrutura, mesmo nesses casos (Cascante, et al., 2008).

O conhecimento da frequência dos sinais pode dar indicações importantes acerca da homogeneidade do material, mas a velocidade fornece os resultados com maior utilidade na qualificação das alvenarias (Aiolfi, et al., 1996) já que é extremamente sensível a variações da densidade do meio em que as ondas se propagam. Por esta razão, altera-

ções dos materiais ou más ligações entre elementos estruturais ou vazios, podem ser reconhecidos através da avaliação da velocidade das ondas elásticas. Também por esse motivo, este foi o parâmetro a que se deu maior importância no estudo realizado.

No presente capítulo, pretendeu-se caracterizar a alvenaria como um material único, isto é, considerando todos os elementos que a constituem e a interacção entre eles (pedras, juntas, enchimento). Nos ensaios realizados voltou a utilizar-se o equipamento sónico e, sempre que possível, o de ultra-sons. Foi desenvolvido um método, designado por “Método do Impacto Sónico Indirecto” (ISIM) que permitiu caracterizar alvenarias do ponto de vista mecânico.

Apresenta-se a aplicação do método no laboratório sobre painéis de alvenaria de pedra de folha única, em particular em várias paredes “reais” e/ou construídas com a finalidade da realização de ensaios mecânicos. Sempre que possível, os resultados obtidos através da técnica ISIM cruzam-se com os resultados de ensaios mecânicos. Além dos exemplos estudados em ambiente laboratorial, apresentam-se três casos de alvenarias caracterizadas in-situ: primeiro uma situação que configura a execução de ensaios directos numa parede dupla, que permitiu a avaliação da condição do material de enchimento utilizado; outras em que se utilizou o ISIM e em que os resultados obtidos se cruzaram com os resultantes de ensaios de natureza mecânica (sempre que existissem).

4.2 MÉTODO DO IMPACTO SÓNICO INDIRECTO - ISIM

Os ensaios sónicos têm sido realizados em alvenarias com a finalidade de obter características qualitativas. Neste contexto, os ensaios sónicos directos dão um contributo muito importante na caracterização da secção transversal das alvenarias. Contudo, a caracterização de uma alvenaria deve também prever métodos que permitam aceder a grandezas mecânicas que auxiliem na modelação e avaliação estrutural.

Quando se pretende aceder às características mecânicas das alvenarias na direcção vertical, devem ser medidas ondas que efectuem percursos nessa direcção de modo a serem influenciadas pelas características dos materiais ao longo dessa mesma direcção. Um ensaio directo feito entre o topo (superior) e a base de uma alvenaria permitiria caracterizar o material heterogéneo que constitui uma alvenaria (pedra+junta) e prever o seu comportamento na direcção vertical. Contudo, na maioria dos casos não é possível aceder a estes dois locais para realizar esse ensaio (presença de telhado e fundação); além disso, seria difícil fazer chegar à base de uma parede um sinal aplicado no topo (ou vice-versa).

No âmbito da presente dissertação, foi então desenvolvida uma nova metodologia, designada por Método do Impacto Sónico Indirecto – “ISIM”. O ISIM baseia-se no ensaio indirecto: um impacto e múltiplas recepções ao longo de um eixo e sobre uma superfície,

tal como vem referido nas normas aplicáveis (BSI, 2004). Esse impacto é aplicado à alvenaria por um martelo instrumentado e é recebido por diversos acelerómetros fixos a uma série de pontos de recepção distribuídos ao longo da direcção cujo comportamento mecânico se pretende conhecer. Através desta técnica são identificadas as ondas P e R que, por sua vez, permitem estimar o módulo de elasticidade da estrutura estudada.

A identificação das ondas P e R faz-se de acordo com os princípios já apresentados anteriormente, que se resumem de seguida:

1. a chegada da onda P corresponde à primeira perturbação do sinal registado no receptor (no domínio do tempo);
2. à superfície, a energia das ondas R é consideravelmente superior à das ondas P;
3. a relação entre a velocidade de uma onda R e uma onda P respeita, de forma aproximada, a relação $V_r/V_p \approx 0.5$.

Os critérios referidos anteriormente apresentam-se na Figura 4.1.

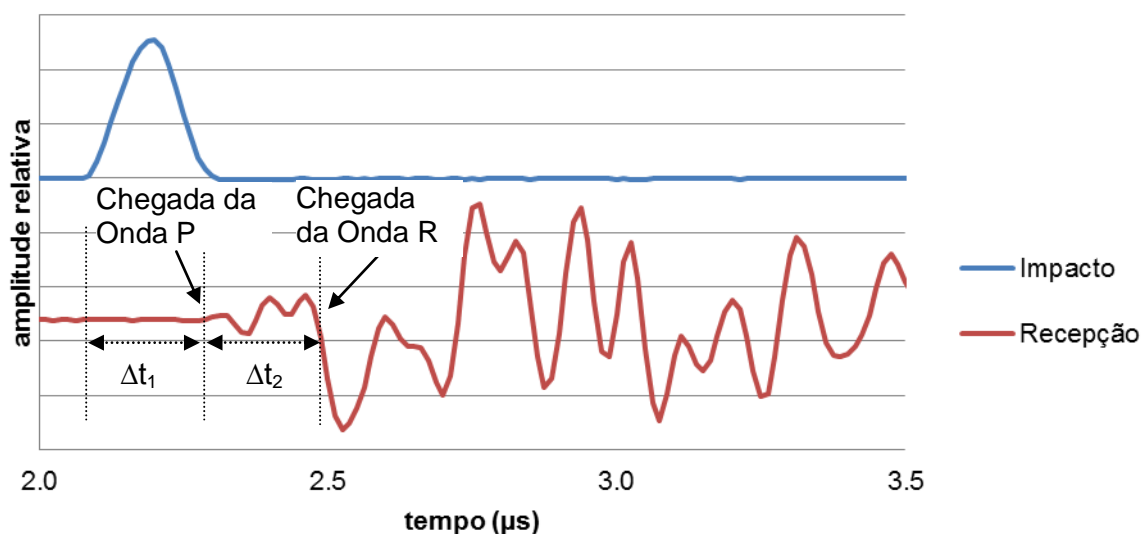


Figura 4.1 – Distinção entre ondas P e R num sinal temporal.

O ISIM não contempla a realização de uma única recepção, mas sim de múltiplas recepções para o mesmo impacto. Em cada ensaio, o impacto aplica-se no ponto mais elevado de em alinhamento vertical (também designado por coluna) e as recepções dão-se nos restantes pontos da mesma coluna. A título de exemplo apresenta-se a Figura 4.2, que ilustra o procedimento e equipamento utilizados.

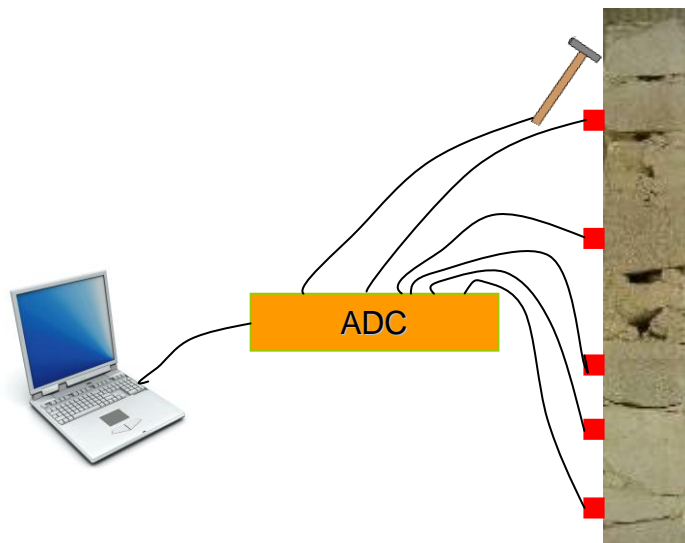


Figura 4.2 – Ilustração da execução de um ensaio indirecto ao longo de uma coluna de uma parede.

O procedimento apresentado na Figura 4.2 a título ilustrativo, possibilita a obtenção de sinais semelhantes aos da Figura 4.3, que correspondem a um exemplo real de aplicação da técnica a uma parede de alvenaria de pedra. Nos sinais obtidos, são identificados os tipos de ondas - P e R - aferidos de acordo com a metodologia apresentada anteriormente (ISIM).

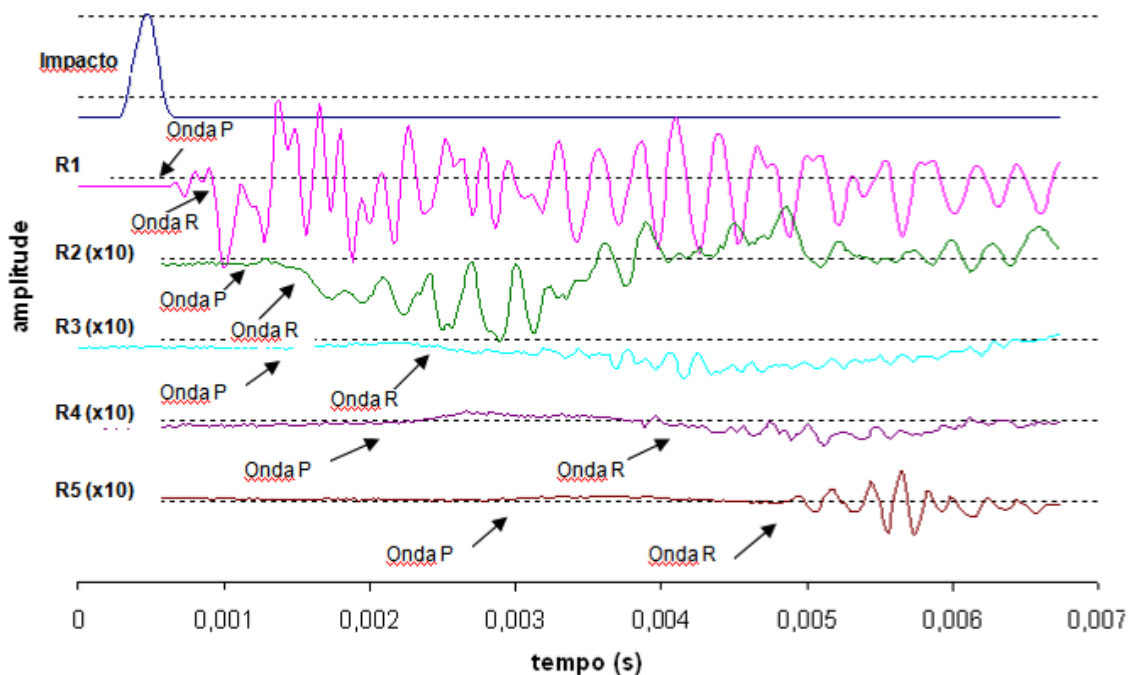


Figura 4.3 – Resultados obtidos num ensaio realizado sobre uma coluna de um painel de alvenaria.

Nota-se, pela observação da Figura 4.3, que a amplitude dos sinais recebidos a partir do segundo receptor diminui significativamente, obrigando a que os sinais sejam multiplicados por dez, para serem comparáveis com o sinal do primeiro receptor.

Com um impacto e diversas chegadas segundo um determinado eixo, é possível construir um gráfico “tempo vs distância” sobre o qual se aplica uma regressão linear segundo um processo semelhante ao que é descrito na norma (BSI, 2004, IPQ, 2007a). A inclinação da recta obtida por regressão linear aplicada aos pontos de cada coluna testada, corresponde à velocidade de propagação das ondas P e R dessa coluna. O gráfico da Figura 4.4, apresenta a regressão linear para um conjunto de pontos obtidos durante o ensaio indirecto de uma parede.

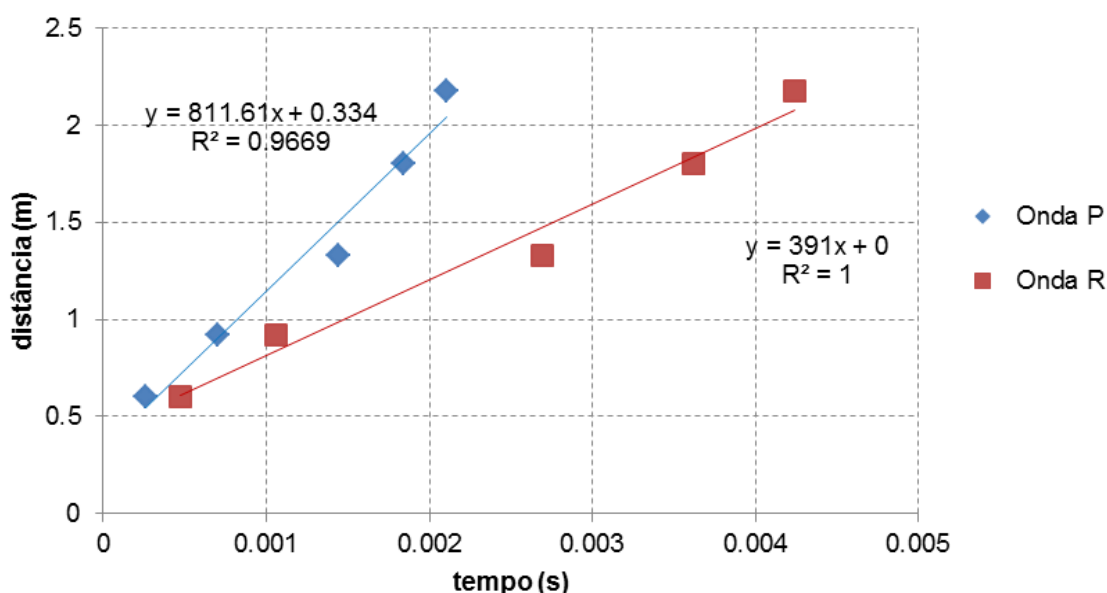


Figura 4.4 – Distinção entre ondas P e R num sinal temporal.

No ponto seguinte apresentam-se alguns ensaios em que se aplicou o ISIM a painéis de alvenaria de pedra.

4.3 PAINÉIS DE ALVENARIA CONSTRUÍDOS EM LABORATÓRIO

4.3.1 Material e Método

Na campanha que se desenrolou em condições relativamente controladas, foram testadas alvenarias construídas no LESE no âmbito de outra tese de doutoramento (Almeida, et al., 2010a). Em concreto, dispôs-se de 18 painéis de alvenaria de pedra, que

se apresentam na Figura 4.5. As alvenarias são constituídas por uma única folha e apresentam as dimensões de $(1.20 \times 1.8 \times 0.28) \text{m}^3$. As pedras são de granito e as juntas de argamassa de cal e saibro. Os painéis de alvenaria apresentam três tipologias distintas:

- ✓ 6 painéis com pedras de dimensões regulares e superfícies lisas;
- ✓ 6 painéis com pedras de dimensões semi-regulares e superfícies rugosas;
- ✓ 6 painéis com pedras de dimensões irregulares e superfícies rugosas.



Figura 4.5 – Alvenarias testadas: (a) pedras com superfícies lisas; (b) pedras semi-regulares com superfícies rugosas.

No âmbito da caracterização das alvenarias foram estudados os materiais individualmente: argamassa das juntas e pedras. Foram testadas 6 pedras de cada painel e um provete de argamassa que apresentava dimensões bastante reduzidas, $(12 \times 3.2 \times 3.2) \text{cm}^3$, recolhido ainda durante a execução das juntas. Para o estudo das paredes na sua globalidade, utilizou-se o método ISIM, tendo-se adoptado 8 pontos colocados em pedras diferentes.

Cada alçado de cada painel foi analisado segundo 2 alinhamentos verticais (também designados por colunas) com 4 pontos cada. Os alinhamentos, foram testados de acordo com a sequência seguinte:

- i) impacto no ponto superior e recepção nos 3 pontos inferiores;
- ii) impacto no ponto inferior e recepção nos 3 pontos superiores.

Assim, cada coluna, ou alinhamento contou com dois pontos de impacto, isto é, 3 recepções no sentido descendente (impacto no ponto superior) e 3 no sentido ascendente (impacto no ponto inferior). Deste modo, foram testadas 4 colunas em cada painel (2 em cada alçado principal). Utilizando a metodologia apresentada, cada painel foi caracterizado por 24 registos através dos ensaios indirectos, ou seja, em cada tipologia testada foram obtidos 288 resultados (144 para as ondas P e 144 para as ondas R).

No caso da parede irregular, 3 dos 6 painéis não foram testados num dos alçados (alçado M). A Figura 4.6 apresenta uma imagem e esquemas dos ensaios realizados.

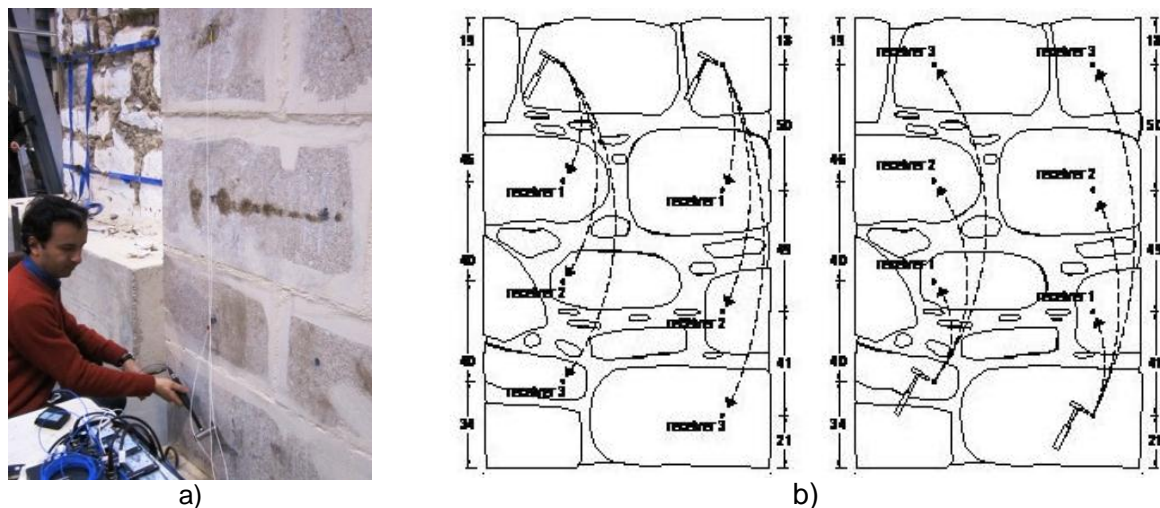


Figura 4.6 – Procedimento adoptado nos ensaios indirectos: a) imagem do teste; b) esquema do procedimento para impactos nos pontos superiores (à esquerda) e pontos inferiores (à direita).

4.3.2 Resultados

A velocidade obtida através de ensaios sónicos directos, usados na caracterização das pedras pertencentes a cada painel foi $V_p=4200\text{m/s}$, para a parede regular, $V_p=3000\text{m/s}$, para a parede semi-regular e $V_p=2600\text{m/s}$, para a parede irregular. O correspondente desvio padrão associado a essas velocidades medidas foi elevado, evidenciando a variabilidade das características das pedras utilizadas na construção das paredes, e aumentou com a irregularidade das paredes, apresentando valores de cerca de 17%, 23% e 27%, respectivamente.

O Quadro 4.1 apresenta as velocidades obtidas nos ensaios realizados nas pedras, e os respectivos módulos de elasticidade para uma massa volúmica de $\rho=2600\text{kg/m}^3$ e um coeficiente de Poisson de $\nu=0.3$. As pedras regulares possuem uma velocidade média superior em 30% às das pedras semi-regulares, e cerca de 40% superior às das pedras irregulares.

Quadro 4.1 – Velocidades de propagação das ondas nas pedras e respectivos módulos de elasticidade, com base numa massa volúmica de $\rho=2600\text{kg/m}^3$ e num coeficiente de Poisson de $\nu=0.3$.

		Pedras regulares	Pedras semi-regulares	Pedras irregulares
Velocidade (m/s)	máxima	5036	4762	3544
	mínima	2820	1071	1267
	média	4181	2981	2600
Módulo de elasticidade (GPa)	máximo	49.0	43.8	24.3
	mínimo	15.4	2.2	3.1
	Médio	33.8	17.2	13.1

Em média, as características das pedras de cada tipo de painel testado não diferem significativamente umas das outras, como evidencia a Figura 4.7 que apresenta a velocidade média das ondas P, por painel.

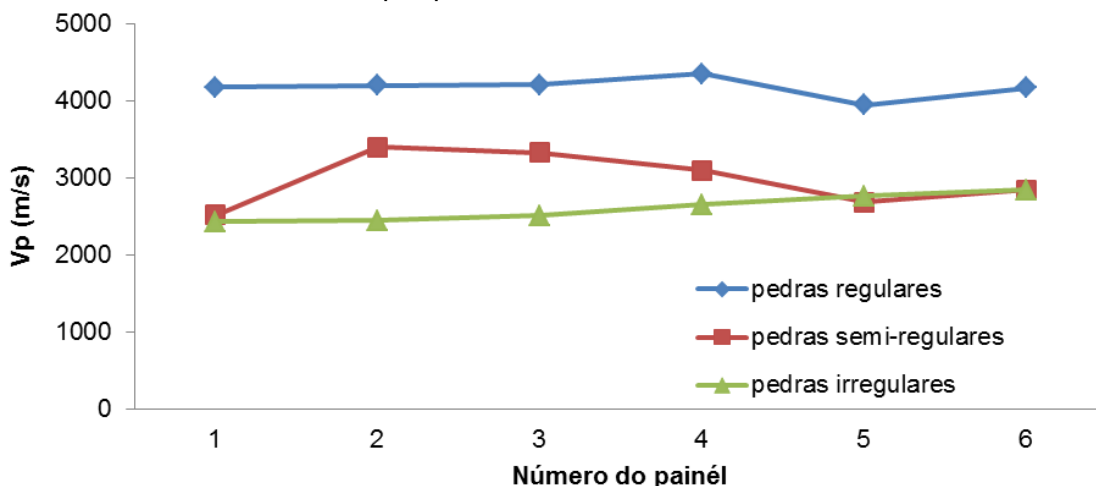


Figura 4.7 – Velocidades médias das pedras obtidas em cada painel e tipo de alvenaria.

Ao estudo individual das pedras seguiu-se o estudo da argamassa. Como se referiu testou-se uma pequena amostra de argamassa com um volume de $(12 \times 3.2 \times 3.2)\text{cm}^3$ e uma massa $m=227\text{g}$. Obteve-se um tempo de propagação ao longo da direcção longitudinal de $t=150\mu\text{s}$. A estes valores correspondem uma massa volúmica de $\rho=18.5\text{kN/m}^3$ e uma velocidade de propagação das ondas P de $V_p=800\text{m/s}$.

Após o estudo individual dos materiais que constituem as paredes passou-se ao estudo das paredes na sua globalidade. Em parte dos painéis observou-se a tendência para a redução da velocidade de propagação das ondas com o aumento do número de juntas, situação observada no estudo da influência das juntas na propagação de ondas apresentado no Ponto 3.6; noutros painéis, essa velocidade mantinha-se aproximadamente constante.

De uma maneira geral, a regressão linear realizada em cada coluna testada apresentou coeficientes de regressão elevados, o que sugeria bastante coerência entre os resultados obtidos. Os coeficientes de regressão obtidos para os 3 tipos de paredes, apresentam-se na Figura 4.8.

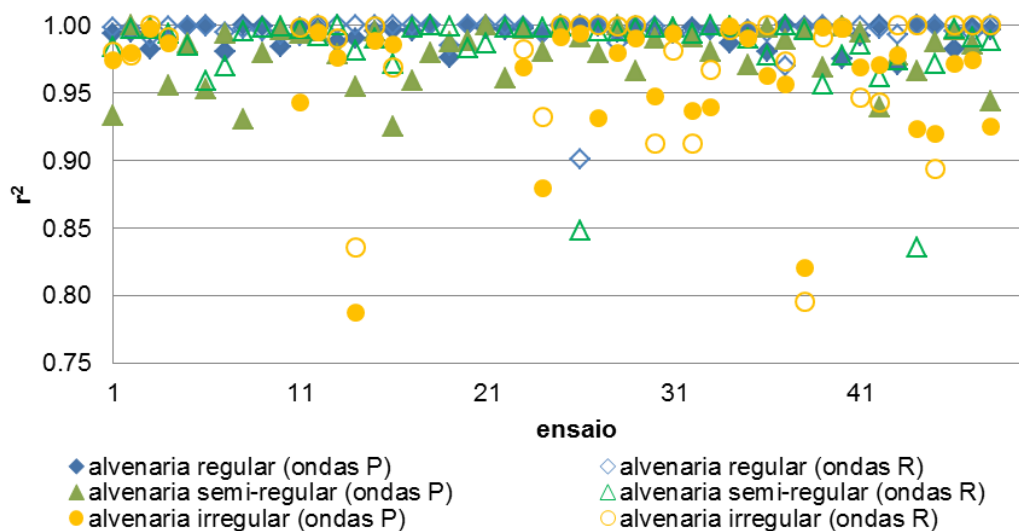


Figura 4.8 – Coeficientes de regressão linear obtidos para cada tipo de alvenaria.

Em relação aos resultados obtidos para cada tipologia, verificou-se que as paredes regulares apresentavam as velocidades de propagação mais elevadas. Os resultados obtidos para este tipo de alvenaria apresentam-se na Figura 4.9. Note-se que se apresentam os resultados das 12 colunas em cada face (M e H) nos dois sentidos (ascendente e descendente). Para cada situação foram determinadas as velocidades das ondas P e R.

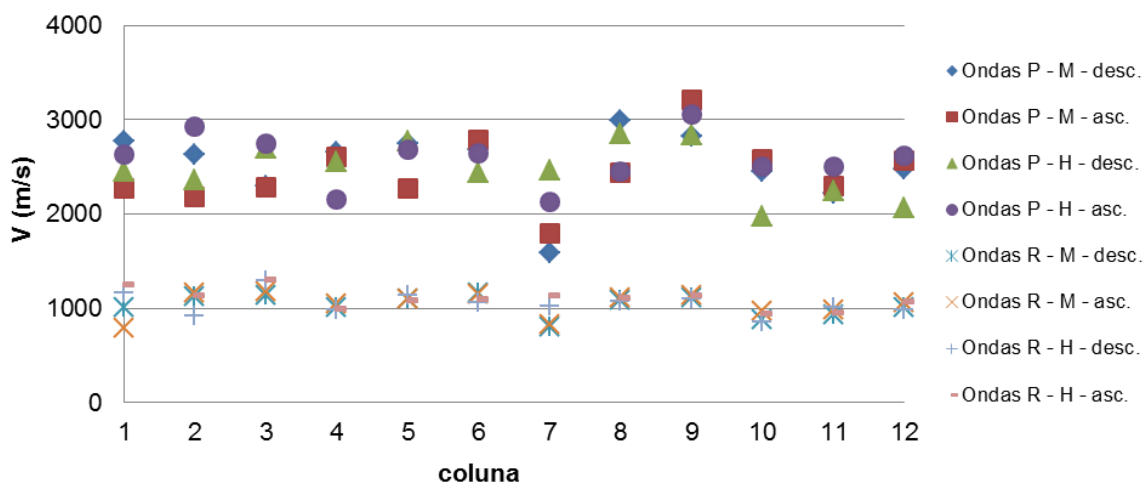


Figura 4.9 – Velocidades obtidas para a alvenaria regular.

A alvenaria de pedras semi-regulares apresentava uma velocidade de propagação de ondas consideravelmente inferior à das pedras regulares. Nas pedras regulares, a ve-

locidade das ondas P rondava os 2500m/s e das ondas R os 1000m/s; no caso da alvenaria semi-regular, essas velocidades baixaram para $V_p=750\text{m/s}$ e $V_r=357\text{m/s}$. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 4.10.

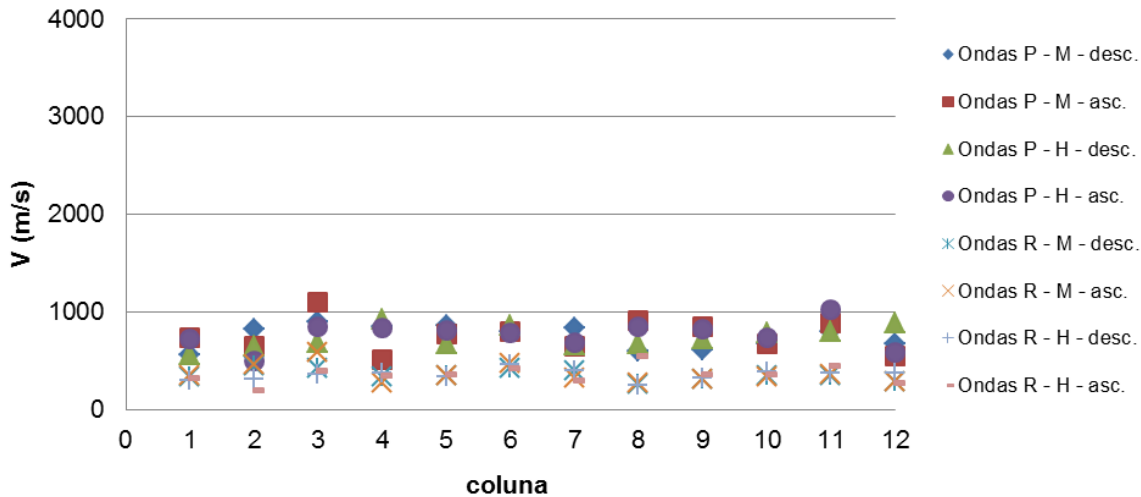


Figura 4.10 – Velocidades obtidas para a alvenaria semi-regular.

A alvenaria constituída por pedras irregulares era aquela que apresentava os menores valores de velocidade: $V_p=560\text{m/s}$; $V_r=299\text{m/s}$. Ainda assim, note-se que esses valores não são muito diferentes dos obtidos na alvenaria constituída por pedras semi-regulares, o que demonstra que estas duas tipologias têm aproximadamente as mesmas características. Por último, faz-se uma nota para a maior dificuldade na identificação das ondas P e R associada às alvenarias irregulares. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 4.11.

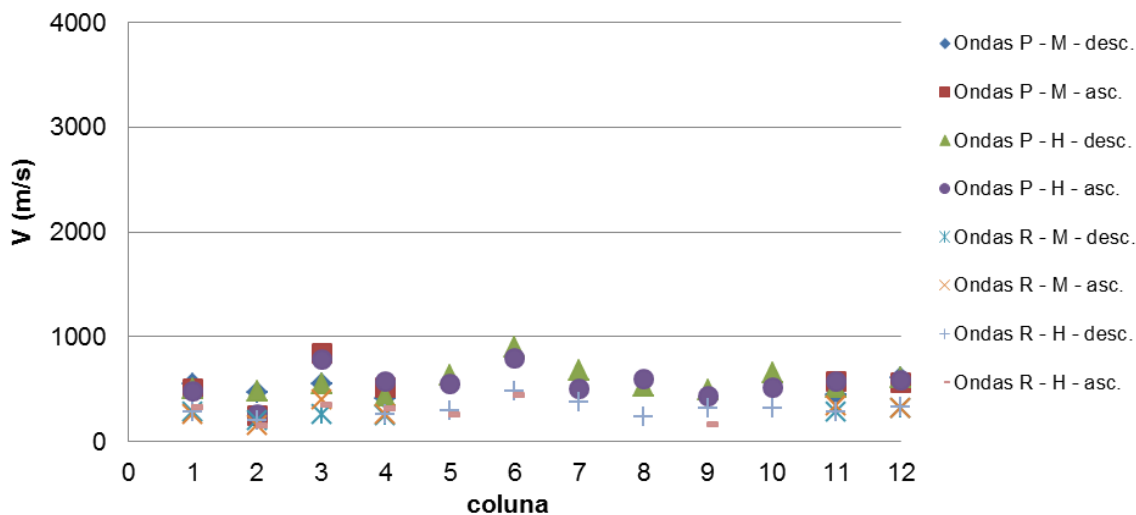


Figura 4.11 – Velocidades obtidas para a alvenaria irregular.

O Quadro 4.2 apresenta os a velocidade determinada para cada tipo de alvenaria, e os respectivos módulos de elasticidade calculados com base numa massa volúmica de $\rho=2400\text{kg/m}^3$ e num coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$.

Quadro 4.2 – Velocidades e correspondentes módulos de elasticidade obtidos com base nos ensaios sónicos para uma massa volúmica de $\rho=2400\text{kg/m}^3$ e um coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$.

grandeza	valor	paredes regulares		paredes semi-regulares		paredes irregulares	
		onda P	onda R	onda P	onda R	onda P	onda R
velocidade	máximo	3216	1305	1097	579	721	373
	mínimo	1591	787	493	197	437	235
	médio	2508 (13%)	1056 (11%)	751 (17%)	357 (21%)	560 (24%)	299 (26%)
módulo de elasticidade	máximo	20.0	12.1	2.3	2.4	1.0	1.0
	mínimo	4.9	4.4	0.5	0.3	0.4	0.4
	médio	12.1	7.9	1.1	0.9	0.6	0.6

4.3.1 Discussão

Ensaio de carga a realizar sobre os painéis construídos irão permitir validar os resultados obtidos através dos ensaios sónicos. Na sua falta, recorreu-se a um estudo muito completo realizado na Universidade do Minho que põs em evidência as diferenças encontradas em ensaios realizados sobre prismas (pedra+junta+pedra+junta+pedra) constituídos por pedras regulares e pedras irregulares (Vasconcelos, 2005). Na Figura 4.12 apresenta-se um esquema de três das cinco configurações utilizadas nesse estudo.

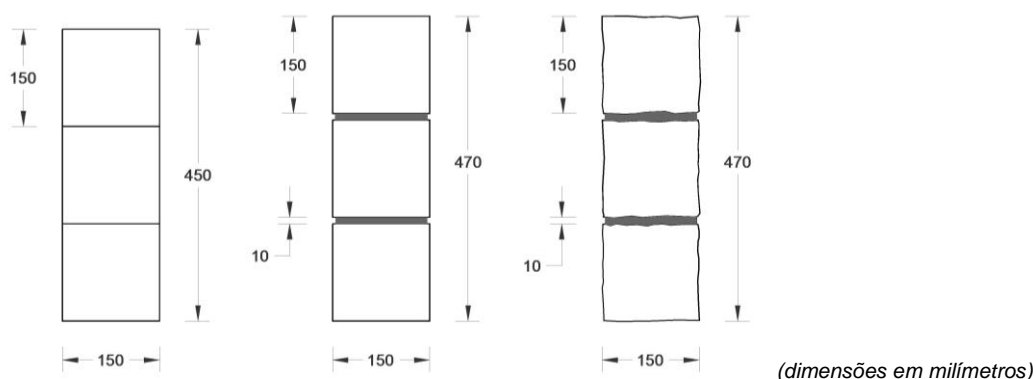


Figura 4.12 – Esquema dos prismas utilizados nos ensaios de Vasconcelos (Vasconcelos, 2005).

No mesmo estudo, as pedras utilizadas em todos os tipos de provetes tinham sensivelmente as mesmas características; o seu módulo de elasticidade (genericamente de-

signado por E_s) foi aferido através de ensaios mecânicos apresentando um valor de $E_s=20.2\text{GPa}$. Nos ensaios dos prismas chegou-se a um valor para o módulo de elasticidade – E_w – muito inferior ao obtido para as pedras – E_s . O Quadro 4.3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos por Vasconcelos para as 5 configurações utilizadas, e inclui a relação entre o módulo de elasticidade dos prismas (E_w) e das pedras (E_s).

Quadro 4.3 – Módulo de elasticidade obtido para as pedras e para diferentes tipos de prismas testados (Vasconcelos, 2005).

Pedras utilizadas	juntas	E_w (GPa)	E_w/E_s (%)
regulares	(juntas secas)	14.7	73%
irregulares	(juntas secas)	7.9	39%
regulares	argamassa de cal	4.6	23%
regulares	solo granítico	8.9	44%
irregulares	argamassa de cal	1.3	6%

Os resultados obtidos por Vasconcelos põem em evidência que o comportamento mecânico das alvenarias depende, não só das propriedades individuais dos elementos principais (no caso, as pedras) e da argamassa, mas também das características da respectiva ligação. A experiência obtida com os ensaios de propagação de ondas acústicas em alvenarias, tem demonstrado que também com esta tecnologia se obtêm velocidades para a alvenaria, consideravelmente inferiores às velocidades obtidas para as suas componentes principais, nomeadamente as pedras analisadas individualmente (Miranda, et al., 2010). As juntas têm um efeito redutor na velocidade de propagação das ondas elásticas. A causa dessa redução, como se referiu no Ponto 3.6, está no conjunto de fenómenos associados à propagação das ondas através de descontinuidades e, em geral, em materiais compósitos. O comportamento das juntas, que funcionam como filtros de altas frequências, e os fenómenos de dispersão que ocorrem em materiais heterogêneos, causam diferenças e fazem com que a velocidade medida seja inferior à velocidade esperada com base nas características individuais dos materiais constituintes (Aggelis, et al., 2009, Aggelis ; Shiotani, 2007b, Cascante, et al., 2008).

Analisando os resultados obtidos nos ensaios realizados nos painéis de alvenarias, verifica-se que a velocidade de propagação das ondas nas pedras semi-regulares e irregulares foi cerca de 70% e 60%, respectivamente, da velocidade das pedras regulares, o que significa que as alvenarias semi-regulares e irregulares contaram nestes painéis com pedras de pior qualidade. A relação a que se fez referência, não se mantém quando se analisam as velocidades de propagação nas alvenarias correspondentes aos diferentes

tipos de pedras: as alvenarias de pedra semi-regular e irregular apresentaram uma velocidade de 33% e 28% da velocidade obtida nas alvenarias de pedra regular. Assim, conclui-se que o comportamento das alvenarias não depende apenas da qualidade das pedras utilizadas (note-se que neste caso se utilizou argamassa do mesmo tipo) mas também da geometria e distribuição de pedras tal como, aliás, já tinha sido concluído no estudo de Vasconcelos.

Os resultados obtidos para os painéis de paredes testados são muito semelhantes aos obtidos por Vasconcelos nos prismas. Considerando os valores médios de módulo de elasticidade e tendo por base o valor da velocidade das ondas R, para o caso da caracterização das alvenarias, e o valor da velocidade das ondas P (o único disponível) para o caso da caracterização da pedra, construiu-se o Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Comparação dos módulos de elasticidade obtidos nos painéis (E_w) e nas pedras dos painéis (E_s).

Pedras utilizadas	Juntas	E_w (GPa)	E_s (GPa)	E_w/E_s (%)
Regulares	argamassa de cal	7.9	33.8	23.4%
Semi-regulares	argamassa de cal	0.9	17.2	5.2%
irregulares	argamassa de cal	0.6	13.1	4.6%

A relação entre os resultados do módulo de elasticidade médio das paredes com o módulo de elasticidade das pedras apresenta resultados muito similares ao estudo de Vasconcelos. Assim, para pedras regulares Vasconcelos obteve 23% e no estudo apresentado obteve-se 23.4%. No caso das alvenarias semi-regulares e irregulares, os valores obtidos rondam os 5% enquanto Vasconcelos obteve 6%. Apesar da coincidência de valores, há que aceitar que em circunstâncias diferentes esta proximidade pode não se verificar de forma tão evidente. Apesar disso, estes resultados mostram ser inegável a contribuição da técnica ISIM para a caracterização de alvenarias.

A semelhança de resultados obtidos parece mesmo ser uma coincidência já que, embora se previsse obter resultados semelhantes aos do estudo de Vasconcelos, nunca se pensou ser possível uma relação entre os dois estudos ao nível da obtida. É inegável a contribuição da técnica ISIM para a caracterização de alvenarias e que esta técnica pode dar um importante contributo para a validação para outros tipos de ensaios.

De modo a testar a aplicação do ISIM noutros ambientes realizaram-se ensaios sónicos em laboratório mas sobre painéis cortados e transportados de um edifício real. Nesse estudo, que se apresenta de seguida, os resultados obtidos através dos ensaios sónicos foram comparados com os resultados obtidos em ensaios mecânicos.

4.4 PAINÉIS DE ALVENARIA DE PEDRA: COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS SÓNICOS E ENSAIOS MECÂNICOS

No ponto anterior estudou-se a relação existente entre ensaios sónicos realizados a uma escala próxima da escala real e ensaios mecânicos em provetes a uma escala reduzida. No presente ponto, apresentam-se os ensaios de propagação de ondas e a comparação dos resultados com os de ensaios mecânicos destrutivos realizados em paredes à escala real. Em concreto, foram testados 3 painéis de alvenaria de um edifício da cidade do Porto, também designado por edifício de António Carneiro, cuja construção remonta a 1910.

Este edifício, apresentado na Figura 4.13 a), é considerado um edifício típico dessa época já que, entre outras características, apresenta paredes de granito de uma folha feitas com pedras com dimensão e forma irregular. Apresenta uma área de implantação rectangular com $20 \times 10 \text{m}^2$ e possui três níveis em altura: cave, rés-do-chão e primeiro andar; os seus pavimentos e telhado são de madeira. As paredes são de alvenaria irregular com juntas preenchidas por argamassa de cal e calços de granito, que tinham por função estabilizar as pedras durante a construção da parede. Por curiosidade, as pedras de maior dimensão nalgumas situações ultrapassavam 1m de comprimento.

Nos ensaios realizados foram testados em laboratório painéis recolhidos de uma parede mestra interior, que existia ao longo da cave do edifício (Figura 4.13 b)). O uso e transporte destes painéis para o laboratório foi possível porque o projecto de reabilitação do edifício previa a sua demolição. Assim, foi possível serrar a parede e transportá-la, por troços/painéis, para o LESE com o objectivo de os testar à compressão e ao corte (no âmbito de outra dissertação). A Figura 4.13 apresenta uma vista da fachada do edifício e da parede utilizada nos ensaios laboratoriais.



a)



b)

Figura 4.13 - Objecto dos ensaios: (a) edifício de António Carneiro; (b) parede ensaiada.

4.4.1 Material e método

Os painéis transportados permitiram simular as condições de obra num ambiente de ensaio mais favorável: o laboratório. Foram identificados por PG1, PG2 e PP2 por Almeida, e na presente dissertação adopta-se a mesma nomenclatura. A Figura 4.14 apresenta dois dos painéis já colocados sobre maciço de betão armado no laboratório.



Figura 4.14 – Parede testada: a) painel de menores dimensões; b) painel de maiores dimensões.

A Figura 4.15 esquematiza os painéis PG1 e PG2, cujas dimensões eram 2.4m de altura por 1.6m de largura, depois de colocados sobre os maciços, em laboratório.

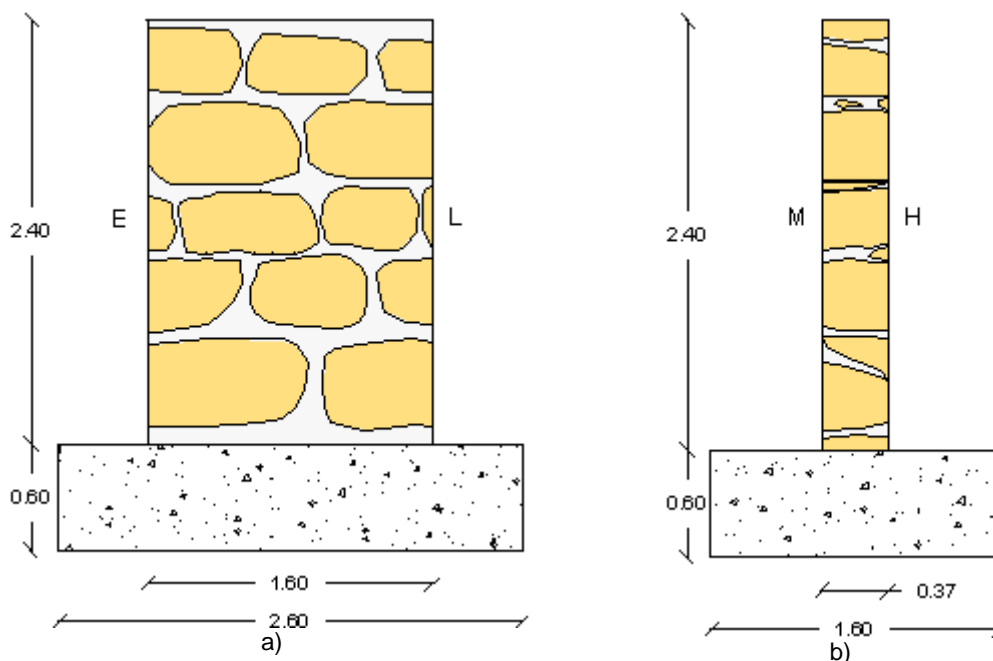


Figura 4.15 – Esquema dos painéis de maiores dimensões (PG1 e PG2): a) vista do alçado principal da parede; b) vista do alçado principal da parede.

Por uma questão de organização de resultados, as duas faces principais das alvenarias foram designadas por M e por H, em PG1 e PG2, e por E e L, em PP2. Para a preparação dos ensaios nos três painéis começou-se por marcar pontos no centro estimado das pedras, nas duas faces e em correspondência directa. Esta medida teve como objectivo agilizar a execução e melhorar a qualidade dos resultados obtidos na caracterização das alvenarias de um modo global, através de ensaios indirectos, evitando que alguns pontos fossem colocados sobre juntas, como é comum quando se utiliza a grelha apresentada na Figura 3.9.

Por terem uma disposição de pedras diferente, os pontos foram distribuídos de forma distinta em cada painel ao longo de colunas tão próximas, quanto possível, da linha recta vertical e coincidentes com o centro das pedras: no caso de PG1, adoptou-se um total de 16 pontos dispostos ao longo de 3 colunas, no caso de PG2 de 22 pontos em 4 colunas e no caso de PP2 de 7 pontos em 2 colunas. A Figura 4.16 apresenta os pontos marcados sobre cada um dos três painéis estudados.

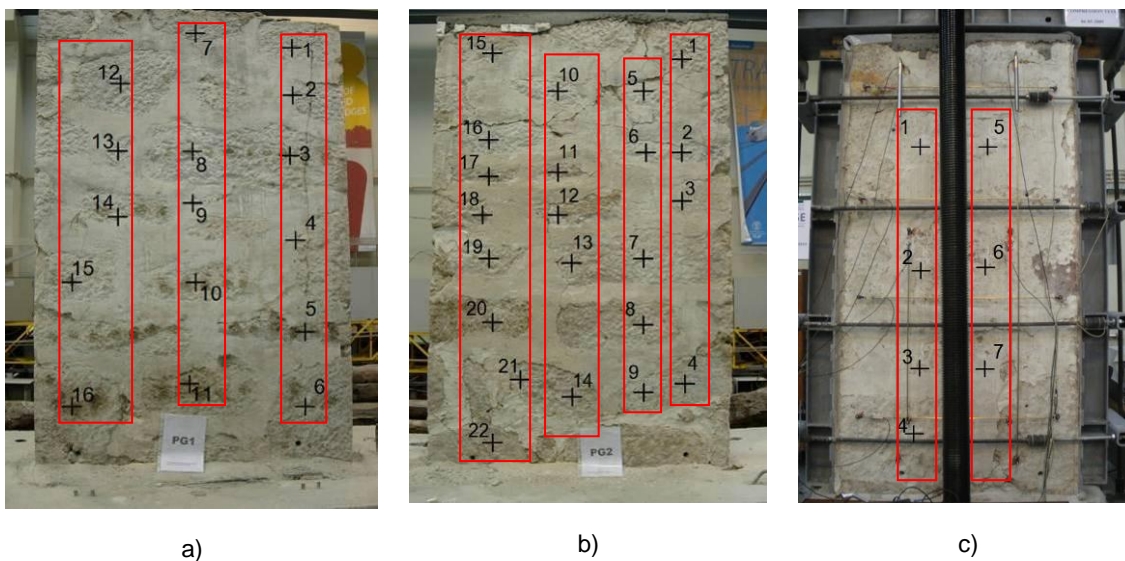


Figura 4.16 – Pontos adoptados/colocados numa das faces principais de (a) PG1; (b) PG2; (c) PP2.

Após a preparação dos painéis, estes foram cuidadosamente caracterizados através da técnica ISIM. Foram depois realizados, no âmbito de outra tese de doutoramento, ensaios de corte sobre PG1 e PG2, e um ensaio de compressão em PP2. Posteriormente, realizaram-se novos ensaios de propagação de ondas sónicas, com o objectivo de determinar as diferenças entre a velocidade de propagação antes e após esses ensaios.

4.4.2 Caracterização prévia dos painéis

Os três painéis (PG1, PG2 e PP2) foram caracterizados através da técnica ISIM aplicada a todas as colunas no sentido descendente (impacto no ponto superior e recepção nos pontos inferiores). O Quadro 4.5 apresenta a velocidade obtida para as ondas P nos três painéis testados; no Ponto 4.4.3 apresentam-se os resultados obtidos para cada painel mais em pormenor.

Quadro 4.5 – Velocidade das ondas P (em m/s).

	PG1		PG2		PP2	
Local	Face H	Face M	Face H	Face M	Face H	Face M
Coluna 1	1277	798	734	582	512	680
Coluna 2	906	706	533	499	613	1036
Coluna 3	340	392	502	946	-	-
Coluna 4	-	-	516	556	-	-
<i>Média</i>	<i>841</i>	<i>632</i>	<i>571</i>	<i>646</i>	<i>563</i>	<i>858</i>

Os resultados obtidos encontram-se, em média, em torno dos 600m/s, havendo contudo dois resultados consideravelmente mais elevados, cerca de 850m/s. Em estruturas heterogéneas, como é o caso dos painéis testados, é de esperar que se observem valores bastante diferentes entre si e por isso considera-se que a velocidade média - $V_p=685\text{m/s}$ – espelha, de uma forma válida, as características gerais da alvenaria testada. Como se referiu as ondas R apresentam uma chegada mais notada do que a das ondas P e têm uma menor velocidade à qual está associada um menor erro. O Quadro 4.6 apresenta as velocidades das ondas R, novamente para os três painéis testados.

Quadro 4.6 – Velocidade das ondas R (em m/s).

	PG1		PG2		PP2	
Local	Face H	Face M	Face H	Face M	Face H	Face M
Coluna 1	546	396	380	256	309	354
Coluna 2	356	433	266	294	316	396
Coluna 3	250	315	297	284	-	-
Coluna 4	-	-	345	232	-	-
<i>Média</i>	<i>384</i>	<i>381</i>	<i>322</i>	<i>267</i>	<i>313</i>	<i>375</i>

A velocidade das ondas R foi um pouco mais estável do que a das ondas P, provavelmente fruto da maior facilidade em determinar o instante da sua chegada. Contudo, os resultados devem ser observados com alguma cautela, uma vez que a uma pequena variação da velocidade das ondas R está associada uma variação das ondas P que é o dobro. O resultado médio obtido para as ondas R foi de 340m/s (cerca de metade do valor da velocidade das ondas P).

No gráfico da Figura 4.17 pode observar-se a forma como varia a velocidade de cada uma das colunas testadas nos diferentes alçados, para cada um dos painéis. As linhas a cheio representam as ondas P e as linhas a tracejado as ondas R, como se indica na legenda. Para cada painel existem duas linhas no gráfico para cada tipo de onda (P e R) e que se referem às duas faces testadas (M e H).

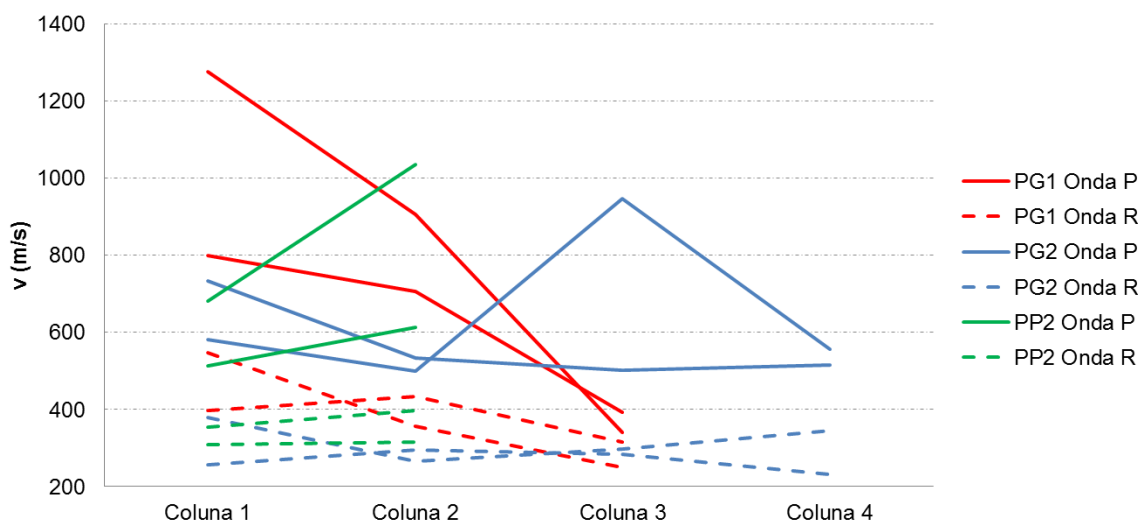


Figura 4.17 – Variação das velocidades das Ondas P e R em cada coluna testada em PG1, PG2 e PP2.

Da análise dos resultados percebe-se que a variação de velocidade relativa, nas diferentes colunas para os dois alçados testados, segue a mesma tendência na maioria dos casos. Por exemplo, em PG1 a velocidade das ondas P é elevada na coluna 1 nas duas faces testadas, sendo depois menor na coluna 2 e 3. Excepcionalmente, verifica-se que a coluna 3 do painel PG2 apresenta um valor bastante diferente dos restantes. Contudo, salienta-se, mais uma vez, que o facto de se efectuarem vários ensaios na mesma parede garante um resultado representativo, sendo normal que haja valores bastante diferentes, dada a grande variabilidade reconhecida nas características das alvenarias. Ainda assim, de uma forma geral os resultados apresentam coerência de face para face e entre ondas P e R.

Os resultados obtidos foram tratados numericamente, de forma a definir-se um intervalo de variação de valores (limite mínimo e máximo) como forma de conhecer a or-

dem de grandeza dos módulos de elasticidade que lhe estão associados. Na Figura 4.18 apresenta-se o intervalo de velocidades obtido para as ondas P; note-se que os limites de velocidade foram estabelecidos de modo a incluir a maioria dos resultados num intervalo que, neste caso, corresponde a um módulo de elasticidade de $E=1.3\pm 1\text{GPa}$, obtido através da Equação 2.18 com base numa massa volúmica de $\rho=2400\text{kg/m}^3$ e num coeficiente de Poisson de $\nu=0.2$.

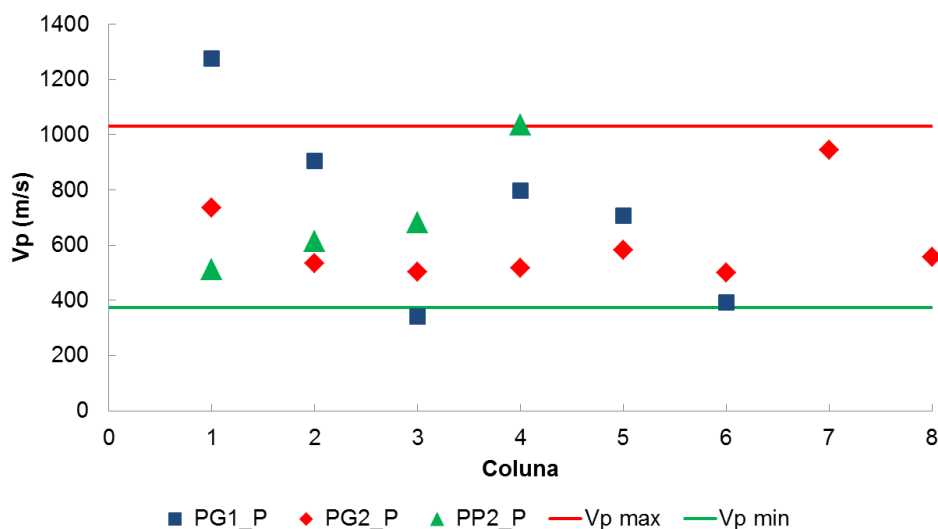


Figura 4.18 – Variação das velocidades das Ondas P em cada coluna testada em PG1, PG2 e PP2.

O mesmo procedimento foi aplicado para a determinação da velocidade das ondas R e os resultados obtidos apresentam-se no gráfico da Figura 4.19. Neste caso, foi possível reduzir significativamente o intervalo de variação do módulo de elasticidade associada às ondas P; o módulo de elasticidade da alvenaria, determinado através da Equação 2.19, é de $E=0.8\pm 0.4\text{GPa}$.

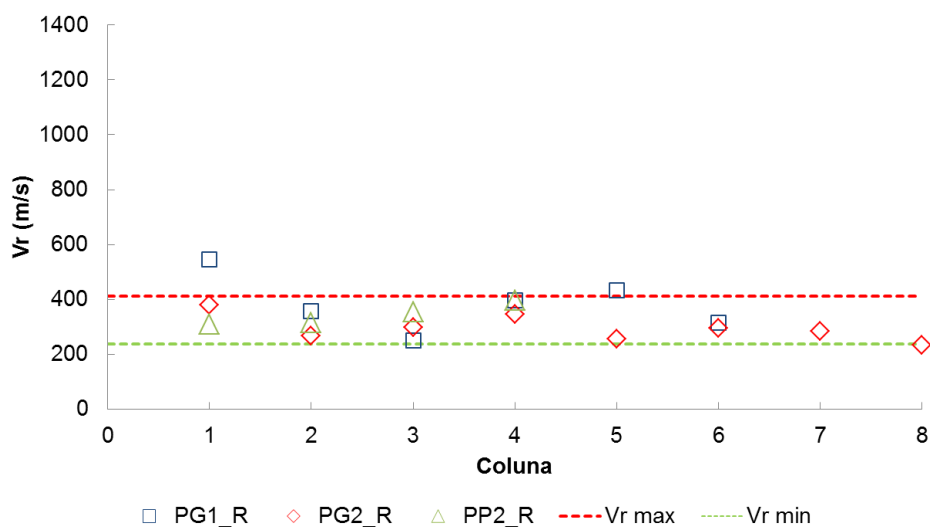


Figura 4.19 – Variação das velocidades das Ondas R em cada coluna testada em PG1, PG2 e PP2.

Analisando os resultados obtidos através das ondas P e R, verifica-se que o módulo de elasticidade associado à velocidade de propagação das ondas P apresenta uma margem de erro consideravelmente superior ao módulo de elasticidade associado à propagação das ondas R, 1GPa e 0.4GPa, respectivamente. Assim, no primeiro caso (Figura 4.18) o intervalo a considerar é $E=[0.2-2.2]$ GPa e no segundo caso (Figura 4.19) esse intervalo é de, apenas, $E=[0.4-1.2]$ GPa. O facto do instante inicial ser, para as ondas R, mais claro, pode ajudar a obter resultados mais robustos, reduzindo a margem de erro que lhe está associada.

4.4.3 Comparação do módulo de elasticidade de PP2 através de ensaios mecânicos e de ensaios sísmicos

O módulo de elasticidade médio associado à velocidade de propagação das ondas elásticas foi comparado com os resultados do ensaio de compressão simples sobre PP2. Os sete pontos a que se fez referência anteriormente (Figura 4.16 c)), voltaram a ser utilizados nos ensaios sísmicos realizados neste contexto. De modo a aproximar-se melhor das condições in-situ, o ensaio foi realizado com um confinamento de 8kN, materializado por 8 tirantes (elementos metálicos horizontais que se podem ver na Figura 4.20), cada um submetido a uma tracção de 1kN. A Figura 4.20 apresenta os dois alçados, genericamente designados por L e E, do painel testado já posicionado no local do ensaio mecânico.

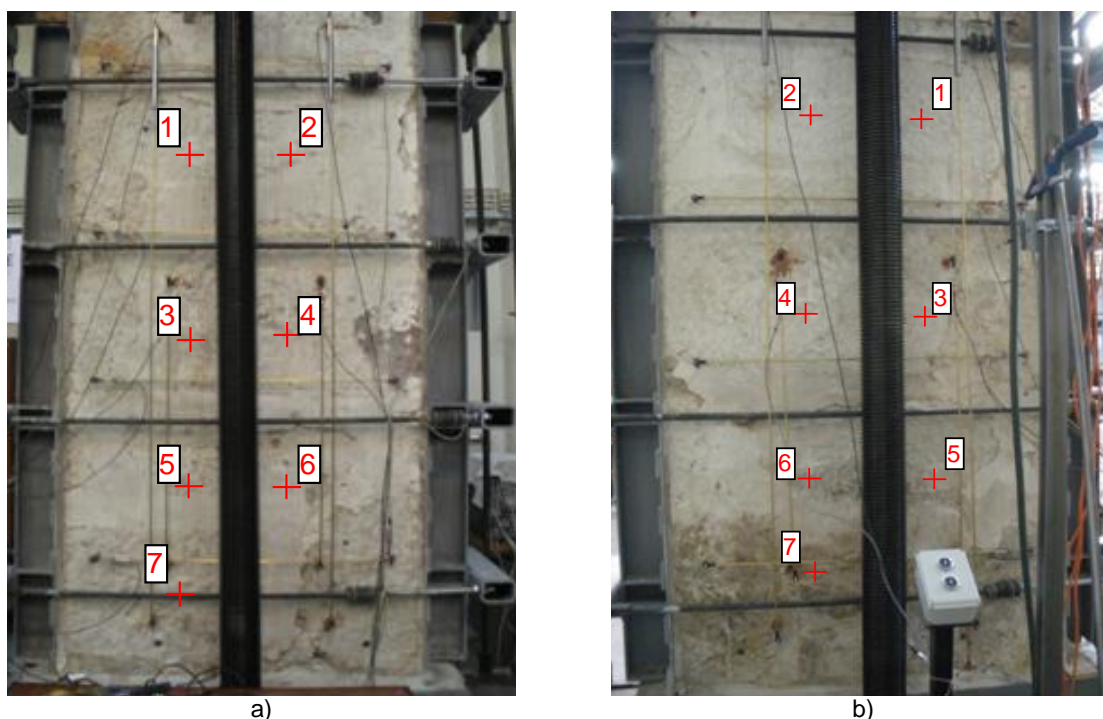


Figura 4.20 – Vista de PP2 antes do ensaio à compressão: a) Alçado L; b) alçado E.

Os ensaios indirectos, seguindo a metodologia do ISIM, foram realizados antes, durante e após o ensaio de compressão. Em simultâneo, as pedras de PP2 foram testadas através de ensaios directos de modo a avaliar o efeito que o ensaio tinha na sua integridade. Em síntese, o procedimento seguido foi:

- ✓ ensaios directos em pedras no sentido de L para E – antes do EC (ensaio de compressão);
- ✓ ensaios indirectos na face E e L – antes do EC;
- ✓ ensaios directos em pedras no sentido L para E – durante o EC;
- ✓ ensaios indirectos na face L – durante o EC;
- ✓ ensaios directos em pedras no sentido L para E – após o EC;
- ✓ ensaios indirectos na face L – após o EC.

Ensaio directos em pedras

Os ensaios directos em pedras foram realizados em cada um dos pontos assinalados na Figura 4.20, com a emissão da onda na face L e a recepção na face E, e permitiram determinar a velocidade média de propagação das ondas P nas pedras que se apresentam no Quadro 4.7. Em alguns casos, especialmente durante o ensaio de compressão, a determinação da velocidade não foi possível (ND, no Quadro 4.7), já que o sinal eléctrico correspondente ao martelo (impacto) apresentava ruído, inviabilizando a correcta análise dos sinais temporais.

Quadro 4.7 – Velocidades obtidas no ensaio directo em pedras.

	Ponto	1	2	3	4	5	6	7	Média
Vp (m/s)	Antes do EC	3333	2520	2500	2857	3333	3960	2880	3055
	Durante o EC	ND	1530	ND	2500	ND	3401	2863	2574
	Após do EC	2901	1971	1363	2500	2463	3353	2941	2499

Verifica-se que, em geral, se registou uma diminuição das velocidades de propagação das ondas P nas pedras, facto que resulta, muito possivelmente, da degradação que o ensaio de carga induziu nesses elementos. O gráfico da Figura 4.21 salienta essa diminuição.

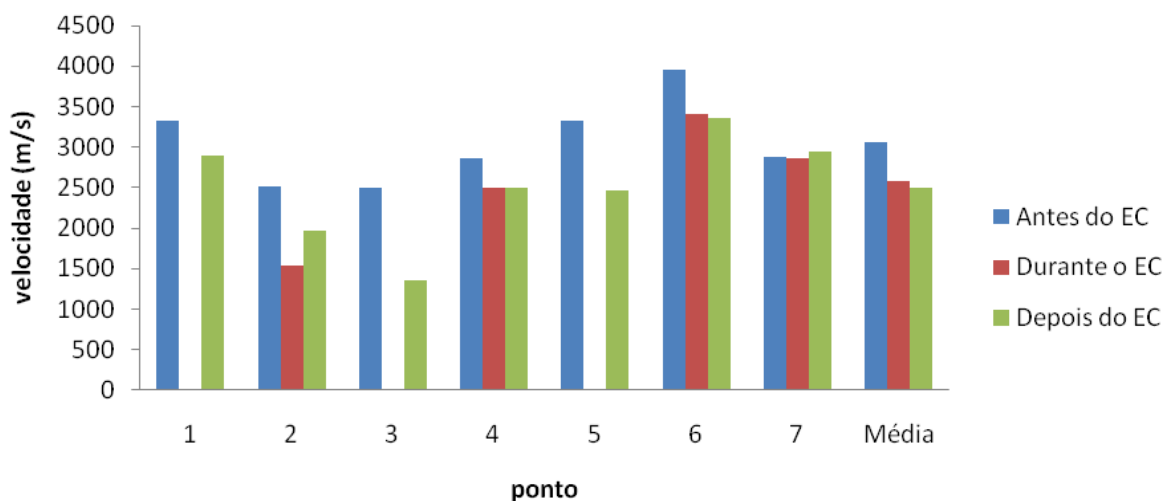


Figura 4.21 – Evolução da velocidade das ondas P ao longo do ensaio de compressão (Quadro 4.7).

Em síntese, a velocidade de propagação das ondas P nas pedras diminuiu durante o ensaio de compressão, por comparação com a velocidade obtida antes desse ensaio mantendo o seu valor depois do ensaio. Este comportamento sugere que o dano induzido às pedras pelo EC é permanente; possivelmente surgiram fissuras internas resultantes das cargas aplicadas que fizeram com que o tempo de propagação das ondas elásticas aumentasse consideravelmente e de forma irreversível.

Técnica ISIM aplicada em PP2

O comportamento da parede foi também estudado em termos globais: realizaram-se ensaios utilizando os princípios enunciados no método ISIM nas 2 colunas identificadas na Figura 4.20. Em concreto, efectuaram-se ensaios na face L – antes, durante e depois do ensaio de compressão – e, adicionalmente, na face E – apenas antes do ensaio de compressão. A análise dos resultados não foi fácil, em especial no caso dos pontos mais distantes do ponto de impacto de cada coluna. A Figura 4.22 dá uma ideia dos sinais obtidos na coluna 1.

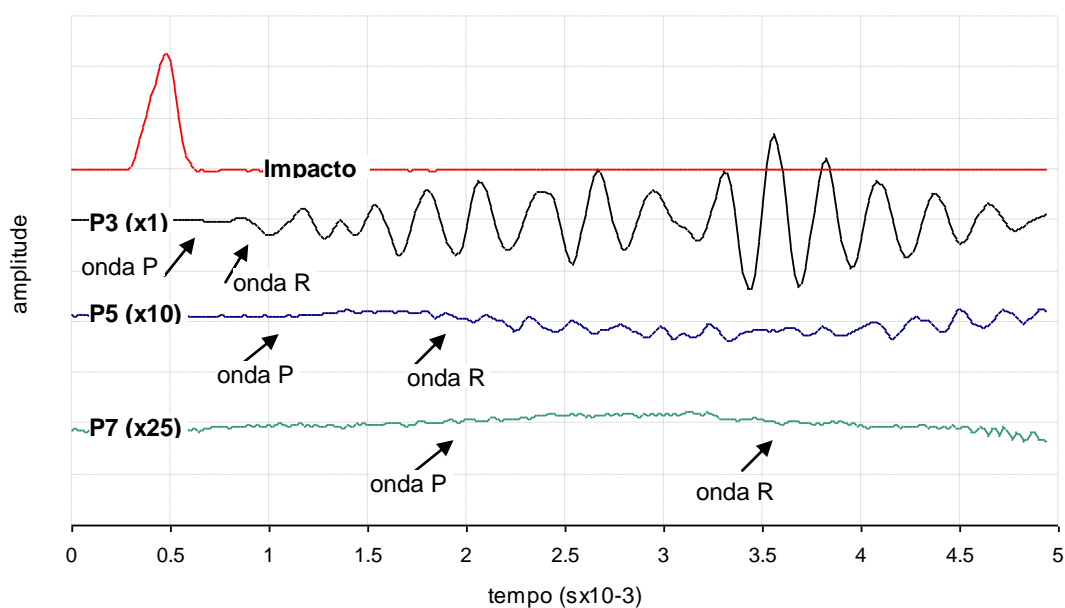


Figura 4.22 – Aspecto dos sinais obtidos na coluna 1 antes do ensaio de compressão.

O Quadro 4.8 apresenta os resultados obtidos em todos os ensaios realizados em PP2. A velocidade das ondas R antes do ensaio de compressão, demonstrou uma considerável coerência de resultados que se traduz num desvio padrão próximo dos 10%, ao contrário do que se observou para as ondas P. Este resultado, em conjunto com os resultados obtidos em PG1 e PG2 (antes do ensaio de corte), sugerem que a velocidade das ondas R é aquela que melhor caracteriza a alvenaria.

Quadro 4.8 – Velocidades obtidas em ensaios indirectos.

	Alçado	Sentido do teste	Vp (m/s)	r ²	N	Vr (m/s)	r ²	n	Vr/Vp
Antes do EC	L	Coluna 1 (de 1 para 7)	512	0.90	3	309	0.94	3	0.60
		Coluna 2 (de 2 para 6)	613	(1.00)	2	316	(1.00)	2	0.52
	E	Coluna 1 (de 1 para 7)	680	0.94	3	354	0.96	3	0.52
		Coluna 2 (de 2 para 6)	1036	(1.00)	2	396	(1.00)	2	0.38
Durante o EC	L	Coluna 1 (de 1 para 7)	1289	1.00	3	882	1.00	3	0.68
		Coluna 2 (de 2 para 6)	2150	(1.00)	2	877	(1.00)	2	0.41
Depois do EC	L	Coluna 1 (de 1 para 7)	752	0.97	3	545	0.93	3	0.60
		Coluna 2 (de 2 para 6)	961	(1.00)	2	320	(1.00)	2	0.52

Durante o ensaio de carga a velocidade das ondas R aumentou de cerca de 300m/s, para valores próximos dos 1000m/s. Após o ensaio de carga, a velocidade voltou a reduzir: no caso da coluna 1, para valores superiores aos registados antes do ensaio, e no caso da coluna 2, para valores da ordem dos obtidos antes do ensaio de carga. A evolução a que se faz referência é apresentada na Figura 4.23.

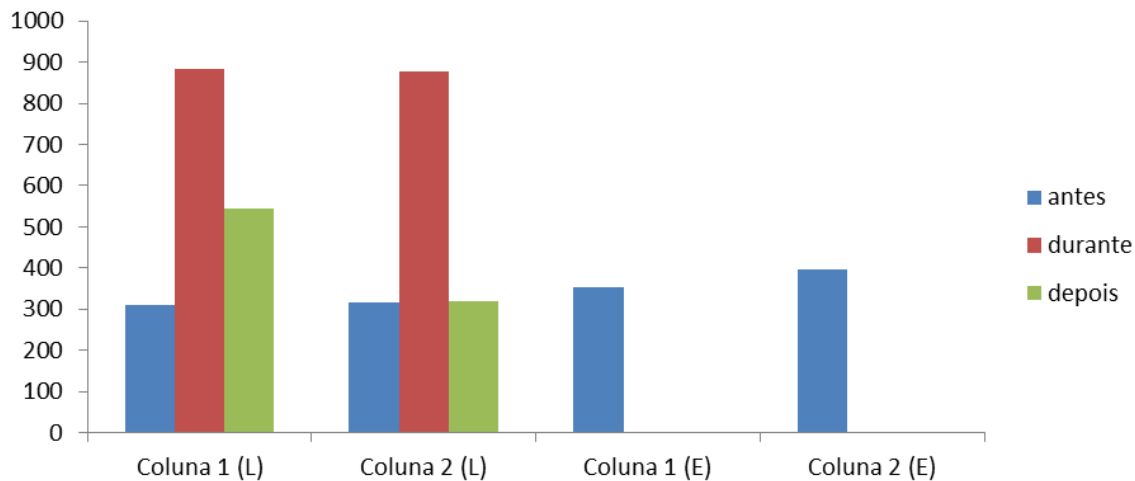


Figura 4.23 – Variação da velocidade das ondas R antes, durante e após o ensaio de carga (Quadro 4.8).

A velocidade média das ondas P e R, obtida antes do ensaio de compressão - $V_p=710\text{m/s}$ e $V_r=344\text{m/s}$, respectivamente - correspondem a um módulo de elasticidade de 0.9GPa. Durante o ensaio de compressão fez-se uma nova leitura da velocidade das ondas R e chegou-se a um valor médio superior ao obtido antes do ensaio de compressão, em cerca de duas vezes e meia - $V_r=880\text{m/s}$ - o que corresponde a um módulo de elasticidade bastante superior ao encontrado antes do ensaio de carga (superior a $E=5\text{GPa}$). A velocidade das ondas P ($V_p=1720\text{m/s}$) forneceu resultados semelhantes.

Após o ensaio de carga a parede ficou consideravelmente degradada, tendo-se mesmo verificado a rotura de uma das pedras que a constituía. A Figura 4.24 dá conta do estado da parede após esse ensaio e apresenta um pormenor da pedra que partiu e de uma junta que ficou consideravelmente degradada. O novo ensaio sónico realizado com o painel nas condições ilustradas pela Figura 4.24 produziu velocidades de propagação das ondas P e R superiores às obtidas antes do ensaio de compressão, mas inferiores aos valores obtidos durante o mesmo ensaio. Após o ensaio de compressão o módulo de elasticidade calculado através da velocidade de propagação das ondas elásticas era $E=1.3\text{GPa}$.

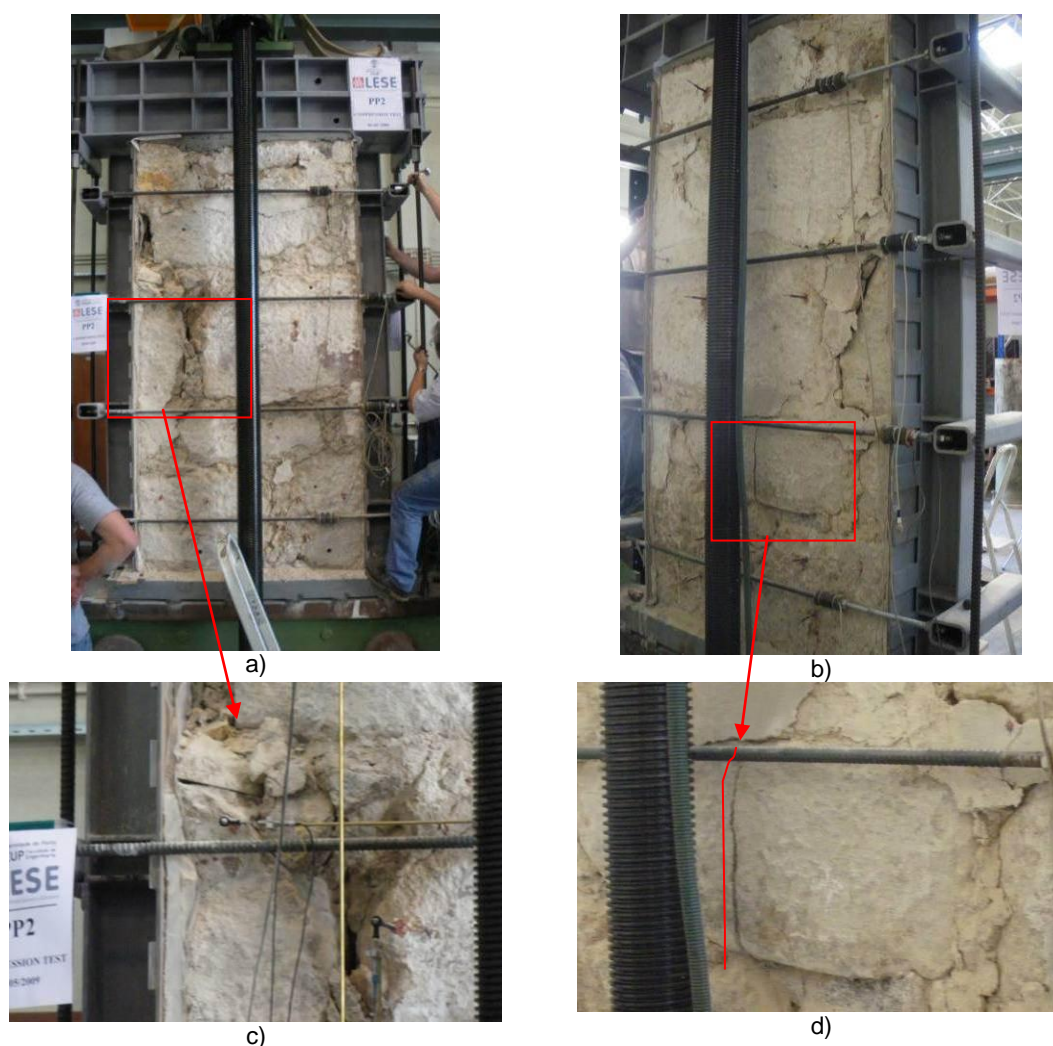


Figura 4.24 – Vista de PP2 depois do Ensaio à Compressão: a) c) abertura de junta; b) d) rotura de pedra.

O Quadro 4.9 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nos ensaios sónicos e os respectivos módulos de elasticidade calculados com base na Equação 2.18, na Equação 2.19 e nos valores médios das velocidades, numa massa volúmica de $\rho=2400\text{kg/m}^3$ e num coeficiente de Poisson calculado com a partir da comparação das velocidades das ondas P e R (Equação 2.20).

Quadro 4.9 – Velocidades obtidas em ensaios indirectos.

	Vp (m/s)	Vr (m/s)	Vr/Vp	ν	E (GPa)
Antes do EC ($\sigma_c=0$)	710	344	0.48	0.31	0.9
Durante o EC ($\sigma_c=2.5\text{GPa}$)	1720	880	0.51	0.28	5.6
Depois do EC ($\sigma_c=0$)	857	433	0.51	0.29	1.3

A Figura 4.25 apresenta a curva tensão extensão obtida através da instrumentação colocada no ensaio de compressão (a preto) e os módulos de elasticidades determinados através das velocidades médias de propagação das ondas sónicas (a vermelho). O primeiro carregamento (segmento A ao segmento E) refere-se à situação confinada (com os 8 tirantes metálicos). O segundo carregamento (segmento F ao segmento H) refere-se à situação não-confinada. Como é usual neste tipo de estruturas, os módulos de elasticidade obtidos são diferentes consoante a fase do ensaio: alta deformabilidade para cargas que a estrutura nunca conheceu; baixa deformabilidade para cargas que a estrutura já conheceu. Para além das grandezas aferidas através do ensaio estático, apresentam-se Figura 4.25 os módulos de elasticidade determinados através da velocidade de propagação das ondas antes (E_{SAEC}), durante (E_{SDEC}) e após (E_{SPEC}) o ensaio de carga.

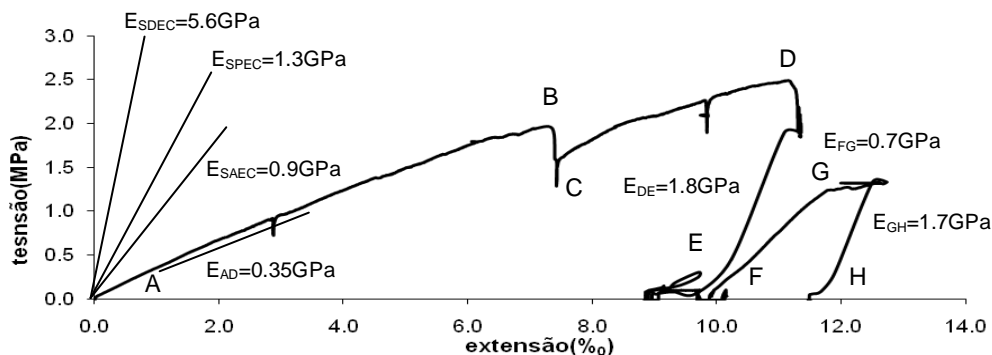


Figura 4.25 – Curva tensão-extensão obtida no ensaio de carga.

Analisando a curva - tensão vs extensão – da Figura 4.25, verifica-se que o módulo de elasticidade na fase de carga (segmento A-B) ronda os 0.4GPa e o módulo de elasticidade em recarga (segmento F-G) os 0.7GPa (valor próximo do obtido através do ensaio sónico). Os valores obtidos em descarga nas situações confinada (segmento D-E) e não-confinada (segmento – G-H) foram semelhantes: cerca de 1.7GPa.

Antes do ensaio de compressão, o ensaio sónico forneceu resultados semelhantes ao módulo de elasticidade do ensaio estático em regime de recarga (não confinado): $E_{SAEC} = 0.9$ GPa. Contudo, este valor foi consideravelmente diferente do módulo de elasticidade tangente obtido no primeiro ciclo de carga (regime confinado) $E_{AB} = 0.35$ GPa. Na justificação destes valores está o facto de a parede “in-situ” ter estado sujeita durante o seu período de vida a carregamentos superiores ao do seu peso próprio (situação existente no laboratório). Assim, a primeira fase do carregamento corresponde a uma recarga. Como o ensaio sónico apenas gera carregamentos muito reduzidos (resultantes da propagação das ondas) certamente não faz ultrapassar o valor de carga máximo instalado in-situ, detectando uma rigidez de recarga.

O módulo de elasticidade obtido através dos ensaios sónicos deveria ser superior ao estático também por outro motivo: a existência de vazios no interior da parede, como se verificou através de observações directas da superfície transversal dos painéis. Esses vazios são intransponíveis para as ondas elásticas, que “não os vêem”, apresentando um valor de velocidade que corresponde à velocidade de propagação na zona de material contínuo junto às faces dos alçados. Contudo, a presença desses vazios, reflecte-se num ensaio de compressão da alvenaria, já que contribui para a redução da sua secção efectiva, aumentando assim a deformabilidade.

Para tentar avaliar a influência dos vazios na resposta da alvenaria, analisaram-se os resultados obtidos noutra parede recolhida da mesma alvenaria. Esse painel, designado de PP3, foi previamente testado nas mesmas condições que PP2, tendo sido depois injectado com uma argamassa pobre, semelhante à da parede original. O comportamento dos dois painéis de parede testados PP2 e PP3 (antes e depois da injeção) apresenta-se na Figura 4.26 (Almeida, et al., 2010b).

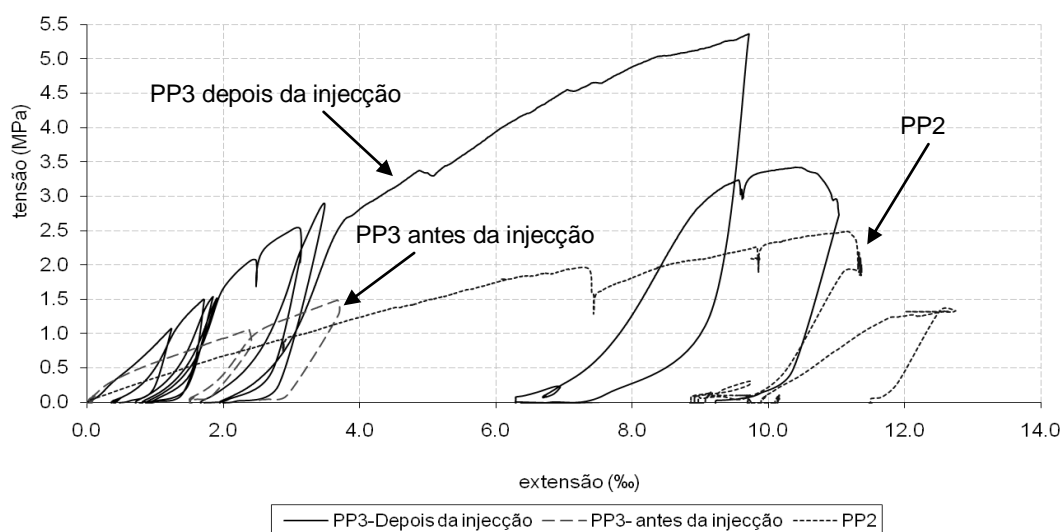


Figura 4.26 – Curva tensão-extensão obtida no ensaio de carga para os painéis PP2 e PP3 (Almeida, et al., 2010b).

Na Figura 4.26, percebe-se que o comportamento de PP3 antes da injeção é semelhante ao comportamento de PP2 (módulo de elasticidade idêntico) e, por isso, as conclusões retiradas para PP3 puderam ser extrapoladas para PP2 e para os ensaios sónicos sobre ela realizados. Verificou-se que o módulo de elasticidade do painel PP3 subiu de 0.35GPa (antes da injeção) para 0.9GPa (depois da injeção).

Verifica-se assim que o módulo de elasticidade de PP3 depois da injeção, é idêntico ao módulo de elasticidade obtido através dos ensaios sónicos antes do ensaio de compressão de PP2 (0.9GPa). Na recarga, o módulo de elasticidade da parede assumiu

valores da ordem dos obtidos através do ensaio sónico após o teste: 1.5GPa. O que se pode ter passado no ensaio de propagação de ondas elásticas ilustra-se na Figura 4.27.

No primeiro caso, antes da injeção, as ondas passavam sobre o material sem detectar a presença de vazios (Figura 4.27 a)), sendo a velocidade das ondas determinada pelas condições do material que tinha um contacto efectivo. No segundo caso, após a injeção (Figura 4.27 b)), os vazios foram preenchidos; a velocidade de propagação das ondas mantinha-se, mas o módulo de elasticidade estático aumentava, já que a secção útil da parede também aumentava. A Figura 4.27 ilustra o que pode ter ocorrido na propagação das ondas à luz desta hipótese.

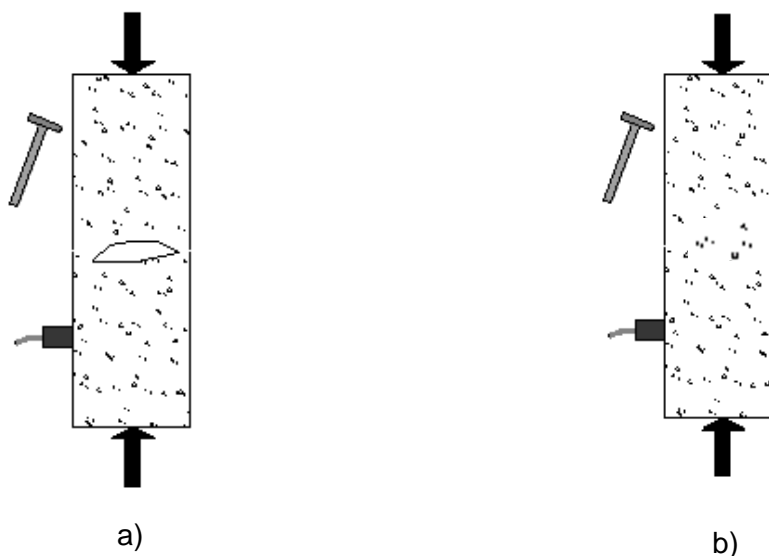


Figura 4.27 – Ilustração do ensaio sónico: a) antes da injeção; b) depois da injeção.

Conclui-se que a existência de vazios na alvenaria deve também ter contribuído para a diferença verificada entre os valores obtidos no ensaio sónico ($E=0.9\text{GPa}$) e na fase inicial do ensaio mecânico de PP2 ($E=0.35\text{GPa}$).

Durante o ensaio de carga, o reajustamento das partículas que constituem a alvenaria, através do preenchimento de vazios e melhoria do contacto entre as próprias pedras (Figura 4.24 c) e d)), justifica o aumento do módulo de elasticidade obtido através do ensaio sónico nessa fase. Grande parte desses ajustes foi irreversível, como se pode concluir através da baixa recuperação das deformações ao longo da fase de descarga (segmentos D-E e G-H do gráfico da Figura 4.25). O material mais compacto daí resultante, traduz-se num aumento da velocidade das ondas elásticas e num aumento do módulo de elasticidade da estrutura em situação de recarga. Esta situação deve verificar-se até ao dano (abertura de fendas, esmagamento) ser atingido.

Na natureza, o aumento do módulo de elasticidade pós-carga plástica nota-se noutros materiais. Por exemplo, num corpo de elevada porosidade – arenito - Oliveira

(Oliveira, 2000) verificou que até 60% da carga última se registava o aumento do módulo de elasticidade. Esse aumento era permanente e, provavelmente, devia-se à reconfiguração das partículas com o consequente preenchimento de vazios. A partir daquele valor de carga, formavam-se microfissuras e verificava-se o decréscimo da rigidez. Em ensaios triaxiais de solos, acontece a mesma situação.

4.4.4 Caracterização após os ensaios de corte em PG1 e PG2

Depois de caracterizados através dos ensaios sínicos, os painéis PG1 e PG2 foram submetidos a ensaios de corte (no âmbito de outra tese de doutoramento). Após esse ensaio voltou-se a medir a velocidade de propagação das ondas sínicas, de modo a estudar os efeitos que os danos causados a esses painéis (Figura 4.30) tiveram na velocidade de propagação das ondas elásticas.

Nos ensaios sínicos realizados foram utilizados os mesmos pontos que se tinham utilizado no ensaio indirecto Figura 4.16. No Quadro 4.10 apresentam-se as velocidades medidas após o ensaio de corte; as velocidades obtidas antes desse ensaio estão apresentadas no Quadro 4.5 e no Quadro 4.6. Os valores não determinados (ND) apresentados no Quadro 4.10, devem-se à grande abertura de juntas, que causaram um importante abaixamento da amplitude dos sinais tornando impossível a interpretação desses resultados.

Quadro 4.10 – Velocidades das ondas P e R obtidas em PG1 e PG2 após o ensaio de corte.

	PG1				PG2			
	Vp (m/s)		Vr (m/s)		Vp (m/s)		Vr (m/s)	
	Face H	Face M	Face H	Face M	Face M	Face M	Face H	Face M
Coluna 1	269	287	147	159	369	502	216	324
Coluna 2	489	629	204	353	575	618	328	292
Coluna 3	ND	507	ND	269	596	574	346	371
Média	379	474	175	260	284	280	123	158

De forma a comparar as velocidades antes e depois do ensaio de corte, construiu-se o gráfico da Figura 4.28. A sua análise permite verificar a existência de duas situações predominantes: (a) as velocidades mantiveram-se estáveis antes e depois do ensaio de corte (casos dos ensaios 5, 6, 8, 9, 11 e 12); (b) as velocidades depois do corte apresentaram um importante decréscimo comparativamente com as velocidades obtidas antes desse ensaio (caso dos ensaios 1, 2, 3, 4, 7, 10, 13 e 14).

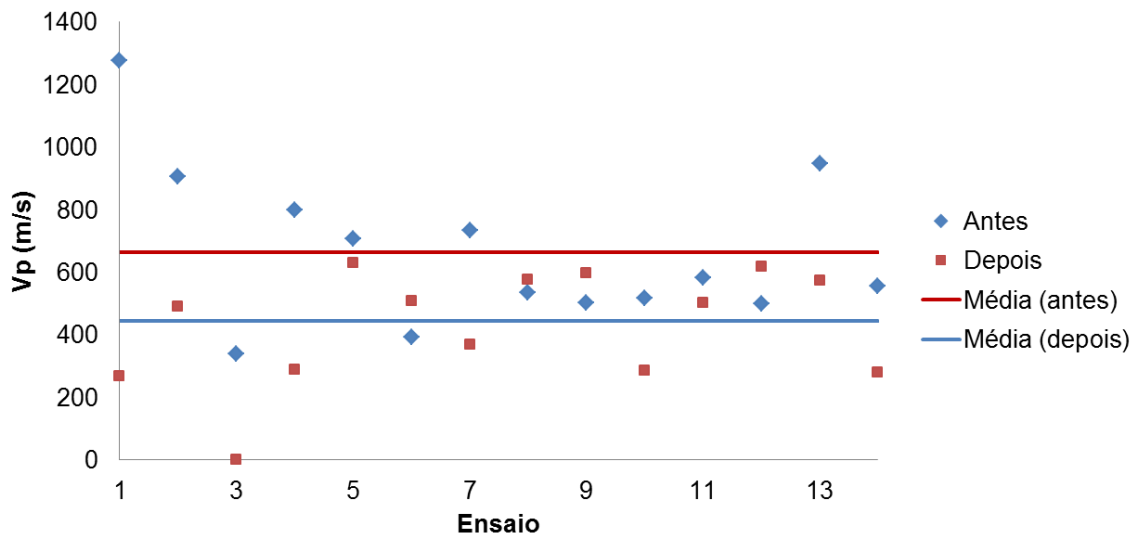


Figura 4.28 – Comparação da velocidade das ondas P antes e depois do ensaio de corte.

Na Figura 4.29, apresenta-se a velocidade de propagação das ondas R. Os resultados obtidos foram muito semelhantes aos das ondas P, sendo por isso válidas as afirmações feitas anteriormente. Em geral, como na situação anterior, verificou-se a diminuição da velocidade das ondas R após o ensaio de corte: a velocidade média passou de $V_r=332\text{m/s}$ (antes o ensaio de corte) para $V_r=256\text{m/s}$ (após o ensaio de corte).

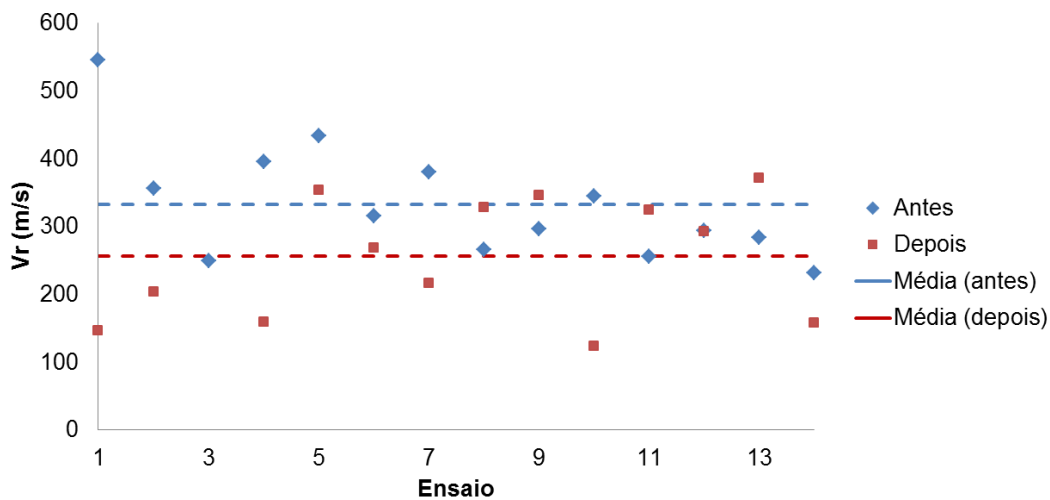


Figura 4.29 – Comparação da velocidade das ondas R antes e depois do ensaio de corte.

A observação do estado dos painéis após o ensaio de corte traduz o elevado grau de degradação induzido por esse ensaio. A Figura 4.30 apresenta imagens do estado de PG2 nesse momento.

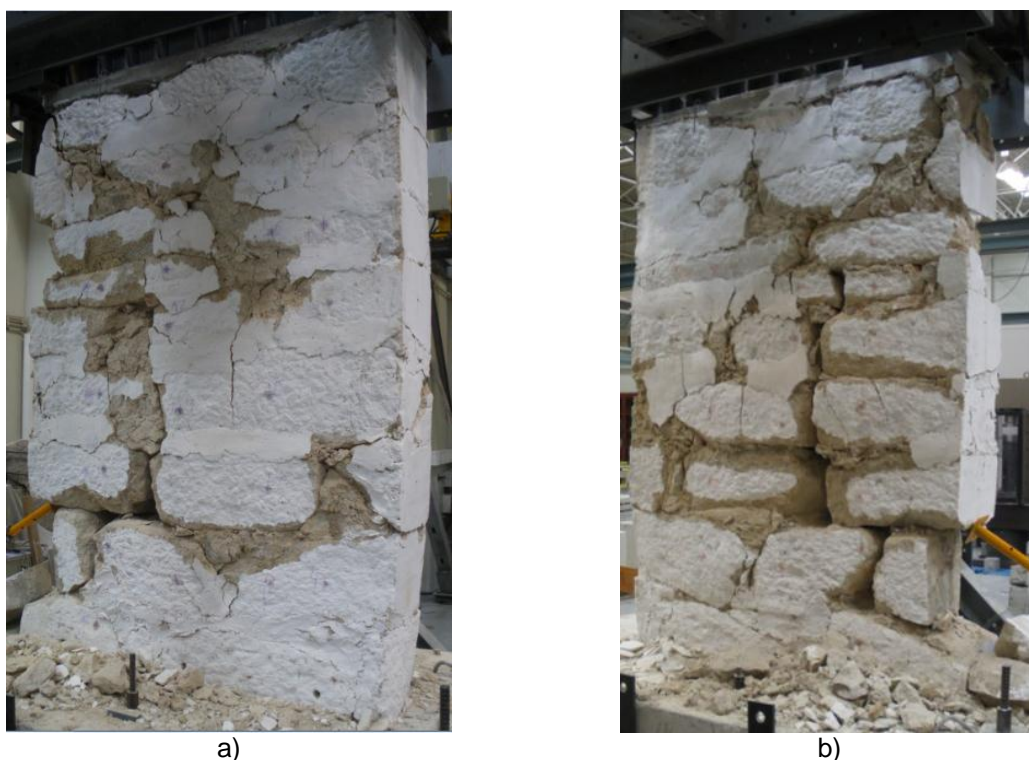


Figura 4.30 – Aspecto do painel PG2 após o ensaio de corte.

Dado o estado de degradação da parede, determinar o seu módulo de elasticidade vertical nestas circunstâncias é difícil e pode ser questionável. No entanto, utilizando o valor médio da velocidade das ondas R calculou-se o seu módulo de elasticidade, após o ensaio de corte, através da Equação 2.19, adoptando uma massa volúmica de $\rho=2400\text{kg/m}^3$ e um coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$. Verificou-se que esse valor baixou, em termos médios, de $E=0.8\text{GPa}$ (antes do ensaio, ver Ponto 4.4.2) para cerca de $E=0.4\text{GPa}$. Além dos ensaios indirectos, foram realizados ensaios directos nas pedras, não se tendo notado uma degradação sistemática da velocidade após o ensaio de corte.

4.5 ENSAIOS SÓNICOS IN-SITU

Paralelamente ao desenvolvimento dos ensaios sónicos em laboratório, foi feita a caracterização de alvenarias in-situ através dos ensaios sónicos. Estes trabalhos resultaram de algumas oportunidades a que se teve acesso no âmbito da actividade do Instituto da Construção (IC) da FEUP. Em concreto, apresentam-se os casos da Torre do Relógio em Caminha, do edifício do Largo dos Loios no Porto e do edifício de Mouzinho da Silveira também no Porto.

Como se referiu, os trabalhos apresentados foram realizados paralelamente ao estudo desenvolvido em laboratório. Assim, na altura da realização do ensaio na Torre do Relógio ainda não se tinha concebido a técnica ISIM, pelo que se efectuaram ensaios de

acordo com a técnica existente a essa data. Foram utilizados ensaios directos que permitiram caracterizar a torre numa perspectiva mais qualitativa. Posteriormente, nos casos do Largo dos Lóios e Mouzinho da Silveira, aplicou-se a técnica do ISIM na determinação das características das respectivas alvenarias. Em alguns casos, além dos ensaios sísmicos foram realizados ensaios de macacos planos que serão apresentados mais à frente.

4.5.1 Torre do Relógio - Caminha

A Torre do Relógio, em Caminha, marcou o início dos trabalhos in-situ no âmbito da presente Tese de Doutoramento. A aquisição de resultados teve lugar no dia 19 de Junho de 2008, pouco tempo depois da recepção do equipamento para execução dos ensaios, que se deu no final de Abril de 2008.

A Torre do Relógio é a única estrutura intacta que resta do castelo gótico que envolvia o burgo de Caminha. Foi construída no séc. XIII e localiza-se na praça central junto aos Paços do Concelho. Tem planta rectangular, com $(7.8 \times 7.0) \text{m}^2$, e eleva-se a uma altura de 17m divididos em 4 pisos: o rés-do-chão, dois pisos intermédios à cota das seteiras e 1 piso de cobertura. Na Figura 4.31 apresentam-se fotografias dos alçados principais da torre (Paupério ; Costa, 2006).



Figura 4.31 – Imagens da Torre do Relógio: a) alçado principal (Sul); b) alçado posterior (Norte).

Segundo um relatório de inspecção elaborado pelo IC da FEUP em Outubro de 2006 (Paupério ; Costa, 2006), a estrutura apresentava degradação material promovida pela humidade e colonização biológica e aberturas de juntas. Foi sugerida a adopção de algumas medidas com o objectivo de minorar os danos observados, em especial, a colmatação de juntas.

Além disso, aconselhou-se a realização de ensaios dinâmicos e ensaios sónicos directos, com o objectivo de avaliar o estado físico dos paramentos da torre antes da intervenção e averiguar a existência de vazios ou material menos coeso no interior das paredes da estrutura. Embora não tivessem sido realizadas carotagens que permitissem determinar a constituição dos paramentos da torre, a sua grande espessura - cerca de 2.0m - e a comparação com estruturas idênticas, indiciava tratar-se de uma parede de 2 panos de pedra com enchimento no interior.

Os ensaios dinâmicos de vibração ambiental envolveram a realização de um levantamento “Laser Scanning”, a modelação numérica da torre e a calibração do modelo numérico. Com base na modelação e nos ensaios dinâmicos realizados, concluiu-se que o módulo de elasticidade da alvenaria era em média de $E=1.4\text{GPa}$ (Miranda, et al., 2008). Nas páginas seguintes apresentam-se os trabalhos desenvolvidos no âmbito da caracterização através dos ensaios sónicos directos.

Procedimento

A Torre do Relógio contava com paredes de diferentes espessuras: 2.0m; 1.2m; 0.30m. Nos elementos com 2.0m de espessura foram realizados ensaios directos em 5 locais e utilizou-se uma grelha de 6x6 pontos; nos elementos com 1.2m de espessura, foram realizados ensaios em 3 locais e utilizou-se uma grelha de 6x2 pontos; nos elementos com 0.30m de espessura, foram realizados ensaios directos em dois locais com o objectivo de estimar a velocidade de propagação das ondas no granito utilizado na construção da torre. A limitação do número de pontos foi induzida pela dimensão dos elementos a testar. A Figura 4.32 apresenta a preparação (marcação dos pontos) de um elemento em que foi utilizada uma grelha de 6x2 pontos.



Figura 4.32 – Preparação de um ensaio num elemento com 1.2m de espessura (6x2 pontos).

Do total dos 10 ensaios realizados, 7 distribuíram-se pelos alçados Norte e Sul por haver acesso ao paramento exterior ao longo da altura da torre. O alçado Norte apresentava material de pior qualidade que se traduzia em pedras de menor dimensão e por um assentamento mais irregular. Os ensaios foram numerados de 1 a 10; a Figura 4.33 apresenta a localização dos ensaios realizados (Miranda, et al., 2008).

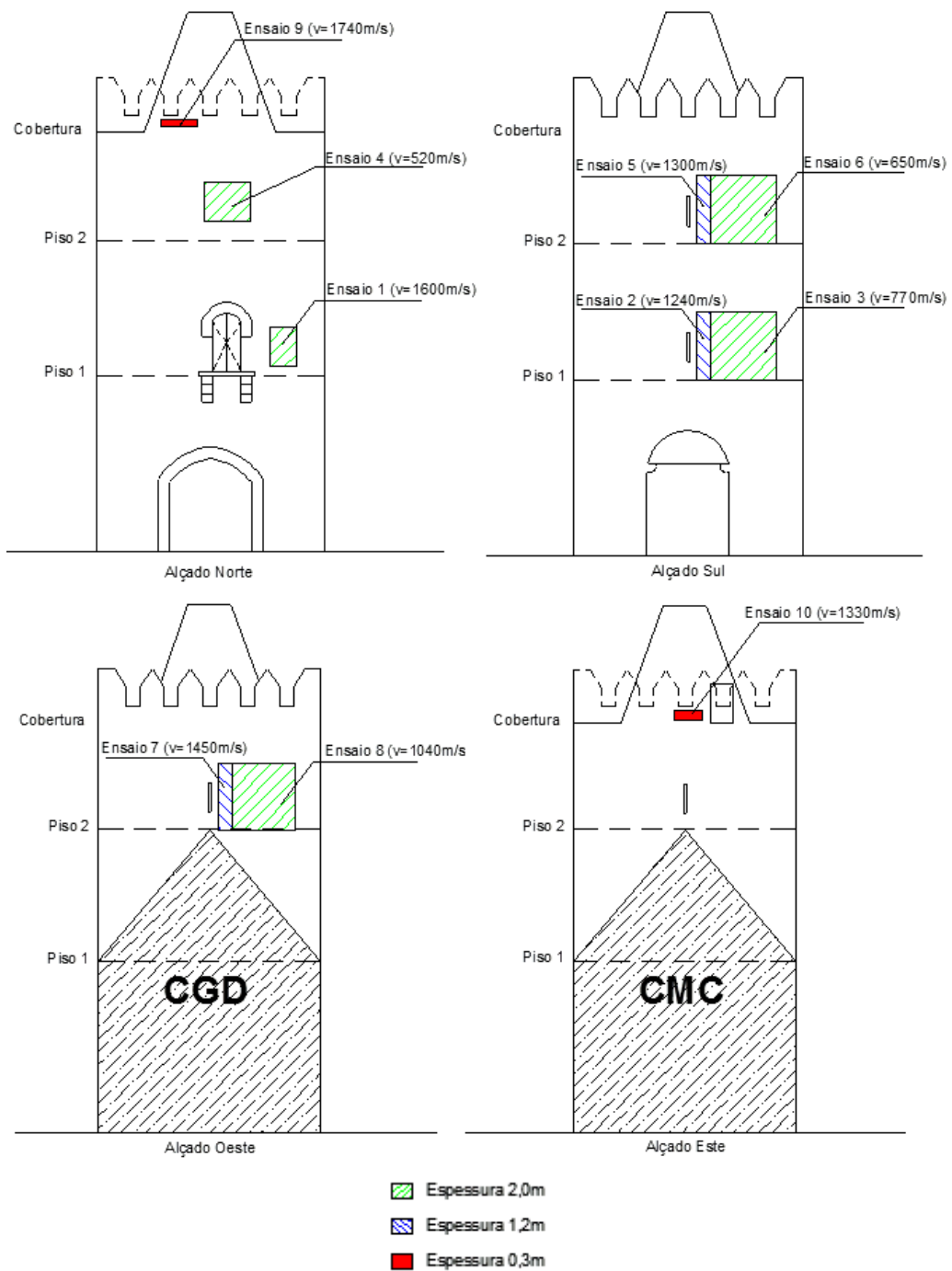


Figura 4.33 – Localização dos ensaios realizados.

Resultados e Conclusão

As velocidades de referência do granito da torre, obtidas através das leituras nas pedras da cobertura (ensaios 9 e 10), são as mais elevadas, com valores entre os 1300m/s e os 1700m/s. Em termos médios, as velocidades obtidas foram as seguintes: 1531m/s para os elementos com 0.3m de espessura, 1326m/s para os elementos com 1.2m de espessura e 915m/s para os elementos com 2m de espessura. Assim, os elementos mais espessos (2.0m) devem ter duas folhas, enquanto os elementos com 1.2m e 0.3m apenas devem contar com uma folha. O Quadro 4.11 apresenta uma síntese das velocidades obtidas nos ensaios realizados.

Quadro 4.11 – Síntese dos ensaios realizados.

Ensaio	Local	Orientação	Espessura (cm)	Nº de Pontos	Nº de testes	Vmédia (m/s)	σ
1	Piso 1	Norte	200	12	2	1645 - 1580	301 - 208
2	Piso 1	Sul	120	12	2	1222 - 1249	293 - 283
3	Piso 1	Sul	200	36	1	765	122
4	Piso 2	Norte	200	4	2	575 - 448	227 - 84
5	Piso 2	Sul	120	12	1	1297	246
6	Piso 2	Sul	200	12	1	646	60
7	Piso 2	Oeste	120	12	1	1448	254
8	Piso 2	Oeste	200	12	1	1040	129
9	Cobertura	Norte	30	1	4	1735	42
10	Cobertura	Este	30	1	3	1328	77

A primeira conclusão que se retira da análise dos resultados é que, quanto mais espesso é o elemento, tendencialmente menor é a respectiva velocidade. Este resultado era espectável, uma vez que a probabilidade de um elemento contar com um maior número de juntas, vazios ou material de pior qualidade no interior (factor responsável pelo abaixamento da velocidade) é tendencialmente maior quanto maior for a sua espessura. Apenas o ensaio 1 (espessura de 2.0m e velocidade média de cerca de 1600m/s) não segue a tendência referida. O facto deste ensaio ter sido realizado junto à ombreira da abertura do piso 1 da fachada Norte, uma zona presumivelmente maciça, explica o valor mais elevado.

O facto de haver uma redução da velocidade nos elementos mais espessos, indicia que o material de enchimento tem características piores do que os panos exteriores de alvenaria. Ainda assim, o simples facto de o sinal conseguir atravessar a parede significa que os elementos dos dois panos se encontram, de alguma forma, ligados pela camada de enchimento.

Ainda com base nos resultados do Quadro 4.11 e na Figura 4.33, conclui-se não existir uma relação directa entre as velocidades médias obtidas e a cota a que foi realizado o ensaio. O granito, parece ter as mesmas características, independentemente da orientação. Contudo, analisando os elementos que, presumivelmente, têm camada de enchimento, ou seja 2m de espessura, verifica-se que é na fachada Norte que a propagação das ondas atinge menor velocidade. Este resultado vai de encontro aos indícios retirados da observação visual a que se fez referência e que constava dos relatórios de inspecção realizados pelo NCREP: a fachada Norte conta com material mais irregular e de aparente menor qualidade. Também numa zona da fachada Sul foi detectada uma velocidade consideravelmente baixa que também sugere a existência de material de pior qualidade na camada de enchimento. O mesmo tipo de análise confirma que a fachada Oeste é a que se encontra em melhor estado de conservação.

4.5.2 Edifício do Largo dos Lóios

Introdução

O edifício que se apresenta de seguida localiza-se no Largo dos Lóios, no Porto, e funcionava como edifício de habitação e comércio. Possui paredes resistentes, na sua maioria de alvenaria de pedra, e pavimentos de madeira; em planta apresenta uma configuração em L e desenvolve-se ao longo de 4 pisos: rés-do-chão e três andares. Na Figura 4.34 apresenta-se uma imagem do exterior do edifício e uma planta esquemática, evidenciando o local em que foram realizados os ensaios sónicos.

À data da realização dos ensaios sónicos, o edifício estava a ser reabilitado. Os ensaios sónicos realizados distinguem-se dos realizados na Torre do Relógio de Caminha, já que utilizam a técnica ISIM. Note-se que as paredes-mestras do edifício apenas tinham uma face acessível pelo que, neste caso apenas se poderiam realizar ensaios do tipo indirecto.

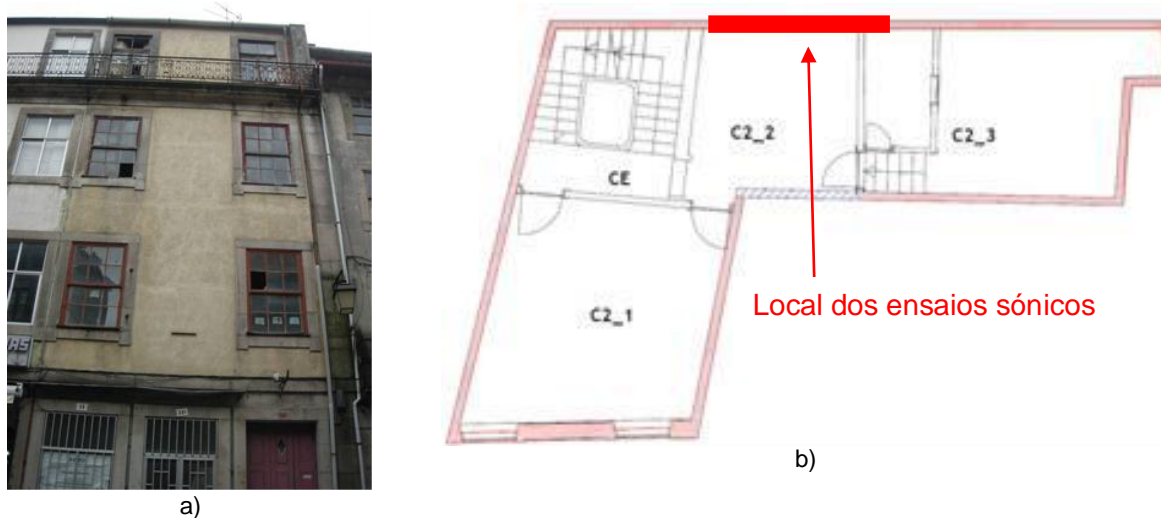


Figura 4.34 – Edifício do Largo dos Lóios: a) vista da fachada principal; b) planta esquemática do rés-do-chão.

Procedimento

Foram então realizados ensaios sónicos indirectos utilizando a técnica ISIM ao longo de 6 colunas, no sentido descendente, no local assinalado a vermelho na Figura 4.34. Para a sua execução foi utilizada uma grelha de 6x6 pontos espaçados na horizontal cerca de 40cm entre si, e na vertical cerca de 30cm. Assim, testou-se uma “janela” com 2.0m de comprimento por 1.5m de altura. Dada a rigidez do espaçamento dos pontos da grelha, alguns deles foram posicionados sobre a superfície de juntas que se apresentavam sólidas e possuíam dimensões elevadas. A Figura 4.35 apresenta os pontos utilizados nos ensaios sónicos.



Figura 4.35 – Local e pontos testados.

Na Figura 4.36 apresentam-se as velocidades das ondas P e R obtidas nas 6 colunas testadas. Verifica-se que essas velocidades se concentram no intervalo de $V_p=1000\text{m/s}$ a $V_p=1200\text{m/s}$ e $V_r=400\text{m/s}$ a $V_r=600\text{m/s}$.

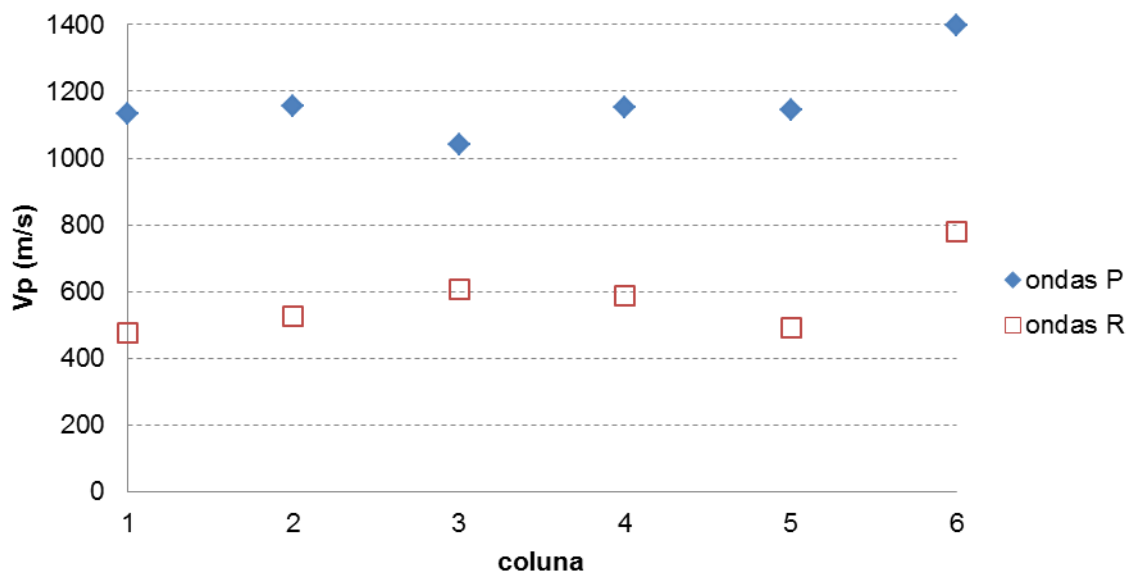


Figura 4.36 – Velocidade das ondas P obtida nas leituras em colunas, linhas e diagonais.

Utilizando os valores médios de cada tipo de onda ($V_p=1171\text{m/s}$ e $V_r=577\text{m/s}$), através da Equação 2.18 e da Equação 2.19 e adoptando uma massa volúmica de $\rho=2400\text{kg/m}^3$ e um coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$, obteve-se um módulo de elasticidade de $E=2.7\text{GPa}$ (ondas P) e de $E=2.4\text{GPa}$ (ondas R). Estes resultados serão objecto de discussão e comparação com os dos ensaios de macacos planos, no Capítulo 6.

O tratamento de resultados do ensaio não foi fácil. As dificuldades notadas poderiam ter sido minimizadas caso se tivesse adoptado uma distribuição de pontos posicionados apenas no centro das pedras, caso do Ponto 4.3. O ensaio realizado num edifício da rua Mouzinho da Silveira, que se apresenta de seguida, contemplou esse cuidado.

4.5.3 Edifício de Mouzinho da Silveira

Introdução

O edifício da rua Mouzinho da Silveira apresenta planta rectangular com cerca de $(20 \times 6)\text{m}^2$ com pavimentos em madeira. Da sua estrutura fazem parte as paredes resistentes em alvenaria de pedra de granito que atingem uma altura de 18m e uma espessu-

ra de cerca de 30cm, medida no topo da parede. Na Figura 4.37 apresenta-se uma vista da fachada e uma vista em planta do edifício.

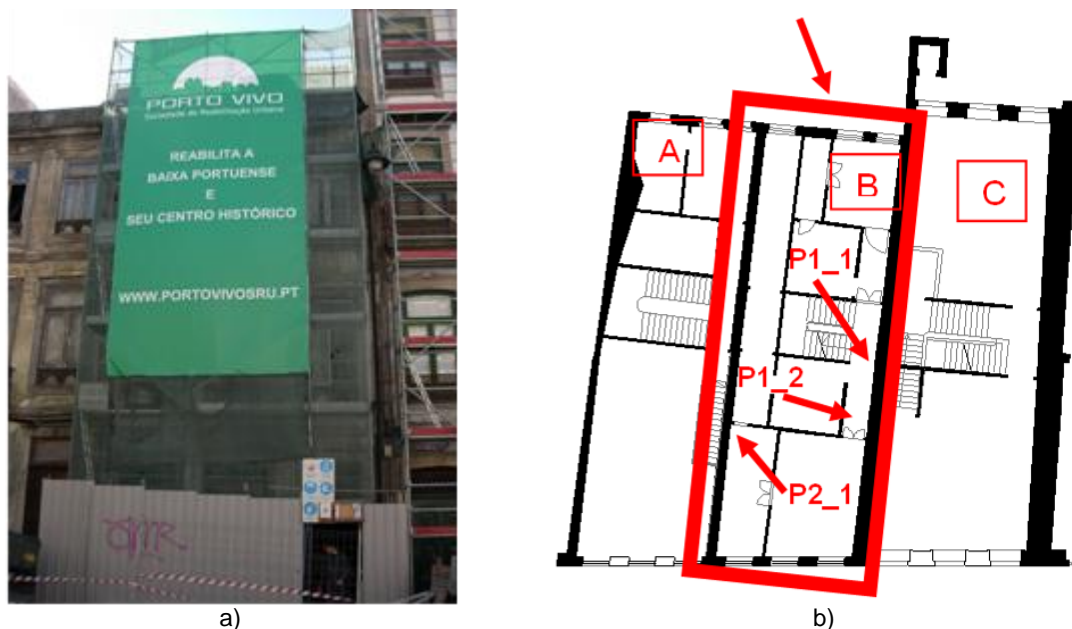


Figura 4.37 – Edifício de Mouzinho da Silveira (B): a) fachada na altura de intervenção; b) vista em planta.

À data da realização dos ensaios, o imóvel, assinalado como B, na Figura 4.37 b), encontrava-se em obras de demolição dos elementos interiores. Os pavimentos de madeira estavam a ser sucessivamente desmontados, restando apenas o patamar de arranque das escadas e as paredes resistentes. Como se pode verificar através da planta do edifício (Figura 4.37 b)), as paredes laterais do edifício B são mearas e não se teve acesso aos paramentos dos edifícios A e C (Figura 4.37). Assim, foi impossível utilizar ensaios directos para a caracterização dessas alvenarias.

Procedimento

Os ensaios tiveram lugar nas duas paredes de maior dimensão do edifício e que se encontram assinaladas na Figura 4.37 b). Nos três locais testados foram marcados 36 pontos, dispostos em 6 linhas e 6 colunas e espaçados cerca de 30cm entre si, em média, colocados preferencialmente sobre a superfície das pedras.

Por se ter acesso apenas a um dos paramentos das alvenarias, optou-se pela realização de ensaios indirectos seguindo a técnica ISIM para a determinação da velocidade. O valor do módulo de elasticidade obtido através dos ensaios sónicos foi confrontado com o que se obteve através de um ensaio com macacos planos realizado no troço P2_1, que será apresentado no Capítulo seguinte.

Na Figura 4.38 apresentam-se imagens dos três locais testados (P1_1; P1_2 e P2_1) com os pontos utilizados devidamente assinalados. Realça-se para a elevada dimensão das pedras existentes.

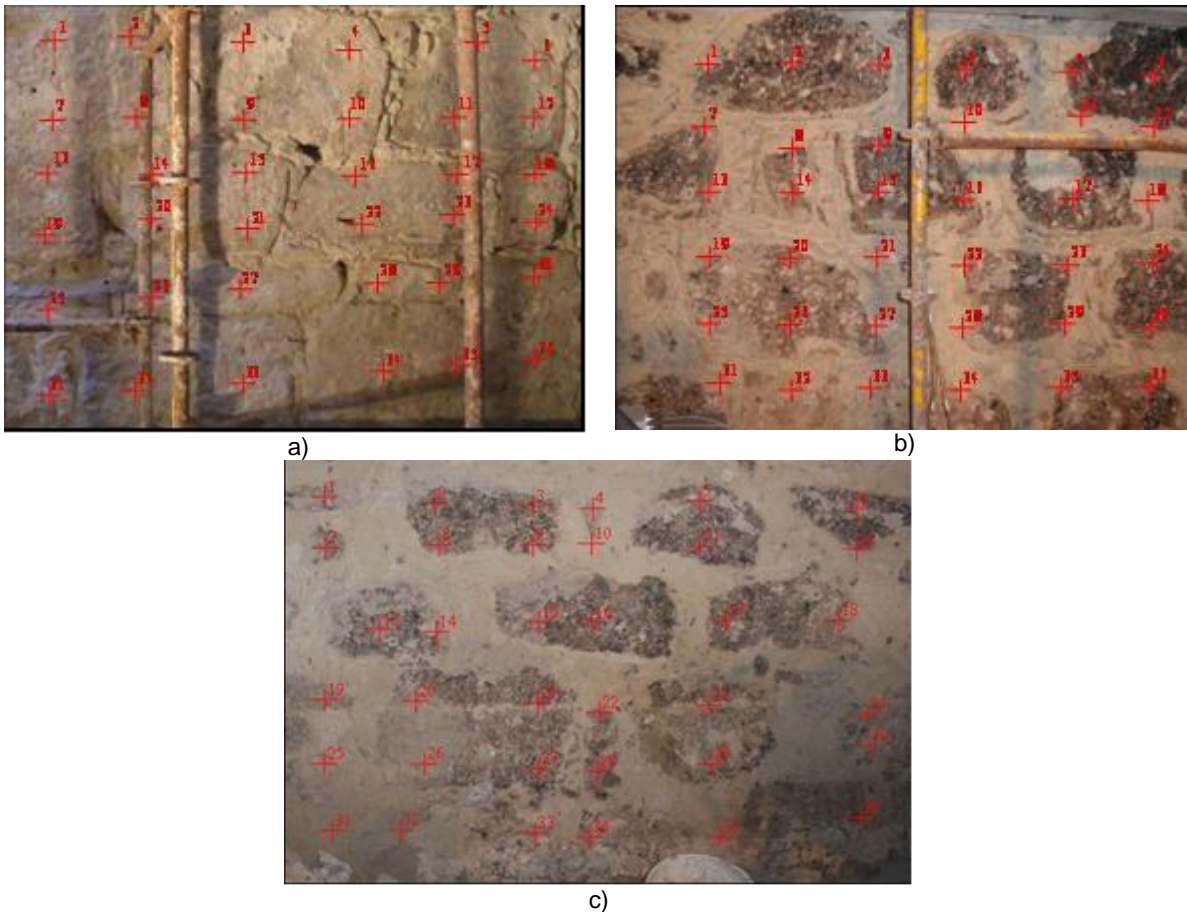


Figura 4.38 – Locais adoptados para a realização dos ensaios: a) P1_1; b) P1_2, c) P2_1.

Resultados e Conclusões

Os três locais foram testados segundo colunas com impacto no ponto superior e recepção nos pontos inferiores. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 4.39. Embora se tenham realizado ensaios em locais diferentes, apresenta-se o conjunto de resultados obtidos no mesmo gráfico.

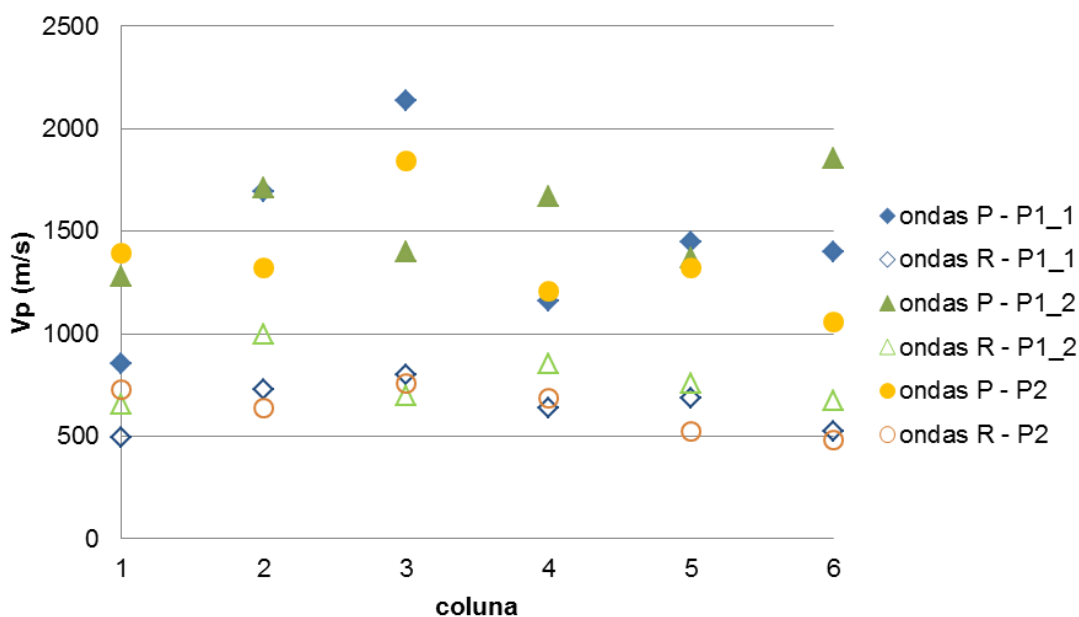


Figura 4.39 – Velocidades das ondas P (formas cheias) e R (formas vazias) obtidas nos três locais testados.

Como se pode verificar pela observação do gráfico da Figura 4.39 a velocidade das ondas P apresenta valores consideravelmente mais dispersos do que a velocidade das ondas R. A coincidência das velocidades obtidas leva a crer que os locais testados têm as mesmas características, facto que se considera normal tendo em conta que se referem ao mesmo edifício.

Os valores das velocidades permitiram calcular o módulo de elasticidade dos locais testados. Para isso, adoptou-se a massa volúmica de $\rho=2400\text{kg/m}^3$ e o coeficiente de Poisson de $\nu=0.25$ e utilizou-se a velocidade média das ondas R - $V_r=684\text{m/s}$ - pelas razões já referidas anteriormente em diversas ocasiões; nestas condições, o módulo de elasticidade obtido através da Equação 2.19 foi $E=3.3\text{GPa}$. Por curiosidade foram realizados ensaios indirectos sobre pedras e determinou-se uma velocidade de propagação que variava entre $V_r=900\text{m/s}$ e $V_r=1425\text{m/s}$. Os resultados obtidos através dos ensaios sónicos serão comparados com os resultados obtidos através da técnica de macacos planos no Capítulo 6.

4.6 CONCLUSÃO

No presente capítulo apresentou-se uma técnica de caracterização de alvenarias, que se designou de ISIM. Este método, baseado num ensaio indirecto, tinha em conta a contribuição das pedras e das juntas (em simultâneo) na determinação da velocidade das ondas P e R. A determinação destes dois tipos de ondas é feita com base em alguns critérios que visam dar mais robustez ao método. Essa técnica foi aplicada em diferentes

situações, em laboratório e in-situ. No LESE estudaram-se paredes de diferentes tipologias (regular, semi-regular e irregular). Verificou-se que o ISIM é sensível aos diferentes tipos de parede e que à medida que a irregularidade da alvenaria aumenta o módulo de elasticidade que lhe está associado também aumenta. Os resultados obtidos foram muito semelhantes aos de um estudo realizado em laboratório sobre provetes de pedra e junta, de tipologias comparáveis (regular; irregular).

Ainda em laboratório e aproveitando três painéis de parede retirada de um edifício e transportada para o LESE, no âmbito de outra tese de doutoramento, realizaram-se ensaios sónicos de acordo com a técnica ISIM antes e depois da execução de ensaios mecânicos destrutivos (ensaios de compressão e de corte). As velocidades obtidas nos três painéis foram coerentes entre si, o que era de esperar, uma vez que os painéis faziam parte da mesma alvenaria, e foram convertidas em módulos de elasticidade cuja ordem de grandeza era semelhante à dos módulos de elasticidade obtidos através dos ensaios de compressão realizados. Neste âmbito avaliou-se ainda a influência de ensaios mecânicos destrutivos – ensaios de corte em PG1 e PG2 e ensaio de compressão em PP2 – nos resultados da velocidade das ondas elásticas.

Em PP2, antes do ensaio de carga, o módulo de elasticidade calculado com base nos ensaios sónicos, embora fosse da mesma ordem de grandeza, era superior ao estático na zona de carga. A justificar esta situação parece estar o facto de a parede, quando se encontrava in-situ, ter estado submetida a cargas superiores ao seu peso próprio, consistindo o ensaio sónico num teste em situação de recarga da parede. Contudo, a zona da recarga na curva tensão-extensão resultante do ensaio de carga não era assinalável. Durante o ensaio de carga, foi registado um forte aumento da velocidade das ondas P e após o ensaio de carga um valor intermédio.

Ainda no painel PP2 foram realizados ensaios directos em pedras e indirectos ao longo de colunas, antes, durante e após um ensaio de carga. Verificou-se um abaixamento da velocidade das ondas P nas pedras de cerca de 18% durante o teste. Esse valor foi irreversível já que se manteve após o ensaio de carga.

Os ensaios de corte realizados sobre PG1 e PG2 reflectiram-se nas velocidades das ondas elásticas, fazendo baixar a velocidade de propagação das ondas em 40% e 20%, respectivamente. Esta situação foi causada pela abertura de fendas que está associada a este tipo de ensaios. Ainda assim, verificou-se que em alguns casos essa velocidade se manteve aproximadamente constante.

Para além dos ensaios realizados em ambiente laboratorial, no presente Capítulo também se apresentaram ensaios sónicos in-situ. Esses ensaios foram realizados com diferentes objectivos e, quase sempre, enquadrados em estudos mais alargados. Os três casos de estudo apresentados representam uma evolução:

- ✓ no primeiro (Torre do Relógio) aplicou-se a técnica de ensaios que, embora permita obter resultados úteis, se trata de uma técnica de caracterização qualitativa. Foi possível identificar os elementos que possuíam uma folha e, avaliar o estado da camada de enchimento dos locais que se estimava possuírem duas folhas;
- ✓ no segundo caso (Largo dos Lóios), aplicou-se o ensaio num local sem que se tenha tido o cuidado de utilizar pontos de ensaio colocados apenas na superfície de pedras. Verificou-se que nos pontos em que o impacto ou a recepção se dava sobre juntas, havia uma maior dificuldade em identificar a chegada das ondas P e R;
- ✓ no terceiro caso (Mouzinho da Silveira), a técnica foi utilizada em 3 locais e verificou-se uma grande coerência entre os resultados.

Com o estudo apresentado demonstrou-se a aplicabilidade do ensaio sónico, não só do ponto de vista qualitativo como do ponto de vista quantitativo, já que produz resultados da mesma ordem de grandeza dos obtidos através de ensaios mecânicos destrutivos. Este método precisa que mais testes sejam realizados de forma a consolidar a sua aplicabilidade. Verificou-se haver uma muito maior uniformidade de resultados para as ondas R do que para as ondas P. Essa uniformidade, dá maior confiança na utilização das ondas R no cálculo das grandezas mecânicas resultantes dos ensaios sónicos. Contudo, as ondas P devem ser utilizadas para ajudar na validação dos resultados.

Apesar dos resultados apresentados serem muito próximos dos determinados através de ensaios mecânicos destrutivos, o método apresentado – ISIM - não dispensa a realização de ensaios de outro tipo. Pelo contrário, é importância contrapor os resultados do ensaio ISIM com ensaios de outros tipos, tendo a noção de que todos estes procedimentos não estão isentos de erros ou de interpretações menos correctas.

CAPÍTULO 5

ENSAIO COM MACACOS PLANOS

5.1 INTRODUÇÃO

A caracterização em laboratório de alvenarias existentes torna necessária a recolha de amostras de dimensões elevadas que traduzam a respectiva heterogeneidade. Deve-se recorrer a amostras com pelo menos 4 ou 5 fiadas de alvenaria (Rossi, 1985), o que torna a sua recolha difícil senão, na maior parte das vezes, inviável por razões diversas: intrusividade, complexidade. O ensaio com macacos planos é uma opção bem menos intrusiva que permite determinar in-situ a tensão instalada e as características de deformabilidade de uma alvenaria. A realização de um ensaio com macacos planos envolve apenas a execução de rasgos de pequena dimensão e espessura.

Um macaco plano é um aparelho constituído por duas chapas metálicas sobrepostas soldadas ao longo das extremidades formando um reservatório fechado, o qual possui um orifício de comunicação com o exterior que se liga a uma bomba hidráulica responsável pela injeção de óleo para o interior do macaco. Essa injeção faz com que o macaco aumente de volume na direcção perpendicular ao seu plano. A pressão aplicada ao macaco plano é transmitida às superfícies do elemento que com ele contactam. Na Figura 5.1 apresenta-se um macaco plano a ser introduzido numa parede de alvenaria.

A técnica de ensaio com macacos planos é das poucas que permite a determinação do módulo de elasticidade de uma alvenaria in-situ, havendo por isso interesse em utilizá-la e, se possível, melhorá-la. Embora hoje em dia se aplique em alvenarias, o ensaio com macacos planos teve origem no âmbito da Mecânica das Rochas. De seguida apresenta-se o seu desenvolvimento, com vista a explicitar a sua adaptação para as paredes de alvenaria e a justificar alguns procedimentos do ensaio.



Figura 5.1 – Colocação do macaco plano numa parede de alvenaria.

5.2 DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA

A técnica de macacos planos, como actualmente é conhecida, é fruto da evolução de um ensaio proveniente da Mecânica das Rochas realizado com os mesmos fins. De acordo com essa configuração, era realizado um rasgo no terreno, conseguido através da execução de orifícios consecutivos com cerca de 5cm de espessura. Após essa operação, o macaco era introduzido e o contacto com o material a testar (rocha) era conseguido através da introdução de uma argamassa. No procedimento existente era salientada a morosidade e perturbação significativa do terreno envolvente ao local do teste, de um modo tal que se questionava a representatividade do ensaio (LNEC, 1970).

No final da década de 1960 o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) introduziu alterações que vieram melhorar consideravelmente a técnica existente à data (LNEC, 1970), promovendo: (a) a redução significativa do dano causado pelo teste na zona envolvente; (b) a estimativa mais precisa das quantidades estimadas; (c) uma importante redução do tempo requerido para a realização do teste.

O macaco plano, até então de secção rectangular, passou a ser semi-circular e passou a ajustar-se perfeitamente ao rasgo realizado com um equipamento concebido no LNEC. Além desta vantagem, esse equipamento permitia realizar cortes com uma profundidade superior a metade do diâmetro do disco, embora isso fosse conseguido à custa da perturbação da parte central do corte, como sugere a Figura 5.2 b).

Os avanços introduzidos pelo LNEC foram patenteados (Patente número 46483) em 1967 pelo LNEC. Na Figura 5.2 apresentam-se algumas imagens das inovações então promovidas.

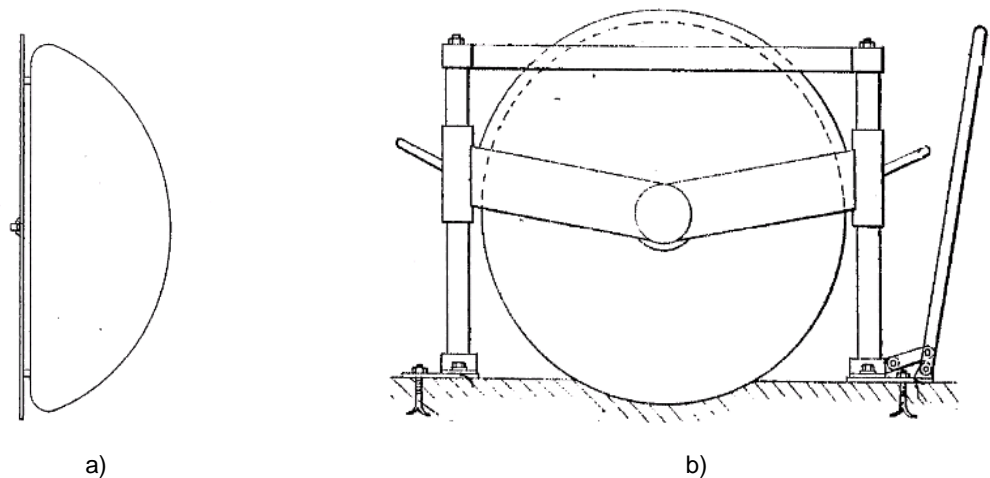


Figura 5.2 – Desenhos do LNEC (LNEC, 1970): a) macaco plano; b) máquina de corte.

A transposição da técnica de macacos planos para as alvenarias deu-se em 1980, quando P. Rossi, que trabalhava na mecânica das rochas, publicou um trabalho onde, pela primeira vez, se referia a utilização de macacos planos em alvenarias (Rossi, 1982). As motivações que levaram Rossi a adaptar a técnica dos macacos planos às alvenarias foram apresentadas numa conferência internacional no ano de 1985 (Rossi, 1985). Nesse documento é claro o alvo privilegiado para a realização do ensaio com macacos planos: a alvenaria de tijolo. Esta preocupação reflectiu-se mais tarde na elaboração das normas para a execução do ensaio com macacos planos (ASTM, 1991, RILEM, 1990, RILEM, 2004b).

A contribuição de Rossi não se cingiu à transposição do método da mecânica das rochas para as alvenarias. A relevância do completo trabalho de calibração que Rossi realizou, é motivo suficiente para que os seus primeiros passos sejam descritos, de seguida, com algum detalhe. De facto, os ensinamentos que se podem retirar desses trabalhos são, ainda hoje, úteis.

Rossi apresentou duas variantes do ensaio com macacos planos aplicado a paredes de alvenaria: ensaio simples e ensaio duplo. O ensaio simples permite determinar a tensão in-situ da alvenaria e utiliza um macaco plano. Baseia-se na descompressão provocada pela realização de um corte na alvenaria onde, de seguida, se insere um macaco plano no qual é injectado óleo até que a geometria original da parede seja recuperada. O estado de tensão in-situ é calculado a partir da pressão registada no macaco plano.

Após a realização do ensaio simples, é realizado um segundo corte paralelo ao primeiro e um segundo macaco plano é introduzido. Os dois macacos planos delimitam um troço de parede de dimensões apreciáveis em que um ensaio de compressão simples é realizado. São impostos ciclos carga/descarga através da injeção de óleo no interior dos dois macacos planos, em simultâneo, sendo as deformações obtidas através de

LVDTs colocados na vertical e horizontal entre os macacos. Aplicam-se cargas crescentes que possibilitam o conhecimento das curvas de deformabilidade do material, permitindo o conhecimento do módulo de elasticidade em carga, descarga e recarga. Estes dois tipos de ensaios serão aprofundados na secção 5.3.

A validação do ensaio simples foi realizada por Rossi, que o calibrou aplicando uma carga conhecida a painéis de alvenaria de grandes dimensões. Foram utilizados macacos planos com 40x20cm² tendo-se testado três painéis de alvenaria com as mesmas características mas sujeitos a diferentes níveis de carregamento. O Quadro 5.1 apresenta as cargas instaladas nos painéis de alvenaria e as cargas determinadas através do ensaio simples com macacos planos, que eram muito próximas das primeiras.

Quadro 5.1 – Síntese do estudo realizado sobre diferentes painéis (Rossi, 1985).

N.º	Tensão aplicada (MPa)	Tensão medida (MPa)	Erro (%)
1	0.75	0.66	-12.0
2	1.50	1.55	3.3
3	2.25	2.16	-4.0

O ensaio simples, através da determinação do estado de tensão in-situ, provou ser capaz de detectar também a existência de carregamentos excêntricos numa alvenaria (Rossi, 1987). A Figura 5.3 apresenta as conclusões retiradas de um estudo em que foi analisada esta possibilidade. Numa alvenaria sujeita a um carregamento excêntrico a realização de dois ensaios com macacos planos simples, um em cada um dos alçados, forneceu valores diferentes do estado de tensão. O erro associado à sua determinação foi, nos dois casos, residual: 2.00MPa em vez de 1.95MPa e 0.36MPa em vez de 0.45MPa. Os resultados demonstram a utilidade do ensaio simples na detecção de excentricidades em alvenarias. O mesmo tipo de teste foi feito com uma alvenaria de arenito e voltou-se a verificar uma boa correspondência entre os valores teóricos e os valores obtidos.

De modo a avaliar a influência da dimensão do macaco plano nos resultados obtidos, utilizou-se, no mesmo trabalho, um quarto painel de características idênticas aos anteriores. Desta vez, recorreu-se a um macaco plano de dimensões mais reduzidas (24x12cm²). Os resultados obtidos não demonstraram diferenças significativas já que, para uma tensão aplicada de 1.5MPa, foi determinada, através da técnica de macacos planos, a tensão de 1.61MPa (por oposição aos 1.55MPa, obtidos utilizando macacos planos de 40x20cm², ver Quadro 5.1).

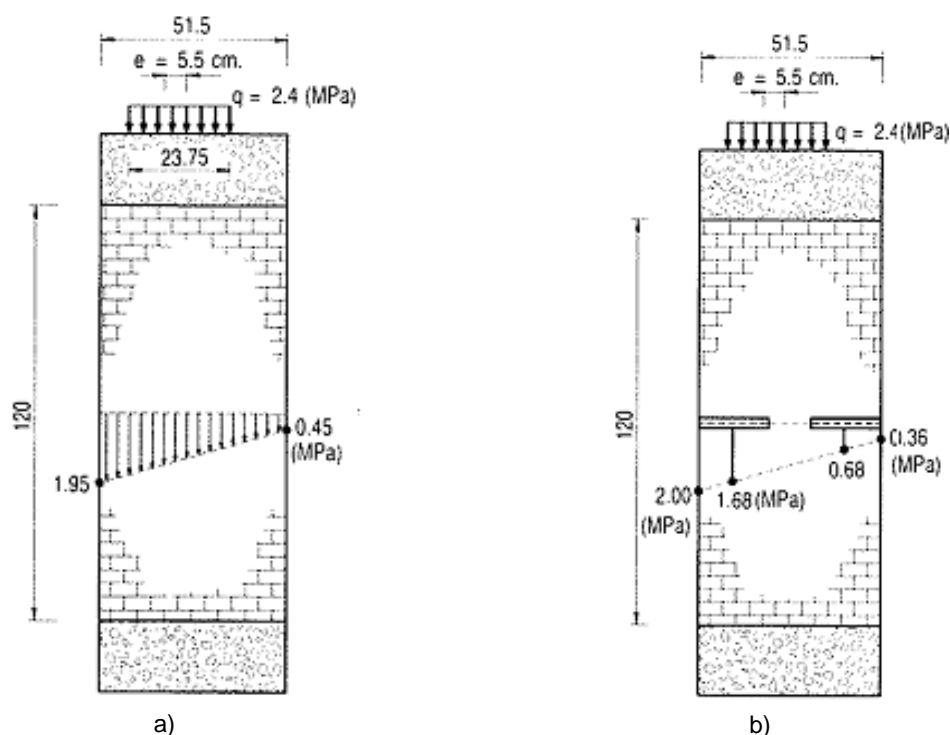


Figura 5.3 – Estudo sobre estrutura sujeita a cargas excêntricas (Rossi, 1987): a) cargas efectivamente existentes; b) cargas aferidas através do ensaio com macacos planos simples.

Refira-se que a utilização de macacos planos de diferentes dimensões foi também alvo de estudo noutros ensaios, ainda no ano de 1983 (Binda, et al., 1983). Sobre uma parede de um claustro, que se pensava não apresentar carregamentos excêntricos, foi observada uma relativa concordância, entre os resultados dos macacos:

- ✓ 40 x 20 cm – 1.04MPa;
- ✓ 24 x 12 cm – 1.12MPa;
- ✓ 12 x 12 cm – 1.17MPa.

Embora não se tenham verificado grandes diferenças nos resultados dos ensaios simples utilizando macacos planos de diferentes dimensões, no caso dos ensaios duplos tal não sucedeu. Em ensaios realizados com macacos planos de diferentes dimensões, 40x20cm² e 24x12cm², e com tensões aplicadas que se elevaram aos 3MPa os resultados obtidos foram extremamente diferentes. Ensaios de carga realizados indicaram um melhor desempenho do macaco plano de maior dimensão. Verificou-se assim que a dimensão dos macacos planos é importante para a obtenção de melhores resultados. Com o tempo, identificaram-se as dimensões mais indicadas para cada tipo de parede de alvenaria.

A título de curiosidade apresenta-se, na Figura 5.4, o esquema de ensaio utilizado na calibração do ensaio simples e do ensaio duplo.

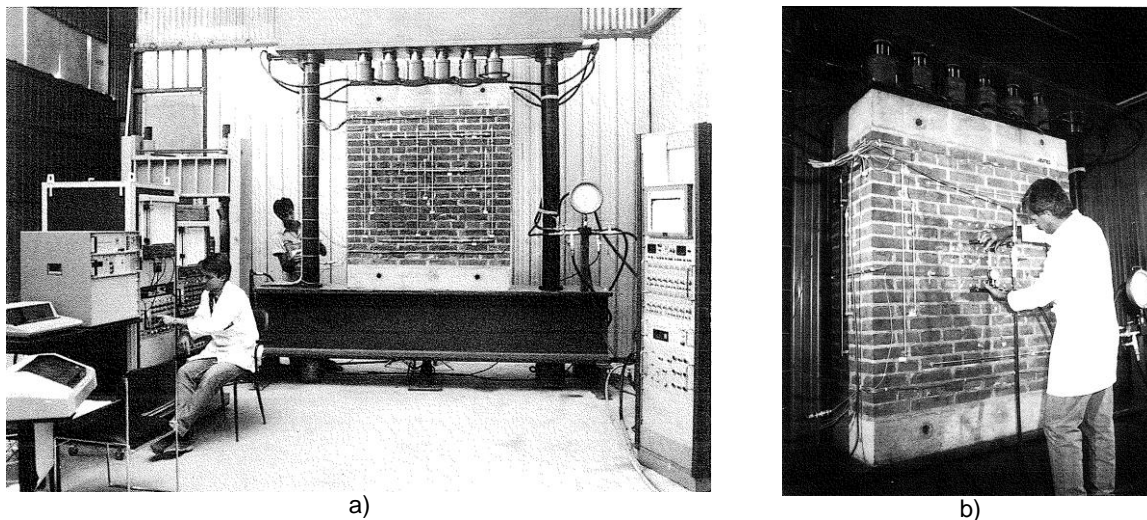


Figura 5.4 – Esquema de ensaio utilizado na calibração dos macacos planos por Rossi (Rossi, 1985): a) ensaio simples; b) ensaio duplo.

Os trabalhos em que se utilizou a técnica de macacos planos aumentaram exponencialmente com o tempo, uma vez que era reconhecida a grande importância desta técnica na determinação do comportamento mecânico do material, sem que para isso fosse necessário extrair qualquer tipo de amostra (Binda, et al., 1983). Em 1987, Rossi apresentava um outro trabalho, mais completo, onde sintetizava a experiência obtida através da realização do teste em mais de 30 monumentos. Se dúvidas houvesse quanto a exatidão do trabalho realizado com macacos planos, essas dúvidas ficariam desfeitas com a leitura da comunicação produzida a esse respeito (Rossi, 1987).

Ainda na década de 1980 existem exemplos de aplicação do ensaio a edifícios de alvenaria de tijolo, de alvenaria de pedra, alvenarias mistas com tijolo e pedras vulcânicas, entre outros. Em edifícios altos, o método foi utilizado para verificar as tensões in-situ a diferentes níveis (alturas) (Ronca, et al., 1997).

Nos parágrafos anteriores pretendeu-se, de uma forma simples, dar uma ideia acerca das possibilidades dos ensaios de macacos planos. Na secção 5.3 apresentam-se os dois tipos de ensaios de macacos planos de um modo mais pormenorizado.

5.3 FASES DO ENSAIO COM MACACOS PLANOS

5.3.1 Ensaio simples

O ensaio simples com macacos planos contempla três fases que se ilustram na Figura 5.5 e se descrevem de seguida:

- ✓ fase 1 – escolha da zona de corte para introdução do macaco plano e marcação de 4 alinhamentos verticais (Binda ; Tiraboschi, 1999) a interceptar a zona de corte, relativamente aos quais se medem as distâncias entre os pontos extremos, ou de referência, indicados por pequenos quadrados na Figura 5.5 a);
- ✓ fase 2 - realização do corte no local assinalado a amarelo na Figura 5.5 a); o local sofre uma descompressão e, como resultado, os pontos de referência aproximam-se (Figura 5.5 b)), efectuando-se nova leitura da distância entre os pontos de referência;
- ✓ fase 3 – colocação do macaco plano no rasgo e injeção de pressão com o objectivo de repor o estado de deformação da parede, num processo gradual (Figura 5.5 c)) que termina quando a leitura das distâncias entre os pontos de referência alcançam os valores iniciais. A pressão aplicada ao macaco plano nesse momento corresponde à tensão de compressão instalada no local.

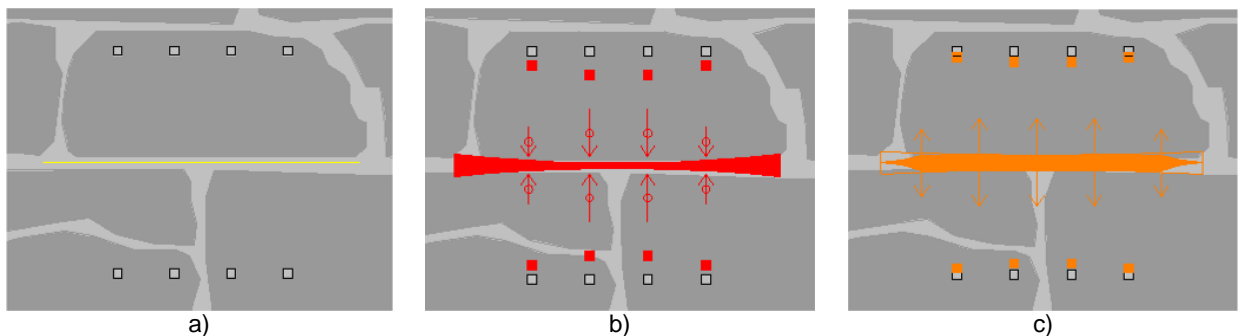


Figura 5.5 – Ilustração das 3 fases do ensaio simples (vista de frente da parede): a) antes do corte; b) depois do corte; c) aplicação de pressão no macaco.

A pressão é aplicada no macaco por patamares, realizando-se uma leitura das distâncias entre os pontos de referência em cada patamar. Note-se que na fase 3 e antes de se iniciar a injeção de óleo para o interior do macaco, é importante ajustá-lo à superfície do corte, aplicando-lhe metade da pressão que se estima existir no local, descarregando-o logo de seguida. A título de exemplo, apresenta-se, na Figura 5.6, a realização de uma medição.

A pressão lida pelo utilizador durante a realização do ensaio (pressão do fluido no interior do macaco) não é exactamente a que é efectivamente aplicada na alvenaria já que o valor lido pelo manómetro à saída da bomba hidráulica não tem em consideração a rigidez do macaco plano, nem a diferença entre a área do macaco plano e a área da superfície serrada (área do corte).

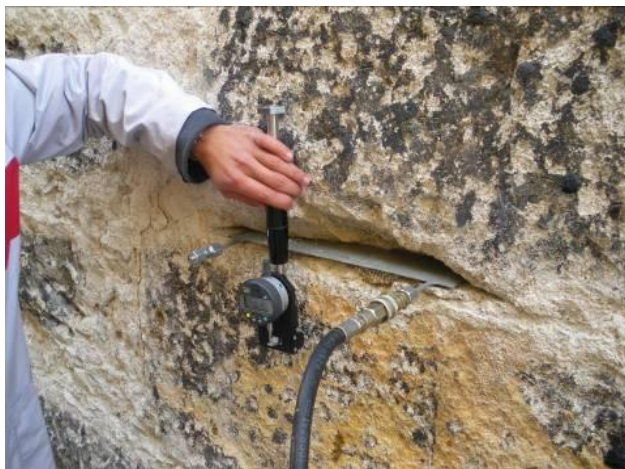


Figura 5.6 – Execução de um ensaio simples.

A avaliação da influência da rigidez de um determinado macaco plano é realizada colocando o macaco plano entre dois pratos rígidos (que simulam o rasgo num teste real) instrumentados por uma célula de carga. De seguida, é aplicada pressão no macaco plano, cujo valor se determina à saída da bomba hidráulica ($P_{\text{bomba_hidráulica}}$). Esta pressão é comparada com a pressão lida pela célula de carga ($P_{\text{célula_de_carga}}$) que monitoriza a pressão entre os dois pratos rígidos, dando origem a um coeficiente designado k_m obtido através da Equação 5.1.

$$k_m = \frac{P_{\text{célula_de_carga}}}{P_{\text{bomba_hidráulica}}} \quad 5.1$$

Por outro lado, se a área de corte for superior à área do macaco plano (o que é relativamente frequente de forma a facilitar a entrada do macaco plano no rasco) a zona de descompressão da alvenaria é maior do que a prevista e, por isso, o macaco plano tem que mobilizar uma maior quantidade de alvenaria. De forma a ter este facto em consideração, aplica-se à pressão lida um coeficiente (k_a) no qual se supõe que a força aplicada pelo macaco se encontra distribuída por toda a superfície do corte. Ao contrário do coeficiente k_m , determinado em laboratório, a determinação de k_a é feita in-situ dividindo a área de contacto do macaco plano (A_m) pela área do corte (A_c).

$$k_a = \frac{A_m}{A_c} \quad 5.2$$

Tanto k_a como k_m apresentam um valor inferior a 1, contribuindo assim para reduzir a pressão (P) exercida no interior do macaco plano que passa assim a ser representada pelo valor efectivamente aplicado pelo macaco à alvenaria (P_{ef}). A expressão que se utili-

za para o cálculo da tensão instalada in-situ de uma alvenaria é apresentada na Equação 5.3:

$$P_{ef} = k_m k_a P \quad 5.3$$

Como se referiu, o ensaio com macacos planos simples permite obter o estado de tensão de compressão existente num elemento, neste caso numa parede de alvenaria. A Figura 5.7 ilustra os resultados obtidos num ensaio simples.

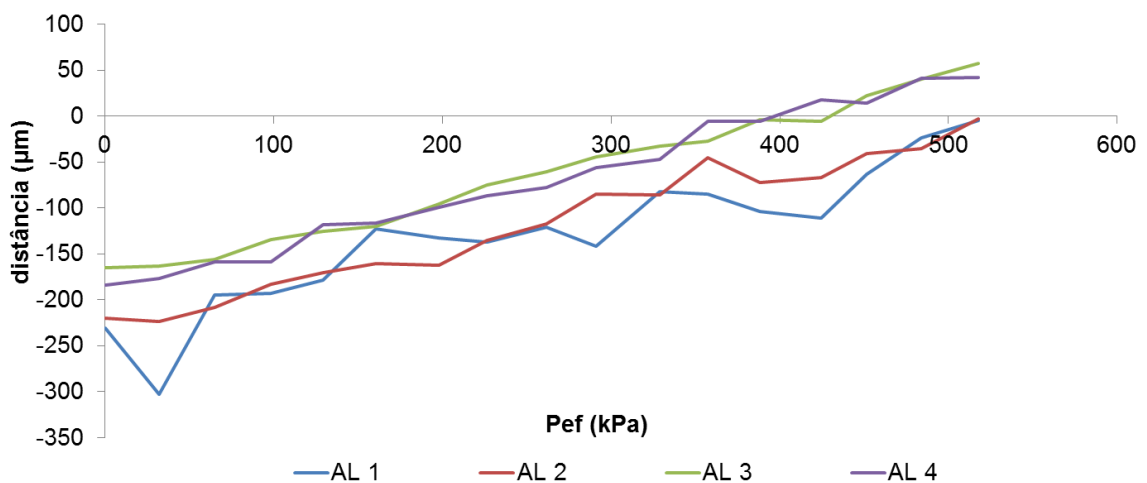


Figura 5.7 – Resultados obtidos num ensaio simples: evolução da distância entre os pontos de referência de cada alinhamento vertical em função da pressão efectiva instalada na parede.

Na Figura 5.7 pode-se ver a evolução da distância entre os pontos de cada um dos 4 alinhamentos verticais de referência para cada incremento de pressão. Repare-se que para a pressão zero (após o corte) a distância entre os pontos de cada alinhamento se reduz; a cada incremento de pressão essa distância tende a aumentar e o ensaio pára quando se atinge a distância zero em todos os alinhamentos (altura em que a situação inicial é reposta). Finalmente, estima-se o valor médio da pressão que produziu o equilíbrio nos 4 alinhamentos e que, no caso da Figura 5.7, é de 466kPa.

A execução do ensaio simples é manual, cabendo ao utilizador registar a pressão, lida no manómetro e as distâncias entre os pontos de referência lidas no deformómetro. O ensaio duplo recorre a um procedimento mais automatizado envolvendo a utilização de um sistema de aquisição, como se apresentará de seguida.

5.3.2 Ensaio duplo

O ensaio duplo com macacos planos é normalmente antecedido pelo ensaio simples. Quando aplicado a uma parede de alvenaria, este segundo ensaio permite ao utili-

zador obter as características de deformabilidade, o módulo de elasticidade médio e estimar a resistência à compressão da parede.

O ensaio duplo consiste em comprimir uma zona delimitada por dois macacos planos e monitorizar as deformações impostas pela mesma pressão nesses dois macacos planos. Para isso, é efectuado um segundo corte, superior e paralelo ao primeiro, onde se coloca outro macaco plano. Depois é montado um conjunto de aparelhos de medição de deslocamentos (LVDTs) entre os dois macacos planos, frequentemente 4 na vertical e 1 na horizontal (Binda ; Tiraboschi, 1999). Os dois macacos planos são ligados à mesma bomba manual, de modo a que esta lhes transmita a mesma pressão. A Figura 5.8 ilustra o esquema adoptado em ensaios deste tipo.

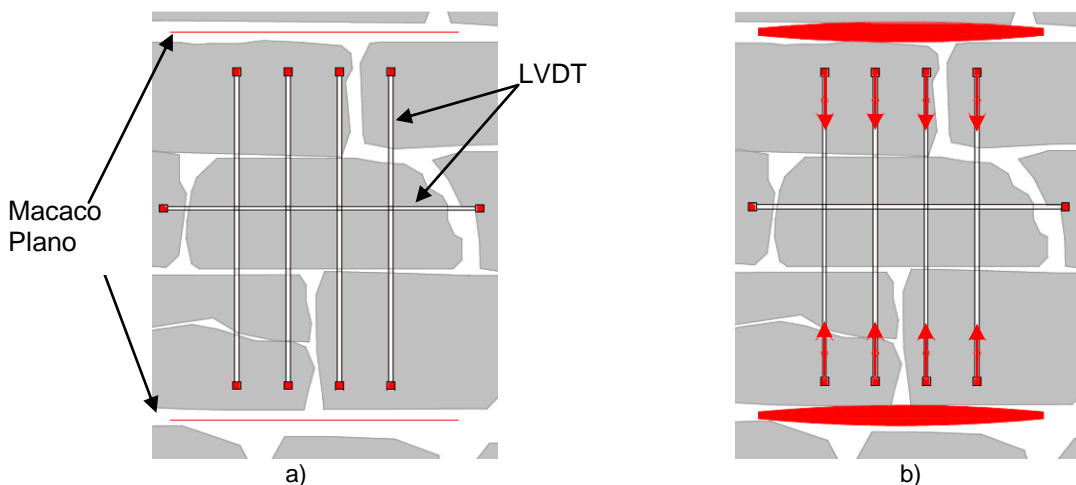


Figura 5.8 – Fases do ensaio duplo: a) situação inicial; b) aumento de pressão simultâneo nos macacos e ilustração do movimento dos LVDT.

A Figura 5.8 b) traduz a deformação provocada na parede pela injeção de óleo, i.e., de pressão nos macacos planos. Este ensaio pode ser encarado como um ensaio de compressão do troço de parede delimitado pelos dois macacos planos. Refira-se que, num estudo realizado com base em modelos físicos e numéricos, se concluiu que, para valores de carregamento reduzidos (<20% da carga última) o efeito do confinamento pode ser desprezado; contudo, para valores de carga mais importantes (<50% da carga última) o módulo de elasticidade da estrutura não confinada é cerca de 10% menor quando comparado com o da estrutura em estado confinado (Binda, et al., 1983). Embora estas conclusões tenham sido retiradas para alvenarias de tijolo, em alvenarias de pedra é expectável que o confinamento da alvenaria tenha o mesmo tipo de influência nos resultados obtidos.

O LVDT horizontal permite estimar um coeficiente de dilatação transversal que pode ser relacionado com o coeficiente de Poisson da alvenaria nas condições do ensaio. Para além disso, este LVDT é um excelente indicador de abertura de fendas e/ou juntas

verticais, ou seja, da ocorrência de dano na porção de parede comprimida entre macacos.

O ensaio duplo é monitorizado com o auxílio de um sistema de aquisição ligado a um computador portátil que armazena os dados provenientes: (a) da célula de pressão instalada à saída da bomba manual, que indica a pressão exercida no interior dos macacos; (b) dos LVDTs, que indicam os movimentos de cada um dos alinhamentos apresentados na Figura 5.8. Na Figura 5.9 apresenta-se uma imagem da execução de um ensaio duplo.



Figura 5.9 – Material utilizado num ensaio duplo: a) conjunto dos aparelhos utilizados; b) pormenor do local do ensaio.

A conjugação de todos os dados permite desenhar gráficos tensão-deformação do “provete” localizado entre os dois macacos planos. No caso do ensaio duplo com macacos planos, a quantidade de informação retirada é substancialmente superior à do ensaio simples, uma vez que determina a curva de comportamento do material na direcção vertical. A título de exemplo, na Figura 5.10 apresenta-se um gráfico obtido num ensaio realizado num edifício localizado na rua Mouzinho da Silveira, no Porto.

Este exemplo será descrito mais à frente pelo que, nesta secção não se apresenta uma explicação detalhada dos resultados obtidos. Contudo, é interessante notar que o LVDT5 (colocado na horizontal), ao contrário dos restantes LVDTs, apresenta tracções, dando importantes indicações do comportamento da alvenaria durante o desenrolar do teste, em particular sobre o instante relativo à abertura de fissuras e/ou juntas verticais que se traduzem no aumento acentuado da taxa de deformação deste LVDT (linha horizontal na Figura 5.10).

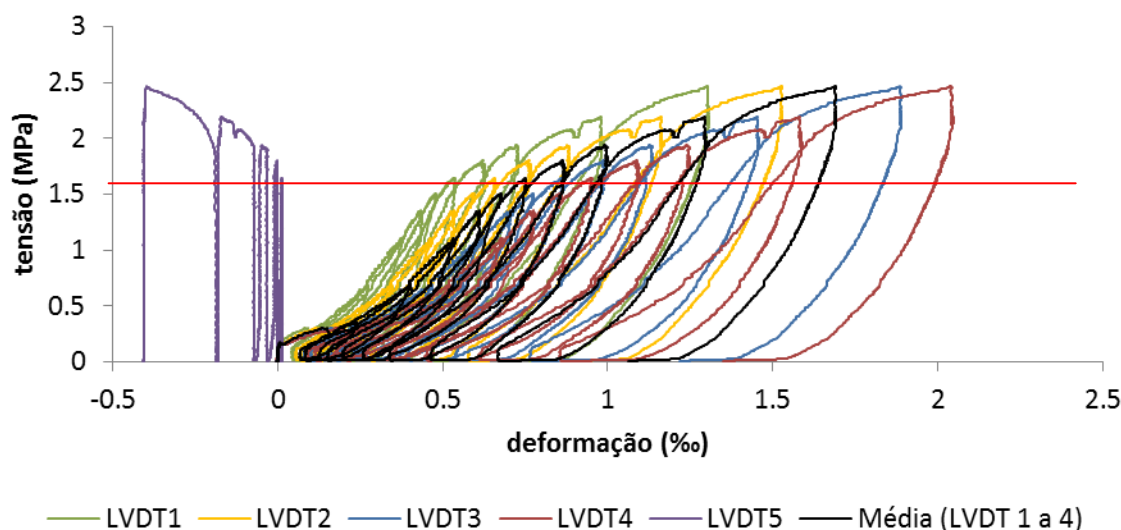


Figura 5.10 – Gráfico “tensão vs deformação” obtido num ensaio duplo.

Na realização do ensaio duplo utiliza-se um software desenvolvido no âmbito da presente dissertação e implementado pelo LESE. Este programa permite visualizar a evolução do gráfico apresentado em tempo real, assim como gravar toda a informação.

5.4 AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL ENVOLVIDO NUM ENSAIO DUPLO COM MACACOS PLANOS

No ano de 2008 realizaram-se ensaios em edifícios do Museu da Ciência e Tecnologia de Leonardo da Vinci, em Milão, com o objectivo de avaliar a integridade das suas alvenarias. Estes estudos foram realizados pelo grupo de investigação da Professora Luigia Binda e acompanhados pelo autor da presente dissertação.

Os edifícios testados foram construídos pelas tropas de Napoleão funcionando na altura como cavaliariças. Durante a II Guerra Mundial foram bombardeados, o que causou grande parte da degradação que apresentavam. Em dois desses edifícios, designados de “Siloteca” e “Cavallerizze” foram realizados ensaios com macacos planos duplos, em que se monitorizou a distribuição das deformações induzidas na zona da alvenaria localizada na área externa ao material delimitado pelos macacos planos (Acito, et al., 2008).

Nos ensaios foram utilizados macacos planos semi-circulares, com 30cm de comprimento e pouco mais de 25cm de profundidade. A alvenaria testada é composta por tijolo bem aparelhado e por juntas de argamassa de cal com cerca de 15 a 20mm.

Na “Siloteca” para além da instrumentação que usualmente é adoptada, utilizou-se um total de 13 LVDTs, cuja distribuição se apresenta na Figura 5.11. Os objectivos desse ensaio foram perceber de que forma a tensão induzida pelos macacos planos se distribui na parede.

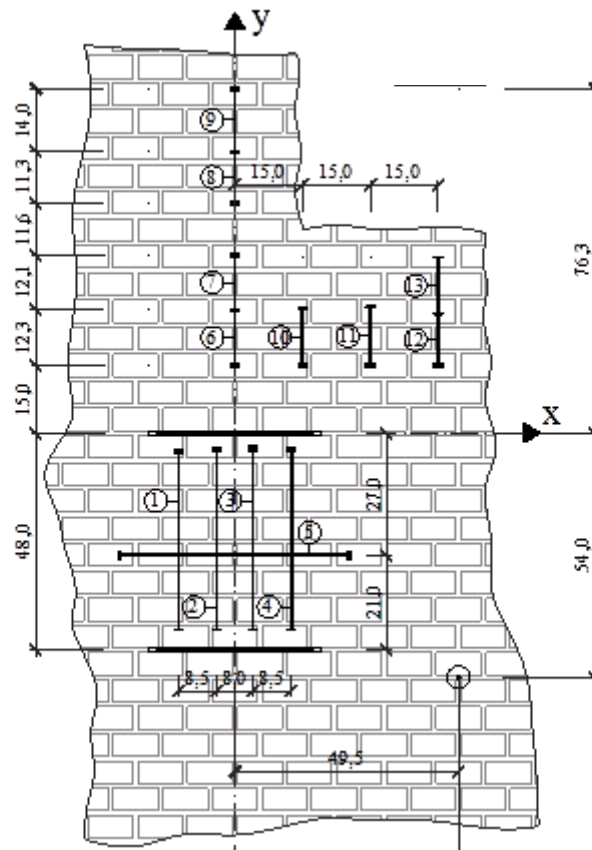


Figura 5.11 – Distribuição dos LVDTs no ensaio realizado no Museu da Ciência e Tecnologia em Milão (Acito, et al., 2008).

O Quadro 5.2 apresenta as deformações observadas ao longo do eixo vertical (ϵ_{yy}) nos LVDTs 6,7,8 e 9 em comparação com a média das deformações dos LVDTs 2 e 3 ($\epsilon_{(2+3)/2}=3.5\mu\text{m}/\text{mm}$) orientados na vertical e colocados entre os dois macacos planos (Figura 5.11). Verifica-se que os LVDTs colocados na vertical (eixo dos yy) acima dos macacos planos apresentam deformações que rapidamente decrescem em altura, mas que, ainda assim, se fazem notar no LVDT mais distante do macaco plano e que se localizava a cerca de 70cm do macaco plano posicionado no corte superior.

Ao longo da diagonal no lado superior direito do macaco plano superior, nos LVDTs 11 a 13 foram detectadas trações que, embora decrescessem para um valor pouco significativo na zona do LVDT 13, mostraram que o volume de alvenaria envolvido num ensaio duplo de macacos planos é significativamente superior ao volume de alvenaria que se situa no alinhamento vertical confinado à dimensão dos macacos planos.

Quadro 5.2 – Redução da deformação medida ao longo do alinhamento vertical (ϵ_{yy}) (Acito, et al., 2008).

LVDT	Distância desde o corte superior (cm)	ϵ_{yy} ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	$\epsilon_{yy}/\epsilon_{(2+3)/2}$ (%)
06	21.15	3.60	102
07	33.35	1.24	35
08	56.65	0.64	18
09	69.30	0.45	13

Além dos LVDTs apresentados na Figura 5.11, foram colocados 4 LVDTs na face da alvenaria oposta à do ensaio e que permitiram concluir não existirem deformações claras nessa zona.

Tendo em conta os resultados do primeiro ensaio, no edifício designado de “Cavalerizze”, não foram considerados os 4 LVDTs na face oposta à do ensaio, mas na face principal adoptaram-se mais 8 LVDTs do que no teste na “Siloteca”. A Figura 5.12 apresenta a nova distribuição de LVDTs, salientando as alterações em relação ao ensaio anterior. Fundamentalmente, aumentou-se a zona monitorizada acima do macaco plano superior para cerca de 1m, colocando dois novos LVDTs (14 e 15). Além disso procurou-se perceber qual a abertura induzida na zona adjacente aos macacos planos como resultado da respectiva aplicação de pressão, colocando-se os LVDTs 16,17 e 18. Colocou-se ainda o LVDT21, orientado na vertical, de modo a perceber-se o que se passava na extremidade da zona localizada acima do macaco plano superior. Finalmente, foram colocados dois LVDTs na horizontal (19 e 20) para se perceber se a tensão induzida pelos macacos na alvenaria provocava compressões horizontais no material posicionado nas zonas laterais à coluna definida pelos macacos planos.

Durante o ensaio os LVDTs 19 e 20 indicaram a existência de compressões na direcção horizontal, na zona envolvente à zona comprimida pelos macacos planos. Essas deformações foram superiores na zona mais próxima dos macacos planos (LVDT 19). Verificou-se, como no caso anterior, que os LVDTs colocados acima do macaco plano superior (LVDTs 6 e 7) apresentaram resultados muito semelhantes aos LVDTs colocados entre os macacos planos (LVDTs 2 e 3).

Ao longo da diagonal na zona acima e à direita do macaco plano superior, identificaram-se tracções nos LVDTs 17,11 e 13. Com o decorrer do ensaio verificou-se a formação de uma fenda que se propagava aproximadamente a 45° e que se desenvolvia ao longo de 0.5m medidos na direcção vertical desde a extremidade do macaco plano. Este facto significa que a contribuição da alvenaria no ensaio duplo não se limita à coluna de

material definida pelos dois macacos planos, mas a uma largura que pode ser superior a 4 vezes a largura do macaco plano.

Verificou-se ainda que acima do macaco plano superior se registaram compressões aproximadamente constantes nas zonas de leitura dos LVDTs, 6 e 10.

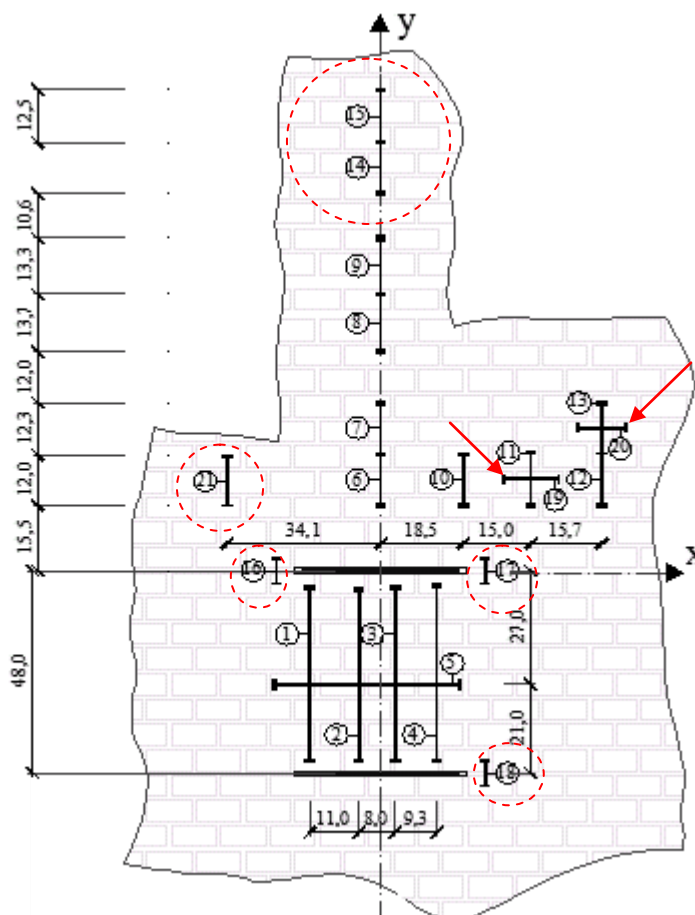


Figura 5.12 – Distribuição de LVDTs no segundo teste (“Cavallerizze”) (Acito, et al., 2008).

Embora os ensaios de macacos planos não tenham sido concebidos para esse fim, no ensaio do edifício “cavallerizze” atingiu-se a tensão de rotura da alvenaria. Esta situação foi possível devido ao facto do projecto de intervenção contemplar a demolição na zona do local estudado. Na “Siloteca” tal não foi possível devido a uma rotura registada num macaco plano. A Figura 5.13 apresenta algumas imagens do estado final da alvenaria deste último caso.



Figura 5.13 – Aspecto da alvenaria no final do teste: a) abertura de fendas junto ao macaco plano inferior; b) aspecto da alvenaria na zona subjacente ao macaco plano inferior (Acito, et al., 2008).

Essa rotura teve lugar na zona subjacente ao macaco plano inferior o que originou a perda de rigidez dessa zona, ou seja e tal como se pode observar no gráfico da Figura 5.14, a redução das deformações dos LVDTs verticais colocados entre os macacos planos resultante do “desvio” do macaco plano inferior para a zona em rotura.

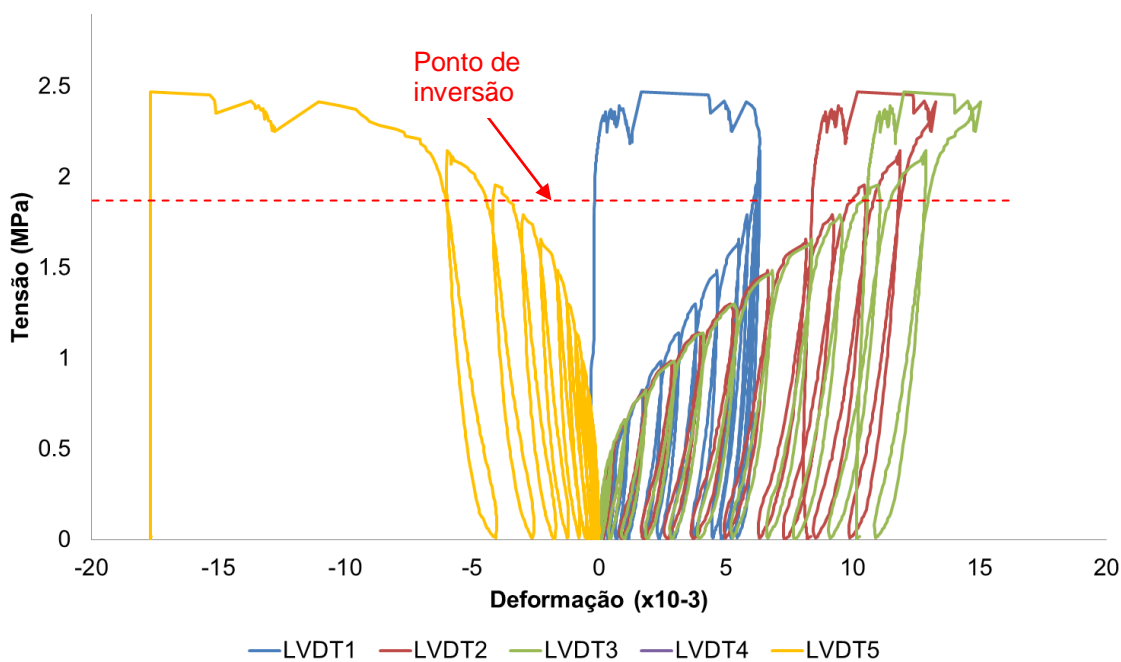


Figura 5.14 – Gráfico tensão vs extensão obtido no edifício “Cavallerizze” (Acito, et al., 2008).

A modelação numérica realizada por Acito (Acito, et al., 2008), veio confirmar as observações efectuadas in-situ. De facto, o volume de parede que tem influência num ensaio de macacos planos atinge uma extensão considerável, como se ilustra na Figura 5.15. Por outro lado, o modelo também sugeriu que as repercussões do ensaio na face oposta à da realização do corte para introdução do macaco plano, são mínimas.

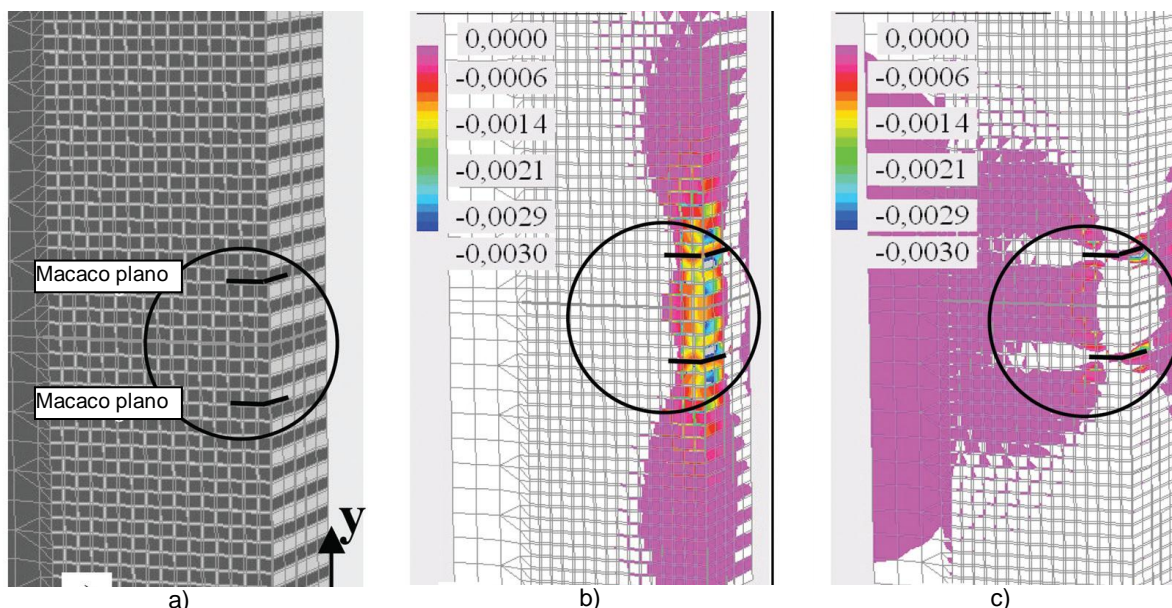


Figura 5.15 – a) modelo não-linear adoptado; b) deformações na direcção vertical; c) deformações na direcção horizontal (Acito, et al., 2008).

5.5 NORMALIZAÇÃO

A ASTM (“American Society for Testing Materials”) e a RILEM (“International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures”) desenvolveram normas que regulam a execução dos ensaio com macacos planos simples e duplo (ASTM, 1991, RILEM, 1990). Essas normas estabelecem vários limites para estes ensaios, nomeadamente: as propriedades que o material utilizado deve verificar, as tolerâncias admissíveis para um ensaio ser validado, o procedimento a utilizar na calibração de macacos planos e a definição do coeficiente k_m . Além disso, as normas sugerem que os resultados do ensaio devem apresentar uma variabilidade máxima de 20% no caso do ensaio simples (ASTM, 1991). No caso do ensaio duplo é referida uma sobrestimativa do módulo de elasticidade que pode ir até aos 10% (RILEM, 1990) ou 15% (ASTM, 1997).

Nos ensaios com macacos planos apresentados neste trabalho, nem sempre foi possível respeitar as normas referidas. Logo no início do ensaio, a escolha do local de corte é por vezes difícil, à semelhança do que foi referido noutro estudo realizado sobre alvenarias de xisto (Roque, 2002). De acordo com a norma da RILEM (RILEM, 1990), a distribuição de pedras segundo uma disposição não-simétrica e não-homogénea provoca uma distribuição de tensões não-uniforme, que põe em causa os princípios que servem de base a um ensaio com macacos planos: homogeneidade da alvenaria à volta do local ensaiado; aplicação de uma tensão uniforme à alvenaria pelo macaco plano; e, deformação simétrica da alvenaria em relação ao eixo de corte.

As dimensões do equipamento e do espaçamento a utilizar são também regulamentadas pelas normas referidas. Por exemplo, no caso particular dos macacos planos, existem formas geométricas, cujos 3 tipos principais são o rectangular, o circular e o semi-circular, e dimensões que regulam os equipamentos e que são definidas tendo em conta as dimensões das unidades da alvenaria a testar. Na Figura 5.16 apresentam-se as formas geométricas mais utilizadas na construção de macacos planos.

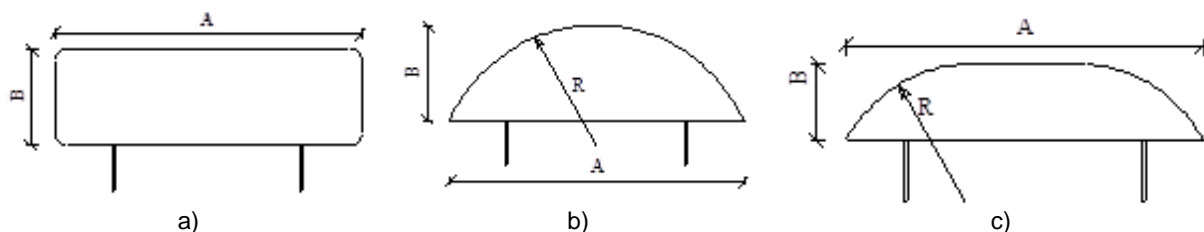


Figura 5.16 – Diferentes tipos de macacos planos (vista esquemática em planta): a) rectangular; b) circular; c) semi-circular.

O Quadro 5.3 faz referência a várias características dimensionais que devem ser respeitadas na realização de ensaios de macacos planos à luz das normas aplicáveis na ASTM e na RILEM.

Verifica-se que o comprimento do macaco plano (dimensão A) deve ser, no mínimo, igual ao comprimento das unidades da alvenaria (ASTM). A irregularidade dimensional dos elementos de várias alvenarias torna difícil a definição do seu comprimento. Para se cumprir a norma da ASTM a dimensão A (ver Quadro 5.3) do macaco plano, no caso das paredes de alvenaria de pedra existentes no Norte do país, por vezes deveria ser próxima de 1m. A utilização de macacos planos com este tipo de dimensões, não só altera o carácter pouco intrusivo do teste, como torna o ensaio de difícil execução. Em algumas alvenarias que se ensaiaram no âmbito da presente dissertação, esta condição não foi respeitada, utilizando-se macacos planos com $A=0.35\text{m}$ em situações em que as dimensões das unidades de alvenaria (pedra) rondavam 1m de comprimento.

Relativamente à profundidade do macaco (dimensão B), esta deve ser no mínimo igual à espessura dos elementos de alvenaria. Note-se, porém, que em paredes semelhantes às dos edifícios testados na presente dissertação, onde a espessura da unidade de alvenaria é igual à espessura total da parede ou de um dos panos da parede, se a dimensão B do macaco plano for superior a essa espessura são induzidas grandes deformações na zona do macaco que sai do pano da parede. Esta situação tem implicações significativas na prática do ensaio e nos resultados que serão discutidas mais à frente.

Quadro 5.3 – Alguns aspectos das normas da ASTM e da RILEM.

Dimensão	ASTM (1991)	RILEM (1990)
A	$A \geq L_{alv} \wedge A \geq 200\text{mm}$	$A \geq 1.5 L_{alv}$ (se $L_{alv} > 200\text{mm}$) $A \geq 2 L_{alv}$ (se $L_{alv} \leq 200\text{mm}$)
B	$\geq P_{alv}$ $\geq 75\text{mm}$	$\geq P_{alv}$
R	Raio do disco da máquina de corte	-
e_{folhas}	0.61 a 1.2mm	0.5 a 1mm
P_{max}	6.9 MPa	6.0 MPa
d_{ref}	(0.3A - 0.6A)	(0.3A - A)
E_{mac}	≥ 5 fiadas de alvenaria $\leq 1.5A$	≥ 5 fiadas de alvenaria (se $H_{alv} \leq 100\text{mm}$); ≥ 3 fiadas de alvenaria (se $H_{alv} \geq 100\text{mm}$); (A - 1.5A) $\geq 2.5B$
C_{lvdt}	(0.75 E_{mac} - 0.9 E_{mac})	(0.75 E_{mac} - 0.9 E_{mac})
$S_{extensómetros}$	0.005% da distância medida	0.0025mm

Onde:

- ✓ A – comprimento do macaco;
- ✓ B – profundidade do macaco;
- ✓ e_{folhas} – espessura das folhas de aço com que se faz o macaco;
- ✓ d_{ref} – distância na vertical entre os pontos de referência no ensaio simples;
- ✓ E_{mac} – espaçamento (medido na vertical) entre os macacos no ensaio duplo;
- ✓ L_{alv} – comprimento de uma unidade de alvenaria;
- ✓ P_{alv} – espessura de uma unidade de alvenaria;
- ✓ H_{alv} – altura de uma unidade de alvenaria;
- ✓ $S_{extensómetros}$ – sensibilidade dos LVDT;
- ✓ C_{lvdt} – comprimento dos LVDT.

No caso dos ensaios simples, a distância vertical entre os pontos de referência do ensaio simples (d_{ref} , no Quadro 5.3) está relacionada com o comprimento do macaco plano (dimensão A) que, por sua vez, se relaciona com as dimensões das unidades das al-

venarias. No caso de pedras de grandes dimensões, apenas um macaco plano com comprimentos iguais ou superiores poderia satisfazer as condições expressas pelas normas apresentadas. A solução talvez passasse por construir macacos planos de dimensões elevadas de modo a assegurar que $A \geq L_{alv}$. Contudo, no caso de se possuir um macaco plano de dimensões muito superiores às unidades de alvenaria, é provável que se registem abatimentos locais que impeçam a realização do teste, como resultado das elevadas dimensões necessárias para a realização do corte. Além disso, é de prever a existência de deformações plásticas que dificultem a remoção dos macacos planos e falseiem os resultados.

Às dificuldades apontadas no parágrafo anterior, acresce o facto de a construção de um macaco plano se revestir de alguma complexidade, em especial na execução das soldaduras, o que, no caso de um macaco plano de grandes dimensões, é um factor ainda mais delicado. Considerando todos estes factores, optou-se por utilizar o macaco plano de dimensões correntes (comprimento 0.35m e profundidade de 0.26m), que se apresentará de seguida, com todas as limitações decorrentes dessa opção.

No caso dos ensaios duplos, as normas preconizam que os macacos planos devem ser espaçados até 1.5 vezes o seu comprimento (dimensão A), o que para pedras de grandes dimensões significa cerca de 2.0m de comprimento. Contudo, a não utilização de macacos planos de grandes dimensões faz com que a distância exigida nunca exceda os 0.53m. No entanto, as normas aplicáveis referem ainda a necessidade de existirem no mínimo entre 3 e 5 fiadas de alvenaria entre os dois macacos, o que, no caso de diversas alvenarias, corresponde a distâncias superiores a 1m.

Em conclusão, as normas em vigor são de difícil aplicação, especialmente em alvenarias com elementos de dimensões elevadas. Ao longo do presente trabalho pretende-se também avaliar a influência do não cumprimento das normas nos resultados obtidos.

5.6 MATERIAL

Para a realização dos ensaios com macacos planos, foram utilizados: (i) uma máquina de corte, (ii) um ou dois macacos planos (consoante o tipo de ensaio), (iii) uma bomba hidráulica manual, (iv) um deformómetro (no ensaio simples), (v) 5 LVDTs (no ensaio duplo) e (vi) um sistema de aquisição (no ensaio duplo).

5.6.1 Macacos Planos

Os macacos utilizados no âmbito do presente trabalho cumprem a norma da ASTM aplicável (ASTM, 1991) e as recomendações RILEM (RILEM). Apresentam uma configuração semi-circular (352x261x4.6mm) e possuem dois orifícios: um para entrada/saída de

óleo e outro para purgar o ar que, inevitavelmente, se encontra no interior do macaco. Na Figura 5.17 apresenta-se uma imagem do macaco utilizado, bem como um desenho esquemático em que se realçam as suas dimensões.

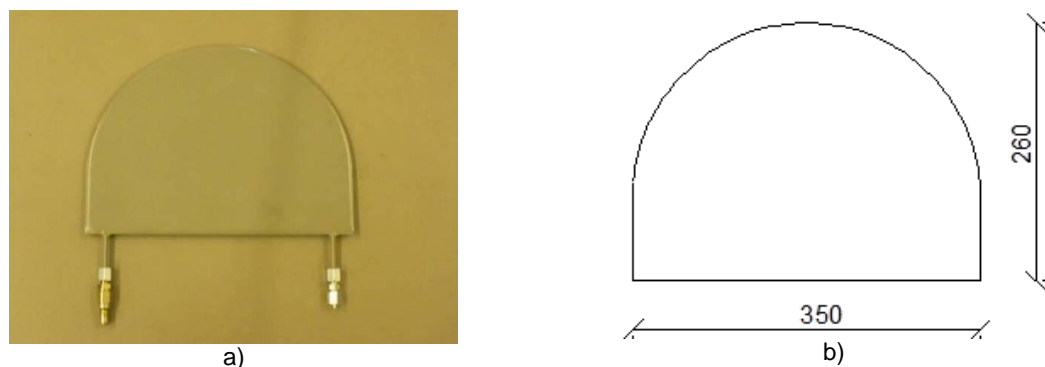


Figura 5.17 – Macaco plano utilizado: a) imagem do macaco; b) esquema com as dimensões do macaco (em milímetros).

Todos os macacos planos utilizados neste trabalho foram calibrados no construtor, havendo ainda o cuidado de, pontualmente, serem realizadas calibrações suplementares no LESE. A Figura 5.18 apresenta o esquema de montagem utilizado na calibração realizada no LESE.



Figura 5.18 – Dispositivo utilizado no teste dos macacos planos em laboratório: a) vista geral; b) pormenor.

O sistema montado para a realização da calibração englobou material disponível no LESE: pórtico de reacção, dois blocos de granito, uma célula de carga (até 200kN), o macaco plano a ser testado e a bomba hidráulica manual. Embora não respeite as normas a que se fez referência anteriormente, esse sistema permitiu ao utilizador ficar com uma ideia do valor do coeficiente k_m e compará-lo com o fornecido pelo fabricante. Em geral, foram confirmados os resultados da calibração previamente realizada.

5.6.2 Máquina de Corte

A máquina de corte utilizada para efectuar o rasgo na parede é uma rebarbadora que possui uma característica particular; apesar dos seus discos terem um diâmetro de cerca de 35cm, é capaz de realizar um corte com uma profundidade de cerca de 30cm, mais de metade do diâmetro do disco. Estas dimensões são particularmente úteis, já que permitem um ajuste quase perfeito aos macacos planos semi-circulares utilizados nos ensaios. Na Figura 5.19 pode ver-se a máquina de corte utilizada.



Figura 5.19 – Aspecto da máquina de corte.

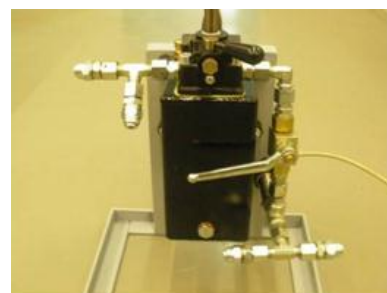
A rebarbadora funciona com um motor a gasolina com 94cc e uma potência de 6.1 cavalos, o que a torna extremamente versátil. A sua maior desvantagem é, sem dúvida, o peso: 13.1kg. O disco da máquina apresentada é, na realidade, um anel suportado por duas guias que o mantêm preso ao corpo da rebarbadora. No âmbito deste trabalho foram utilizados dois tipos de anéis: um com 4.2mm de espessura e outro com 5.6mm de espessura, ambos indicados para material duro (betão, granito).

5.6.3 Sistema hidráulico

O sistema hidráulico utilizado é constituído por uma bomba hidráulica com 25cm³ que é capaz de debitar uma pressão máxima de 350bar e possui um depósito de óleo de 2 litros. Posteriormente à sua aquisição, acoplaram-se na bomba um manómetro/transdutor de pressão e derivações do circuito hidráulico, permitindo assim a conexão simultânea de dois macacos planos. Pode ver-se o equipamento na Figura 5.20.



b)



c)

Figura 5.20 – Bomba hidráulica: a) vista geral; b) pormenor.

5.6.4 Deformómetro e LVDT

Nos ensaios simples foi utilizado um deformómetro com um comprimento base de 300mm. Este equipamento possui um ecrã digital com uma resolução de 0.001mm que assim cumpre largamente as normas (a norma ASTM exige apenas 0.015mm). Com o conjunto foram fornecidos discos de referência com uma depressão convexa que permitem o acoplamento das pontas cónicas do deformómetro.

Uma das ponteiros do deformómetro é fixa e a outra é basculante, o que facilita o ajuste do aparelho a diferentes distâncias (maiores ou menores) do comprimento de referência (300mm). No entanto, esta adaptabilidade apresenta limites que têm a ver com o maior ângulo que a ponteira basculante pode descrever e que corresponde a uma distância de 5mm (+/-2.5mm). O deformómetro utilizado pretende cobrir os casos mais comuns das alvenarias testadas, já que apresenta 0.3m de comprimento. Desta forma fica apto a respeitar as normas para uma gama de comprimentos de pedras que vai desde 0.3m a 1m (ver Quadro 5.3).

Faz parte do conjunto, uma barra de referência/calibração com a mesma dimensão do deformómetro: 300mm. Esta barra, para além de permitir calibrar o deformómetro, ajuda ao posicionamento dos discos de referência. A Figura 5.21, apresenta imagens do conjunto de ferramentas incluídas no deformómetro.

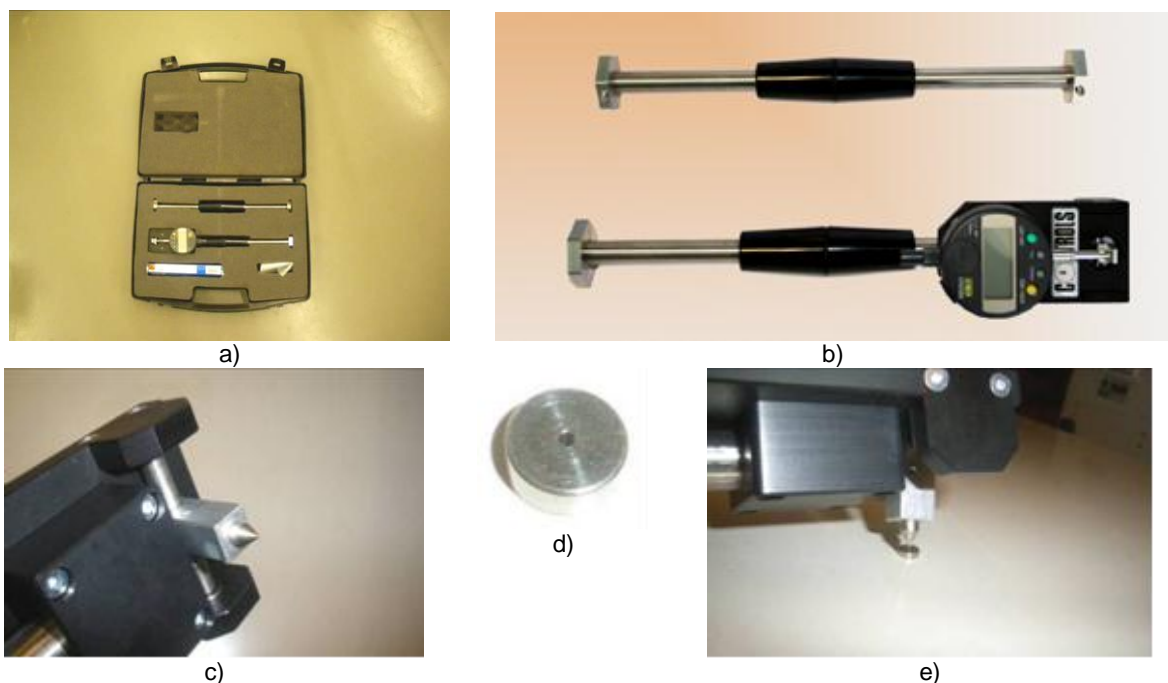


Figura 5.21 – Deformómetro utilizado na medição dos deslocamentos no ensaio com macacos planos simples: a) conjunto fornecido pelo fabricante; b) deformómetro; c) ponta cónica do deformómetro; d) ponto de referência com depressão cónica; e) ponto de referência e deformómetro.

Na realização do ensaio duplo são utilizados LVDTs que dispõem de um curso máximo de 5cm. O LESE foi responsável pela preparação das suas ligações e pela construção de uma protecção física, necessária à boa conservação deste tipo de aparelhos, já que o ensaio com macacos planos pode decorrer em ambientes agressivos. A Figura 5.22 apresenta o aspecto final dos LVDTs utilizados. A caixa construída evita a acumulação de poeiras e confere uma maior resistência a choques mecânicos.



Figura 5.22 – LVDT utilizado: a) aspecto do aparelho adquirido; b) aspecto do aparelho após a preparação realizada no LESE.

5.7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO EM PORTUGAL

A técnica de macacos planos tem grande aplicação na avaliação de alvenarias existentes em países como Itália e Estados Unidos da América. Em Portugal conhecem-se poucos exemplos de aplicação, possivelmente devido ao estado pouco desenvolvido do sector da reabilitação de edifícios no país.

Um dos primeiros trabalhos conhecidos foi realizado na Universidade do Minho, em ambiente laboratorial (Gregorczyk ; Lourenço, 2000). Nesse trabalho faz-se uma síntese do ensaio com macacos planos e discute-se o estado da técnica. A abordagem é sustentada por um ensaio numa alvenaria construída com blocos de “ytong” sujeita a um carregamento controlado, em que se utilizaram macacos planos com $40 \times 10 \times 0.4 \text{ cm}^3$. Em geral, os valores da medição da tensão in-situ eram superiores, em cerca de 20%, à tensão efectivamente existente. Na Figura 5.23 apresenta-se o aspecto do material testado.

No mesmo trabalho foram comparadas duas técnicas de corte: uma utilizando um berbequim e outra utilizando uma rebarbadora. Foi ainda colocada uma folha de papel químico sobre o macaco (envolvida por duas folhas de papel comum) que permitiu, segundo os autores, estimar a área de contacto entre o macaco e a parede. Através da observação dos resultados obtidos por essa via, os autores concluíram que o corte com uma rebarbadora é o mais adequado permitindo um melhor contacto entre a parede e o macaco plano.

Em aplicações com macacos planos in-situ em Portugal, destacam-se as do centro histórico da cidade de Bragança (Roque, 2002), as da Vila de Tentúgal (Pagaimo, 2004) e ainda as do centro histórico da cidade de Coimbra (Vicente, 2009).

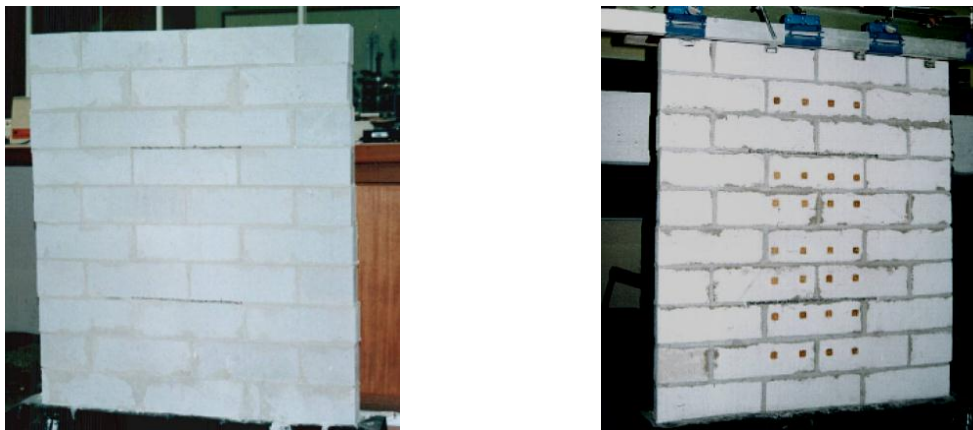


Figura 5.23 – Aspecto do tipo de paredes testadas, posicionamento dos rasgos e colocação dos pontos de referência (Gregorczyk ; Lourenço, 2000).

No caso da intervenção do centro histórico de Bragança (Roque, 2002), é apresentado o estudo de um edifício em que foram realizados três ensaios simples em alvenarias de pedra de xisto ou, menos vulgar, granito, com forma e dimensão irregular (pequena a média). Esses ensaios produziram resultados dentro dos valores esperados, ou seja, para uma tensão prevista de 0.12MPa foram obtidos 0.13MPa (em duas ocasiões) e para uma tensão prevista de 0.07MPa foi obtida uma tensão de 0.09MPa (num caso). Foram também realizados 3 ensaios duplos, sem recurso a sistemas de aquisição, com leituras em cada incremento de 0.05MPa de tensão nos macacos. Os valores obtidos para o módulo de elasticidade foram, em média de 1GPa tendo sido o valor máximo de 2.2GPa e o valor mínimo de 0.3GPa.

Na Vila de Tentúgal (Pagaimo, 2004) a técnica dos macacos planos foi utilizada in-situ com o objectivo de determinar a tensão instalada e o módulo de elasticidade de alvenarias de calcário. Este trabalho apresenta, contudo, algumas particularidades: o incumprimento do afastamento mínimo dos LVDTs às extremidades dos macacos planos, no ensaio duplo; a exclusão dos resultados de determinados eixos por não reflectirem o comportamento dos restantes; a existência de pedras soltas e a desagregação das alvenarias, motivando a anulação de 2 dos 4 ensaios simples realizados; a elevada percentagem de argamassa encontrada nas alvenarias, em média 40%. Estas limitações, traduzem a dificuldade de aplicação do ensaio com macacos planos. No que diz respeito ao ensaio simples, verificou-se uma disparidade importante na tensão estimada/instalada. Em duas ocasiões foram estimados valores da tensão in-situ de 0.08MPa e 0.15MPa; contudo, os valores determinados por via experimental foram um pouco diferentes: 0.20MPa e 0.25MPa, respectivamente. O mesmo trabalho apresenta a realização de 8

ensaios duplos em alvenarias do mesmo tipo mas distribuídos por 5 edifícios diferentes. Obteve-se um módulo de elasticidade médio de cerca de 0.2GPa com um máximo de 0.61GPa e um mínimo de 0.08GPa.

Recentemente, foi aplicada a técnica de macacos planos em 6 edifícios do centro histórico de Coimbra (Vicente, 2009). Com os ensaios pretendeu-se caracterizar as paredes de alvenaria existentes (pedra calcária) constituídas em média por 36% de argamassa, 62.5% de pedra e 1.5% de vazios. Neste trabalho foram utilizados macacos planos com 40cm de comprimento, 10cm de “profundidade” e 4mm de espessura. Nos nove ensaios simples realizados verificou-se uma diferença importante entre os valores estimados e os valores obtidos no ensaio. Quanto ao ensaio duplo, os valores de rigidez inicial obtidos nos nove ensaios (realizados em 6 edifícios diferentes) foram de 2GPa, em média, tendo-se obtido um valor mínimo de 0.2GPa e um máximo de 3.7GPa.

No gráfico da Figura 5.24 apresenta-se a diferença entre os valores estimados e obtidos para a tensão instalada in-situ nos três trabalhos referidos anteriormente. Verifica-se diferenças significativas entre os valores obtidos e estimados por cada autor, não tendo sido possível obter uma tendência clara.

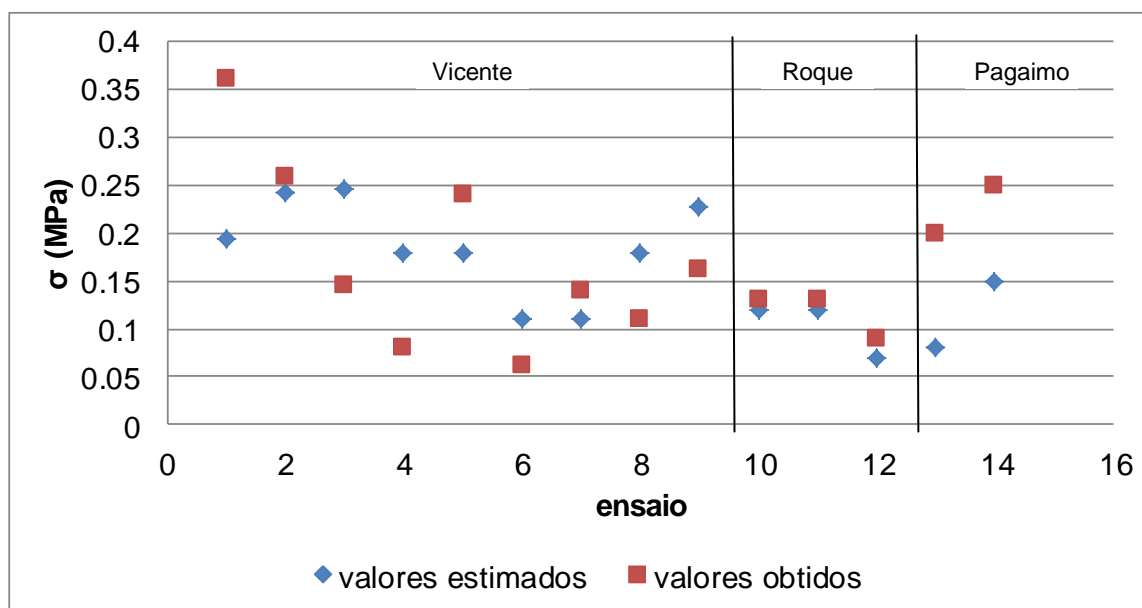


Figura 5.24 – Comparação entre os valores estimados e os valores obtidos em ensaios simples (Pagaimo, 2004, Roque, 2002, Vicente, 2009).

A variabilidade verificada nos resultados do módulo de elasticidade de um edifício e de outros edifícios que, sendo diferentes apresentavam a mesma tipologia, revela a importância de cruzar os resultados obtidos nos ensaios de macacos planos com outro tipo de ensaios que também permitam obter o módulo de elasticidade de alvenarias. As limitações encontradas no ensaio com macacos planos sugerem que os seus resultados de-

vem ser analisados com prudência e enquadrados num programa experimental mais vasto que permita a sua validação.

CAPÍTULO 6

ENSAIOS IN-SITU COM MACACOS PLANOS

6.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo apresenta-se a aplicação da técnica de macacos planos a diferentes edifícios, localizados essencialmente na região Norte de Portugal. A aprendizagem da técnica dos macacos planos foi possível graças a um estágio realizado em Itália, no “Politécnico di Milano”, com o grupo das construções históricas. Este grupo é liderado pela Professora Luigia Binda, que tem uma longa carreira nas áreas do diagnóstico, vulnerabilidade e conservação de edifícios.

No âmbito do referido estágio aplicou-se o ensaio com macacos planos a alvenarias de tijolo. As alvenarias de tijolo têm sido caracterizadas por diversas vezes através de ensaios com macacos planos. Pelo contrário, a caracterização de alvenarias do tipo das testadas no âmbito da presente dissertação não é tão corrente e levantou alguns problemas, já que essas possuem algumas especificidades, como por exemplo pedras com formas irregulares e dimensões elevadas e juntas preenchidas por pequenas pedras que funcionam como calços.

Era importante perceber se o equipamento que tinha sido utilizado em Itália, idêntico ao adquirido pelo LESE, poderia satisfazer as condições de aplicabilidade da técnica de macacos planos no tipo de alvenarias descritas no parágrafo anterior, à luz normas aplicáveis, já apresentadas no Capítulo 5. Houve necessidade de proceder a um ajuste do método inicialmente apreendido em função das dificuldades que iam surgindo no decorrer dos testes. O procedimento seguido na busca das melhorias é apresentado, e as várias hipóteses que se colocaram, são discutidas no presente capítulo. As sucessivas dificuldades permitiram evoluir para uma melhor compreensão do ensaio, que culminou

com a submissão de uma patente cujo objecto é um novo equipamento com características de deformabilidade mais adequadas às heterogeneidades do material a testar e uma rede de sensores capazes de informar o utilizador acerca da pressão efectivamente aplicada pelo macaco plano à alvenaria em estudo.

6.2 CASOS DE ESTUDO

No âmbito do presente estudo, a aplicação da técnica dos macacos planos foi realizada em 5 edifícios de alvenaria de pedra, três localizados na cidade do Porto, um localizado em V. N. de Gaia e o quinto na cidade de Bragança. Por simplicidade, os edifícios são designados por: (a) António Carneiro, por estar situado na rua de António Carneiro, no Porto; (b) Largo dos Lóios, por estar localizado no Largo dos Lóios, no Porto; (c) Sociedade de Reabilitação Urbana (SRU) de V. N. de Gaia, por ser propriedade da entidade que lhe dá o nome; (d) Mouzinho da Silveira, por estar localizado na rua homónima, no Porto; (e) Escola Emídio Garcia, por ser parte dessa escola em Bragança.

Nos pontos seguintes descreve-se cada um dos ensaios realizados e a forma como se foram ultrapassando as condicionantes que iam surgindo. Como forma de discutir a validade dos ensaios, foram introduzidos elementos de outros ensaios realizados no mesmo edifício. Conforme se verá, nem sempre foi possível respeitar as normas aplicáveis.

6.2.1 Edifício António Carneiro

No dia 3 de Novembro de 2009 foram realizados ensaios com macacos planos que tiveram por objecto o edifício sito na rua de António Carneiro no Porto. Este edifício foi descrito no Ponto 4.4 (ver Figura 4.13), dado que foi objecto de uma intensa campanha de ensaios sínicos, pelo que agora se dispensa a sua apresentação exaustiva.

O ensaio de macacos planos foi realizado numa parede ao nível do rés-do-chão, com cerca de 40cm de espessura designada por MP1 na Figura 6.1. Essa parede apresentava um pano único e era constituída por pedras de dimensões e formas muito irregulares. De entre essa variedade de pedras destacam-se as de maiores dimensões que ultrapassavam 1m de comprimento e 40cm de altura. A parede desenvolvia-se desde o nível da cave até à cobertura, sendo que ao nível do 1.º andar a sua espessura se reduzia para os 30cm. As juntas eram realizadas por argamassa de cal, misturada com pequenos calços de granito, de acordo com a técnica de construção usual neste tipo de alvenarias.

As formas irregulares das pedras tornavam difícil a escolha do local para a realização do corte. As juntas das pedras de maiores dimensões apresentavam uma maior regularidade e, por isso, foram privilegiados os cortes nesses locais. Contudo, como se referiu no Capítulo 5, as dimensões dos macacos planos estão relacionadas com as di-

mensões das pedras testadas. No presente caso, era claro que não eram respeitadas quer a dimensão A quer a dimensão B do macaco plano, já que ambas deveriam ser superiores (ver Ponto 5.5).

Com este ensaio, pretendia-se conhecer o estado de tensão in-situ e as características de deformabilidade da alvenaria testada, através de um ensaio simples e de um ensaio duplo, respectivamente. Contudo, durante o corte para o ensaio simples deu-se a queda de um dos calços que fazia parte da junta, impossibilitando o contacto regular entre o macaco plano e a alvenaria, tal como se ilustra na Figura 6.2. Por este motivo, foi escolhido um outro local próximo para realizar o ensaio, designado por MP2, cuja localização também se apresenta na Figura 6.1.

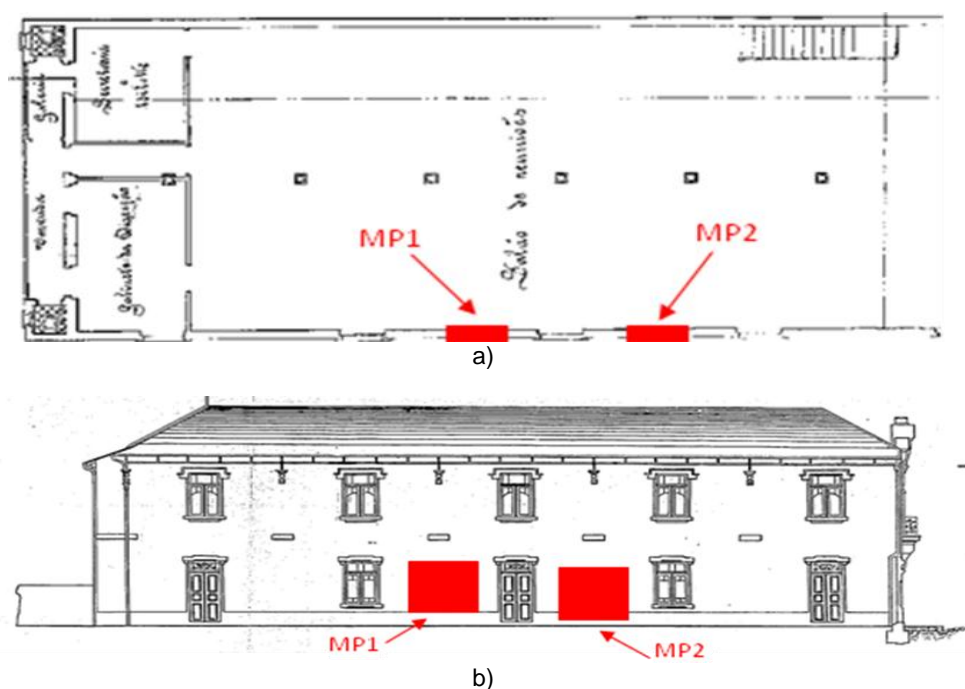


Figura 6.1 – Localização do ensaio com macacos planos realizado no edifício de António Carneiro: a) vista em planta; b) vista em alçado.

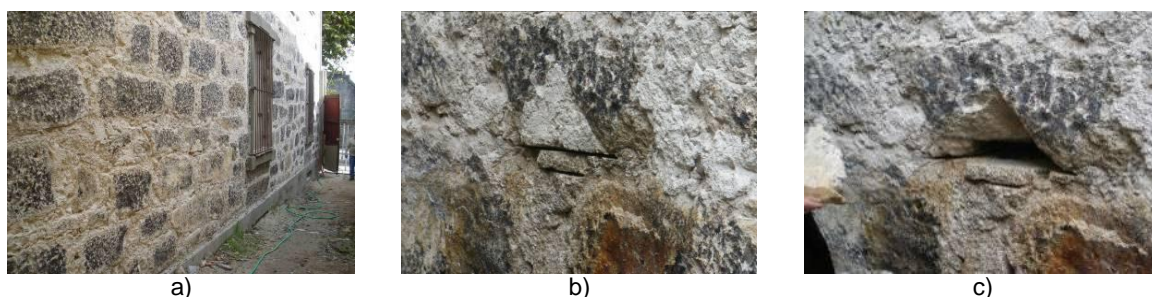


Figura 6.2 – Local MP1: a) vista geral da alvenaria; b) vista do local no final do corte; c) vista do corte sem o calço da junta.

Ensaio simples

No local MP2, realizou-se o ensaio simples, ao qual se seguiu o ensaio duplo. A Figura 6.3 apresenta imagens recolhidas durante o ensaio. À semelhança do que tinha acontecido no local MP1, no corte efectuado para a execução do ensaio simples em MP2 também se verificou a queda de material que, contudo, não foi tão significativa como a que ocorreu no local MP1, pelo que não inviabilizou a execução do ensaio.



Figura 6.3 – Execução do ensaio no local MP2: a) execução de um corte; b) aspecto final do primeiro corte.

No ensaio simples foram utilizados 4 alinhamentos de referência que se designaram por AL1, AL2, AL3 e AL4, respectivamente da esquerda para a direita. O gráfico da Figura 6.4 apresenta a evolução dos deslocamentos dos 4 alinhamentos (verticais) de referência utilizados no presente ensaio. No eixo horizontal pode ver-se o valor da pressão efectiva e no eixo vertical a evolução da distância entre os pontos de referência, onde o valor zero corresponde à situação antes do corte.

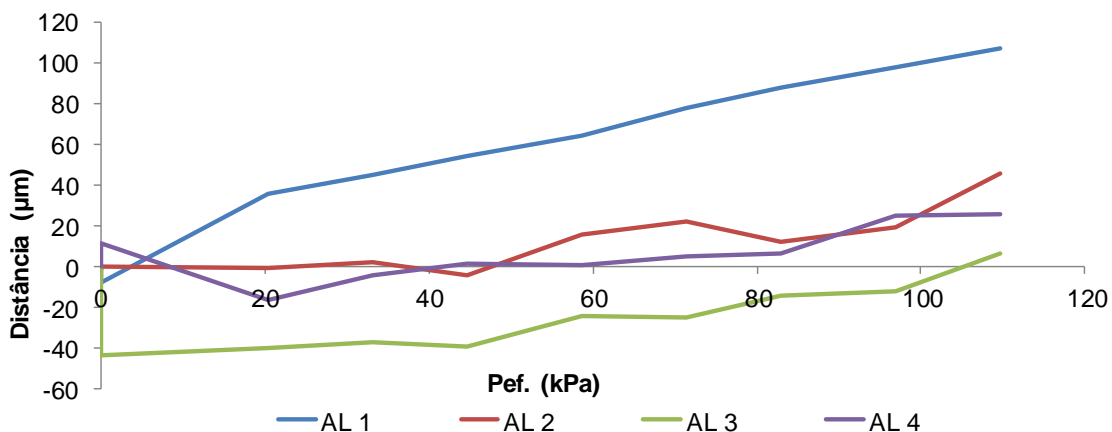


Figura 6.4 – Evolução das distâncias dos pontos de referência em MP2.

No gráfico da Figura 6.5 apresenta-se a evolução das distâncias entre os pontos de referência vistas de uma outra perspectiva. O eixo vertical volta a representar a distância entre esses pontos, comparada com o valor zero, que corresponde à situação inicial (antes do corte). Contudo o eixo horizontal representa cada um dos 4 alinhamentos verticais. Cada valor de pressão é representado por uma recta de uma cor. As cores mais quentes (vermelhos) representam pressões mais elevadas e as cores mais frias (azuis) pressões mais reduzidas.

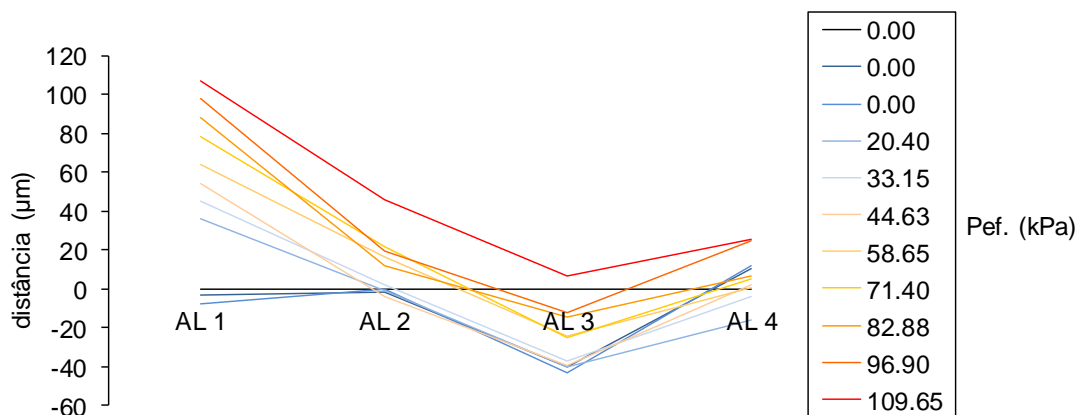


Figura 6.5 – Evolução relativa das distâncias entre os pontos de referência por patamar de pressão.

Observando os gráficos da Figura 6.4 e da Figura 6.5, verifica-se a existência de situações um pouco inesperadas: no alinhamento AL2, os pontos praticamente não sofreram alteração após o corte; no alinhamento AL1 os pontos aproximaram-se logo no primeiro incremento de carga; no alinhamento AL4 numa primeira fase verificou-se o afastamento dos pontos e, numa segunda fase, após o primeiro incremento de carga a sua aproximação. O único alinhamento que apresentou um comportamento considerado normal foi o AL3, isto é, os seus pontos de referência aproximaram-se após o corte e repuseram o afastamento com o progressivo aumento da pressão no macaco.

À luz da norma ASTM (ASTM, 1991) o teste não seria considerado válido, já que o desvio verificado, quando todos os alinhamentos atingiram a tensão de anulamento, excedia os 13 μ m. Pode-se ver na Figura 6.5 que há alinhamentos com cerca de 100 μ m de desvio. Estes resultados reflectem a dificuldade na aplicação da técnica dos macacos planos em alvenarias deste tipo.

A tensão espectável no local foi estimada em cerca de 160kPa, considerando as cargas correspondentes ao pavimento do primeiro andar, à cobertura e o peso próprio da alvenaria até à cota do macaco plano, localizado 0.7m acima da cota do terreno. Através da Equação 5.3 calculou-se, para cada alinhamento, a pressão efectiva de anulamento. O Quadro 6.1 apresenta os valores obtidos e o correspondente valor médio que corresponderia à tensão instalada no local MP2 antes do corte. Para a determinação da pres-

são efectiva (P_{ef}) utilizou-se um coeficiente $k_m=0.85$, fornecido pelo fabricante dos macacos planos, e um coeficiente $k_a=0.75$, determinado no local.

O valor médio da tensão in-situ – 49kPa – foi consideravelmente inferior ao valor estimado (160kPa). Se o alinhamento AL1 não for contabilizado (por ser o que apresenta o comportamento mais anómalo), a tensão in-situ obtida seria de 64kPa. Por curiosidade, verificou-se que, no máximo, a tensão instalada seria 105kPa (valor do alinhamento AL3) que, embora mais próximo, continuava a ser bastante inferior ao valor estimado.

Quadro 6.1 – Valores de anulamento da distância dos alinhamentos utilizados no ensaio simples.

Alinhamento	P_{ef} (kPa)
1	4
2	47
3	105
4	41
Média	49

O valor médio da tensão in-situ – 49 kPa – foi consideravelmente inferior ao valor estimado (160kPa). Se o alinhamento AL1 não for contabilizado (por ser o que apresenta o comportamento mais anómalo), a tensão in-situ obtida seria de 64kPa. Por curiosidade verificou-se que, no máximo, a tensão instalada seria 105kPa (valor do alinhamento AL3) que, embora mais próximo, continuava a ser bastante inferior ao valor estimado.

A disparidade de resultados entre a tensão estimada e a tensão obtida pode estar associada à pequena altura da alvenaria acima do local de corte, cerca de 6 metros a que corresponde uma carga de alvenaria relativamente reduzida. A recomendação da RILEM (RILEM, 2004a) indica que quando se está perante tensões inferiores a 150kPa, frequentes em edifícios de 1 ou 2 pisos, o erro cometido utilizando o ensaio simples pode ultrapassar os 100%. Note-se que mesmo em condições normais, o ensaio simples com macacos planos apresenta um erro de cerca de 20%.

Além da determinação do estado de tensão in-situ, procurou-se retirar uma informação complementar dos ensaios simples, nomeadamente o módulo de elasticidade da alvenaria. Para isso, reanalisou-se a curva que representa a evolução dos alinhamentos em função da pressão do macaco plano. Essa análise permitiu perceber que, após uma fase inicial correspondente à adaptação do macaco plano à alvenaria, existe uma tendência semelhante entre os vários alinhamentos. A Figura 6.6 apresenta o ajuste de uma recta (representada a vermelho, a tracejado) à zona mais linear dos alinhamentos.

Com base na recta da Figura 6.6 (tracejado a vermelho) calculou-se o módulo de elasticidade que lhe está associado. Utilizando a pressão de $\sigma=110\text{kPa}$ e a distância de $\Delta l=60\mu\text{m}$ e sabendo que o comprimento dos pontos de referência era de 300mm, estimou-se para o módulo de elasticidade o valor $E=\sigma/\varepsilon=110/0.0002=0.55\text{GPa}$.

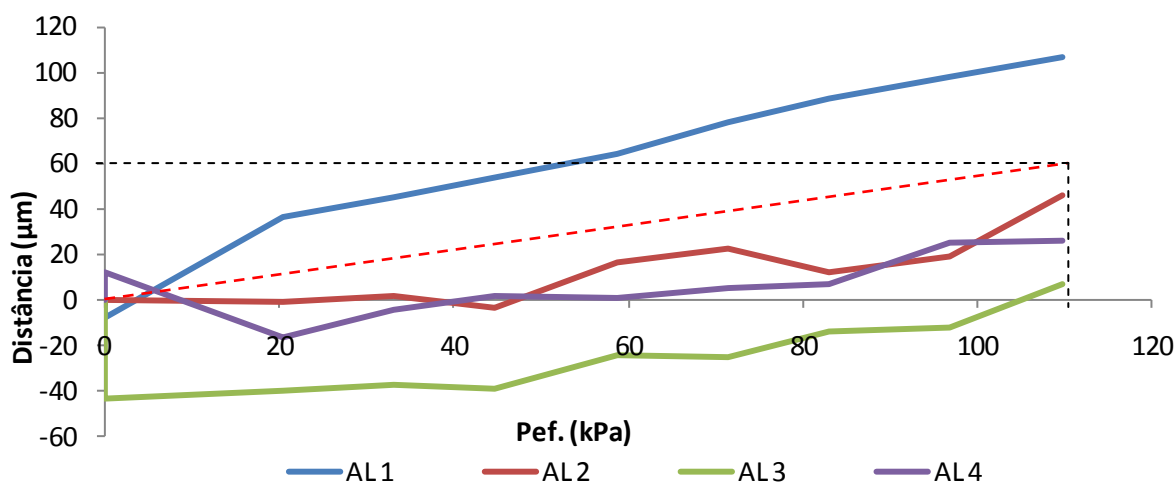


Figura 6.6 – Evolução das distâncias dos pontos de referência em MP2.

Ensaio duplo

Após o ensaio simples realizou-se o ensaio duplo, com o objectivo de definir as características de deformabilidade da zona testada. Como se referiu anteriormente, as normas aplicáveis prevêem que sejam deixadas, no mínimo, 3 fiadas de alvenaria entre os dois macacos planos e que a distância entre eles esteja compreendida entre 0.3 e 0.6 vezes o comprimento do macaco plano. Ora, no presente caso o macaco plano tinha 0.35m de comprimento, o que corresponde, aproximadamente, à altura de um elemento de alvenaria, o que significa que os dois macacos planos ficariam espaçados no mínimo 1m para respeitar o afastamento de 3 fiadas de alvenaria, distância significativamente superior a $0.6 \times 0.35\text{m} = 0.21\text{m}$. Como não era possível cumprir estas duas condições simultaneamente, dada a reduzida dimensão do macaco plano utilizado, optou-se por deixar apenas 2 fiadas de alvenaria entre os dois macacos planos. A Figura 6.7 apresenta uma imagem do local ensaiado com os LVDTs posicionados e a forma das pedras realçadas.

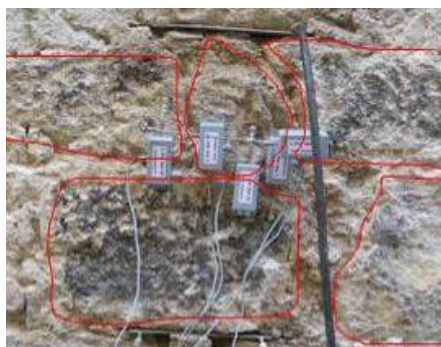


Figura 6.7 – Pormenor do local do ensaio duplo.

Como se pode ver na Figura 6.7, foram utilizados 5 LVDTs para medir os deslocamentos da zona compreendida entre os macacos. Esses LVDTs foram numerados da esquerda para a direita por LVDT1 a LVDT4; o LVDT5 foi colocado na direcção horizontal.

A Figura 6.8 apresenta as curvas tensão vs deformação obtidas para os alinhamentos estudados. Através da sua análise verifica-se que as deformações registadas nos quatro alinhamentos verticais eram muito diferentes entre si: a menor deformação atingida no LVDT3 era cerca de 0.2‰, enquanto a maior foi de 1.5‰ no LVDT2. Uma análise cuidada do mesmo gráfico permite, contudo, verificar que a deformabilidade obtida nos vários alinhamentos verticais não é tão díspar como uma primeira observação pode fazer crer. De facto, os LVDTs 1 e 2 não respondem com deslocamento para cargas de baixa magnitude, até cerca de 1/3 da tensão máxima imposta. A partir desse valor de tensão, as deformações seguem aproximadamente a mesma tendência de deformabilidade obtida para os restantes alinhamentos verticais. Verifica-se assim que, embora as deformações máximas registadas nos diferentes alinhamentos sejam bastante diferentes, a deformabilidade obtida a partir de 1/3 da tensão máxima imposta é semelhante em todos os alinhamentos.

Além dos elementos apresentados, através da análise da Figura 6.8 é possível identificar dois regimes de carga distintos:

- ✓ o primeiro regime que vai até à tensão de $\sigma=0.5\text{MPa}$ e é caracterizado por um comportamento mais rígido, com um módulo de deformabilidade médio em carga e em recarga de $E=1.3\text{GPa}$, e menos plástico, com dano reduzido ou nulo para a alvenaria;
- ✓ o segundo regime que, iniciando-se à tensão de $\sigma=0.5\text{MPa}$, apresenta um módulo de elasticidade médio de aproximadamente metade do primeiro regime ($E=0.6\text{GPa}$) e caracteriza-se por um carregamento que provoca dano na alvenaria, traduzido pelo aumento da taxa de deformação vertical e pelas elevadas deformações horizontais registadas pelo LVDT5.

Como se referiu, o edifício de António Carneiro foi alvo de um programa alargado de ensaios laboratoriais. Em particular, foram testados à compressão simples em laboratório e no âmbito de outro trabalho (Almeida, et al., 2010b), painéis retirados de outra parede desse edifício. Comparando os resultados, verificam-se diferenças significativas entre o módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão simples em regime de primeira carga ($E=0.35\text{GPa}$) e de recarga ($E=0.7\text{GPa}$), e o obtido através dos macacos planos ($E=1.3\text{GPa}$). Esta diferença pode resultar do facto das paredes testadas não serem rigorosamente as mesmas, embora sigam a mesma tipologia. Contudo, a explicação que parece ser mais consistente, tendo também em conta a diferença registada entre o estado de tensão in-situ e a tensão estimada no ensaio simples, é a área de contacto efectiva entre o macaco plano e a alvenaria poder ser menor do que a que se pensava. Note-se que uma área efectiva inferior à estimada leva a que sejam cometidos erros por excesso na estimativa do módulo de elasticidade. Acresce a este facto o erro inerente à realização de ensaios com macacos planos e que, segundo a ASTM, sobrestima o módulo de elasticidade obtido em cerca de 15%, e a variabilidade que se espera obter em ensaios duplos numa determinada alvenaria, que se estima em cerca de 30%.

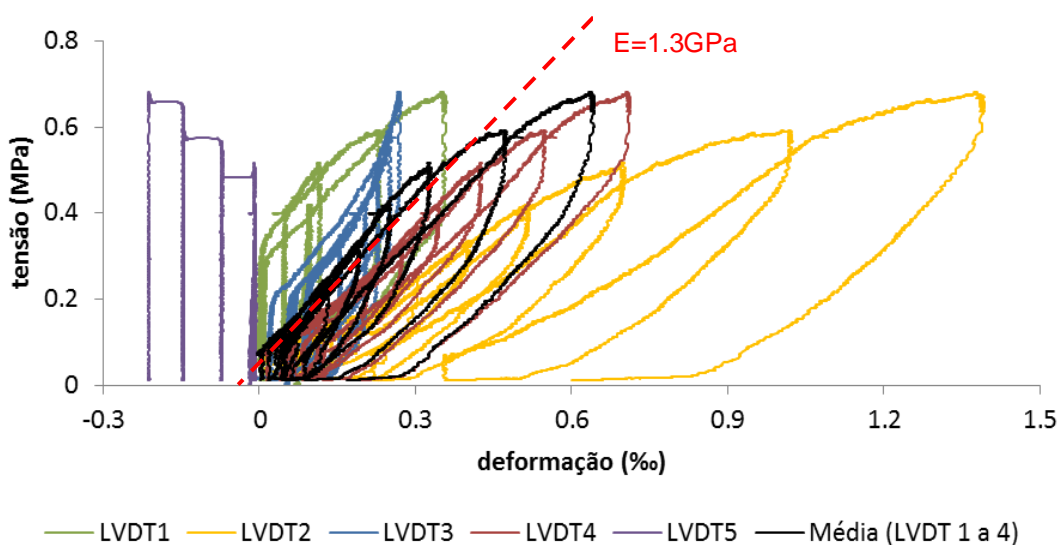


Figura 6.8 – Curvas tensão vs extensão obtidas no ensaio duplo.

Não obstante as diferenças observadas entre o ensaio com macacos planos e o ensaio de compressão simples, a campanha de ensaios sínicos realizada no laboratório e descrita no Ponto 4.4, conduziu a resultados para o módulo de elasticidade de cerca de $E=0.8\pm 0.4\text{GPa}$. Verifica-se assim que os resultados obtidos através da técnica dos macacos planos e dos ensaios sínicos são da mesma ordem de grandeza. Este facto dá maior consistência, não só aos ensaios sínicos, como ao próprio ensaio com macacos planos.

Finalmente, é importante fazer uma referência à dificuldade sentida na remoção do macaco plano do rasgo após o ensaio e que apenas graças à persistência dos técnicos do LESE foi retirado desse local. Contudo, a força e os métodos utilizados nessa remoção danificaram um dos macacos planos, irremediavelmente.

Pensou-se que este edifício poderia ter características particulares que precipitaram esta série de condicionantes, pelo que o ensaio no edifício do Largo dos Lóios foi realizado sem alterar a técnica utilizada.

6.2.2 Edifício do Largo dos Lóios

O edifício do largo dos Lóios foi apresentado no ponto 4.5.2 e por esse motivo não se fará na presente secção a sua apresentação detalhada. A espessura da parede testada não foi medida uma vez que não se teve acesso ao edifício que lhe é adjacente. Na Figura 6.9 apresenta-se uma planta esquemática do edifício do Largo dos Lóios, com a localização do ensaio realizado.

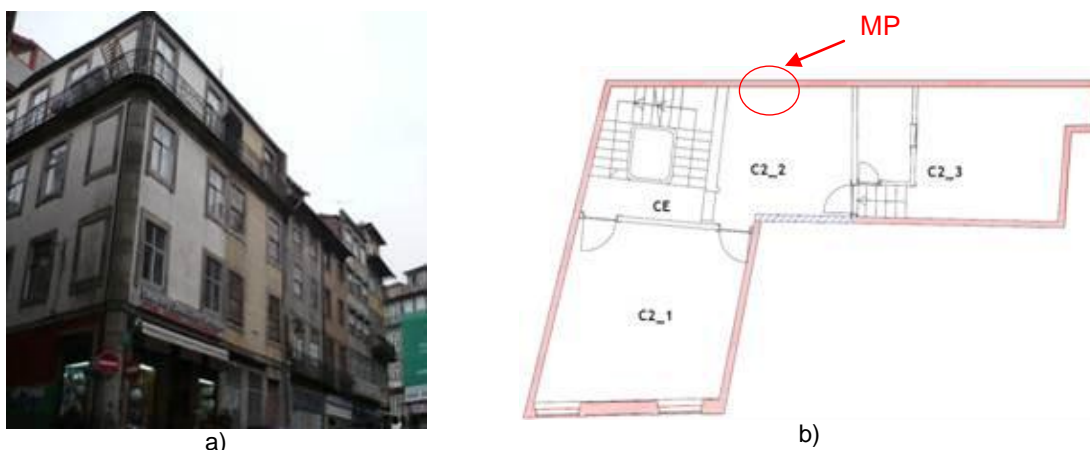


Figura 6.9 – Localização do ensaio com macacos planos: a) vista do exterior do edifício; b) planta esquemática.

Embora não tenha sido possível determinar a espessura da parede no local em que se realizou o teste, no seu topo esta valia cerca de 40cm. Para além disso desconhecia-se o tipo de secção transversal desta parede à cota do ensaio. Apesar desse desconhecimento, pretendeu-se executar um ensaio com macacos planos simples e outro duplo.

Ensaio simples

Para a realização do ensaio simples, realizou-se um corte horizontal sobre uma junta onde, sem dificuldade, se introduziu o macaco plano. As imagens da Figura 6.10 apresentam algumas fases do ensaio.

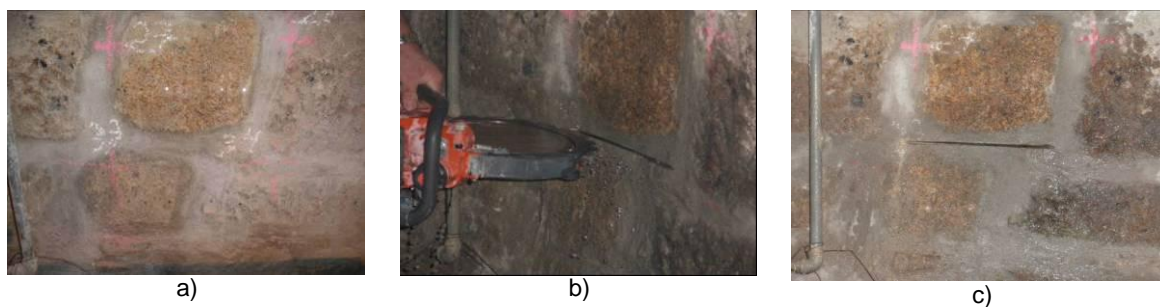


Figura 6.10 – Preparação do ensaio simples: a) local do teste; b) corte; c) aspecto final do corte.

O gráfico da Figura 6.11 apresenta os resultados obtidos no ensaio simples. A evolução das deformações foi muito semelhante para os quatro alinhamentos monitorizados. A partir da tensão de 518kPa a injeção de óleo nos macacos não se reflectia no aumento de pressão do macaco plano e, por isso, deu-se o teste por terminado. Ainda assim, pode-se verificar pela Figura 6.11 que todos os alinhamentos tinham anulado as suas deformações, pelo que se determinou que o estado de tensão in-situ da alvenaria era de $\sigma=466\text{kPa}$. A principal contribuição para este valor foi o peso próprio da alvenaria, cuja massa volúmica se considerou ser 26kN/m^3 .

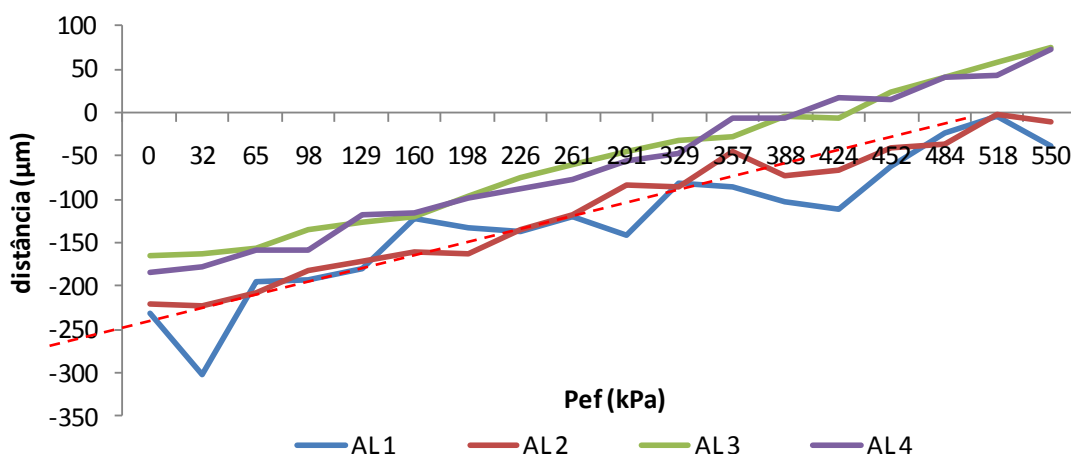


Figura 6.11 – Resultados obtidos no ensaio simples.

O valor obtido para a tensão in-situ, $\sigma=466\text{kPa}$, foi contudo, significativamente superior ao valor estimado previamente, $\sigma=250\text{kPa}$. Levantaram-se duas hipóteses para este facto:

- ✓ a superfície de contacto efectiva entre o macaco e a parede, podia ser significativamente inferior à considerada;
- ✓ a tensão estimada poderia não corresponder à real, já que não teve em conta que o edifício adjacente podia estar a descarregar parte das suas cargas na alvenaria testada.

Embora se admita que as duas hipóteses se possam ter verificado, aquela que parece ser mais consistente é a primeira dado que foi verificado que o macaco plano, após ser retirado da alvenaria, apresentava uma deformação excessiva a uma profundidade correspondente a cerca de 20cm da face acessível da parede. Esta situação foi certamente causada pela existência de um vazio a essa profundidade que resultou numa área efectiva de contacto inferior à área estimada. Nesta situação seria de esperar que a tensão in-situ determinada pelo ensaio fosse inferior à estimada, como se acabou por obter.

A determinação rigorosa da área de contacto é um assunto que tem merecido alguma atenção nos estudos que envolvem ensaios com macacos planos. Uma solução expedita, já utilizada noutros trabalhos (Pagaimo, 2004, Vicente, 2009), passa pela interposição de papel químico entre a parede e o macaco plano para a determinação da área de contacto. Contudo, no caso da alvenaria testada isso não foi possível, já que o corte apresentava uma espessura reduzida que dificultava a própria introdução do macaco plano, impossibilitando a colocação adicional do papel químico. Por outro lado, mesmo conseguindo-se esta interposição, a remoção do macaco plano alteraria substancialmente essa “impressão digital”, sendo espectável que em muitas situações inviabilizasse a sua leitura.

A remoção do macaco plano no final do ensaio foi difícil, já que a sua deformação no interior do vazio tinha criado uma espécie de “âncora” que tornou necessário causar um dano de nível elevado na alvenaria. A Figura 6.12 apresenta imagens da (difícil) remoção do macaco plano bem como do seu aspecto após essa remoção.

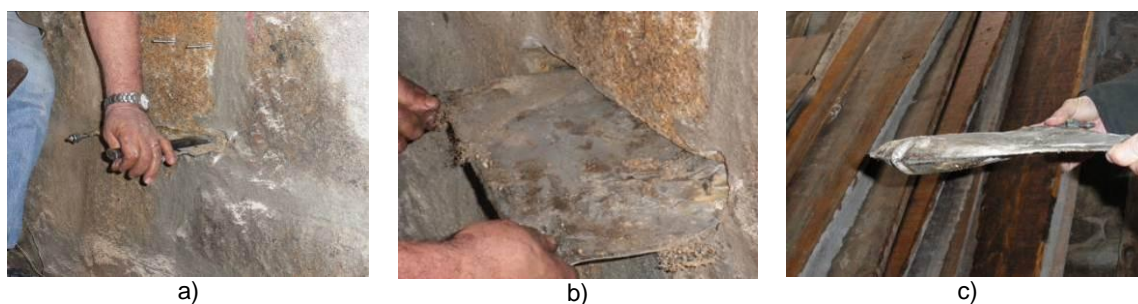


Figura 6.12 – Fases que se seguiram ao ensaio: a) e b) remoção do macaco; c) aspecto final do macaco plano.

Por curiosidade, procurou-se, também neste caso estimar o módulo de elasticidade da alvenaria através dos dados da Figura 6.11, de acordo com a metodologia apresentada anteriormente (ajuste da recta a tracejado), tendo-se obtido o valor de $E=0.62\text{GPa}$.

Como forma de evitar as dificuldades referidas durante o processo de remoção do macaco plano do interior do rasgo, procuraram-se alternativas. A primeira solução testada foi uma bomba de vácuo com o objectivo de eliminar as deformações plásticas do macaco plano, após retirado todo o óleo do seu interior. Foi feita uma tentativa sobre o ma-

caco plano deformado depois de retirado da parede. Para isso utilizou-se uma bomba de vácuo, propriedade do Laboratório de Compósitos do INEGI. A Figura 6.13 apresenta a bomba utilizada e o macaco plano deformado.

No entanto, as tentativas realizadas não contribuíram para a recuperação da deformação plástica do macaco plano, tendo-se por isso abordado este processo e pensado na utilização de elementos externos que protegessem o macaco plano e evitassem a sua deformação plástica. Contudo, havia uma limitação importante à partida relacionada com a espessura do corte que teria sempre que ser de cerca de 5mm, por indicações do fabricante.



Figura 6.13 – Utilização da bomba de vácuo: a) bomba de vácuo; b) preparação do macaco.

Assim, a nova solução teria que passar pela inclusão de um material que, obrigatoriamente, tinha que ser pouco espesso. Por sugestão do INEGI, surgiu a hipótese de utilização de folhas de membranas de Polietileno tereftalato (PET), com o objectivo de proteger o macaco plano das irregularidades que podiam existir no interior do rasgo e facilitar a sua remoção. Esta solução foi utilizada no ensaio do edifício da rua de Mouzinho da Silveira que se apresenta de seguida.

6.2.3 Edifício de Mouzinho da Silveira

O edifício da rua de Mouzinho da Silveira foi apresentado no Capítulo 4, pelo que se dispensa agora uma nova apresentação. Após a sua caracterização com base nos ensaios sónicos, foi realizado um ensaio com macacos planos (simples e duplos). Testou-se uma parede de pedra de granito, de folha única, com 18m de altura e 30cm de espessura (medida no topo da parede). O local testado foi designado por P2 e a sua localização apresenta-se na Figura 6.14.

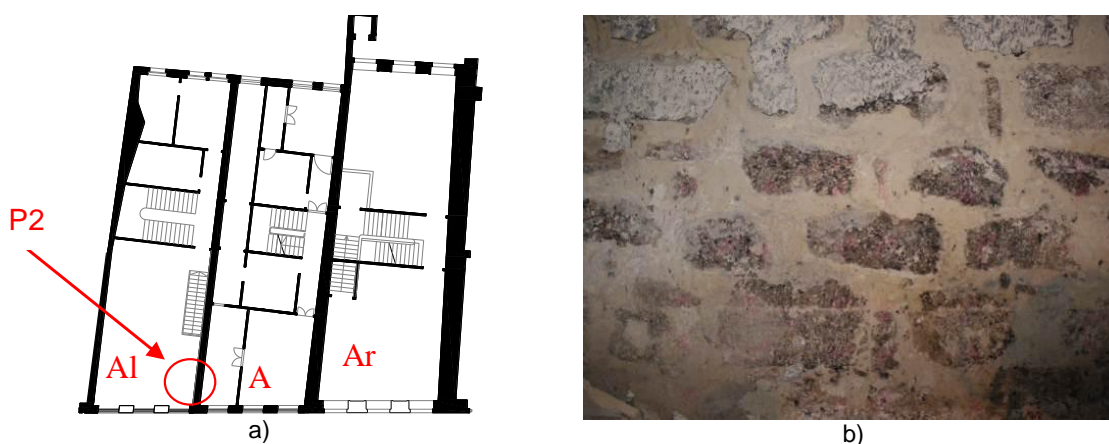


Figura 6.14 – Localização do ensaio com macacos planos: a) planta esquemática; b) aspecto da alvenaria ensaiada.

O edifício de Mouzinho da Silveira contava com pedras de altura superior às do edifício de António Carneiro. À luz das normas apresentadas no Capítulo 5, o afastamento dos macacos planos utilizados deveria ser 0.3 a 0.6 vezes a dimensão do macaco plano que, como se sabe é de 0.35m. De acordo com esta indicação, o espaçamento máximo entre macacos planos seria inferior à altura das pedras, cuja dimensão rondava os 0.5m, não sendo por isso possível verificar simultaneamente esta condição e a de existirem 3 fiadas de alvenaria entre os dois macacos planos, como, aliás, já se tinha verificado para o edifício de António Carneiro.

Tendo consciência da impossibilidade de cumprir a norma, optou-se por se adoptar um afastamento corresponde a três fiadas de alvenaria e realizar o teste em duas fases: (a) utilizando LVDTs de 0.6m e (b) utilizando LVDTs de 1m de comprimento (no mesmo local). Desta forma seria possível avaliar a influência do comprimento dos LVDTs nos resultados obtidos no ensaio duplo.

Ensaio simples

Através do ensaio simples procurou-se aceder ao estado de tensão in-situ que, previamente foi estimado em cerca de 500kPa, valor que se devia, quase exclusivamente, à massa da parede de 18m de altura. Note-se que não se teve acesso aos edifícios adjacentes ao edifício em estudo, pelo que as respectivas cargas, nomeadamente o peso dos pavimentos do edifício da esquerda (Figura 6.14) não foram contabilizadas na tensão estimada.

De modo a obviar a perda de informação resultante do descolamento dos pontos de referência (verificados em ensaios anteriores), no ensaio simples agora realizado foi adoptado um quinto alinhamento de referência, designado por ALS (alinhamento suplementar), para além dos quatro alinhamentos habituais (AL1 a AL4). A película de PET foi

utilizada na face superior do macaco plano e pode ser vista no local, em conjunto com os 5 alinhamentos utilizados, através da Figura 6.15.

Os resultados obtidos no ensaio nos 5 alinhamentos, apresentam-se no gráfico da Figura 6.16. Como se pode observar, os alinhamentos AL2, AL3 e ALS tiveram deslocamentos relativamente semelhantes com o aumento da pressão no macaco plano. Contudo, verificaram-se duas situações inesperadas: o alinhamento AL1 ficou inutilizado pouco depois do início do ensaio (atingiu a tensão de anulamento no primeiro incremento de carga); os pontos de referência do alinhamento AL4 sofreram uma aproximação elevada na fase inicial do carregamento mas posteriormente adoptaram um comportamento normal.



Figura 6.15 – Ensaio simples de macacos planos: a) após realização do rasgo com os 5 alinhamentos realizados; b) macaco plano e folha de PET colocados.

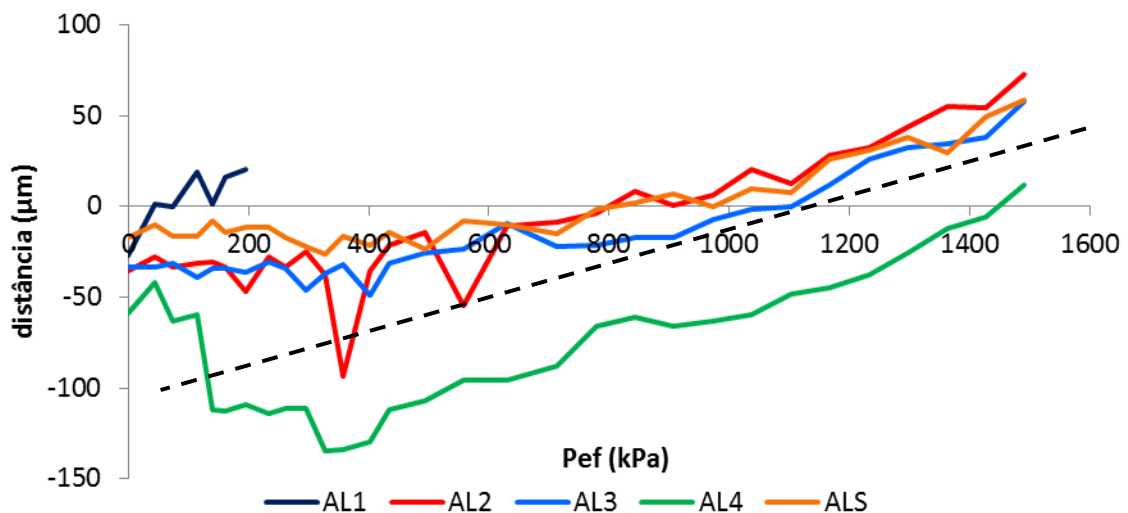


Figura 6.16 – Resultados do ensaio simples.

Considerando os cinco alinhamentos de referência, a tensão instalada obtida seria de $\sigma=840\text{kPa}$. Contudo, os alinhamentos AL1 e AL4 parecem desviar-se significativamente da tendência registada nos restantes, pelo que parece mais correcto contabilizar apenas os alinhamentos AL2, AL3 e ALS; neste caso, a tensão instalada seria $\sigma=900\text{kPa}$.

Conclui-se que a utilização dos 5 alinhamentos ou apenas dos 3 cujo comportamento é mais aceitável produz resultados da mesma ordem de grandeza e ambos muito superiores à tensão estimada ($\sigma=500\text{kPa}$).

Mais uma vez, apontam-se como causas para esta diferença, para além das inerentes à própria técnica, a possibilidade de existirem vazios induzindo o técnico que realiza o ensaio em erro, ou de haver uma estimativa incorrecta da tensão instalada, por se desconhecer a existência de outras estruturas a descarregar directamente na alvenaria em estudo. No entanto, tendo em conta o reduzido contributo (inferior a 10%) que os pavimentos e a cobertura têm na tensão in-situ estimada nestas estruturas, o erro que se poderia cometer nessa estimativa é também reduzido.

Assim, pensou-se que a diferença verificada se ficou a dever a um contacto reduzido entre o macaco plano e a alvenaria. O facto das normas ASTM e RILEM não terem sido respeitadas, no que diz respeito ao comprimento mínimo do macaco plano que no presente caso deveria ser superior a 1m (aproximadamente 1 a 1.5 vezes a dimensão das pedras), também poderá ter contribuído para as diferenças verificadas.

Na Figura 6.16, para além da evolução do afastamento entre os pontos de referência, apresenta-se o ajuste de uma recta (a tracejado) que pretende ilustrar a evolução da deformação com a tensão aplicada. Essa recta apoia-se na tendência relativa dos quatro alinhamentos notada a partir da tensão efectiva de $\sigma=600\text{kPa}$. O módulo de elasticidade da alvenaria, segundo o ajuste representado na Figura 6.16 (recta a tracejado), foi obtido de modo similar ao apresentado para o ensaio simples no edifício de António Carneiro e resultou em cerca de $E=3\text{GPa}$.

Ensaio duplo

Com o ensaio duplo pretendeu-se avaliar o efeito que o diferente comprimento dos LVDTs tem nos resultados obtidos num ensaio com macacos planos. O módulo de elasticidade da parede foi obtido utilizando: (a) LVDTs de 60cm de comprimento; (b) LVDTs de 1.0m de comprimento.

Os macacos planos contavam com um afastamento de cerca de 1.2m, de modo a possuírem duas juntas de argamassa entre si. Os LVDTs tiveram a denominação habitual: os LVDT1, 2, 3 e 4 foram colocados na vertical e da esquerda para a direita, respectivamente; o LVDT5 foi colocado na horizontal. A Figura 6.17 apresenta o local testado já com os dois macacos planos colocados e com os LVDTs de 60cm. Note-se que a dimensão dos LVDTs é consideravelmente menor que a distância que separa os dois macacos planos e não respeita as normas aplicáveis, já que estas requerem a adopção de uma distância entre 75 e 90% do afastamento dos macacos planos (ver Quadro 5.3).

Como se percebe pela Figura 6.17, as pedras da alvenaria apresentam dimensões extremamente elevadas quando comparadas com a dimensão dos macacos planos. Por essa razão e pelo exposto anteriormente, foi impossível, neste ensaio, cumprir as normas aplicáveis.

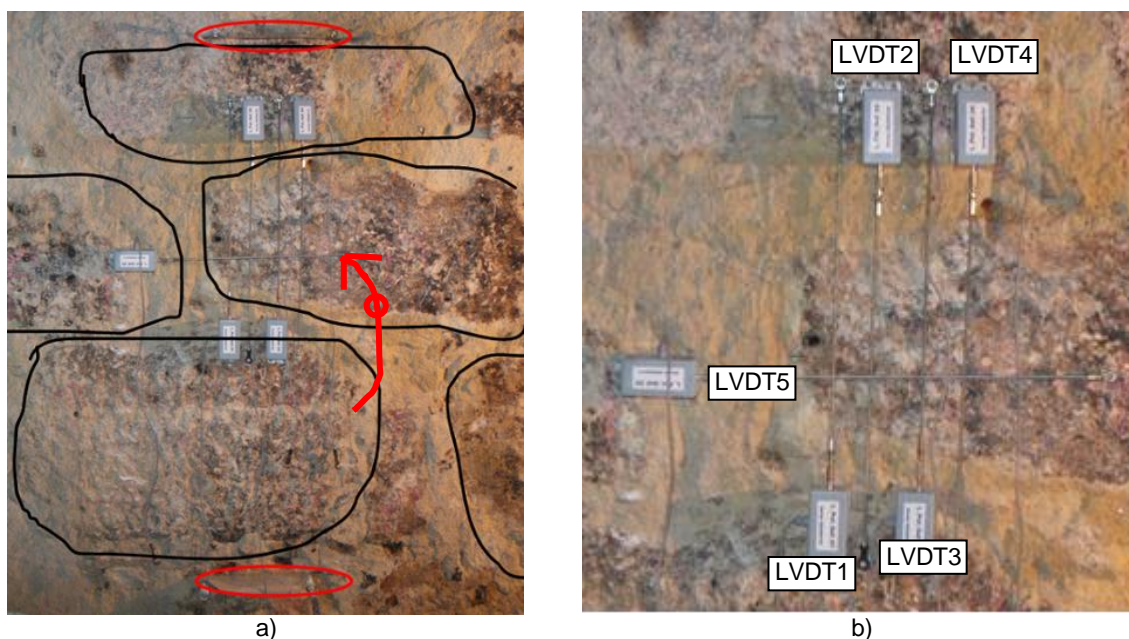


Figura 6.17 – Aspecto do local testado com os LVDTs de 60cm: a) vista geral; b) pormenor dos LVDTs.

A Figura 6.18 apresenta a curva tensão (efectiva) vs deformação para o ensaio em que se utilizaram LVDTs de 60cm. A configuração das pedras do troço de alvenaria testada parece justificar os resultados obtidos em cada um dos LVDTs verticais. O aumento das deformações verticais da esquerda para a direita parece ter justificação no facto de o macaco plano inferior exercer um carregamento excêntrico na pedra que lhe é imediatamente superior, causando assim a rotação representada pela seta a vermelho na Figura 6.17.

O gráfico apresentado na Figura 6.18 apresenta dois regimes de carga, o primeiro dos quais vai da tensão zero a uma tensão um pouco inferior a 1MPa, e regista uma deformação máxima de cerca de 0.25‰ (valor médio). Este valor deve corresponder à tensão já anteriormente instalada na parede já que no ensaio simples se obteve para a tensão actualmente instalada um resultado semelhante: cerca de 0.8MPa. Este primeiro regime de carga está associado a um módulo de elasticidade de 3.0GPa, idêntico ao obtido através da aproximação feita através do ensaio simples.

O módulo de elasticidade a partir da tensão instalada diminui consideravelmente, até estabilizar no valor da ordem dos $E=0.4\text{GPa}$, para tensões superiores a cerca de $\sigma=1.2\text{MPa}$. Este novo comportamento está associado a elevadas deformações do LVDT5

(horizontal) e traduz uma degradação acentuada de material, nomeadamente a abertura de juntas e/ou a ocorrência de fissuração vertical. Essa deformação, com carácter plástico, ocorreu para deformações verticais pouco superiores a $\epsilon=0.5\text{‰}$ e até cerca de $\epsilon=2\text{‰}$. O módulo de elasticidade em recarga foi de, aproximadamente, $E=2.6\text{GPa}$.

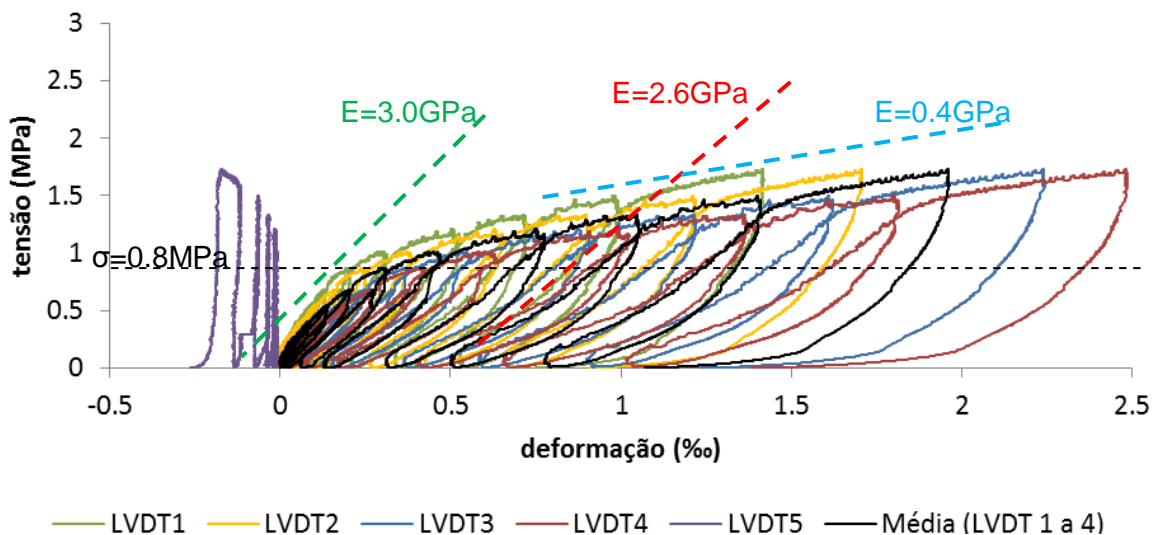


Figura 6.18 – Curva tensão vs deformação obtida para LVDTs de 60cm de comprimento.

Depois do ensaio com os LVDTs de 60cm de comprimento, deu-se a descarga dos macacos planos e passou-se ao segundo ensaio previsto. Colocaram-se LVDTs com 1.0m de comprimento e os macacos planos foram mantidos no mesmo local. Voltou-se a aplicar pressão nos macacos planos de acordo com o procedimento descrito nas normas e obtiveram-se os resultados que se apresentam da Figura 6.19.

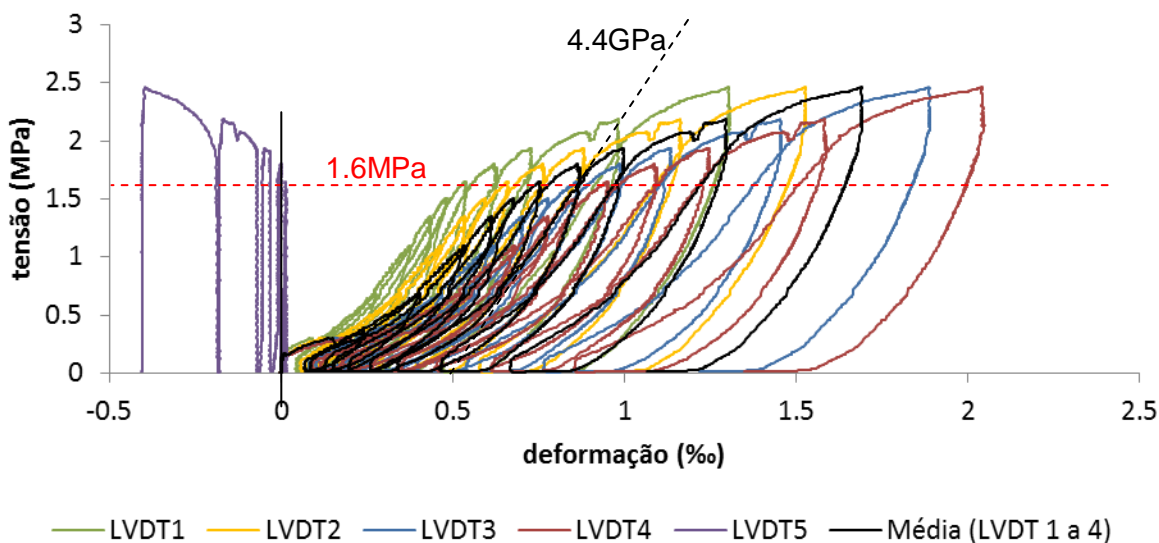


Figura 6.19 – Curva tensão vs deformação obtida para LVDTs com 1m de comprimento.

Foi registada uma grande coerência entre os resultados dos quatro LVDTs verticais, à semelhança do que se tinha verificado para o caso em que se utilizou LVDTs de 60cm. Determinou-se o módulo de elasticidade em recarga da alvenaria numa altura em que já se tinha atingido a tensão máxima ($\sigma=1.6\text{MPa}$) do primeiro teste (LVDTs de 60cm). Esse módulo de elasticidade foi determinado num tramo aproximadamente constante, situado entre 40% e 85% da carga máxima, e apresentava o valor $E=4.4\text{GPa}$.

Na verdade, o segundo teste, com LVDTs de 1.0m de comprimento é a continuação do primeiro teste, pelo que faz sentido comparar os resultados dos dois ensaios. Esta comparação apresenta-se na Figura 6.20, onde se representam as duas curvas tensão vs deformação média: uma obtida no primeiro teste (a azul), em que foram utilizados LVDTs de 60cm, e outra para o segundo teste (a vermelho), com LVDTs de 1m de comprimento.

No segundo ensaio, o carregamento registado corresponde a uma recarga até cerca de 1.6MPa; só a partir desta tensão se começam a registar deformações plásticas importantes, na direcção vertical. É também a partir desse valor de tensão que o LVDT5 (horizontal) se começa a deformar; essa deformação reflecte a continuação da abertura das juntas verticais e, possivelmente, a abertura de fendas verticais nas pedras.

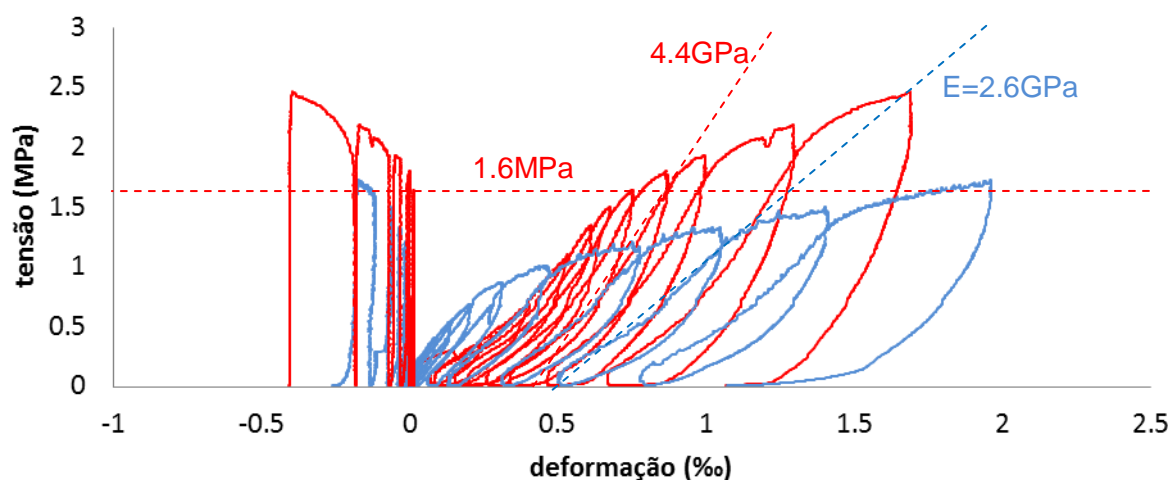


Figura 6.20 – Comparação entre os resultados médios obtidos com LVDTs de 60cm (curva a azul) e com LVDTs de 1m (curva a vermelho).

Sendo o segundo teste a continuação do primeiro, é também interessante simular a continuidade do gráfico tensão vs deformação obtido e comparar a evolução da rigidez das duas configurações. Esta análise é apresentada na Figura 6.21, onde consta a curva do primeiro teste (a azul) e a curva do segundo teste (a vermelho) para tensões superiores à tensão máxima obtida no primeiro teste.

Verifica-se que a rigidez medida pelos LVDTs verticais é, em geral, superior no segundo teste. Este comportamento resulta do facto de os LVDTs de 1m de comprimento

cobrirem uma porção significativamente superior de material mais rígido (pedra), em comparação com o que acontecia no primeiro teste (LVDTs de 60cm; ver Figura 6.17).

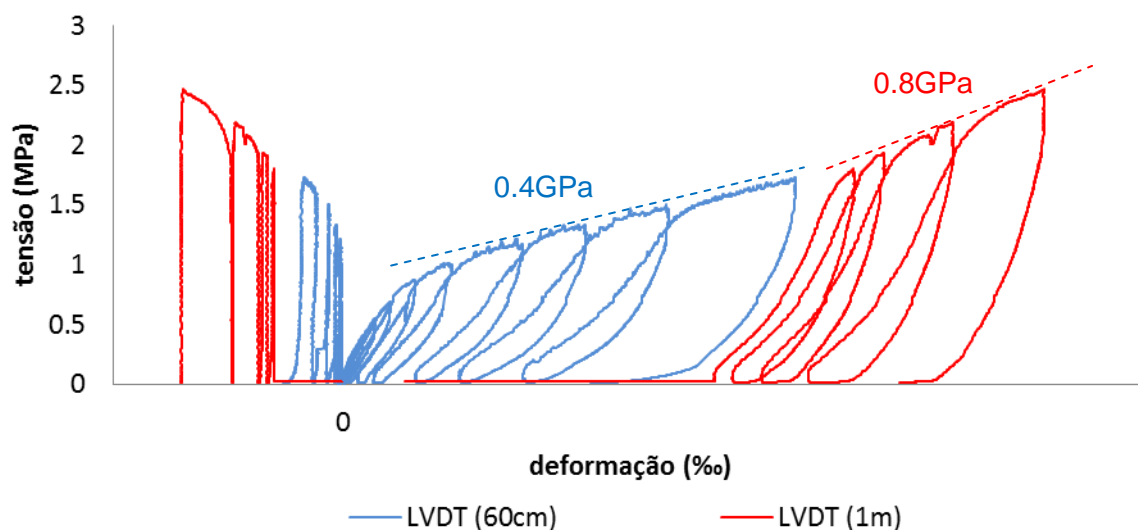


Figura 6.21 – Resultados médios obtidos com LVDTs de 60cm (curva a azul) e de 1m (curva a vermelho) colocado em sequência, de modo a ser possível analisar a continuidade das duas curvas.

Em síntese, o tamanho dos LVDTs utilizados teve influência nos resultados obtidos. Em recarga o módulo de elasticidade passou de $E=2.6\text{GPa}$ para $E=4.4\text{GPa}$. As diferenças registadas, ainda que sejam significativas, podem dar uma indicação acerca da ordem de grandeza da deformabilidade da alvenaria. Como se apresentou no ponto 4.5.2, através dos ensaios sónicos, obteve-se, para o mesmo edifício, um módulo de elasticidade de $E=3.3\text{GPa}$, valor muito próximo dos valores obtidos com o ensaio com macacos planos.

Em relação à película de PET, a sua utilização revelou-se totalmente ineficaz já que não contribuiu para a protecção ou para a remoção mais fácil do macaco plano. Por esse motivo não se voltou a utilizar esta solução nos ensaios subsequentes, passando-se a adoptar chapas de aço.

6.2.4 Edifício da Sociedade de Reabilitação Urbana – V.N. Gaia

O edifício da Sociedade de Reabilitação Urbana de V. N. de Gaia, que se apresenta esquematicamente na Figura 6.22, foi alvo de um projecto de reabilitação que previa a demolição de parte de uma parede estrutural (a amarelo na Figura 6.22). Por esse motivo, foi possível realizar ensaios nessa parede.

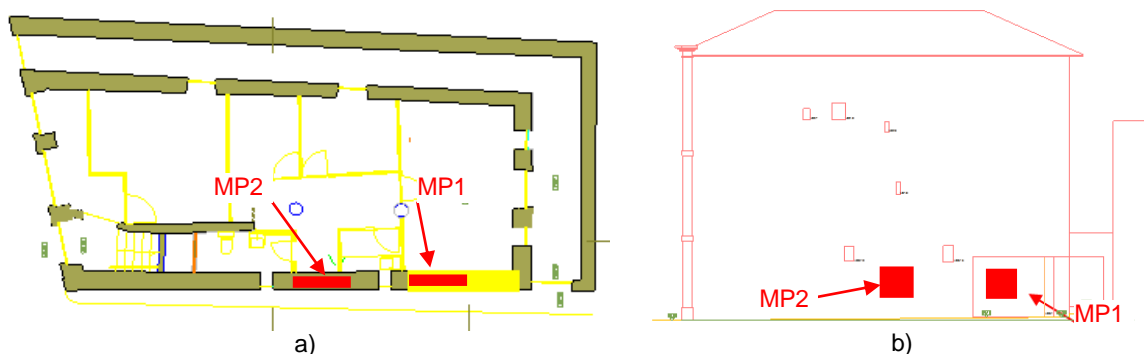


Figura 6.22 – Esquema do edifício testado e localização dos ensaios realizados: a) em planta; b) em alçado.

Como se referiu, depois de se verificar a ineficácia das placas de PET passou-se à utilização de placas em chapa de aço. Tendo ainda a limitação da espessura do corte, utilizaram-se chapas com cerca de 0.5mm, sempre que a sua introdução era possível. Na Figura 6.23 é possível ver o conjunto chapa de protecção e macaco plano, colocado num rasgo. Note-se que se deixou uma pega, assinalada pela seta a vermelho na Figura 6.23, para possibilitar a remoção mais fácil da chapa de protecção.



Figura 6.23 – Chapa de protecção colocada sobre a face superior do macaco plano.

Foram testados dois locais designados por MP1 e MP2, que se podem ver na Figura 6.22. O local designado por MP1 está inserido numa zona representada a amarelo na Figura 6.22 a), que corresponde à parede a demolir. O ensaio MP2 foi realizado noutra zona do mesmo alçado em que se localizava MP1.

Ensaio simples

A parede testada era composta por dois panos; o pano exterior (o único testado) tinha, nos dois locais testados (MP1 e MP2), 25cm de espessura. A Figura 6.24 apresenta algumas imagens de um dos dois ensaios simples realizados. Pode-se observar o tipo de alvenaria estudada e assim perceber que as dimensões das pedras e do macaco plano são semelhantes.

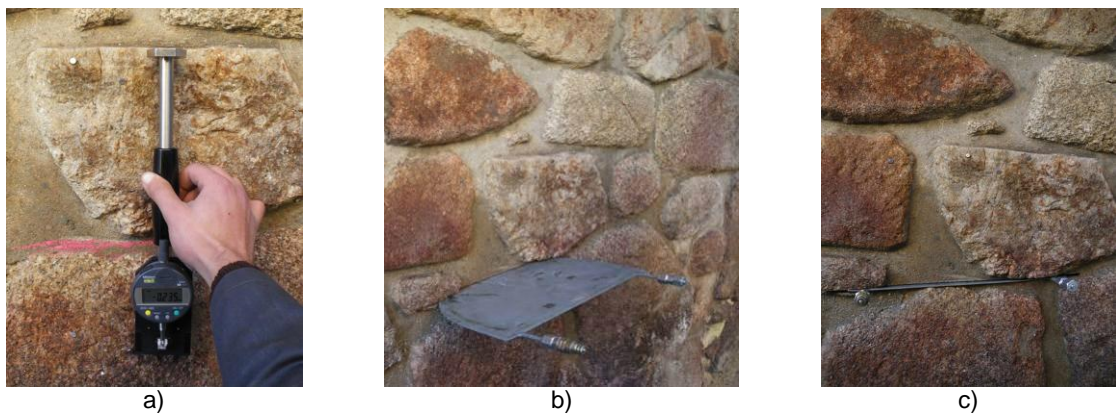


Figura 6.24 – Imagens da realização do ensaio simples em MP1: a) medição do afastamento dos pontos de referência antes do corte; b) introdução do macaco plano; c) macaco plano colocado.

Por pertencerem à mesma alvenaria, os locais MP1 e MP2 estavam sujeitos às mesmas cargas, pelo que a tensão estimada para esses dois locais foi a mesma: $\sigma=420\text{kPa}$. Este valor foi estimado com base em tabelas de fabricantes de lajes pré-esforçadas e em medições geométricas in-situ, assim como considerando que a parede tem uma massa volúmica de 26kN/m^3 . Note-se que o contributo do pavimento e da cobertura de betão armado foi de cerca de 35% da tensão total. Este valor é bem maior do que o contributo que os pavimentos e a cobertura de madeira tiveram para a estimativa da tensão instalada no caso do edifício de Mouzinho da Silveira, que foi de apenas 10% (material menos denso).

O gráfico da Figura 6.25 apresenta a evolução dos 4 alinhamentos utilizados no ensaio simples realizado em MP1. A tensão instalada determinada no ensaio com macacos planos foi de cerca de $\sigma=600\text{kPa}$ (foram adoptados os coeficientes $k_m=0.85$ e $k_a=0.75$).

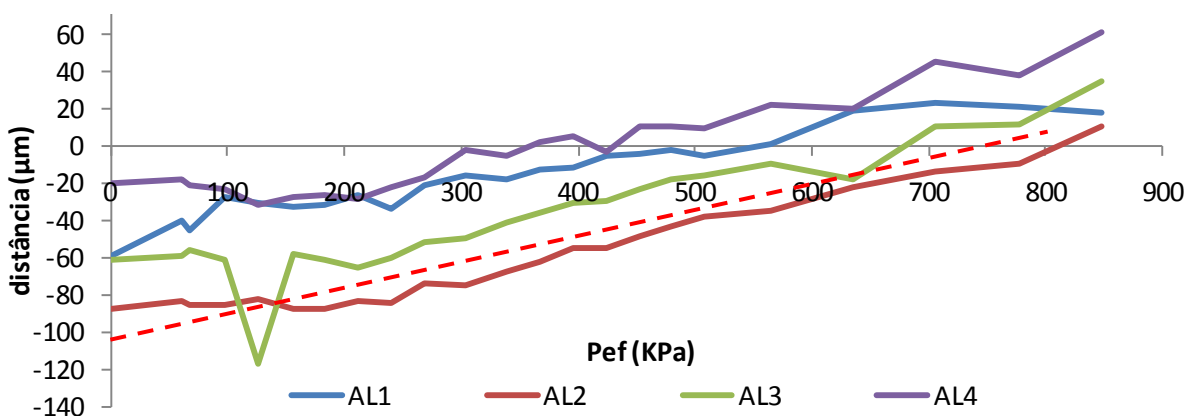


Figura 6.25 – Esquema do edifício testado e localização dos ensaios: a) em planta; b) em alçado.

O gráfico da Figura 6.26 apresenta a evolução dos quatro alinhamentos verticais obtidos no ensaio MP2. Neste caso, a tensão instalada foi $\sigma=730\text{kPa}$ e os coeficientes utilizados para o seu cálculo foram: $k_m=0.85$ e $k_a=0.77$.

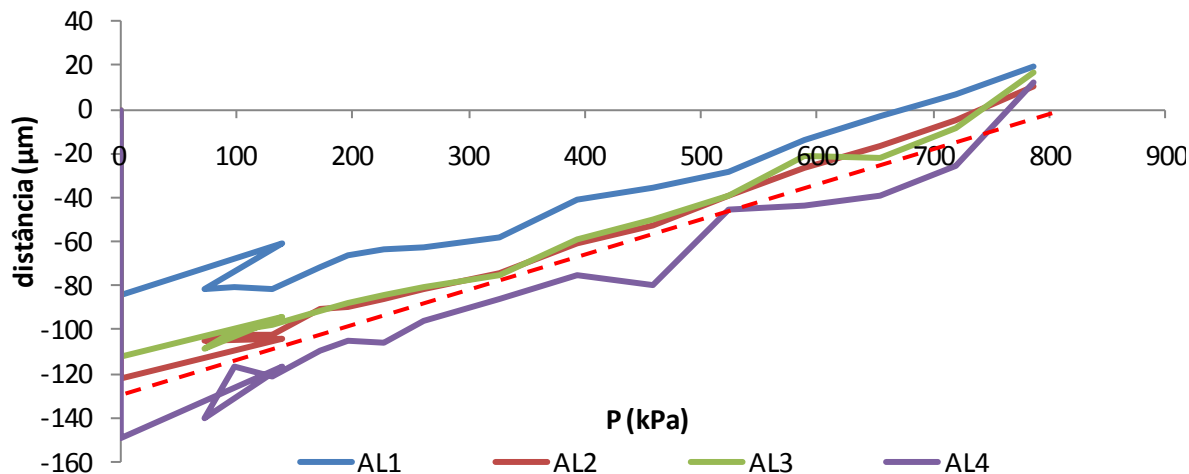


Figura 6.26 – Evolução da distância entre os pontos de referência para os alinhamentos verticais em MP2.

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 6.26, a aplicação da tensão no macaco plano produziu uma evolução das distâncias próxima para os 4 alinhamentos utilizados, ao contrário do que se verificou em MP1, onde a recuperação de AL4 se deu muito antes da recuperação dos restantes alinhamentos. A Figura 6.27 apresenta a evolução da distância em cada patamar de pressão para MP1 e MP2, organizada de outra forma.

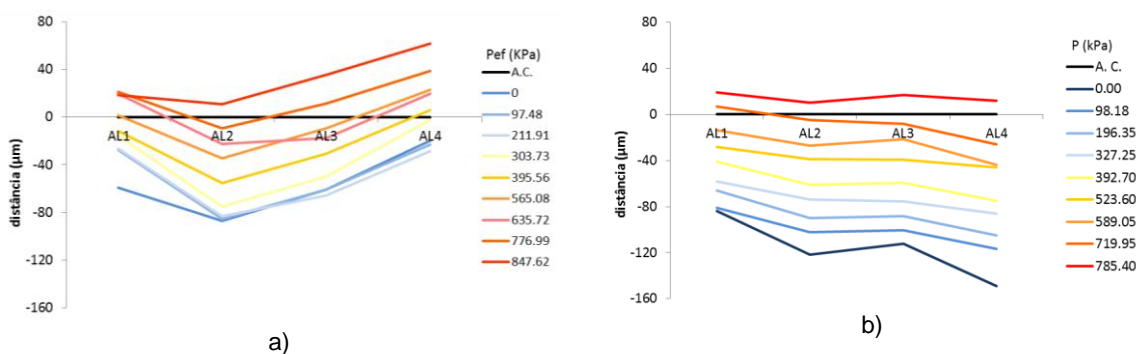


Figura 6.27 – Evolução da distância entre os pontos de referência para cada patamar de pressão: a) MP1; b) MP2.

Comparando a tensão instalada estimada ($\sigma=420\text{kPa}$) com a obtida nos ensaios ($\sigma=600\text{kPa}$ em MP1 e $\sigma=730\text{kPa}$ em MP2) verifica-se, à semelhança do edifício do Largo dos Lóios e de Mouzinho da Silveira, que se obteve, na prática, um valor inferior ao estimado. Lembra-se que, neste caso, a estimativa das acções gravíticas foi feita com bastante rigor. Neste caso, ao contrário dos edifícios anteriores que contavam com pavimentos e cobertura de madeira, não só a determinação da tensão exercida por estes elemen-

tos foi contabilizada de forma mais rigorosa, como a sua própria contribuição para a tensão instalada é bastante superior. Por este motivo, a hipótese de uma má estimativa das cargas foi afastada, restando, portanto, a possibilidade da área de contacto efectiva ser menor do que a que foi considerada. Contudo, mais uma vez, não foi encontrada uma metodologia que permitisse perceber qual a força efectivamente transmitida à alvenaria ou determinar a área de contacto com rigor.

Nos gráficos da Figura 6.25 e da Figura 6.26 apresenta-se uma linha suplementar a tracejado que, como no caso de António Carneiro, pretendeu estimar a rigidez da alvenaria. Realça-se que este procedimento não é corrente e apenas se utilizou para se obter uma aproximação do valor da deformabilidade da alvenaria. Assim, no caso de MP1, o ajuste considerado corresponde a um módulo de elasticidade de $E=1.85\text{GPa}$ e, no caso de MP2, $E=2.2\text{GPa}$.

Além dos ensaios simples, realizaram-se dois ensaios duplos, nos locais MP1 e MP2. No entanto uma anomalia eléctrica no sistema de aquisição invalidou os resultados.

Por outro lado, a pequena espessura das chapas de protecção utilizadas na protecção dos macacos planos não permitiu ganhos significativos na protecção e remoção dos macacos planos, já que se voltaram a verificar grandes dificuldades nesta fase.

Por essa razão, assumiu-se que seria necessário realizar um corte mais espesso de modo a permitir a introdução de elementos de protecção mais eficazes, que também possibilitassem uma melhor distribuição de tensões e, simultaneamente facilitassem a remoção dos macacos planos das alvenarias.

As alternativas que se colocaram foram as seguintes: (a) adquirir um disco mais espesso para a máquina de corte, contudo, considerando a gama de discos disponíveis no mercado, no máximo atingir-se-ia os 5.2mm, insuficiente para colocar elementos mais espessos do que os utilizados anteriormente; (b) construir um disco de raiz com a espessura pretendida, situação desaconselhada pelo fabricante da rebarbadora por razões de segurança; (c) depois de se ter feito o rasgo com a máquina de corte, realizar o seu desbaste utilizando um berbequim.

Pela inviabilidade ou desaconselhamento das outras opções, adoptou-se a hipótese c). Com este procedimento, a espessura do corte foi aumentada em cerca de 3 vezes, para cerca de 1.5cm a 2cm.

A espessura a determinar para as chapas foi calculada e, posteriormente, verificada em laboratório. No teste, procurou-se simular uma situação desfavorável, idêntica à que se tinha registado no ensaio do edifício do Largo dos Lóios. Assim, o macaco plano foi protegido com chapas de 0.5cm, com a forma macaco e sobre esse conjunto foi colocada uma chapa rectangular com 4cm de espessura, deixando cerca de 5cm livres do conjunto macaco/chapa de protecção, como forma de simular um vazio. Este conjunto foi

então colocado entre dois perfis metálicos. A Figura 6.28 apresenta imagens do esquema de ensaio utilizado.

A pressão do macaco plano foi aumentada até cerca de 3MPa e verificou-se, no final do ensaio, que a chapa de protecção não apresentava qualquer deformação, pelo que se aumentou a dimensão da zona do macaco plano sem apoio de 5 para 8cm, com o objectivo de simular um vazio de maiores dimensões. A pressão no interior do macaco voltou-se a elevar aos 3.0MPa, mas desta vez verificou-se uma deformação na chapa de protecção que, ainda assim, na sua extremidade era inferior a 0.5cm. Entendeu-se que uma deformação dessa magnitude não deveria pôr em causa a remoção do conjunto macaco/chapa de protecção.

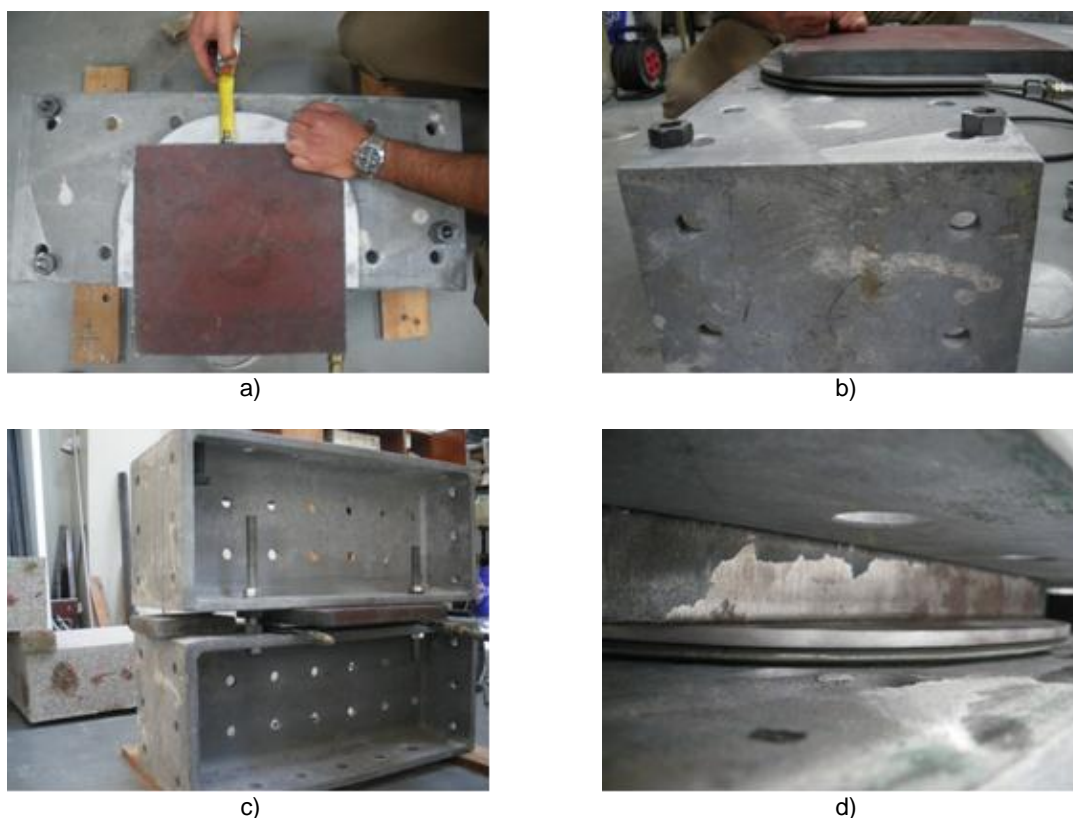


Figura 6.28 – Ensaio de avaliação da capacidade resistente e da deformabilidade da chapa de protecção na presença de um vazio: a) montagem (vista em planta); b) montagem (vista de perfil); c) vista do esquema de ensaio; d) vista interior do local mais solicitado.

Posto isto, assumiu-se que uma chapa com 0.5cm era suficiente para evitar deformações plásticas. Tendo em mente a dificuldade associada à remoção do equipamento do rasgo, procurou-se que essas chapas possuíssem um sistema que facilitasse a sua remoção e, indirectamente, a remoção do macaco plano. Em síntese, concebeu-se um par de chapas com 0.5cm de espessura que protegessem os macacos planos, facilitas-

sem a sua remoção e promovessem uma melhor distribuição das tensões na alvenaria durante a realização do ensaio.

As chapas foram desenhadas com a forma exacta do macaco plano que pretendem proteger no interior da parede, apresentando um braço que permanece no exterior do rasgo e facilita a sua remoção com a ajuda de uma barra de aço. A dimensão do braço das chapas é propositadamente diferente, com o objectivo de reduzir o esforço necessário à sua remoção. Na Figura 6.29 apresenta-se um esquema das peças com uma ilustração do modo como se removem (Figura 6.29 b)).

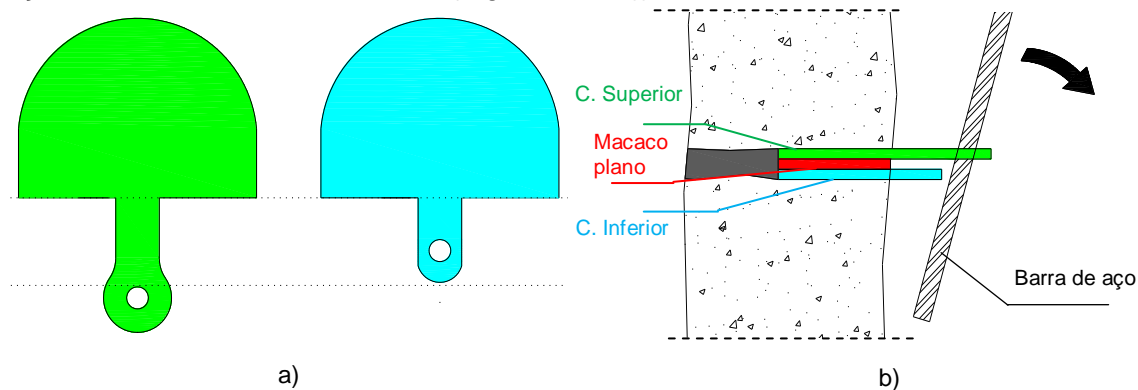


Figura 6.29 – Chapas de protecção dos macacos: a) geometria (vista em planta); b) esquema de colocação e modo de remoção (corte do plano vertical da parede).

Esta melhoria ou adaptação do método de ensaio às paredes de granito em estudo, foi testada num edifício próximo da FEUP. Esse edifício era composto por paredes de alvenaria de pedra e pavimentos e cobertura em estrutura de madeira, dispondo apenas de rés-do-chão e primeiro andar. Foi efectuada o rasgo de acordo com a técnica referida e aumentou-se pressão do macaco plano até aos 0.3MPa. No final, a remoção das chapas foi feita do modo ilustrado na Figura 6.29, tendo-se constatado que, de facto, a incorporação das chapas contribuiu para a protecção e a fácil remoção do macaco plano. Na Figura 6.30 apresentam-se algumas imagens do primeiro teste realizado com o novo equipamento.

O nível de tensão imposto à alvenaria neste teste foi relativamente reduzido, já que o edifício de teste era bastante baixo. Contudo, o mesmo sistema foi posteriormente utilizado, no ensaio realizado na Escola de Emídio Garcia (apresentado anteriormente) sendo então testado para tensões bastante superiores, como se verá de seguida.



Figura 6.30 – Primeira avaliação da modificação introduzida no ensaio com macacos planos: a) edifício objecto de teste; b) sistema de chapas colocado.

6.2.5 Edifício da Escola Emídio Garcia

No âmbito de um estudo realizado na escola Emídio Garcia, foram executados ensaios sísmicos e com macacos planos. O estudo foi inserido no âmbito do Programa de Modernização do Parque Escolar promovido pelo Governo Português.

O complexo edificado da Escola Emídio Garcia é uma construção do período de transição entre as estruturas integralmente em alvenaria de pedra e madeira para as estruturas de betão armado. De acordo com o projecto original e com a observação no local, as paredes de contorno do edifício, assim como algumas paredes internas, são em alvenaria de pedra enquanto as padieiras dos vãos são em betão armado.

A estrutura interna é composta por diversos elementos de betão armado, incluindo pilares interiores e lajes. A cobertura é constituída por asnas de madeira apoiadas em pilaretes que descarregam sobre vigas invertidas de betão armado de grande altura. De acordo com a informação recebida, as paredes e os pilares, apoiam-se no terreno com fundações directas.

A manutenção do edifício exigiu o levantamento dos elementos estruturais e a avaliação das suas características mecânicas, envolvendo a realização de: (a) ensaios com macacos planos e (b) ensaios sísmicos. Foi realizado um ensaio com macacos planos (simple e duplo) numa parede de alvenaria de pedra (granito), de pano único, com cerca de 45cm de espessura. A Figura 6.31 apresenta uma planta da escola onde se assinala o local da intervenção que se designou por P1.

Ao contrário dos casos apresentados anteriormente, as alvenarias testadas encontravam-se revestidas de reboco. Esse reboco encontrava-se muito bem ligado à alvenaria o que transformou a sua remoção num processo extremamente difícil e moroso, tendo sido criada uma “janela de observação” para a escolha do local do teste com dimensões reduzidas.

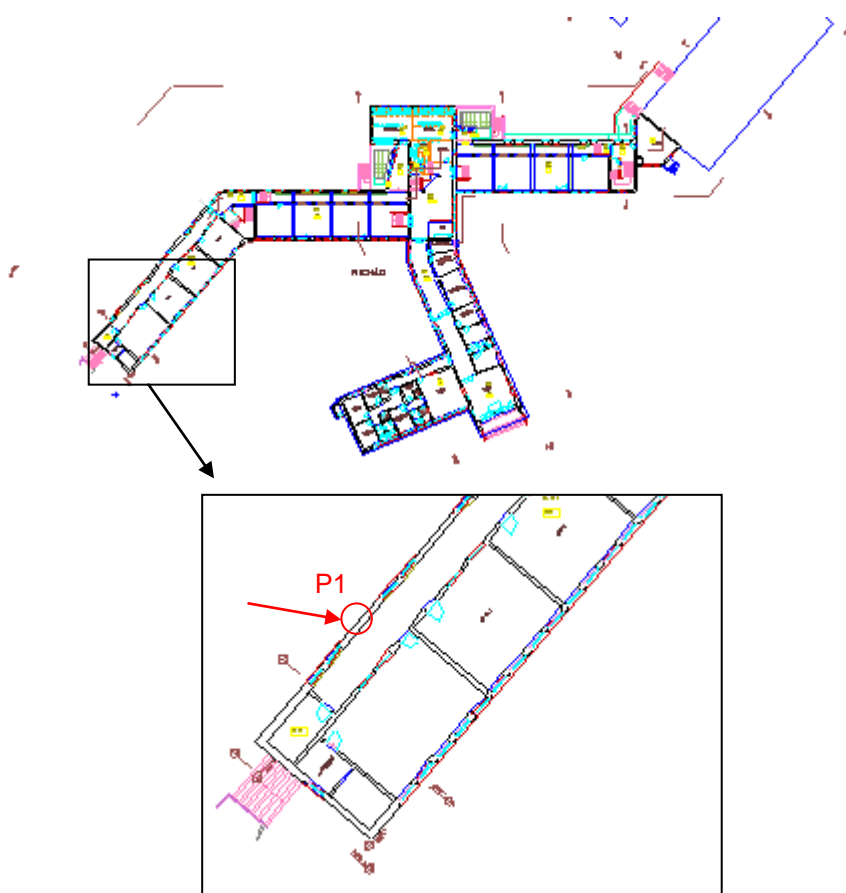


Figura 6.31 – Planta da escola e pormenor do local em que se realizou o ensaio com macacos planos.

Relembra-se que neste ensaio foram utilizadas chapas espessas como forma de protegerem os macacos planos e facilitarem a sua remoção. Cada macaco contava com uma chapa de 2mm de espessura e com outra de 5mm. De seguida apresentam-se os resultados obtidos.

Ensaio simples

O ensaio simples possibilitou obter o estado de tensão vertical instalado in-situ na zona de corte. Previamente, esse estado de tensão tinha sido estimado em 360kPa, valor obtido considerando uma massa volúmica para a alvenaria de 26kN/m³ e uma altura de parede até ao local do ensaio de 14m, tendo-se desprezado a contribuição dos pavimentos de madeira. Mais uma vez, as normas aplicáveis não foram respeitadas já que a dimensão do macaco plano utilizado era muito inferior à das pedras da alvenaria.

Dos 4 alinhamentos verticais considerados no ensaio simples, apenas se utilizaram 3, já que um dos discos de referência do alinhamento AL3 descolou e inviabilizou as leituras nesse alinhamento. Na Figura 6.32 apresentam-se várias fases do ensaio simples, incluindo a localização dos alinhamentos e assinalando-se a vermelho o alinhamento 3.

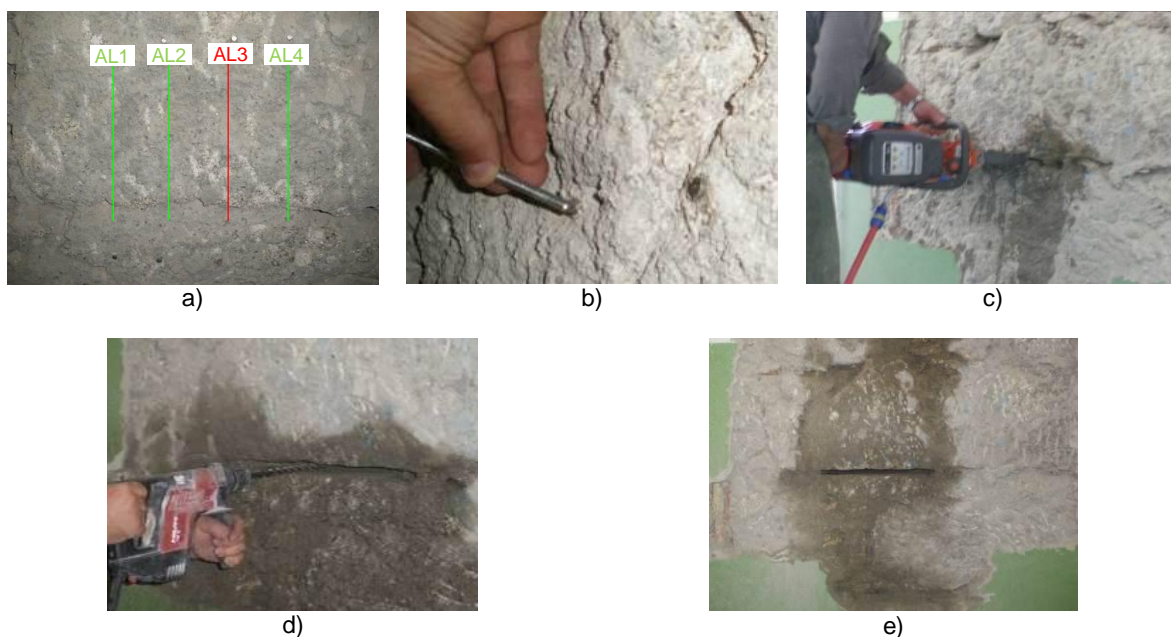


Figura 6.32 – Preparação do ensaio simples: a) definição dos locais a medir e a cortar; b) colocação dos discos de referência; c) corte; d) abertura suplementar do rasgo; e) aspecto final do rasgo.

Na Figura 6.33 e na Figura 6.34 representa-se a evolução relativa dos deslocamentos medidos nos alinhamentos verticais para alguns patamares de carga (pressão efectiva) exercida no macaco plano.

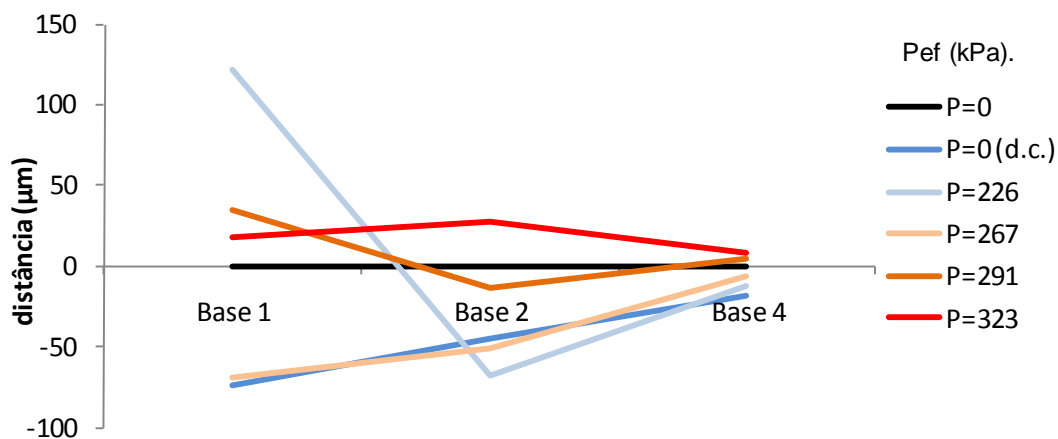


Figura 6.33 – Evolução dos deslocamentos por patamar de pressão (efectiva).

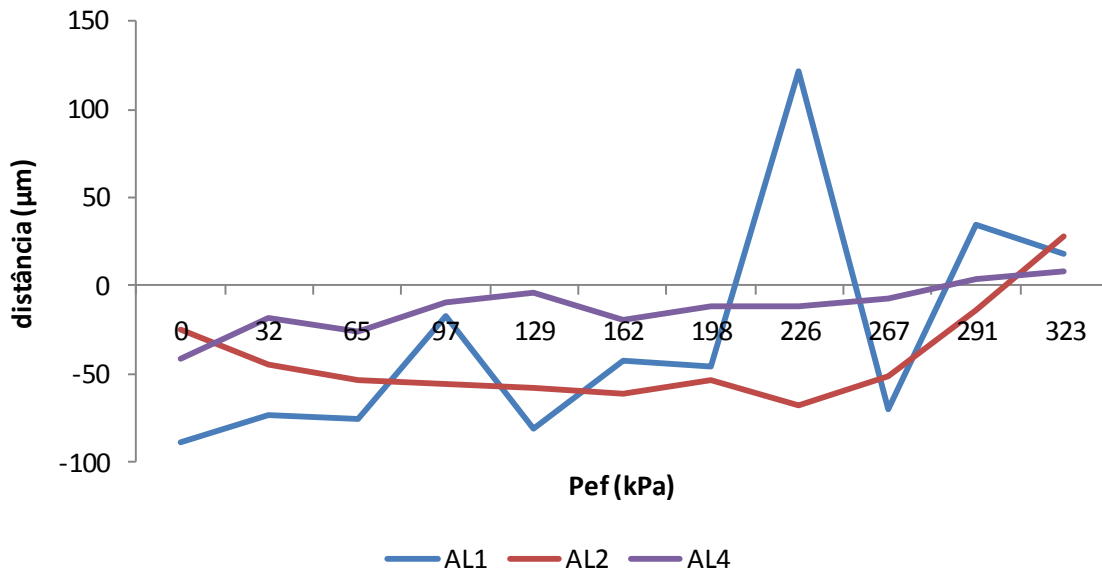


Figura 6.34 – Evolução da distância entre dos alinhamentos com a tensão aplicada no ensaio simples.

A evolução dos deslocamentos com a carga aplicada permitiu determinar a tensão vertical instalada in-situ, $\sigma=289\text{kPa}$, utilizando um $k_a=0.76$ e um $k_m=0.85$. Constata-se que este valor é cerca de 20% inferior ao valor previamente estimado ($\sigma=360\text{kPa}$). Nas normas aplicáveis, é referido que o método pode sobre ou subestimar o valor da tensão in-situ e que a variabilidade de resultados pode atingir os 20%. Assim, considerou-se o resultado obtido aceitável.

Nos gráficos da Figura 6.33 e da Figura 6.34 percebe-se que, para a tensão de $\sigma=226\text{kPa}$ o alinhamento AL1 apresenta um valor que deve ter resultado de um erro de leitura, já que na leitura seguinte volta à ordem de grandeza dos valores que tinha assumido anteriormente. Por esse motivo não se considerou esse ponto e assumiu-se que aquele alinhamento se anulou apenas à tensão de $\sigma=283\text{kPa}$. Não se fez, ao contrário de outros casos, um ajuste de uma recta capaz de estimar a deformabilidade da alvenaria, já que neste caso não foi possível identificar qualquer tendência.

As chapas de elevada rigidez utilizadas na protecção do macaco plano foram certamente úteis na distribuição de tensões mais uniforme. Essa contribuição foi, certamente, importante para a qualidade dos resultados obtidos no ensaio, já que, como se referiu, se verificou uma razoável aproximação entre a tensão estimada e a tensão obtida.

Ensaio duplo

O ensaio duplo permitiu avaliar o comportamento da alvenaria sob carga vertical. A Figura 6.35 apresenta as pedras localizadas entre os macacos planos com o contorno realçado, e os LVDTs colocados entre os macacos planos.

Todos os LVDTs utilizados apresentaram um comportamento normal, com a exceção do LVDT3 (realçado na Figura 6.35), que apresentou um comportamento anómalo. Como se pode observar na Figura 6.36, a correspondente curva tensão vs deformação demonstra que até à tensão de $\sigma=1.5\text{MPa}$, o LVDT3 registou aumentos de comprimento com o aumento da pressão no macaco plano; acima desse valor de tensão o seu comportamento passou a ser o esperado já que registou reduções de comprimento com o aumento da pressão.

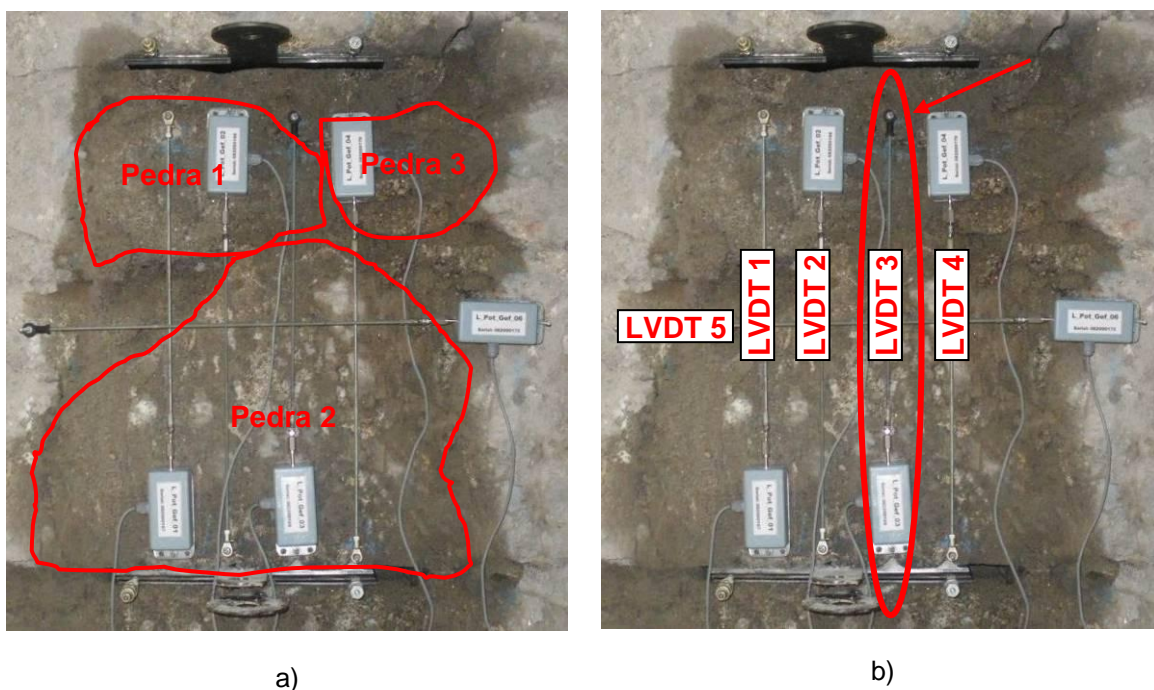


Figura 6.35 – Imagem da zona ensaiada: a) realce das pedras; b) realce dos LVDTs.

De acordo com a disposição dos LVDTs, da geometria das pedras e rigidez do macaco plano, o comportamento anómalo registado pelo LVDT3 deve estar associado ao reajuste das pedras como resultado de superfícies de contacto pontuais, possivelmente responsáveis pela existência de rotações.

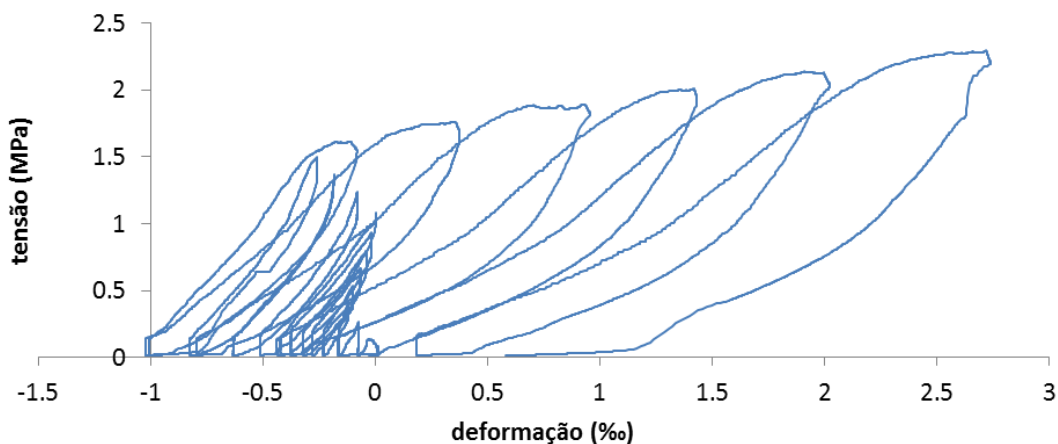


Figura 6.36 – Gráfico tensão vs extensão do LVDT3.

A Figura 6.37 apresenta os resultados obtidos nos 3 LVDTs verticais que apresentaram compressões com o aumento de tensão (excluiu-se o LVDT3) e no LVDT5 (horizontal).

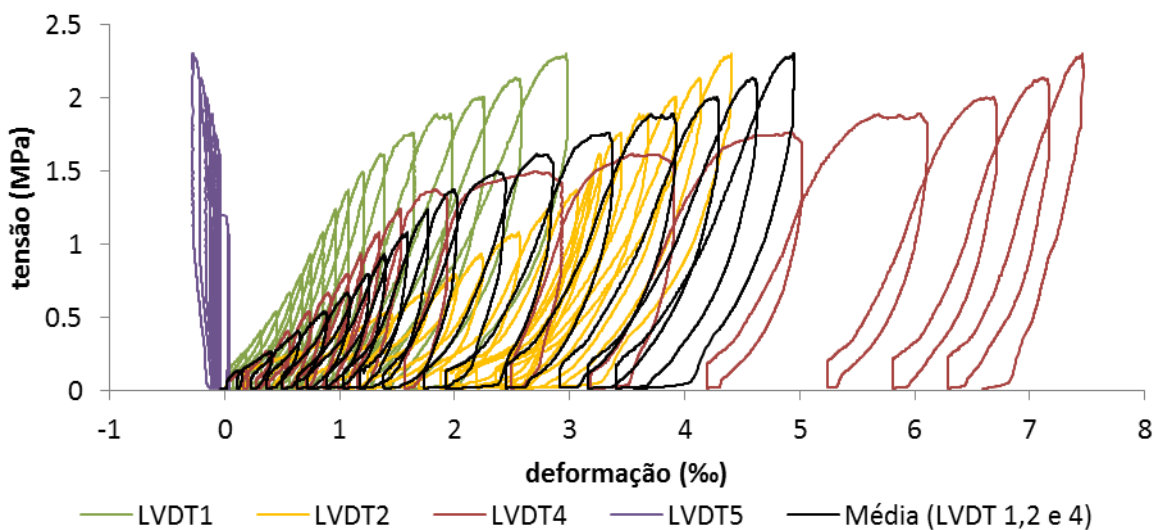


Figura 6.37 – Gráficos tensão-extensão obtidos no ensaio duplo.

De modo a facilitar a análise dos resultados obtidos, apresenta-se na Figura 6.38 apenas a curva média das deformações verticais e a curva do LVDT5 (horizontal).

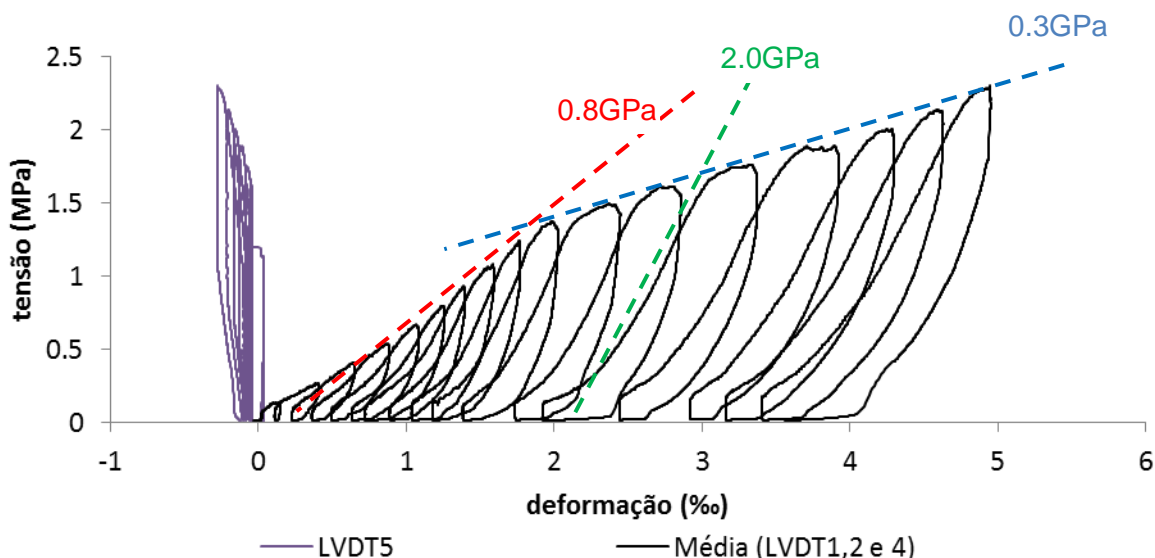


Figura 6.38 – Gráfico tensão vs deformação obtido no ensaio: curva média dos LVDTs verticais e curva do LVDT5 (horizontal).

A curva média apresenta os dois regimes de deformação da curva envolvente, com dois valores distintos de rigidez. O módulo de elasticidade da alvenaria em fase de carga foi, no primeiro regime de carga, de cerca de $E=0.8\text{GPa}$ (linha tracejada a vermelho na Figura 6.38); no segundo regime de carga o módulo de elasticidade foi significativamente inferior: cerca de $E=0.3\text{GPa}$ (linha tracejada a azul na Figura 6.38). Em recarga o módulo de elasticidade foi de $E=2.0\text{GPa}$ (linha a verde na Figura 6.38). O ponto de transição entre as duas curvas coincide com o ponto onde ocorre um grande aumento da deformação horizontal (LVDT5), que está normalmente associado ao aparecimento de dano no material: abertura de juntas e/ou fissuração vertical.

No final do teste, as chapas de protecção dos macacos planos foram retiradas sem dificuldades e os macacos planos foram recuperados sem danos dignos de registo. A elevada rigidez das chapas fizeram com que constituíssem um bom sistema de distribuição de tensões e baixas deformações diferenciais. Assim, na falta de outras soluções mais completas, sugere-se a utilização deste sistema em testes futuros.

6.2.6 Síntese e conclusões dos ensaios realizados

Nos pontos anteriores apresentaram-se ensaios com macacos planos realizados in-situ. Os resultados obtidos, embora possam ser questionáveis, dão uma ideia acerca das alvenarias estudadas. O cruzamento destes resultados com os resultados obtidos através de outros ensaios, nomeadamente ensaios sínicos, é essencial para uma boa validação desta técnica pode ajudar a validar ou rejeitar os ensaios. Verificou-se nos edi-

fícios de António Carneiro e de Mouzinho da Silveira, que o módulo de elasticidade obtido através dos ensaios sínicos é muito próximo do módulo de elasticidade obtido em situação de recarga através do ensaio com macacos planos, como se pode concluir pela observação do Quadro 6.2.

Quadro 6.2 – Síntese de resultados obtidos nos edifícios estudados.

	Estado de tensão in-situ (kPa)		Módulo de elasticidade (GPa)				
	Estimada	Ensaio simples	Ensaio simples	Carga – 1ºregime	Carga – 2ºregime	Recarga	Ensaio sínicos
António Carneiro	160	49	0.55	1.3	0.6	1.2	0.4-1.2 ^{*(1)}
Largo dos Loios	250	466	-	-	-	-	-
Mouzinho da Silveira	500	840	3.0	3.3/3.0	0.4/0.8 ^{*(2)}	2.6/4.2 ^{*(2)}	3.3
SRU	420	600/730 ^{*(3)}	1.85/2.2 ^{*(3)}	-	-	-	-
Escola Emídio Garcia	360	289	-	0.8	0.3	2.0	-

* (1) – obtido noutra parede do mesmo edifício

* (2) – valores obtidos com LVDTs de, respectivamente, 60cm de comprimento e 1.0m de comprimento.

* (3) - valores obtidos em dois locais da mesma parede

Verificou-se que a tensão in-situ estimada e a tensão determinada através dos ensaios com macacos planos foram na maioria dos casos muito diferentes, embora no caso da escola Emídio Garcia se tenha verificado uma diferença inferior (de cerca de 20% entre os dois valores); o caso em que se verificou a maior diferença, cerca de 70%, foi no edifício de António Carneiro. A diferença significativa entre os valores estimados e os efectivamente obtidos, não pode ser dissociada do desconhecimento da verdadeira área de contacto entre o macaco plano e a alvenaria embora, pontualmente, outras razões possam ser apontadas, como no caso do edifício de António Carneiro, onde o baixo nível de tensão a mobilizar pode levar à perda de resolução do ensaio.

Embora o objectivo principal do ensaio simples com macacos planos seja a determinação do estado de tensão in-situ, se for verificada uma tendência regular dos deslocamentos dos pontos de referência, é possível obter também uma primeira aproximação do módulo de elasticidade da alvenaria, como se apresentou nos casos dos edifícios de António Carneiro e Mouzinho da Silveira. Neste último caso, a estimativa da rigidez da alvenaria foi muito próxima da obtida no ensaio duplo.

Tal como o ensaio simples, o ensaio duplo também pode fornecer informação que vai muito para além do conhecimento do módulo de elasticidade da alvenaria. Desde lo-

go, pode ser verificada a forma como esse parâmetro varia com o regime de cargas aplicado. Além disso, este ensaio dá uma ideia do estado de tensão in-situ e da carga máxima a que uma determinada parede esteve sujeita durante a sua história. Importa também salientar o importantíssimo papel do LVDT horizontal que, mais do que contribuir para determinar o coeficiente de Poisson da alvenaria em situação confinada como alguns autores defendem (valor muito discutível devido às especificidades do teste), permite complementar a informação que se pode deduzir pelo andamento dos LVDTs verticais ajudando a identificar o início e a magnitude do dano, isto é, da fissuração e/ou abertura de juntas verticais.

Pelas especificidades das alvenarias estudadas, verificou-se que na maioria dos ensaios as normas aplicáveis não puderam ser respeitadas. Considera-se fundamental a adaptação dessas normas às alvenarias constituídas por pedras de grandes dimensões. Essa adaptação deve ser baseada em ensaios laboratoriais e in-situ, apoiada em simulações numéricas.

Todos os casos de estudo referidos contribuíram para a compreensão das limitações e potencialidades do método, em particular quando aplicados ao material em estudo, contribuindo ainda para a melhoria do ensaio. Em síntese:

- ✓ no edifício de António Carneiro, foram sentidas dificuldades durante a execução dos rasgos, com a queda de calços da parede que alteravam significativamente as condições de contacto entre o macaco plano e a alvenaria. Foi ainda extremamente difícil retirar os macacos planos dos rasgos após o ensaio;
- ✓ no edifício do largo dos Lóios, próximo do final do teste o macaco plano começou a deformar-se excessivamente, resultado da presença de um vazio de grandes dimensões. Essa deformação impediu a conclusão do teste e dificultou a remoção do macaco plano, pelo que foi necessário destruir a alvenaria circundante;
- ✓ no edifício de Mouzinho da Silveira foi avaliada a diferença entre os resultados obtidos com LVDTs de diferentes comprimentos (60cm e 1m de comprimento). Os resultados obtidos revelaram-se coerentes nos dois casos, realçando a necessidade de estudar mais situações deste tipo e a respeitar um único procedimento (norma) de forma a serem comparáveis. Além disso, foi testada a protecção dos macacos planos com placas de PET (como tinha sido sugerido pelo INEGI), protecção que se revelou inadequada; a remoção dos macacos planos foi muito complicada;
- ✓ no edifício da Sociedade de Reabilitação Urbana de Vila Nova de Gaia verificou-se que, com o ensaio simples, se obtiveram valores consistentes em ensaios realizados em dois locais diferentes da mesma alvenaria. Foi testa-

do o uso de chapas metálicas de cerca de 0.5mm de espessura que se revelaram ineficazes, quer para proteger o macaco plano, quer para facilitar a sua remoção;

- ✓ na Escola Emídio Garcia, obteve-se uma razoável consonância entre os valores da tensão in-situ estimada e obtida. Foram utilizadas chapas de protecção com 2 e 5mm de espessura nas faces superior e inferior de cada macaco plano. Após a realização do ensaio as chapas e os macacos planos foram removidos sem dificuldade.

A realização de ensaios com macacos planos e o conhecimento da técnica com mais profundidade puseram a nu limitações e/ou dificuldades de dois tipos: (a) inerentes à própria técnica e (b) associadas às alvenarias de pedra ensaiadas. Em relação ao primeiro grupo referem-se 2 exemplos:

- ✓ a indefinição da área de contacto entre o macaco plano e a alvenaria. Note-se que ainda que se conhecesse essa área com exactidão, não é possível determinar a tensão que cada ponto desse contacto transmite à alvenaria;
- ✓ o valor utilizado para o coeficiente do macaco plano k_m . Este valor está associado à rigidez do macaco plano e considera-se constante quando, na realidade, a sua rigidez é passível de variar com o nível de pressão existente no seu interior, com a espessura do rasgo e as condições de contacto do macaco plano. Lembra-se que o processo de calibração do macaco plano, isto é, de determinação de k_m ocorre num ambiente confinado e adaptado à sua espessura.

Em relação ao segundo grupo, relativo às dificuldades associadas ao tipo de alvenarias ensaiadas, refere-se:

- ✓ a escolha do local do corte – a variabilidade de dimensões e irregularidade da forma das pedras torna a escolha do local de corte uma tarefa difícil. Note-se que o local escolhido deve permitir a execução de dois cortes alinhados, preferencialmente, em juntas;
- ✓ o posicionamento dos pontos de referência e dos LVDT's – dada a irregularidade das formas geométricas das pedras, adoptar um espaçamento e alinhamento constantes entre pontos de referência e/ou LVDT's é por vezes difícil;
- ✓ a queda de calços das pedras – conforme se referiu, nas alvenarias testadas, as pedras são calçadas com outras pequenas pedras. Quando se faz o corte das juntas para a introdução dos macacos planos, frequentemente cortam-se também esses calços provocando a sua queda, criando lacunas

no contacto dos macacos planos com a parede que podem, inclusivamente, inviabilizar o teste;

- ✓ a introdução/protecção dos macacos planos nos rasgos - devido à pequena espessura do corte realizado (limitação da máquina de corte utilizada) é por vezes difícil a introdução do macaco plano no rasgo, em particular quando incluídas também as chapas de aço de protecção;
- ✓ a remoção do macaco plano – o macaco plano deforma-se plasticamente nos vazios que vai encontrando. O aumento de volume que daí resulta torna difícil a sua remoção que, por vezes, só é possível se for retirado parte do material que o envolve.

6.3 MACACO DE ALTA DEFORMABILIDADE E FLEXIBILIDADE

A introdução das chapas de aço trouxe melhorias importantes ao ensaio realizado. Contudo, continuaram a existir aspectos que contribuem para incertezas importantes nos resultados obtidos através da técnica dos macacos planos. Enquanto não houver conhecimento rigoroso da área e da tensão transmitida pelo macaco plano à alvenaria, restarão sempre dúvidas relativamente à representatividade dos resultados.

O desconhecimento da área de contacto não permite conhecer a força total transmitida pelo macaco plano à alvenaria. Na falta de outro método mais fiável, existe um método expedito que pode ser utilizado para determinar a área de contacto - o uso de papel químico. Contudo, o papel químico, já utilizado em ensaios de macacos planos em edifícios portugueses (Pagaimo, 2004, Roque, 2002, Vicente, 2009), pode não ser completamente fiável já que:

- ✓ a introdução/remoção dos macacos e das chapas de apoio pode alterar o desenho de tensões obtido durante o teste. No caso das alvenarias testadas na presente dissertação, essa alteração teria ocorrido, dada a dificuldade em introduzir e remover o macaco plano;
- ✓ não permite determinar a distribuição de tensões na área de contacto identificada.

Com o objectivo de ultrapassar os condicionalismos referidos, estudou-se a criação de um macaco plano flexível. Uma ideia semelhante já tinha sido anteriormente estudada por Woodham e Schuller (Woodham ; Schuller, 2003) que desenvolveram macacos planos flexíveis feitos à base de materiais diversos, por exemplo: nylon; aramida; kevlar. Os autores notaram várias dificuldades com o novo equipamento: nuns casos as placas com que fabricavam o corpo do macaco eram demasiado rígidas; noutros casos dava-se a expansão lateral; além disso, os orifícios de saída/entrada desligavam-se do corpo do macaco plano.

No mesmo trabalho, os autores previram a instrumentação do macaco plano com placas paralelas, num sistema que se baseava na alteração da capacitância entre essas duas placas que, quando se deslocavam entre si, faziam alterar esse valor. Este sistema provou ter utilidade para medir deslocamentos entre as placas; esses deslocamentos foram comparados com os obtidos durante a execução de um ensaio simples tendo-se verificado uma boa aproximação. O macaco plano que projectaram foi ainda utilizado no teste de alvenarias em laboratório, tendo-se verificado haver uma boa aproximação entre os resultados do ensaio duplo e do ensaio de compressão (diferenças do módulo de elasticidade inferiores a 20%). A eficiência do macaco plano flexível em termos de coeficiente k_m variava entre os 0.69 e os 0.92.

Embora Woodham e Schuller tivessem atingido desenvolvimentos interessantes, continuava-se a desconhecer o valor da força aplicada em cada segmento de área do macaco plano. Por esse motivo, no âmbito da presente dissertação foi concebido um macaco plano de alta sensibilidade e flexibilidade. Trata-se de um macaco plano construído num material compósito que incorpora fibras de carbono, poliamida, poliéster ou kevlar que consegue recuperar a sua forma no final do teste, facilitando a sua remoção do interior do rasgo. Desta forma, evita-se a introdução de dano nas estruturas para a sua remoção e de dano nos próprios macacos planos que, assim, não têm que ser sistematicamente re-calibrados. Note-se que a calibração dos macacos planos é um processo delicado e que exige equipamento complexo.

O tecido do macaco plano concebido na presente dissertação, incorpora um sistema de mapeamento de pressão que, para além de permitir conhecer com precisão o valor da tensão transmitida pelo macaco plano à estrutura testada, por integração na área de influência de cada sensor regista o valor da força total que é efectivamente aplicada à alvenaria. O conhecimento da distribuição de tensões no macaco plano permite ao utilizador detectar anomalias que advenham da concentração de tensões num ponto através da leitura do valor registado em cada sensor. O espaçamento de sensores pode ser ajustado em função da aplicação que se pretende realizar. Note-se que esta decisão está directamente relacionada com o custo do equipamento (mais sensores implicam um custo mais elevado).

O macaco plano concebido, para além dos elementos a que se fez referência anteriormente, possui uma peça de remate rígida. Esta peça visa dar maior resistência e estabilidade ao macaco plano: limita as deformações para fora do plano da parede, torna mais rígida a ligação entre o corpo principal do macaco e os orifícios de saída/entrada e a peça de remate e incorpora a ficha para onde convergem todos os sensores.

O equipamento idealizado, ilustrado na Figura 6.39, foi depositado no Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (Costa, et al., 2011). A sua execução encontra-se em estudo por uma equipa multidisciplinar que, para além dos seus autores, inclui um Enge-

nheiro Mecânico e Engenheiros Electrotécnicos. Espera-se que o primeiro protótipo se possa construir em breve.

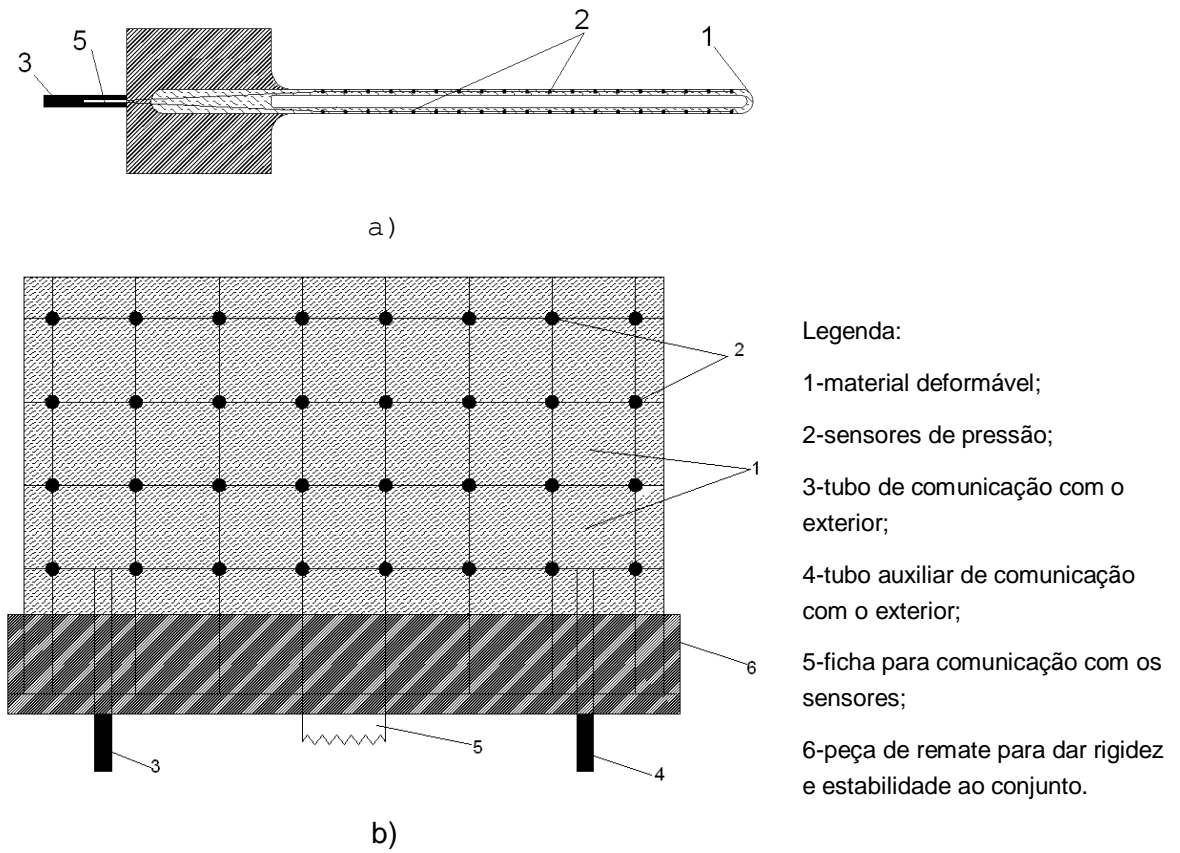


Figura 6.39 – Vista esquemática de um macaco plano de alta sensibilidade e deformabilidade: a) em corte; b) em planta.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação encontra-se dividida em sete Capítulos em que se estudam duas técnicas de ensaios não/semi-destrutivos que se utilizam na caracterização de estruturas de alvenaria de pedra: macacos planos e ensaios acústicos. No Capítulo 1 apresentam-se considerações de carácter genérico e aspectos que têm a ver com a organização do trabalho.

Os Capítulos 2, 3 e 4 foram dedicados ao estudo dos ensaios acústicos. Após a apresentação no Capítulo 2 dos princípios subjacentes a este tipo de técnicas, passou-se, no Capítulo 3, ao estudo de variáveis capazes de influenciar os resultados obtidos. Estes ensaios prévios, realizados sobretudo em laboratório, foram extremamente importantes já que permitiram a familiarização com a técnica e com os diferentes equipamentos utilizados (sónico e ultra-sónico). Foi também possível estabelecer fronteiras acerca da aplicabilidade dos ensaios.

O equipamento de ultra-sons revelou-se, na maioria das vezes, inadequado à caracterização de alvenarias de pedra e a sua utilidade ficou cingida aos casos em que se caracterizaram pedras regulares, em especial de superfícies lisas. A avaliação de elementos heterogéneos, como é o caso das alvenarias, e a contabilização do efeito conjunto de pedras e juntas, apenas foi possível utilizando ondas de baixa frequência – ondas sónicas.

Concluiu-se que a presença de reboco não influencia em grande medida as velocidades de propagação das ondas sónicas, desde que este esteja solidamente ligado à alvenaria. A utilização de acopladores entre o acelerómetro e a superfície testada, na ca-

racterização de alvenarias através de ensaios directos, não traz vantagens claras na determinação da velocidade de propagação das ondas elásticas.

Ainda no Capítulo 3, confirmou-se a utilidade de diferentes configurações de ensaio (directa, indirecta e eco-impacto) e de técnicas de tratamento de resultados, na caracterização de pedras homogéneas de superfícies lisas. Estes métodos, embora produzissem resultados ligeiramente diferentes, davam uma boa ideia da ordem de grandeza das velocidades de propagação das ondas elásticas. Os resultados obtidos nas pedras de dimensões regulares e superfície lisa sugeriram que o rigor dos ensaios acústicos é elevado, já que forneceram um módulo de elasticidade que diferia em apenas 10% do módulo de elasticidade obtido através de ensaios mecânicos destrutivos.

Em pedras de formas e dimensões irregulares verificou-se que a utilização do equipamento de ultra-sons apenas era possível utilizando a configuração indirecta já que não se conseguia obter qualquer valor através da configuração directa. Nestes verificava-se uma situação interessante: em superfícies irregulares, em que o contacto com os transdutores não era perfeito, o equipamento apenas conseguia detectar a chegada das ondas R (maior energia); em superfícies lisas, em que se verificava um bom acoplamento dos transdutores, já era possível identificar a chegada das ondas P. Esta situação levanta questões importantes relativamente à utilização de equipamentos fechados na detecção de ondas de superfície. Nas pedras testadas obteve-se, com base nos ensaios sónicos, um módulo de elasticidade de 15GPa contrariamente aos ensaios estáticos em pedras recolhidas do mesmo edifício onde esse módulo foi de 26GPa. O valor obtido através da técnica sónica permite obter uma ordem de grandeza do módulo de elasticidade, devendo-se a diferença observada a terem sido analisadas diferentes pedras.

Em prismas constituídos por várias pedras de granito sobrepostas, apurou-se que o atravessamento das juntas por parte das ondas elásticas contribui para baixar a sua velocidade de propagação mais do que o previsto, até à sua estabilização. Essa estabilização ocorre com o atravessamento da terceira ou quarta junta e coincide com o resultado obtido através dos ensaios directos. A técnica do eco-impacto forneceu frequências associadas à primeira grande interface que as ondas encontravam e que: no caso de juntas secas, correspondia à primeira junta; no caso de juntas argamassadas correspondia à extremidade do conjunto.

Em prismas constituídos por pedras de granito e juntas argamassadas, verificou-se que os ensaios sónicos são sensíveis ao endurecimento das argamassas já que a velocidade de propagação das ondas obtidas com base em ensaios directos, indirectos e de eco-impacto, aumentou essencialmente nos primeiros dias de cura da argamassa.

Os ensaios realizados em pedras permitiram fazer testes preliminares que contribuíram para o conhecimento do método e do material em estudo. Com base nesses ensaios, desenvolveu-se uma técnica utilizando o ensaio sónico a que se designou por ISIM,

que se aplicou em diferentes alvenarias e que se apresenta no Capítulo 4. Em laboratório os resultados obtidos utilizando esta técnica, foram comparados com ensaios mecânicos nos mesmos painéis de alvenaria e com ensaios realizados no âmbito de outro trabalho de Doutoramento (Vasconcelos, 2005) sobre provetes de características semelhantes às alvenarias testadas. Nos dois casos verificou-se uma considerável concordância nos resultados obtidos.

Ainda no Capítulo 4, apresentam-se alguns casos de aplicação da técnica ISIM em condições in-situ onde também se verificou a sua utilidade. A técnica desenvolvida foi capaz de fornecer resultados de natureza quantitativa em alvenarias, nomeadamente uma ordem de grandeza do seu módulo de elasticidade. Comprovou-se que esta técnica tem condições para ser incluída no lote restrito de técnicas capazes de fornecer resultados de natureza mecânica e quantitativa em alvenarias. Note-se contudo que à semelhança dos métodos já existentes, o ISIM deve ser utilizado como complemento das outras técnicas de caracterização de alvenarias e a sua utilização deve ser vista como uma contribuição para a validação (ou não) dos resultados dessas técnicas.

No Capítulo 5, apresentou-se a técnica dos macacos planos, que se pretendeu melhorar. O ensaio com macacos planos é dos poucos ensaios in-situ semi-destrutivos que permite conhecer o módulo de elasticidade de uma alvenaria, sendo frequentemente realizado em locais onde previamente se realizaram ensaios acústicos. Apresentou-se a evolução do ensaio com macacos planos, técnica que provém da Mecânica das Rochas, e descreveram-se as suas duas variantes, o ensaio simples e o ensaio duplo. Foram referidos diversos aspectos desta técnica e fez-se uma referência especial a um estudo em que o autor participou e em que se concluiu que a quantidade de alvenaria mobilizada na execução do ensaio duplo é muito superior à quantidade de material delimitado pelos dois macacos planos. As normas aplicáveis foram discutidas e percebeu-se que, nalguns casos, são de difícil aplicação. Finalmente, apresentaram-se alguns estudos realizados em Portugal em que se vincam as limitações do teste, em especial, a dispersão de resultados.

No Capítulo 6, tendo por base ensaios realizados in-situ em edifícios de alvenaria de pedra, foram identificadas as dificuldades de realização dos ensaios com macacos planos, quer as inerentes à própria técnica, quer as relacionadas com o material estudado, maioritariamente alvenarias de pedra irregular de grandes dimensões. Para obviar essas dificuldades promoveram-se algumas alterações da técnica existente, que culminaram na concepção de um novo equipamento de alta sensibilidade e deformabilidade. Com o novo macaco plano pretendeu-se reduzir as deformações plásticas e deste modo facilitar a sua remoção do interior do rasgo, bem como, conhecer em detalhe a pressão transmitida à alvenaria, através de uma rede de sensores embebida no material utilizado no fabrico do macaco plano.

7.2 SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Terminada a presente dissertação verifica-se que há ainda várias linhas de investigação em aberto nas duas técnicas de ensaio apresentadas.

Em relação aos ensaios de propagação de ondas acústicas é necessário consolidar a técnica ISIM, aplicando-a a um maior número de edifícios, de diferentes tipologias, e comprovar os seus resultados através de outras técnicas não destrutivas e destrutivas. No estudo de alvenarias de mais que uma folha, pode-se estudar com maior rigor a técnica do eco-impacto, já que se acredita que esta pode dar uma forte contribuição para o conhecimento individualizado das diferentes folhas que constituem as alvenarias.

Além da abordagem no domínio do tempo, apresentada no âmbito do presente trabalho, a análise no domínio da frequência também pode dar indicações importantes na avaliação das alvenarias estruturais, em especial do seu nível de degradação. A exploração da velocidade de fase e a sua utilização para avaliar o estado da alvenaria ao longo da sua espessura, utilizando ensaios indirectos, pode-se revelar igualmente útil.

No actual ponto da investigação em ensaios sónicos é determinante que os resultados obtidos por via experimental se apoiem em modelos numéricos que permitam simular o comportamento das ondas elásticas, primeiro em situações mais controladas e depois em situações mais complexas. Esta situação vai contribuir para a clarificação de um grande conjunto de situações, por exemplo, a propagação das ondas no sistema pedra+junta+pedra.

Em relação ao ensaio com macacos planos, o principal desafio passa por construir um protótipo com base na ideia que se desenvolveu no Capítulo 6 cuja patente se encontra depositada no Instituto Nacional de Patentes. Os progressos até ao momento culminaram numa proposta/orçamento para fabricar um material que incorpore sensores de pressão e que constituiria o corpo principal do macaco plano. Após a construção do protótipo será necessário testar a sua aplicabilidade em laboratório e encontrar estratégias de redução dos custos necessários à sua produção e comercialização.

Em relação à instrumentação de medição de deslocamentos no ensaio com macacos planos (simples e duplos) seria desejável a adopção de equipamentos de medição de deslocamento que não necessitem de contacto. Esta adaptação seria particularmente útil no caso do ensaio simples que, como se sabe, é permeável a erros de leitura dos utilizadores, ao contrário do ensaio duplo que tem vindo a ser realizado com uma considerável automação. Sugere-se ainda a realização de ensaios com macacos planos em condições controladas, fazendo variar algumas grandezas (como a tensão, o tamanho do macaco plano, a espessura da alvenaria, a dimensão dos elementos principais da alvenaria), de modo a avaliar a sensibilidade do ensaio a essas variações. Sempre que possível, os resultados devem ser cruzados com simulações numéricas, que ajudem a compreender

melhor o mecanismo/comportamento em causa, e com outras técnicas. Não é de excluir o recurso a ensaios destrutivos, como forma de validar os resultados.

Finalmente, mas não menos importante, sugere-se a divulgação contínua dos resultados obtidos e a elaboração de uma base de dados com resultados de ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaneo, M. P.; Binda, L.; Faticcioni, A. - *Non Destructive Evaluation of bricks-masonry Structures: Calibration of Sonic wave propagation procedures*. Berlim: 1995.
- Acito, M.; Binda, L.; Cardani, G.; Guedes, J.; Miranda, L. - *Experimental and numerical study on the application of the flat-jack tests to masonry walls* ENGLAND: 2008.
- Aggelis, D. G.; Momoki, Shouhei; Chai, Hwakian - Surface wave dispersion in large concrete structures. *NDT&E international*. 42 (2009). p. 304-307.
- Aggelis, D. G.; Shiotani, T. - Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements. *Cement & Concrete Composites*. 29:9 (2007a). p.
- Aggelis, D. G.; Shiotani, Tomoki - Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media. *Acoustic Society of America*. 122:5 (2007b). p.
- Aiolfi, Ilaria; Bloise, Giuseppe; Maffé, Monica Porta - *Calibrazione delle prove soniche sulle murature in mattoni : utilizzo delle forme d'onda per la definizione di parametri rappresentativi le condizioni del materiale*. Milano: Faculty of Architecture of Politecnico di Milano, 1996.
- Almeida, C.; Guedes, J.; Arêde, A.; Costa, A. - *Caracterização Geométrica e Mecânica de Paredes de Perpiano de Granito*". Guimarães: 2010a.
- Almeida, C.; Guedes, J.; Arêde, A.; Costa, A. - *Geometrical and Mechanical Characterization of One Leaf Stone Masonry*. Dresden: 2010b.
- Alonso, Marcelo; Finn, Edward J. - *Física*. Madrid: Addison Wesley, 1999.
- Andrade, Patrícia Becker de - *Estimativa da Profundidade de Fendas no Concreto através da Utilização do Ultra-som e Eco-Impacto*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- ASTM-D-4580 - *Practice for measuring delaminations in concrete bridge decks by sounding*. West Conshohocken: ASTM, 2002.
- ASTM-E-114 - *Practice for ultrasonic pulse-echo straight beam examination by the contact method*. West Conshohocken: 2002.
- ASTM - C 1196-91 *Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements*. 1991.
- ASTM - *Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method*. West Conshohocken: ASTM - International, 1997.
- ASTM - *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM, 2007.
- ASTM - *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*
West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- Azevedo, Álvaro - *Mecânica dos Sólidos*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.

Begonha, Arlindo Jorge Sá de - *Meteorização do Granito e Deterioração da Pedra em Monumentos e Edifícios da Cidade do Porto*. 1.ª Edição. Porto: FEUP Edições, 2001.

Binda, L.; Cantini, L.; Cardani, G.; Saisi, A.; Tiraboschi, C. - *Use of Flat-Jack and Sonic Tests for the Qualification of Historic Masonry*. In: 10th Tenth North American Masonry Conference (10NAMC), Missouri, 2007, 2007.

Binda, L.; Cantini, L.; Tiraboschi, C.; Amigoni, C. - *Non Destructive investigation for the conservation design of a Monastery near Bergamo (Italy)*. In: 1st Int. RILEM Symp. On Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures - SACoMaTiS 2008, Varenna 2008,

Binda, L.; Rossi, P.; Landriani, G. Sacchi - *Diagnostic Analysis of Masonry Buildings*. In: IABASE Symp. on Strengthening of building structures, Venezia, 1983,

Binda, L.; Saisi, A.; Tiraboschi, C. - Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures. *NDT&E international*. 34 (2001). p. 123-138.

Binda, L.; Saisi, A.; Tiraboschi, C. - Investigation Procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*. 14 (2000). p.

Binda, L.; Saisi, A.; Valle, S.; Zanzi, L. - *Indagini Soniche Applicate alle Murature in Mattoni: Calibrazione e Individuazione di Parametri Significativi*. Orvieto: 1997.

Binda, L.; Saisi, A.; Zanzi, L. - *The complementarity use of on site Non Destructive tests for the investigation of historic masonry structures*. In: 9NAMC (9th North American Masonry Conference), Carolina, USA, 2003,

Binda, Luigia - *Role of a Rilem Committee: Calibration of Proposed Test Methods*. Padua: RILEM, 1995.

Binda, Luigia; Saisi, A. - *Non Destructive Testing applied to historic buildings: the case of some Sicilian Churches*. In: 3.rd International Seminar: Historical Constructions - Possibilities of Numerical and Experimental Techniques, Guimarães, Portugal, 2001,

Binda, Luigia; Tiraboschi, Claudia - Flat-Jack Test: a Slightly Destructive Technique for the Diagnosis of Brick and Stone Masonry Structures. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*. (1999). p. 449-472.

BSI - *Natural Stone Test methods - Determination of Sound Speed Propagation*. British Standard, 2004.

BSI - *Testing Concrete - Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*. BSI, 1986.

Carino, N. J. - *The Impact-echo method: an Overview*. Gaithersburg: Building and Fire Research Laboratory - National Institute of Standards and Technology, 2001.

Carino, Nicholas J. - *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. 2nd Edition. Barr Harbor Drive: ASTM - International

CRC Press LLC, 2004.

Cascante, G.; Najjaran, H.; P.Crespi - Novel Methodology for Nondestructive Evaluation of Brick Walls: Fuzzy Logic Analysis of MASW tests. *Journal of Infrastructure Systems*. June 2008 (2008). p.

CEN - *Ensaio do betão nas estruturas*. Caparica: IPQ, 2007.

Center, NDT Resource - *Introduction to Ultrasonic Testing*. NDT Resource Center, 2011.

Chappuis, Philippe - *Modélisation non-linéaire du comportement du béton sous des sollicitations dynamiques*. Zürich: Institut für Baustatik und konstruktion, 1987.

Christaras, B.; Auger, F.; Mosse, E. - Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures*. 27:(1994). p. 222-228.

construction, Centre Scientifique et technique de la - *Pierres Naturelles*. Bruxelles: Centre Scientifique et technique de la construction, 1997.

Costa, A.; Guedes, J.; Miranda, L. - *MACACO PLANO PARA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO "INSITU"*. Portugal: 2011.

Costa, Cristina - *Análise numérica e experimental do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra*. Porto: University of Porto, 2009.

Eisberg, Robert M.; Lerner, Lawrence S. - *Física - Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: McGraw-Hill, Inc., 1982.

Elmore, William C.; Heald, Mark A. - *Physics of waves*. New York: Dover Publications, inc., 1985.

Faria, Rui - *Avaliação do comportamento sísmico de barragens de betão através de um modelo de dano contínuo*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.

Ferreira, Cristiana Maria da Fonseca - *Implementação e aplicação de transdutores piezoeléctricos na determinação de velocidades de ondas sísmicas em provetes : Avaliação da qualidade de amostragem em solos residuais* Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

Gerthsen, C.; Kneser; Vogel, H. - *Física*. 2.^a Edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.

Green, David W.; Winandy, Jerrold E.; Kretschmann, David E. - *Wood Handbook*. United States Department of Agriculture - Forest Products Laboratory, 1999.

Gregorczyk, P.; Lourenço, Paulo - Review on Flat-Jack Testing. *Engenharia Civil*. 9:(2000). p.

ICOMOS - *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. In: Paris, 2001,

Ingard, K. U. - *Fundamentals of waves and oscillations*. Cambridge University Press, 1988.

IPQ - *Ensaio do betão nas estruturas*. IPQ, 2007a.

IPQ - *Métodos de ensaio para pedra natural : determinação do módulo de elasticidade estático*. 2007b.

Lamb, H. - On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 203:(1904). p. 1-42.

LESE, Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural - *Comportamento Mecânico de buchas*. Porto: FEUP, 2005.

LNEC - *An improved method and apparatus for testing stresses in soil*. Portugal: 1970.

Martínez-Martínez, Javier; Benavente, David; García-del-Cura, M. Angeles - *Comparison of static and dynamic elastic modulus in fractured building rocks*. Oslo: 2008.

- Mechkour, Houari - *The exact expressions for the roots of Rayleigh wave equation*. In: The 2-nd International Colloquium of Mathematics in Engineering and Numerical Physics (MENP-2), University Politehnica of Bucharest, 2002,
- Miller, MG. F.; Pursey, H. - *On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid*. In: Royal Society, London, 1955,
- Miranda, J. Miguel; Luís, J. F.; Costa, P. T.; Santos, F. M. - *Fundamentos de Geofísica*. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2000.
- Miranda, Luís; Lopes, Valter; Quelhas, Bruno; Guedes, João; Paupério, Esmeralda; Costa, Aníbal - *Torre do Relógio - Ensaaios sónicos e dinâmicos*. Porto: IC-FEUP, 2008.
- Miranda, Luís; Rio, João; Guedes, João; Costa, Aníbal - *Propagation of Elastic Waves on Stone Masonry Walls*. Dresden: 2010.
- Mussett, Alan E.; Khan, M. Aftab - *Looking into the earth - An introduction to Geological Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press 2000.
- NASA - *Electromagnetic Waves - different waves, different wavelengths*. NASA, 2011.
- Neville, A. M. - *Properties of concrete*. 4.^a Edição. Harlow: Addison Wesley Longman Limited, 1995.
- Neville, Adam M. - *Properties of concrete*. London: Sir Isaac Pitman & sons Ltd., 1963.
- Nkemzi, Daniel - A new formula for the velocity of Rayleigh waves. *Wave Motion*. 26:(1996). p.
- Oliveira, Daniel V. - *Mechanical Characterization of Stone and Brick Masonry*. Guimarães: University of Minho, 2000.
- Pagaimo, Filipe Alexandre Loureiro - *CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E MECÂNICA DE ALVENARIAS ANTIGAS*
- CASO DE ESTUDO DA VILA HISTÓRICA DE TENTÚGAL*. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2004.
- Paupério, Esmeralda; Costa, Aníbal - *Relatório de Inspeção - Torre do Relógio - Caminha*. Porto: IC-FEUP, 2006.
- Qixian, Luo; Bungey, J. H. - Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. *Construction and Building Materials*. 10:4 (1996). p. 237-242.
- Rayleigh, Lord - *On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic*. In: London Math. Soc., 1885,
- Richart, F. E. - Foundations Vibrations. *Trans. ASCE*. 127:(1962). p. 863-898.
- Richart, F. E. Jr.; Hall, J. R. Jr.; Woods, R. D. - *Vibrations of soils and foundations*. Englewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, Inc., 1970.
- RILEM - *In situ stress tests based on the flat jack*. RILEM, 1990.
- RILEM - *In situ stress tests based on the flat jack*. RILEM,
- RILEM - RILEM Recommendation MDT.D.4: In-situ stress tests based on the flat jack. *Masonry durability and on-site testing*. Vol. 37:(2004a). p.

- RILEM - *RILEM Recommendation MDT.D.5 - In Situ Stress - strain behaviour tests based on flat-jack*. Materials and Structures, 2004b.
- Rio, João Filipe Meneses Espinheira - *Advances in Laboratory Geophysics Using Bender Elements*. London: University College London, 2006.
- Ronca, P.; Tiraboschi, C.; Binda, L. - *In-situ flatjack tests matching new mechanical interpretations*. China: 1997.
- Roque, João Carlos Almendra - *Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria*. Guimarães: Universidade do Minho, 2002.
- Rossi, P. - *Flat jack test for the analysis of mechanical behaviour of brick masonry structures*. 1985.
- Rossi, P. P. - *Analysis of Mechanical Characteristics of brick masonry by means of non-destructive in-situ tests*. In: 6th IBMaC, Rome, 1982,
- Rossi, P. P. - *Recent developments of the flat-jack test on masonry structures*. 1987.
- Sansalone, Mary - *Impact-Echo: The complete story*. *ACI - Structural Journal*. 94:6 (1997). p. 777-786.
- Tallavó, Fernando; Cascante, Giovanni; Pandey, Mahesh D. - *New Methodology for Source Characterization in Pulse Velocity Testing*. *Geotechnical Testing Journal, ASTM* 32:6 (2009). p.
- Tipler, Paul A.; Mosca, Gene - *Física para cientistas e engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC ed., 2006.
- Vasconcelos, Graça de Fátima Moreira de - *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls*. Guimarães: Universidade do Minho, 2005.
- Vicente, Romeu da Silva - *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra*. Aveiro: University of Aveiro, 2009.
- Woodham, David B.; Schuller, Michael P. - *Development of a flexible flatjack for quantitative evaluation of masonry*. In: 9th North American Masonry Conference, Clemson University, 2003, 2003.