

INSPECÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-
ESFORÇADO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ULTRA-SONOGRAFIA POR
INTREMÉDIO DO TOMÓGRAFO DE ULTRA-SONS - MIRA

Maria Antónia Trigo de Sousa Roque

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Construção e Reabilitação

Orientadores

Prof. João Paulo Janeiro Gomes Ferreira

Prof. Fernando António Baptista Branco

Júri

Presidente: Prof. Pedro Manuel Gameiro Henriques

Orientador: Prof. João Paulo Janeiro Gomes Ferreira

Vogal: Prof. João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Novembro 2014

INSPECÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-
ESFORÇADO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ULTRA-SONOGRAFIA POR
INTREMÉDIO DO TOMÓGRAFO DE ULTRA-SONS - MIRA

Maria Antónia Trigo de Sousa Roque

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Construção e Reabilitação

**Dissertação elaborada no âmbito do Projecto ReaBet - Tomografia e
Reabilitação de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado**

Projecto N° 18558 financiado pelo QREN

Resumo

Na reabilitação de uma estrutura é relevante dispor de técnicas de inspecção que permitam analisar o estado da estrutura. Caso seja possível é preferível utilizar técnicas não destrutivas de inspecção pois, ao contrário das técnicas destrutivas de inspecção, permitem efectuar uma análise sem danificar a estrutura. Os desenvolvimentos tecnológicos permitiram elevados avanços nas técnicas não destrutivas de inspecção de estruturas.

O tomógrafo ultra-sónico – Mira é um equipamento inovador e não destrutivo utilizado para obter imagens do interior do betão que assenta na detecção de contrastes e densidades, através de ultra-sons. Este equipamento tem 40 transdutores piezo-eléctricos de contacto pontual seco que usam ondas de corte de baixa frequência. No funcionamento, os transdutores actuam como transmissores e receptores num modo sequencial. Recorrendo à técnica de abertura focal sintética são construídos um modelo 3D e cortes da secção em 2D, permitindo a observação da geometria do objecto em teste bem como a localização da armadura existente e, mais importante, a localização de defeitos internos como vazios, fissuras ou formação de “ninhos de brita”.

A presente dissertação tem como objectivo avaliar uma técnica não destrutiva de inspecção de estruturas de betão armado e pré-esforçado. Verificando o nível de eficácia do tomógrafo ultra-sónico MIRA na determinação das espessuras das peças analisadas, na identificação das armaduras e na quantificação e qualificação dos vazios e discontinuidades existentes no interior do betão.

Foram analisadas, com o tomógrafo ultra-sónico – Mira, quatro vigas protótipo, duas em betão e duas em betão armado e pré-esforçado. Nas quatro vigas foram simulados defeitos, nomeadamente, i- fissuras, ii – vazios no betão, iii - ninhos de brita, iv - vazios nas bainhas de pré-esforço. Nas vigas em betão, os resultados permitiram visualizar a localização de todas as singularidades existentes e ainda, no caso das fissuras, as suas dimensões. Nas vigas em betão armado e pré-esforçado visualizou-se a armadura passiva, os cabos de pré-esforço, ninhos de brita e fissuras. Conclui-se que a utilização desta técnica seria ideal numa primeira análise de inspecção de uma estrutura, pois identifica a existência de anomalias e localiza-as.

Palavras chave:

Estruturas de betão armado pré-esforçado

Anomalias

Técnicas não destrutivas de inspecção e diagnóstico

Ultra-sons

Tomografia por ultra-sons

Imagiologia

Abstract

When performing rehabilitation of a structure it is relevant to have inspection techniques to analyze the condition of the structure. Where possible, it is preferable to use non-destructive inspection techniques because, unlike the destructive inspection techniques, the former allow performing an analysis without damaging the structure. Technological developments have enabled high advances in non-destructive techniques for structures inspection.

The ultrasonic tomograph - Mira is an innovative and non-destructive equipment used to obtain images of the interior of the concrete which is based on the detection of contrast and density through ultrasound. This equipment contains 40 piezo-electric transducers of dry spot contact using shear waves of low frequency. When operating, the transducers act as transmitters and receivers in a sequential mode. Using the synthetic aperture focusing technique, a 3D model and 2D cuts of the section are obtained, allowing the observation of geometry of the object under test as well as the location of existing reinforcement and, more importantly, the location of internal defects such as voids, cracks or forming "honeycombing".

This dissertation aims to evaluate a non-destructive technique for the inspection of reinforced and prestressed concrete structures. Specifically it aims to check the effectiveness level of ultrasonic tomography MIRA in determining thickness of the object under study, in identifying the location of existing reinforcement, discontinuities and voids within the concrete.

Four prototype beams, two concrete and two reinforced and prestressed concrete were analyzed, with the ultrasonic tomograph – Mira. The four beams had simulated defects, including i) cracks; ii) voids in concrete; iii) honeycombing and iv) voids in prestressing ducts. In the concrete beams, results allowed to visualize the location of all existing singularities and, in cracks, it also allowed to dimension them. In the reinforced and prestressed concrete beams, rebars, prestressing cables, cracks and honeycombing were visualised. It is concluded that this technique would be ideal for an initial analysis for inspecting a structure since it identifies the existence of anomalies and locates them.

Key-words:

Prestressed reinforced concrete

Anomalies

Non-destructive inspection and testing methods

ultrasound

Ultrasonic tomography

Ultrasonic Imaging

Agradecimentos

Aos orientadores da dissertação: Professor João Ferreira pela disponibilidade, paciência, orientação e conselhos imprescindíveis para a elaboração da dissertação e ainda a prontidão com que sempre me recebeu; Professor Fernando Branco pelas orientações relativas ao início do trabalho experimental bem como o interesse demonstrado; a ambos a segurança e apoio transmitidos.

Ao Professor João Correia pela disponibilidade, interesse e informação facultada.

Ao Engenheiro Duarte Soares pela informação disponibilizada.

À empresa Teixeira Duarte nas pessoas da Engenheira Joana Caldas e da Engenheira Rita Moura pelo apoio, pelo simpático acolhimento, pelas informações prestadas, pelo interesse demonstrado e por todos os recursos disponibilizados nomeadamente a execução dos protótipos e o Tomógrafo ultrasónico Mira.

À Engenheira Ana Chaves e ao Engenheiro António Mendes pela forma como me receberam no Polo Operacional da Teixeira Duarte.

Aos meus colegas de mestrado pelo companheirismo e amizade, em particular ao Arq. João Torres pela ajuda na utilização do programa de desenho Autocad.

Por último, agradeço a todos os meus amigos e família que sempre me apoiaram.

Simbologia

λ_0 – comprimento de onda

V_l – velocidade das ondas longitudinais

E - modulo de elasticidade

ν - coeficiente de poisson

ρ - densidade

V_t – velocidade das ondas transversais

V_s – velocidade das ondas superficiais

Z - impedância acústica

c - velocidade do som no material

P_i – onda incidente

P_t – onda transversal

P_r – onda reflectida

P_{l1} – onda longitudinal reflectida

P_{l2} – onda longitudinal transmitida

P_{t1} – onda transversal reflectida

P_{t2} – onda transversal transmitida

θ_1 – ângulo da onda incidente; ângulo da onda longitudinal reflectida

θ_2 – ângulo da onda longitudinal transmitida

θ_3 – ângulo da onda transversal reflectida

θ_4 – ângulo da onda transversal transmitida

f_0 – frequência de onda

V – velocidade de propagação

v_c – velocidade de propagação do som

2D - duas dimensões

3D - três dimensões

IAEA - International Atomic Energy Agency

JPEG - Joint Photographic Experts Group

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia civil

LED – light emitting diode

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Considerações gerais.....	1
1.2.	Objectivos e metodologia	2
1.3.	Organização da dissertação.....	2
2.	ESTADO DA ARTE.....	5
2.1.	Considerações gerais.....	5
2.2.	Propagação dos ultra-sons	6
2.3.	Ensaios com ultra-sons	12
2.4.	Factores que influenciam resultados nos ensaios de ultra-sons no betão.....	13
2.4.1.	Tipo, composição geológica, dimensão e granulometria do agregado	14
2.4.2.	Cimento. Relação água/cimento.	15
2.4.3.	Utilização de aditivos.....	16
2.4.4.	Idade do betão.....	16
2.4.5.	Contacto dos transdutores com o betão	17
2.4.6.	Temperatura.....	17
2.4.7.	Humidade.....	18
2.4.8.	Comprimento de onda	18
2.4.9.	Dimensão e forma do elemento estrutural	19
2.4.10.	Tensão no elemento estrutural	19
2.4.11.	Presença de armaduras	20
2.5.	Imagem ultra-sónica	21
2.6.	Estudos anteriormente realizados através do tomógrafo ultra-sónico - MIRA.....	24
2.6.1.	Verificação dos resultados do MIRA e através do DOCTer Impact-Echo.....	24
2.6.2.	Teste na ligação entre uma viga metálica e o reforço realizado em betão	30
2.6.3.	Testes numa fundação em laje de betão.....	31
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	35
3.1.	Objectivos e princípio dos ensaios.....	35
3.2.	Preparação das vigas	35
3.2.1.	Considerações iniciais.....	35
3.2.2.	Geometria e materiais utilizados.....	36
3.2.3.	Processo de execução.....	41
3.2.4.	Localização de anomalias.....	44
3.3.	Descrição do equipamento.....	49
3.4.	Nomenclatura	58

3.5.	Descrição e procedimentos dos ensaios.....	59
3.6.	Considerações finais	64
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	67
4.1.	Considerações iniciais.....	67
4.2.	Tomografia por ultra-sons no protótipo A.....	69
4.3.	Tomografia por ultra-sons no protótipo B.....	77
4.4.	Tomografia por ultra-sons nos protótipos 1 e 2.....	86
4.5.	Síntese dos resultados obtidos	91
5.	CONCLUSÕES	92
5.1.	Conclusão do estudo efectuado.....	92
5.2.	Estudos futuros	92
	BIBLIOGRAFIA	94

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Modelo de partículas excitadas num material elástico	7
Figura 2.2 - Propagação de uma onda primária ou P.....	8
Figura 2.3 - Propagação de uma onda secundária ou S	9
Figura 2.4 – Propagação das ondas de Rayleigh ou R.....	10
Figura 2.5 – Propagação das ondas Love ou L.....	10
Figura 2.6 – Transmissão e reflexão.....	11
Figura 2.7 - Incidência oblíqua numa interface entre 2 meios diferentes	11
Figura 2.8 – Esquema de funcionamento de um ensaio por ultra-sons.....	12
Figura 2.9 – Modos de disposição dos transdutores em ensaios de ultrassons	13
Figura 2.10 - Relação entre a velocidade de propagação do ultra-som e a resistência à compressão, em betões com diferentes tipos de agregados (ligante : areia : agregado).....	15
Figura 2.11 - Relação entre velocidade de onda e idade.	16
Figura 2.12 – Leitura de ultra-som em betão armado – barras paralelas à direcção de propagação	20
Figura 2.13 - Leitura de ultra-som em betão armado – barras paralelas à direcção de propagação	21
Figura 2.14 – Informação obtida pelos métodos A, B e C scan	22
Figura 2.15 – Posições dos modos de imagem	23
Figura 2.16 - Localização das bainhas	24
Figura 2.17 – Inspeção realizada com o tomógrafo Mira.....	25
Figura 2.18 - Ilustração em 3D na vizinhança das bainhas	25
Figura 2.19 – D-scan – Reflexão da bainha vazia.....	25
Figura 2.20 - D-scan – Reflexão da bainha injectada.....	25
Figura 2.21 – B-scan – reflexão a 1200 mm do início da laje. Ilustração em 3D a mostrar a localização do Bscan.....	26
Figura 2.22 - B-scan – reflexão a 1500 mm do início da laje. Ilustração em 3D a mostrar a localização do Bscan.....	26
Figura 2.23 – Sistema do DOCTer Impact-Echo.....	27
Figura 2.24 – Análise realizada no ponto A.....	27
Figura 2.25 – Análise realizada no pnto B.....	28
Figura 2.26 – Análise no ponto C	28
Figura 2.27 – Aperfeiçoamento da análise no ponto C	29
Figura 2.28 – Análise no ponto D.....	29
Figura 2.29 – Laje.....	30
Figura 2.30 – Varrimento da laje	30

Figura 2.31 – Resultados obtidos pelo tomógrafo ultra-sónico Mira e amostras do betão em duas zonas distintas	30
Figura 2.32 – Vista geral	31
Figura 2.33 – Poço teste.....	31
Figura 2.34 – fenda na laje de fundação	31
Figura 2.35 – Localização das bandas a analisar	32
Figura 2.36 – Realiz. de um varrimento	32
Figura 2.37 – Resultados obtidos na banda 1.....	32
Figura 2.38 - Resultados obtidos na banda 2.....	32
Figura 2.39 - Resultados obtidos na banda 3.....	33
Figura 2.40 - Resultados obtidos na banda 4.....	33
Figura 3.1 – Alçado longitudinal da Viga A (dimensões em m).....	36
Figura 3.2 – Alçado longitudinal da Viga B (dimensões em m).....	36
Figura.3.3 – Plantas da Viga A e da Viga B (dimensões em m)	37
Figura 3.4 – Alçados transversais da Viga A e da Viga B (dimensões em m).....	37
Figura 3.5 – Vista em três dimensões de uma Viga (A ou B).....	37
Figura 3.6 – Alçado dos protótipos 1e 2.....	38
Figura 3.7 – Planta dos protótipos 1 e 2.	38
Figura 3.8 – Cortes transversais dos protótipos 1 e 2.....	39
Figura 3.9 – Vista em três dimensões dos protótipos 1 e 2.	39
Figura 3.10 – Corrosão das armaduras e bainha de pré-esforço.....	41
Figura 3.11 – Vazio na bainha assinalado a vermelho, onde será colocado um tubo transversal.....	42
Figura 3.12 – Lâmina de plástico assinalada a vermelho que simulou uma fissura.....	42
Figura 3.13 – Simulação de um ninho de britas.....	43
Figura 3.14 – Cofragem dos protótipos.	43
Figura 3.15 – Sistema de coordenadas utilizado nas vigas de betão.	44
Figura 3.16 – Localização das singularidades do protótipo A.....	44
Figura 3.17– Localização das singularidades do protótipo B.....	45
Figura 3.18 – Sistema de eixos utilizado.....	46
Figura 3.19 – Localizações das anomalias no protótipo 1.....	47
Figura 3.20 – Localizações das anomalias no protótipo 2.....	48
Figura 3.21 – Representação espacial das singularidades nos protótipos 1 e 2.....	49
Figura 3.22 – Antena com a matriz de 10x4 transdutores de onda de corte a baixa frequência, bateria autónoma e bolsa para transporte, carregador da bateria e cabo de alimentação, caixa de transporte.....	50
Figura 3.23 - Computador portátil e saco de transporte, transformador para alimentação do computador e cabo de alimentação.....	50

Figura 3.24 – Ligações existentes entre os diversos componentes do tomógrafo	51
Figura 3.25 – Ligação entre o carregador e a bateria.....	51
Figura 3.26 – Antena e computador portátil com o programa de controlo e análise instalado.....	52
Figura 3.27 – Demonstração das duas primeiras linhas de transdutores actuando como emissores de ultra-sons	52
Figura 3.28 – Demonstração dos 45 raios envolvidos em cada coluna de transdutores.....	53
Figura 3.29 – Localização do botão Iniciar.....	53
Figura 3.30 – Localização dos LEDs coloridos	54
Figura 3.31 – Menu - Calibration	55
Figura 3.32 – Menu – Control Panel	55
Figura 3.33 – Menu – Setings – separador View	55
Figura 3.34 – Menu – Setings – separador Scan	55
Figura 3.35 – Planos e eixos relativos à antena.....	56
Figura 3.36 – Apresentação das imagens efectuadas pelo programa.....	57
Figura 3.37– numeração das faces dos protótipos	58
Figura 3.38 – Exemplo de um mapa da área de varrimento.....	60
Figura 3.39 – Forma de calibração	61
Figura 3.40 – Ensaio no modo Explore.....	61
Figura 3.41 – Ensaio no modo Scan.....	62
Figura 3.42 – Imagens que se vêem no modo Review.....	63
Figura 4.1 - Protótipos A e B no Laboratório de estruturas	67
Figura 4.2 – Face 3 dos protótipos 1 e 2.....	68
Figura 4.3 – Face 5 dos protótipos 1 e 2.....	68
Figura 4.4 – Face 2 do protótipo 2	68
Figura 4.5 – Várias faces do protótipo A.....	69
Figura 4.6 – Descascamentos e delaminações no protótipo A.....	70
Figura 4.7 – localização do ensaio VAF1H5Y10 (dimensões em metro).....	70
Figura 4.8 – localização do ensaio VAF1H5Y30 (dimensões em metro).....	71
Figura 4.9 – localização do ensaio VAF2H10Y30 (dimensões em metro).....	71
Figura 4.10 – localização do ensaio VAF1V5X0	71
Figura 4.11 – Imagens obtidas no ensaio VAF1H5Y10.....	72
Figura 4.12 – Imagens obtidas no ensaio VAF1H5Y30.....	73
Figura 4.13 - Imagens obtidas no ensaio VAF2H10Y30	74
Figura 4.14 - Imagens obtidas no ensaio VAF2H10Y30 mais ou menos a meia altura do protótipo A.....	75
Figura 4.15 – Imagens obtidas no ensaio VAF1V5X0	76

Figura 4.16 – Várias faces do protótipo B.....	77
Figura 4.17– Destacamentos e delaminações no protótipo B.....	78
Figura 4.18 – localização do ensaio VBF1H10Y0.....	78
Figura 4.19 – localização do ensaio VBF1H5Y30.....	78
Figura 4.20 – localização do ensaio VBF1H10Y60.....	79
Figura 4.21 - localização do ensaio VBF1V2X0.....	79
Figura 4.22 - Imagens obtidas no ensaio VBF1H5Y0 efectuado com passo de 5 cm.....	80
Figura 4.23 - Imagens obtidas no ensaio VBF1H10Y0 efectuado com passo de 10 cm.....	81
Figura 4.24 - Imagens obtidas no ensaio VBF1H5Y30.....	82
Figura 4.25 - Imagens obtidas no ensaio VBF1H10Y60.....	83
Figura 4.26 – Ampliações da imagem B-scan dos ensaios VBF1H5Y0, VBF1H10Y0, VBF1H5Y30 e VBF1H10Y60.....	84
Figura 4.27 - Imagens obtidas no ensaio VBF1V2X0.....	85
Figura 4.28 - Faces dos protótipos 1 e 2.....	86
Figura 4.29 - localização do ensaio V2F2V10X0.....	87
Figura 4.30 - localização do ensaio V1F2V10X0.....	87
Figura 4.31 - Imagens obtidas no ensaio V2F2V10X0.....	88
Figura 4.32 - Imagens obtidas no ensaio V1F2V10X0.....	89
Figura 4.33 - Imagens obtidas no ensaio V1F2V10X0.....	90

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Técnicas não destrutivas utilizadas na caracterização de estruturas de betão	6
Tabela 2.2 - Fatores de correção da velocidade dos ultrassons no betão em função da temperatura	17
Tabela 2.3 - Efeitos da dimensão do elemento estrutural na propagação de ondas	19
Tabela 3.1 – Características da calda de cimento	40
Tabela 3.2 - Características das singularidades do protótipo A	45
Tabela 3.3 – Características das singularidades do protótipo B	46
Tabela 3.4 – Características de cada anomalia do protótipo 1	47
Tabela 3.5 – Características de cada anomalia do protótipo 2	48
Tabela 3.6 – Parâmetros de funcionamento do equipamento	57
Tabela 3.7 – Nomenclatura utilizada.	58
Tabela 3.8 – Problemas comuns na utilização do tomógrafo e suas causas e soluções	64

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Actualmente, o sector da construção tem como uma das prioridades a durabilidade das construções e dos materiais. Nessa ordem de ideias, surge uma elevada importância na reabilitação das estruturas de betão armado ou de betão armado e pré-esforçado. Os erros de projecto, os erros de construção, a degradação dos materiais com consequente redução da resistência e/ou a alteração do tipo de uso da estrutura são exemplos de causas que podem levar à necessidade de uma reabilitação estrutural.

Para proceder à reabilitação de uma estrutura é necessário caracterizá-la através das suas características geométricas, dos seus materiais e do seu estado de conservação. Na caracterização da estrutura é relevante dispor de técnicas de inspecção que permitam analisar o estado da estrutura. As técnicas de inspecção podem ser realizadas por métodos destrutivos – envolvem recolha de provetes para ensaiar provocando danos na estrutura ou por métodos não destrutivos – permitem efectuar uma análise sem danificar a estrutura. Estes dois tipos de métodos podem, também, ser utilizados em conjunto para um melhor levantamento de informação. Caso seja possível a utilização de uma técnica não destrutiva, é sempre preferível pois não danifica a estrutura. Os ensaios não destrutivos são úteis nas seguintes situações [IAEA, 2002, Nepomuceno, 1999]:

- i. Controlar a qualidade de estruturas pré-fabricadas ou construídas *in situ*;
- ii. Verificar se o material fornecido está de acordo com as especificações;
- iii. Monitorizar o processo de betonagem e cura para garantir que é bem realizado;
- iv. Localizar e determinar a extensão de fissuras, vazios, ninhos de brita e restantes anomalias;
- v. Determinar a posição, quantidade e qualidade das armaduras;
- vi. Determinar a qualidade do betão e sua heterogeneidade;
- vii. Localizar e confirmar zonas onde o betão se encontra deteriorado, resultantes de fadiga, carga em excesso, ataque químico, fogo, explosões, efeitos ambientais, ou outros;
- viii. Avaliar o potencial de durabilidade do betão;
- ix. Monitorizar variações das propriedades do betão a longo prazo;
- x. Providenciar informações para propósitos de reabilitação.

Uma das técnicas não destrutivas utilizadas em betão armado consiste na avaliação da velocidade de propagação de ultra-sons ao longo de um determinado alinhamento. As alterações da velocidade de propagação através dos diferentes meios permite avaliar as descontinuidades existentes no interior do betão.

A aplicação da tecnologia dos ultra-sons é desde há muito utilizada em medicina (ecografias, sonografias, etc.) e em sistemas de navegação (SONAR – sound navigation and ranging), sendo recente os seus objectivos no sector da construção.

1.2. Objectivos e metodologia

No presente estudo, analisou-se uma técnica que tem por base a avaliação da velocidade de propagação de ultra-sons, mas de uma forma inovadora. Neste caso, em vez de avaliar esse parâmetro ao longo de um único alinhamento, foi utilizado um tomógrafo ultra-sónico que permite fazer essa medição em simultâneo entre um conjunto de pontos e que deveria permitir a obtenção de uma reconstituição tridimensional das peças analisadas [Catalog NDT, 2010].

O ultra-som é uma onda mecânica com frequência superior a 20 kHz (fora do alcance do ouvido humano) que, ao propagar-se num meio mais denso, apresenta maiores velocidades sofrendo reflexões e refrações na interface de dois meios com diferentes densidades. No caso do betão armado, o estudo das velocidades de propagação tem como objectivo quantificar e qualificar vazios ou descontinuidades que existam no interior do betão, identificar armaduras e determinar espessuras das peças.

A presente dissertação tem como objectivo avaliar uma técnica não destrutiva de inspecção de estruturas de betão armado e pré-esforçado. Verificando o nível de eficácia do tomógrafo ultra-sónico MIRA na determinação das espessuras das peças analisadas, na identificação das armaduras e na quantificação e qualificação dos vazios e descontinuidades existentes no interior do betão.

A utilização de tomógrafo ultra-sónico em ensaios não destrutivos é uma técnica designada por Tomografia por Ultra-sons. Ela foi aplicada no âmbito do Projecto ReaBet – Tomografia e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, cujo objectivo passa por avaliar, localizar e corrigir anomalias correntes em elementos de betão.

O projecto Reabet foi promovido pela empresa Teixeira Duarte com a colaboração do Instituto Superior Técnico e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil,

1.3. Organização da dissertação

A dissertação é organizada em 5 capítulos.

O Capítulo 1, introdução – apresenta de uma forma breve as questões relativas a este projecto.

O Capítulo 2, estado da arte – refere-se à necessidade dos ensaios não destrutivos referindo alguns e quais as suas aplicações mais comuns. Apresentam-se as bases dos ensaios por ultra-sons, os factores que influenciam os resultados nos ensaios realizados por ultra-sons,

algumas considerações sobre a imagem obtida através dos ultra-sons e estudos anteriormente realizados com o tomógrafo Mira.

No Capítulo 3, programa experimental – é feita uma descrição do programa experimental desenvolvido. São apresentados os objectivos e princípios dos ensaios, a preparação das vigas, a descrição do equipamento utilizado, aspectos de segurança, séries experimentais e nomenclatura utilizada e uma descrição dos procedimentos a usar nos ensaios.

No Capítulo 4, análise e discussão - apresenta-se a análise e discussão dos resultados obtidos no programa experimental.

O Capítulo 5, conclusão - apresenta as principais conclusões desta campanha e perspectivas de trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Considerações gerais

A utilização do betão na construção no último século tem sido intensa. E, se inicialmente não se pensava na durabilidade do betão, actualmente existe a consciência de que o betão ao longo do tempo vai envelhecendo e sofrendo deteriorações que diminuem a sua capacidade resistente. Surge assim a necessidade de desenvolver ensaios que permitam recolher informações sobre as possíveis deteriorações do betão.

Os ensaios podem utilizar técnicas destrutivas ou não destrutivas. As técnicas destrutivas são as mais utilizadas, mas apresentam desvantagens como o elevado custo e o dano provocado na estrutura devido ao número de provetes recolhido, muitas vezes elevado. De forma a não comprometer o estado e a aparência visual da estrutura, tanto a recolha de provetes como as perfurações têm que ser limitadas não só a zonas escolhidas como em número, limitando a sua representatividade.

De referir também que, em muitos casos, para aplicar técnicas destrutivas é necessário uma autorização especial e um controlo rigoroso nos locais de recolha dos provetes [Manual Insp. de Pontes, 2004].

As técnicas não destrutivas podem ser completamente ou parcialmente não destrutivas. As completamente não destrutivas não danificam a estrutura e as parcialmente não destrutivas causam danos superficiais que só prejudicam esteticamente a estrutura. Estas técnicas têm a vantagem de permitir avaliar o estado da estrutura sem comprometer a sua utilização. De uma forma geral, as técnicas não destrutivas dividem-se em três categorias [IAEA, 2005]:

- na primeira categoria incluem-se os testes realizados “in-situ” que avaliam a dureza superficial e a resistência ao arrastamento (exemplos: esclerómetro de reflexão e pull-out test);
- a segunda categoria inclui os ensaios que medem: humidade, densidade, módulo de elasticidade, espessura e temperatura no betão (exemplos: ultra-sons e corrente eléctrica);
- a terceira categoria inclui os testes usados para detectar e localizar as áreas com defeitos no interior das estruturas de betão, como vazios, fissuras, falhas e delaminações (exemplos: radar, termografia e emissão acústica).

A Tabela 1.1 apresenta as principais técnicas não destrutivas utilizadas no estudo de estruturas de betão e as suas aplicações [IAEA, 2005].

Tabela 2.1 - Técnicas não destrutivas utilizadas na caracterização de estruturas de betão (adaptado de IAEA 2005)

		Aplicações											
		Resistência	Módulo de Elasticidade	Espessura de camadas	Profundidade de fendas	Abertura de fendas	Distribuição de fendas	Desenvolvimento de fendas	Vazios	Delaminação	Localização de armaduras	Dimensão das armaduras	Deterioração de armaduras
Métodos não destrutivos	Lupa de fendas					●	●						
	Esclerómetro de reflexão	●											
	<i>Pull-out test</i>	●											
	Ultrassons	●	●	●	●				●	●	●		
	Radar								●	●	●		
	Termografia						●		●	●			
	Radiografia			●					●		●	●	●
	Emissão acústica							●					
	Corrente magnética										●	●	●
	<i>Half-cell Potential</i> (corrente elétrica)												●
	Fotografia					●	●						

A par das técnicas mencionadas na tabela há que referir que existem outras, algumas ainda em desenvolvimento, não havendo, em alguns casos, suficiente precisão nos resultados obtidos.

O tomógrafo ultra-sónico em estudo é uma técnica inovadora não destrutiva que se aplica em quantificar e qualificar vazios ou discontinuidades que existam no interior do betão, identificar armaduras e determinar espessuras das peças. Baseia-se num sistema de detecção de contrastes e densidades, através de ultra-sons.

As sondas de ultrassons convencionais constituem a essência do método. Por isso, a sua compreensão e domínio são condições indispensáveis. Com este estudo pretende-se compreender essas condições.

2.2. Propagação dos ultra-sons

As ondas sonoras são perturbações mecânicas que se propagam de um ponto para o outro através de um meio (sólido, líquido ou gasoso), transmitindo energia sem transporte de matéria [Medeiros, 2007]. Verifica-se que a velocidade a que se propagam é superior num meio sólido do que num meio líquido e que por sua vez é superior do que num meio gasoso.

Num meio em equilíbrio, quando é introduzida uma perturbação inicia-se um movimento vibratório que se vai propagando progressivamente a todo o meio. Pode-se descrever este movimento de oscilação num meio elástico pelo movimento das partículas associado à rigidez entre partículas. As ondas sonoras podem ser descritas pela caracterização deste movimento através da amplitude, frequência e velocidade de fase [Ribeiro, 2013].

De forma a ilustrar o movimento para todas as partículas de um material é possível imaginar uma matriz composta por bolas ligadas entre si por molas em que as bolas representam as moléculas e as molas as fronteiras de interação entre moléculas (figura 2.1). Quando as ondas sonoras atravessam a matriz, as molas comprimem-se e expandem-se transmitindo energia às bolas a que estão ligadas que irão transmitir energia às molas seguintes, propagando-se num movimento global de oscilação das partículas [Moreira, 2010]. De salientar que neste modelo quanto maior a rigidez das molas, maior é a densidade do meio e mais facilitada é a propagação desta energia. No limite, considerando-se estas molas com rigidez infinita ter-se-ia uma propagação instantânea, isto é, uma velocidade de fase infinita [Ferraro, 2003].

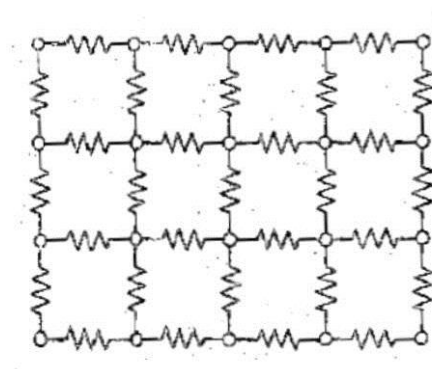


Figura 2.1 – Modelo de partículas excitadas num material elástico [Kuttruff, 1991]

A frequência das ondas distingue a sua classificação em: subsónicas - até 16 Hz; sónicas - entre os 16 Hz e os 20 kHz que corresponde à gama de frequência audível pelos seres humanos; e ultrassónicas – com frequências superiores a 20 kHz.

Como já foi referido, o ultra-som é uma onda mecânica que, ao propagar-se num meio mais denso, apresenta maiores velocidades sofrendo reflexões e refrações na interface de dois meios com diferentes densidades.

O ensaio por ultra-sons é uma técnica utilizada com frequência apesar de estar ainda em desenvolvimento e apresentar algumas limitações. Os ensaios realizados revelam resultados em que a técnica se adequa mais a caracterizar materiais homogéneos do que a materiais heterogéneos. Apesar do betão ser um material heterogéneo, pode ser considerado um material aparentemente homogéneo, o que se reflecte no sucesso da aplicação de ultra-sons na caracterização de estruturas em betão [Ribeiro, 2013].

O ensaio com ultra-sons baseia-se na teoria da propagação de ondas. Segundo esta teoria, quando um meio sólido é perturbado por uma acção vibratória distinguem-se dois tipos fundamentais de ondas: as volúmicas e as superficiais. As ondas volúmicas dividem-se em ondas longitudinais (ou de compressão) e ondas transversais (ou de corte)

Ondas primárias, longitudinais ou de compressão

São ondas que podem ser transmitidas em meios sólidos, líquidos e gasosos e que se caracterizam pela oscilação das partículas na direcção de propagação da onda [Andreucci, 2011] como mostra a figura 2.2. O meio elástico ao vibrar na direcção de propagação da onda (longitudinal) origina “zonas de compressão” e “zonas de dilatação”. Perante esta oscilação, o comprimento de onda (λ_0) é definido como a distância entre duas zonas de compressão (figura 2.2) [Barbosa, 2008]. Segundo o processo de propagação descrito, as ondas longitudinais atingem elevadas velocidades (V_l), que variam consoante as características do meio e que podem ser dadas por [Qixian, Bungey, 1996]:

$$V_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad 2.1$$

Em que E representa o modulo de elasticidade do material, ν o coeficiente de poisson e ρ a densidade.

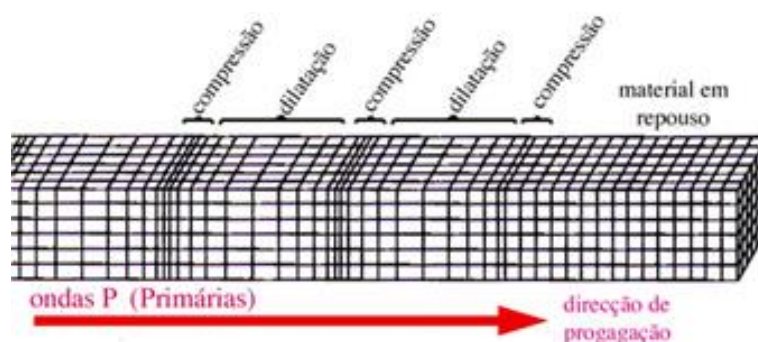


Figura 2.2 - Propagação de uma onda primária ou P

[Dias, 15 Maio 2014]

Ondas secundárias, transversais ou de corte

Nas ondas transversais o movimento das partículas do meio ocorre na direcção perpendicular à direcção de propagação. Como se vê na figura 2.3 os planos de partículas movem-se verticalmente mantendo a distância entre eles. As características das ligações entre partículas de meios líquidos ou gasosos torna estas ondas praticamente incapazes de serem transmitidas nestes meios, sendo só nos sólidos que as ondas transversais são transmitidas [Andreucci, 2011]. Perante esta oscilação, o comprimento de onda (λ) é definido como a distância entre duas “cristas ou dois “picos” consecutivos (figura 2.2) [Barbosa, 2008]. Segundo o processo de propagação descrito, as ondas transversais atingem elevadas

velocidades (V_t), que variam consoante as características do meio. A sua velocidade destas ondas é inferior à das ondas longitudinais e pode ser dada por [Qixian, Bungey, 1996]:

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad 2.2$$

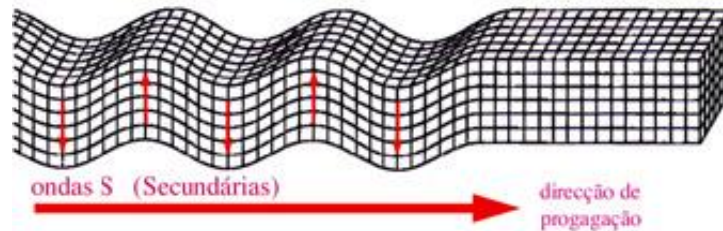


Figura 2.3 - Propagação de uma onda secundária ou S

[Dias, 15 Maio 2014]

Ondas superficiais

Designam-se por ondas superficiais devido a se propagarem pela superfície dos sólidos [Andreucci, 2011] e a sua velocidade (V_S) pode ser dada por [Qixian, Bungey, 1996]:

$$V_S = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad 2.3$$

Estas ondas podem ser:

Ondas de Rayleigh

A velocidade de propagação da onda superficial de Rayleigh é de aproximadamente 90% da de uma onda transversal devido à complexidade do movimento oscilatório das partículas de superfície [Andreucci, 2011].

As ondas Rayleigh podem ser visualizadas como uma combinação de vibrações do tipo transversal e longitudinal, uma vez que o movimento das partículas na frente de onda está polarizado no plano vertical, descrevendo uma elipse retrógrada (figura 2.4) [Dias, 2014].

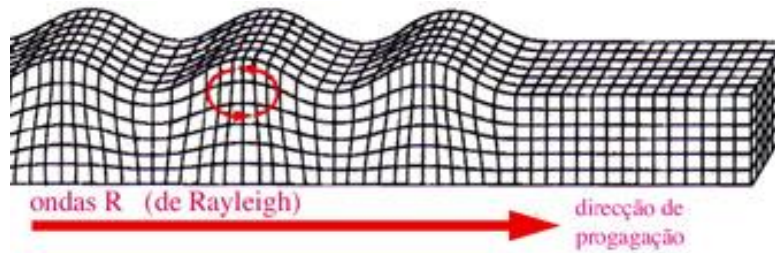


Figura 2.4 – Propagação das ondas de Rayleigh ou R
[Dias, 2014]

Ondas Love

Designa-se por ondas de “Love” as ondas superficiais que não possuem componente normal. Propagam-se paralelamente à superfície e transversalmente à direcção de propagação (figura 2.5). A sua aplicação limita-se à análise de materiais de finas camadas que recobrem outros materiais, como por exemplo argamassas [Andreucci, 2011]. Em geral a velocidade destas ondas é superior à velocidade das ondas de Rayleigh [Dias, 2014].

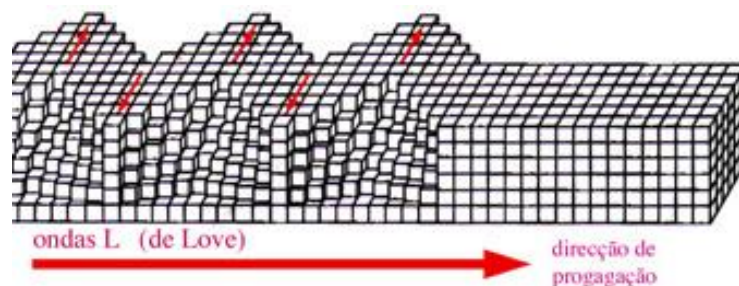


Figura 2.5 – Propagação das ondas Love ou L
[Dias, 2014]

À medida que se propagam ao longo do material a vibração mecânica destas ondas vai atenuando devido ao efeito combinado da absorção e da dispersão. Quando a onda incide na superfície de separação de dois meios, é parcialmente reflectida e parcialmente transmitida para o outro meio (figura 2.6). As percentagens transmitidas e reflectidas dependem da impedância acústica Z [Luz et al., 2013]

$$Z = \rho \cdot c \quad 2.4$$

Em que ρ é a densidade e c a velocidade do som no material.



Figura 2.6 – Transmissão e reflexão
[Luz et al., 2013]

No caso da onda incidir obliquamente, para além de se dividir em reflectida e transmitida sofre um desdobramento, o que significa que a partir de uma onda incidente se obtém uma onda longitudinal transmitida e uma onda longitudinal reflectida e ainda uma onda transversal transmitida e uma onda transversal reflectida (figura 2.7).

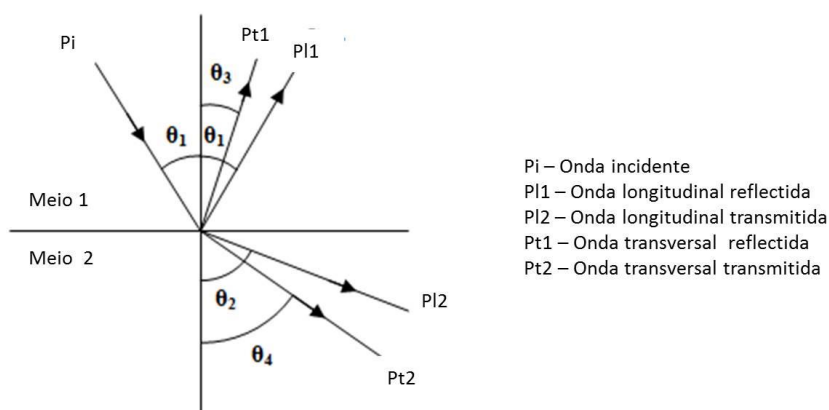


Figura 2.7 - Incidência oblíqua numa interface entre 2 meios diferentes
[adaptado de Luz et al., 2013]

Os ângulos de reflexão e refração são dados pela Lei de Snell.

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{Pl1} = \frac{\text{sen } \theta_2}{Pl2} = \frac{\text{sen } \theta_3}{Pt1} = \frac{\text{sen } \theta_4}{Pt2} \quad 2.5$$

Onde a simbologia está referida na figura 2.7.

O estudo da propagação de ondas através de uma interface entre dois meios diferentes é importante para se estudar as discontinuidades existentes no betão, pois quando uma onda se propaga num meio homogéneo, todas as partículas vibram de forma idêntica, mas quando a onda se propaga num meio não perfeitamente homogéneo ocorrem reflexões e refrações que alteram o trajecto da onda [Luz et al., 2013].

2.3. Ensaio com ultra-sons

Num ensaio é através dos transdutores que se geram os ultra-sons. Estes são essencialmente constituídos por eléctrodos e por elementos piezo-eléctricos. A piezoelectricidade foi descoberta por Pierre e Jacques Curie em 1880 [Kuttruff, 1991] e consiste na propriedade que certos materiais possuem de transformar impulsos eléctricos em vibrações mecânicas (efeito piezo-eléctrico directo) e vice-versa (efeito piezo-eléctrico inverso). O elemento activo é muitas vezes referido como cristal devido ao facto de no início da década de 1950, os elementos piezo-eléctricos serem fabricados a partir de cristais de quartzo. As cerâmicas piezo-eléctricas, devido às suas propriedades e à facilidade de fabricação em variedade de formas e dimensões tornou-se o material dominante para os transdutores. O titanato de bário foi o primeiro piezo-cerâmico a ser vulgarmente usado. Na década de 1960, foram utilizadas composições de titanato zirconato de chumbo. Ainda hoje a maior parte dos transdutores acústicos utilizam uma cerâmica piezo-eléctrica [Marques, 2011], apesar de aparecerem novas técnicas de construção de transdutores que usam “compósitos”, uma mistura de polímeros e material piezoelétrico [Biscegli, 2003].

O ensaio com ultra-sons utiliza um equipamento com capacidade de transformar um impulso eléctrico em ondas mecânicas através de transdutores. Como se pode ver na figura 2.8 as ondas são transmitidas (transdutor transmissor) ao material onde se propagam e são recebidas por um transdutor receptor.

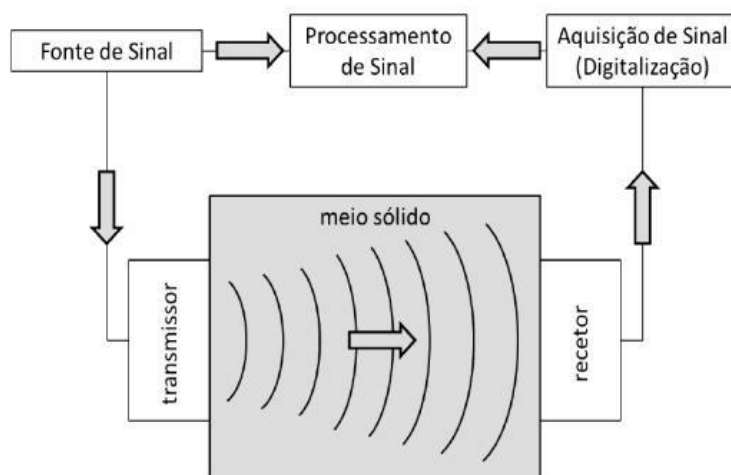


Figura 2.8 – Esquema de funcionamento de um ensaio por ultra-sons
[Rio e Figueiras, 2012]

Conforme especificado na norma EN 12504-4, os transdutores podem ser colocados em diferentes posições (figura 2.9) para a realização do ensaio. O método directo consiste na colocação dos transdutores em faces opostas do material em análise. O método semi-directo na colocação dos transdutores em faces adjacentes e ortogonais do material em estudo. No método indirecto os transdutores são colocados na mesma face do material. Os melhores resultados obtêm-se através do método directo devido à transmissão de energia

do emissor para o material ser realizada na direcção ortogonal à face do transdutor [Bungey et al., 2006]. De notar que o percurso e o modo de propagação nos métodos directo e indirecto são diferentes, logo a velocidade de propagação utilizando o método directo não deve ser comparada à velocidade de propagação utilizando o método indirecto.

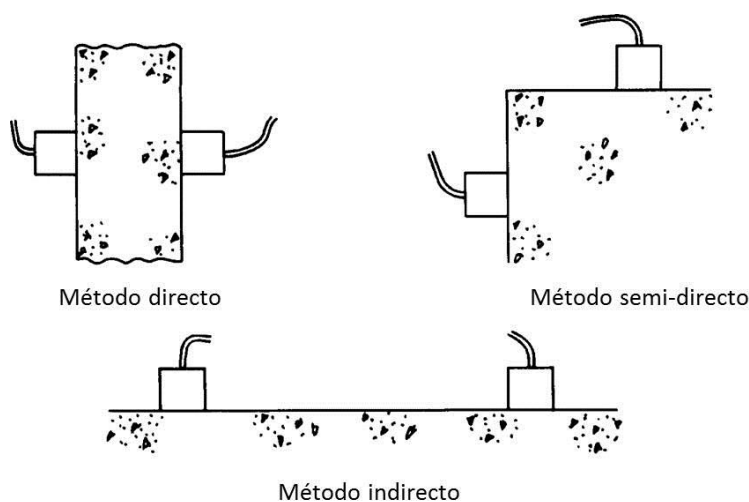


Figura 2.9 – Modos de disposição dos transdutores em ensaios de ultrassons [Bungey et al., 2006]

As sondas utilizadas nos ensaios com ultra-sons possuem um ou mais cristais piezo-eléctricos. A capacidade de uma sonda pode ser definida pela sensibilidade (aptidão para detectar pequenas descontinuidades), pela resolução (aptidão para distinguir as reflexões ultra-sonoras de descontinuidades próximas) e pela eficiência (eficácia na conversão de energia). O tamanho do cristal é também um factor a considerar pois, quanto maior for o diâmetro do cristal menor é a divergência do feixe e maior a quantidade de energia emitida. Outra forma de diminuir a divergência do feixe é aumentando a frequência, o que aumenta a sensibilidade e a resolução. Numa sonda de um dado diâmetro, a divergência do feixe é tanto menor quanto maior for a frequência [Silva, 2013]. Para as inspecções será necessário que haja uma relação correcta entre o cristal e a frequência a utilizar. Altas frequências, muitas vezes, não permitem que todas as reflexões sejam nítidas devido às descontinuidades existentes no betão.

2.4. Factores que influenciam resultados nos ensaios de ultra-sons no betão

Realizar um ensaio com ultra-sons no betão é aparentemente simples mas é importante ter em conta nos procedimentos do ensaio e na interpretação dos resultados obtidos alguns factores que podem influenciar os resultados e conduzir a conclusões incorrectas. Estes factores podem estar directamente relacionados com as propriedades do betão ou serem factores que afectam a velocidade de propagação, mas são exteriores a essas propriedades

[Naik et al., 2004]. Em seguida, apresentam-se os factores que devem ser considerados nos ensaios de ultrasons.

- Factores que resultam das propriedades do betão:
 - tipo, composição geológica, dimensão e granulometria do agregado;
 - tipo de cimento;
 - relação água/cimento;
 - utilização de aditivos;
 - idade do betão.
- Factores que afetam as medições de velocidade de propagação:
 - perfeito contato entre os transdutores e o betão;
 - temperatura;
 - humidade;
 - comprimento de onda;
 - dimensão e forma do elemento estrutural;
 - nível de tensão a que o material está submetido;
 - presença de armaduras.

2.4.1. Tipo, composição geológica, dimensão e granulometria do agregado

A velocidade de propagação da onda é significativamente afectada pelo tipo e dimensão do agregado. De uma forma geral, a velocidade de propagação da onda no cimento é inferior à no agregado [Jones, 1954 citado por Naik et al., 2004]. Através de testes verificou-se que para a mesma mistura de betão ao mesmo nível de resistência à compressão, a velocidade de propagação de onda nos betões com diferentes agregados é também diferente, tendo o betão com cascalho arredondado uma velocidade de propagação inferior à do betão com granito britado, sendo ainda inferior à do betão com calcário moído.

Testes adicionais indicam que com a mesma tensão instalada no betão, betão com agregados mais densos têm velocidades de propagação mais elevadas [Jones, 1962, Bullock e Whitehurst, 1959 e Kaplan, 1959 citado por Naik et al., 2004]. A figura 2.10 relaciona a variação da quantidade de agregados numa mistura de betão com a velocidade de propagação e com a resistência à compressão. A figura mostra que, para um determinado valor de velocidade de propagação, quanto maior for a quantidade de agregados no betão menor será a resistência à compressão.

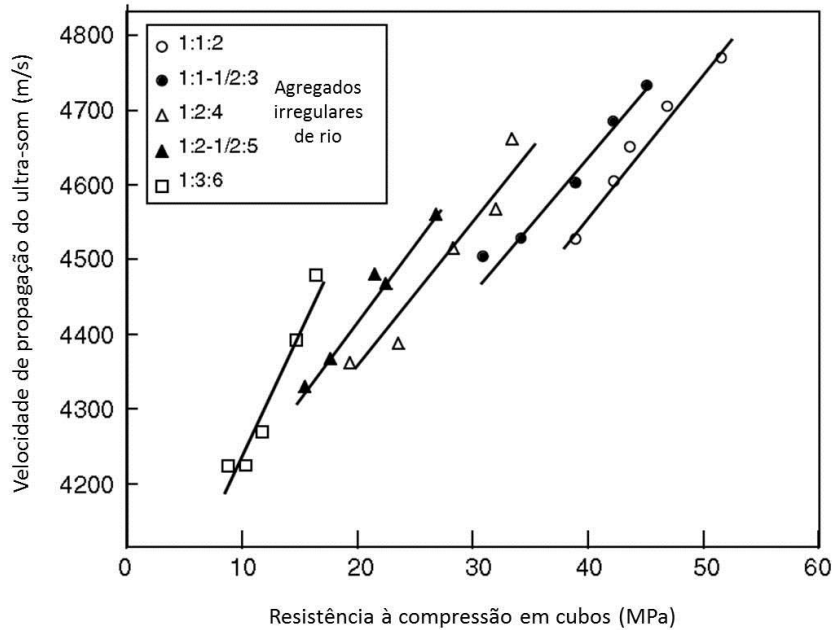


Figura 2.10 - Relação entre a velocidade de propagação do ultra-som e a resistência à compressão, em betões com diferentes tipos de agregados (ligante : areia : agregado) [Jones, 1962 citado por Naik et al., 2004]

2.4.2. Cimento. Relação água/cimento.

A variação da velocidade de propagação não é significativa para os diferentes tipos de cimento [Jones, 1954 citado por Naik et al., 2004]. No entanto, a taxa de hidratação é diferente para diferentes tipos de cimento e quando a taxa de hidratação é mais elevada, o módulo de elasticidade é igualmente maior logo a velocidade de propagação aumenta.

A utilização de cimentos de rápido endurecimento tem como resultado uma maior resistência no betão para uma dada velocidade de propagação [Jones, Facaoaru, 1969 citado por Naik et al., 2004].

A velocidade de propagação no betão é também afectada pela relação água/cimento. Um aumento da água para a mesma quantidade de cimento provoca uma diminuição na resistência do betão à flexão e à compressão e, conseqüentemente, uma diminuição na velocidade de propagação [Kaplan, 1959 citado por Naik et al., 2004].

2.4.3. Utilização de aditivos

A utilização de aditivos no betão altera propriedades como a resistência, a durabilidade, o módulo de elasticidade, a porosidade e a densidade, entre outras. A velocidade de propagação da onda de ultra-som num betão é afectada pela alteração destas propriedades.

Os aditivos vão influenciar a velocidade de propagação da mesma forma que influenciam a taxa de hidratação [Naik et al., 2004].

2.4.4. Idade do betão

O efeito da idade do betão na velocidade de propagação é análogo ao da evolução da resistência do betão [Jones, 1954 citado por Naik et al., 2004]. A velocidade de propagação aumenta rapidamente nos primeiros dias e depois estabiliza, tal como nos betões de alta resistência inicial. Os valores limites da velocidade são atingidos mais cedo do que os da resistência.

A figura 2.11 ilustra a relação entre a idade do betão e a velocidade da onda.

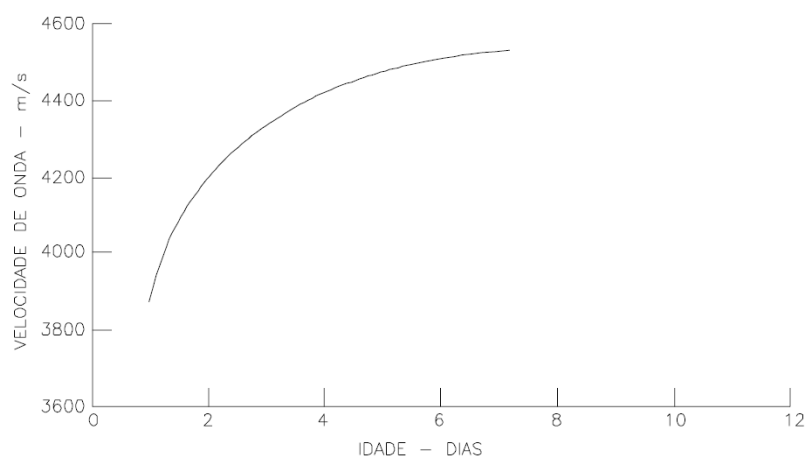


Figura 2.11 - Relação entre velocidade de onda e idade.
[Orchard, 1978 citado por Medeiros, 2007]

2.4.5. Contacto dos transdutores com o betão

Para transmitir ou receber, os transdutores devem estar em perfeito contacto com a superfície do betão. Caso contrário é possível introduzirem-se erros no tempo de propagação, devido a apenas uma quantidade insignificante de energia das ondas poder ser transmitida através do ar [Naik et al., 2004].

A superfície do betão deve ser lisa para que o contacto seja o mais perfeito possível. Caso não seja possível evitar superfícies rugosas recomenda-se que se aumente a distância entre os transdutores [Rilem, 1972]. As superfícies com acabamento devem ser evitadas devido às características do acabamento não serem as mesmas que as do interior [Machado, 2005 citado por Medeiros, 2007].

2.4.6. Temperatura

A temperatura só tem influência significativa na velocidade de propagação em temperaturas extremas. Em temperaturas entre 5°C e os 30°C a variação na velocidade de propagação tem um efeito insignificante [Jones, Facaoaru, 1969, citado por Naik et al., 2004].

Para temperaturas fora deste intervalo, as correções da Tabela 2.2 são recomendadas.

Tabela 2.2 - Fatores de correção da velocidade dos ultrassons no betão em função da temperatura [Naik et al., 2004]

Temperatura (°C)	Correcção (%)	
	Betão seco	Betão saturado
60	5	4
40	2	1.7
20	0	0
0	-0.5	-1
<-4	-1.5	-7.5

O betão sujeito a temperaturas mais elevadas do que os 30 °C tem maior tendência a fissurar. As microfissuras alteram o percurso das ondas de propagação e a velocidade de propagação reduz. No caso do betão sujeito a baixas temperaturas, a água existente no interior do betão solidifica (congela) podendo provocar fissurações. O gelo provoca ligeiros aumentos na velocidade de propagação.

2.4.7. Humidade

A humidade no betão influencia a velocidade de propagação, daí ser importante as condições de cura do betão e o estado de hidratação do betão na fase inicial da presa. A humidade no betão para além da respeitante à cura inicial influencia directamente os resultados dos ensaios realizados com ultra-sons, pois a velocidade de propagação num betão saturado pode ser superior até 5% à do betão seco, sendo a influência inferior para os betões de alta resistência do que para os de baixa resistência [Bungey et al., 2006]. A presença da água nos poros do betão provoca um aumento na velocidade de propagação visto que a trajetória das ondas longitudinais sofre menos alteração do que no caso contrário.

O efeito da humidade e da presença de água no betão pode, assim, induzir resultados enganadores no que diz respeito à deteção de defeitos na estrutura, nomeadamente na quantificação da profundidade de fendas. No caso das fendas se encontrarem total ou parcialmente preenchidas com água, obtêm-se estimativas de profundidade de fendas inferiores à profundidade real ou até mesmo pode não ser possível realizar a sua deteção [Ribeiro, 2013].

2.4.8. Comprimento de onda

Em teoria, o percurso percorrido e a frequência da onda (que é a mesma do transdutor) não deve afectar a velocidade de propagação. No entanto, devido à natureza heterogénea do betão, na prática, pequenos comprimentos de onda tendem a influenciar mais a velocidade de propagação [Jones, 1962 citado por [Naik et al., 2004]. Assim, só é relevante a influência do comprimento de onda para distâncias muito reduzidas ou muito elevadas.

Nas distâncias muito reduzidas a Norma Portuguesa NP EN 12504-4 recomenda como distância mínima:

1. 100 milímetros para o betão com agregados de dimensão máxima 20 mm
2. 150 milímetros para o betão com agregados de dimensão entre os 20 mm e os 40 mm

Nas distâncias muito elevadas é necessário ter em conta o conteúdo em frequência da onda emitida.

De facto, o alcance de uma onda com frequência f_0 propagando-se à velocidade V , depende do comprimento de onda λ_0 dado por:

$$\lambda_0 = \frac{V}{f_0} \quad 2.6$$

Quanto maior for o comprimento de onda, maior a distância a que se consegue detetar a propagação da onda. Como se pode verificar a partir da equação 2.6, a frequências mais altas correspondem comprimentos de onda menores, aumentando assim o ritmo de perda da sua amplitude e, conseqüentemente, encurtando o seu alcance [Ribeiro, 2013].

2.4.9. Dimensão e forma do elemento estrutural

Na maioria dos casos, a dimensão e a forma do elemento estrutural não influencia a velocidade de propagação da onda ultrasónica. No entanto, podem surgir dificuldades em elementos pequenos onde o meio de propagação não pode ser considerado infinito, o que ocorre quando o comprimento de onda é superior à dimensão lateral do elemento em estudo [Bungey et al., 2006]. Nestes casos, é aconselhável a utilização de um transdutor de frequência mais elevada, reduzindo o comprimento de onda (equação 2.6) e conseqüentemente a dimensão lateral pode ser menor [Naik et al., 2004].

A Tabela 2.3 mostra as correspondências entre frequência dos transdutores, velocidade no betão e as dimensões laterais mínimas para que a velocidade de propagação não seja afetada. Entende-se por dimensão lateral mínima a distância mínima entre faces da peça de betão a ensaiar, na direção perpendicular à direção de propagação da onda.

Tabela 2.3 - Efeitos da dimensão do elemento estrutural na propagação de ondas [adaptada de Bungey et al., 2006]

Frequência dos emissores da onda (kHz)	Dimensão lateral mínima (mm)	
	vc = 3800 m/s	vc = 4600 m/s
54	70	85
82	46	56
150	25	30

2.4.10. Tensão no elemento estrutural

De uma forma geral, considera-se, em ensaios laboratoriais, que a tensão a que um elemento está sujeito só influencia significativamente a velocidade de propagação quando

essa tensão é superior a 50% da tensão de rotura. Estes ensaios aplicados a vigas submetidas a esforços de flexão mostraram características semelhantes, confirmando que em elementos sujeitos a elevados esforços a velocidade de propagação é afectada devido à formação de fissuras no betão. Nos elementos pré-esforçados as ondas só serão afectadas nos casos em que as cargas aplicadas ao elemento são muito elevadas [Bungey et al., 2006].

É ainda de referir que em condições de serviço, a tensão a que as estruturas estão sujeitas é normalmente até um terço da tensão de rotura logo, as ondas não são significativamente afectadas [Bungey et al., 2006].

Em elementos sujeitos a tensões de tracção a velocidade de propagação também não é significativamente afectada, mas deve-se ter cuidado nas zonas potencialmente fissuradas pois pode apresentar comprimentos de onda muito reduzidos.

2.4.11. Presença de armaduras

A velocidade de propagação pode ser influenciada de uma forma significativa devido à presença de armaduras. As leituras da velocidade de propagação nas proximidades de zonas que têm concentrações de armaduras são normalmente mais elevadas do que em zonas de betão simples, devido à velocidade de propagação no aço ser superior em 1.4 a 1.7 vezes a no betão simples [Naik et al., 2004]. Verifica-se, no entanto, que estes valores são inferiores quando um varão de aço com um diâmetro definido se encontra embebido no betão. Nestes casos, as condições de aderência entre o aço e o betão e as condições de propagação no betão vão influenciar a velocidade de propagação [Bungey et al., 2006]. O facto da primeira onda a ser detectada (onda mais rápida) se propagar através de um percurso entre o betão e a armadura (figuras 2.12 e 2.13) é a razão desta influência.

Em zonas de grande concentração de armaduras que não seja possível evitar, as medições devem ter em consideração a sua presença e contabilizar o aumento da velocidade. A direcção das armaduras em relação à direcção da propagação das ondas é um factor a ter em conta nas correcções da velocidade [Bungey et al., 2006].

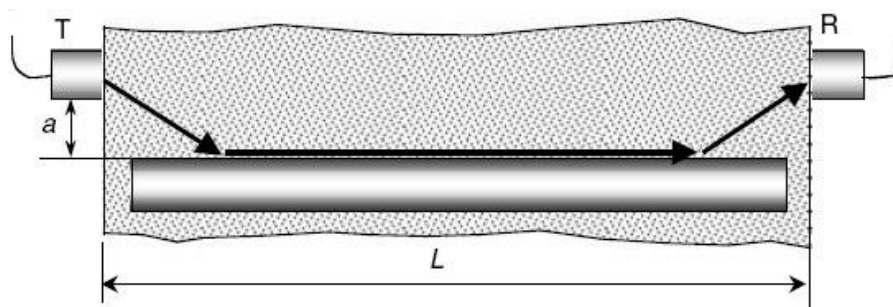


Figura 2.12 – Leitura de ultra-som em betão armado – barras paralelas à direcção de propagação [Rilem, 1972]

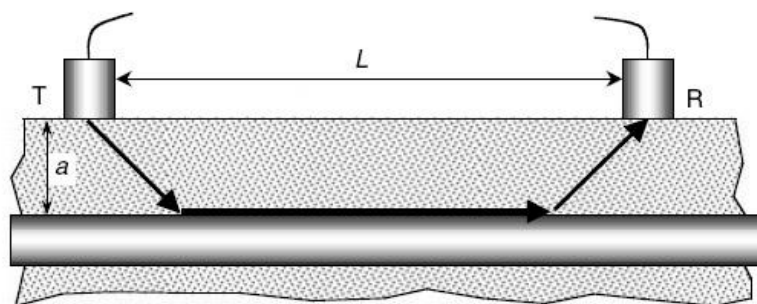


Figura 2.13 - Leitura de ultra-som em betão armado – barras paralelas à direcção de propagação [Rilem, 1972]

2.5. Imagem ultra-sónica

As pesquisas de tecnologias de imagens acústicas datam da Primeira Guerra Mundial (1914-1918). A necessidade de detectar submarinos alemães levou a força naval francesa a designar Paul Langevin para desenvolver um sistema que resultou no sonar.

O cientista russo Sokolov, entre a década de 1920 e a de 1930, codificou informações de imagens através do som que eram observadas em tempo real.

No final da década de 1940, investigadores japoneses realizaram testes de ultra-sons em diagnósticos médicos. O equipamento obtinha a imagem de perfil bidimensional [Marques, 2011]. A partir de 1960, houve vários exemplos de imagens para a medicina: 1965 - Werner Buschman oftalmologista alemão desenvolveu o primeiro transdutor adaptado para examinar o olho; 1967 - Siemens Corporation introduz o equipamento conhecido como Vidoson; 1969 - Magnaflux Corporation lança o equipamento com transdutor mecânico para obter imagens do coração; 1973 - N. Bom - Erasmus University, Rotterdam Holanda constrói transdutor linear para obter imagens do coração; e 1974 - ADR Corporation introduz no mercado o transdutor linear conhecido como “linear array” [Biscegli, 2003].

Também na década de 1970 foram introduzidos, em operações, aparelhos ultra-sónicos para medir espessuras com precisão incluindo quando só era possível aceder a um lado [Marques, 2011]. A medição de espessuras por ultra-sons foi rapidamente utilizada em barcos e em tubos.

O sistema conhecido por microscopia ultra-sónica de varrimento SAM (Scanning Acoustic Microscopie) foi introduzido em 1974. Utiliza o método C-scan e um transdutor piezoeléctrico em que se obtém uma imagem através da codificação da amplitude do sinal ultrasonoro recolhido numa escala de cor [Quate, 1974 citado por Santos, 2004].

Outros sistemas foram desenvolvidos destacando-se, pela sua importância, a microscopia ultra-sónica de varrimento laser SLAM (Scanning Laser Acoustic Microscopie) [Kessler,

1972 citado por Santos, 2004] e a microscopia de varrimento foto-acústico PAM (Photo Acoustic Microscopy) [Busse, 1985 citado por Santos, 2004].

Os últimos avanços em instrumentos ultra-sónicos baseam-se nas técnicas de processamento digital de sinais e no baixo custo dos microprocessadores que se tornaram disponíveis a partir da década de 1980. Estes avanços levaram ao desenvolvimento de sistemas de inspeção portátil e on-line altamente fiáveis para a detecção de falhas, medição de espessura e imagem acústica. Hoje em dia, o desenvolvimento das técnicas não destrutivas por ultra-sons é significativo, sendo utilizados com o objetivo de detectar falhas internas, o que torna este método bastante útil [Marques,2011].

Na análise de defeitos existentes no interior do betão é importante localizá-los e retirar informações sobre a sua forma e dimensão para que seja possível tomar as decisões necessárias. Também em medicina é fundamental a obtenção de imagens para avaliar e diagnosticar em inúmeras situações. Estes dois campos tornam a imagem obtida por ultra-sons numa importante ferramenta nas técnicas não destrutivas.

Numa inspeção as imagens obtidas do interior do betão podem ser de três tipos (depende do equipamento): A, B ou C scan, apresentados na figura 2.14.

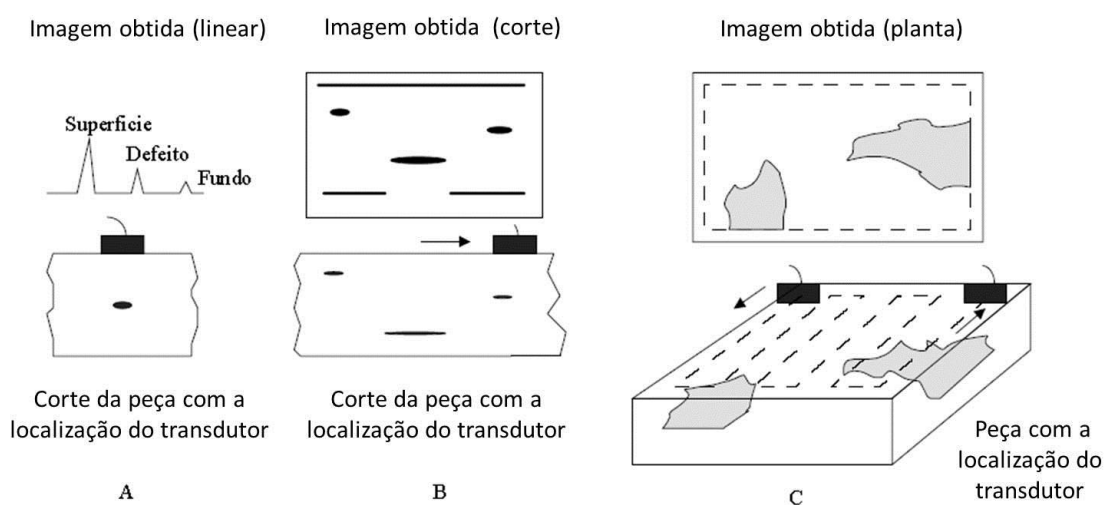


Figura 2.14 – Informação obtida pelos métodos A, B e C scan [Santos, 2004]

A informação obtida pelo A-scan é unidimensional e refere-se ao trajecto percorrido pelo ultra-som. O tempo de propagação medido indica a profundidade a que se localiza o defeito e uma análise à amplitude do sinal recebido estima a dimensão do defeito. Na imagem obtida o eixo horizontal mostra o tempo de propagação e o eixo vertical as amplitudes [Schickert et al., 2003].

No caso do B-scan, o transdutor movimenta-se ao longo de um eixo e obtém-se um corte paralelo à direcção de propagação (diversos A-scans no mesmo eixo). As amplitudes do

modo A são convertidas em cores ou numa escala de cizentos e colocadas lado a lado. A imagem obtida é bi-dimensional e o eixo horizontal mostra a distância ao longo da direcção de inspecção e o eixo vertical ao logo do trajecto do ultra-som [Schickert et al., 2003].

No C-scan o varrimento é realizado num plano definido e perpendicular à direcção de propagação. São recolhidos os sinais referentes a cada ponto do plano (diversos B-scans no mesmo plano) o que permite a construção da imagem. Os sistemas actuais usam um computador para controlo da excitação e do movimento do transdutor, aquisição dos sinais e apresentação da imagem pretendida [Santos, 2004].

A figura 2.15 apresenta as posições dos diferentes modos da imagem, A, B ou C-scan.

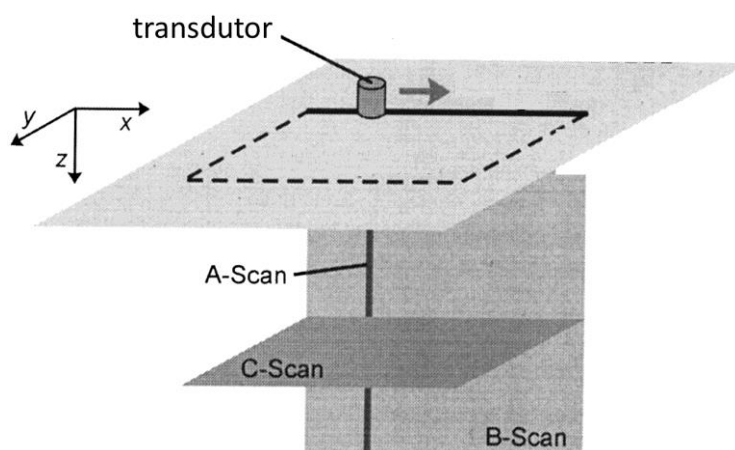


Figura 2.15 – Posições dos modos de imagem [Schickert et al., 2003]

As principais técnicas de imagiologia ultra-sónica usadas actualmente têm por base os princípios de funcionamento dos métodos B e C-scan.

A técnica de imagiologia utilizada pelo tomógrafo ultra-sónico – MIRA é a técnica de abertura focal sintética que, através do processamento dos sinais, constrói um modelo em 3D e três cortes da secção.

A técnica de abertura focal sintética é um algoritmo complexo utilizado na tecnologia de ultra-sons e cujo aprofundamento está fora do âmbito desta dissertação. Na secção 3.3 apresenta-se a descrição do tomógrafo MIRA com 40 transdutores que funcionam em simultâneo. Em cada localização do tomógrafo obtêm 180 A-scan. É, pois, de referir que a base do procedimento envolve 4 passos [Langenberg 2001 et al.; Marklein, 2002 citado por Hoegh et al., 2011]:

- 1) atribuir a intensidade medida a cada profundidade do A-scan de cada medição a todos os pontos (localizações) num leque de 180° à volta da fonte;
- 2) repetir o 1º passo em todos os pontos iniciais (fontes) na superfície a medir;
- 3) sobrepor a intensidade de todos os A-scans registados dos quais resultam pontos de intersecção das localizações das diferentes medições;
- 4) focar as dispersões considerando estas intersecções como as localizações das anomalias.

2.6. Estudos anteriormente realizados através do tomógrafo ultra-sónico - MIRA

O tomógrafo ultra-sónico – Mira é um equipamento inovador e não destrutivo utilizado para obter imagens do interior do betão, que foi desenvolvido pela Germann Instruments. Baseia-se num sistema de detecção de contrastes e densidades, através de ultra-sons. A descrição do tomógrafo MIRA é realizada na secção 3.3.

As imagens obtidas pelo tomógrafo são apresentadas num sistema de eixos relativos à antena como apresentado na Figura 3.35.

2.6.1. Verificação dos resultados do MIRA e através do DOCTer Impact-Echo

A empresa Germann Instruments efectuou testes para confirmar os resultados do tomógrafo ultra-sónico Mira. Apresenta-se em seguida um dos testes efectuado.

Os testes foram realizados numa laje com 0,40 m de espessura, 3,00 m de comprimento e 2,00 m de largura. A figura 2.16 mostra a localização da bainha vazia e da bainha com um cabo de pré-esforço com 10 cordões e injectada [Germann Instruments, 2011].

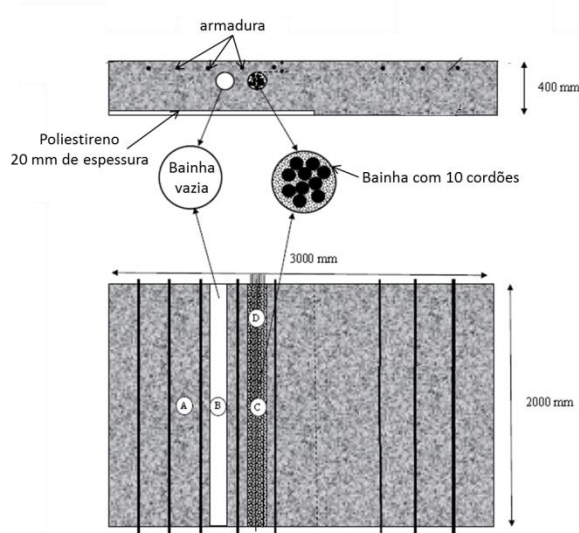


Figura 2.16 - Localização das bainhas [Germann Instruments, 2011]

A primeira inspecção foi realizada com o tomógrafo MIRA como se vê na figura 2.17.



Figura 2.17 – Inspeção realizada com o tomógrafo Mira [Germann Instruments, 2011]

Os resultados obtidos pelo Mira são apresentados nas figuras 2.18 a 2.22.

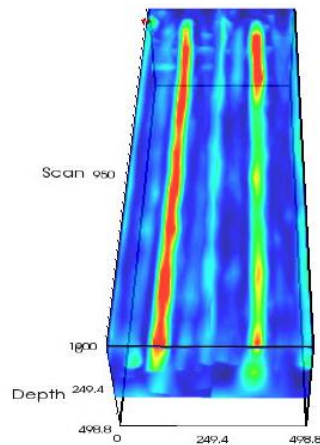


Figura 2.18 - Ilustração em 3D na vizinhança das bairns [Germann Instruments, 2011]

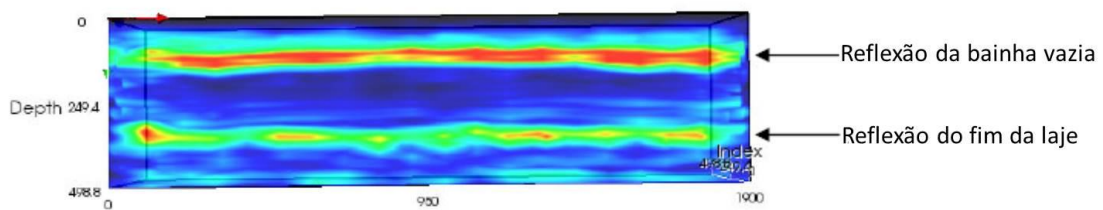


Figura 2.19 – D-scan – Reflexão da bairna vazia [Germann Instruments, 2011]

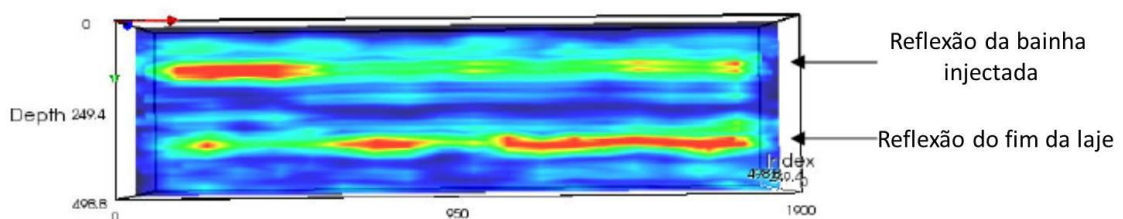


Figura 2.20 - D-scan – Reflexão da bairna injectada [Germann Instruments, 2011]



Figura 2.21 – B-scan – reflexão a 1200 mm do início da laje. Ilustração em 3D a mostrar a localização do Bscan [Germann Instruments, 2011]

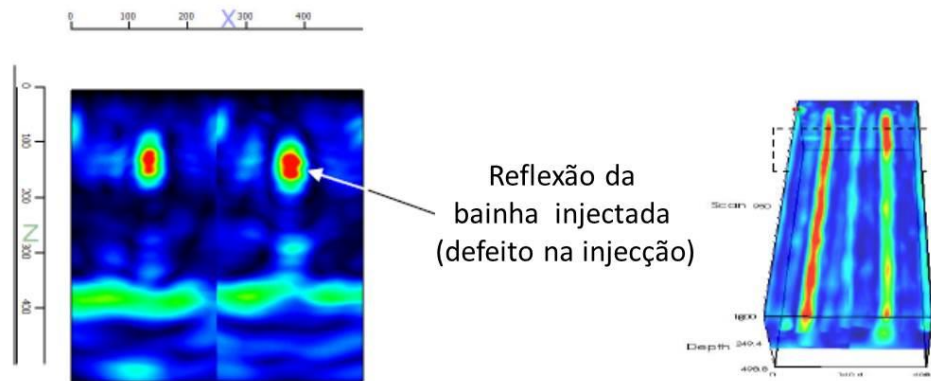


Figura 2.22 - B-scan – reflexão a 1500 mm do início da laje. Ilustração em 3D a mostrar a localização do Bscan [Germann Instruments, 2011]

Como se pode verificar pelas figuras qualquer das bainhas é perfeitamente identificável e localizável. Nota-se que a bainha com os 10 cordões não está toda injectada de um dos lados a cor vermelha indica que existe ar na bainha. As armaduras também são identificáveis.

Para verificar a inspecção realizada pelo MIRA utilizou-se o DOCTer Impact-Echo (aparelho de ultra-sons que apresenta imagens em modo A.). Para tal, marcaram-se quatro pontos para serem analisados (ver figura 2.16).

- Ponto A, betão
- Ponto B, bainha vazia
- Ponto C, bainha injectada
- Ponto D, bainha injectada na zona em que existem vazios

A figura 2.23 apresenta o sistema do DOCTer Impact Echo.

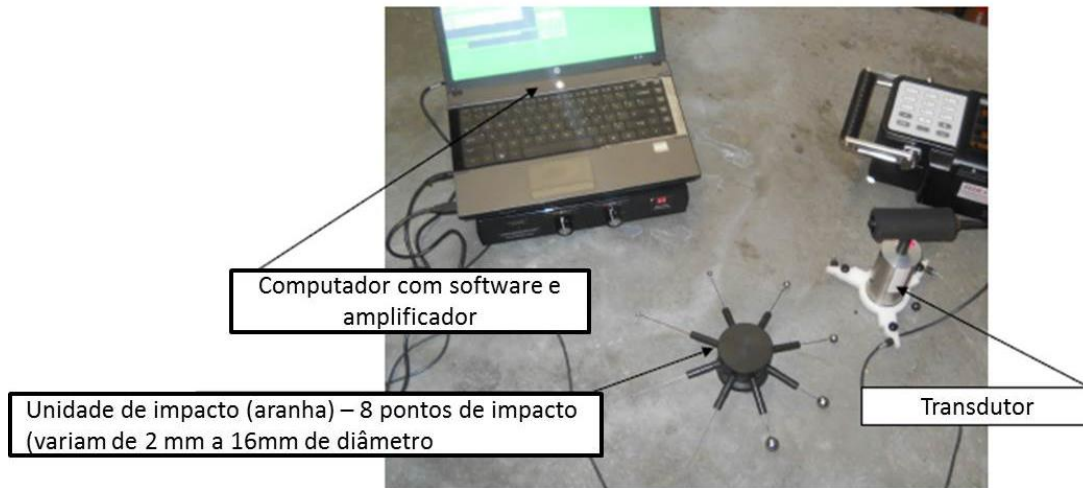


Figura 2.23 – Sistema do DOCTer Impact-Echo
[Germann Instruments, 2011]

Os resultados que se obtiveram são apresentados nas figuras 2.24 a 2.28.

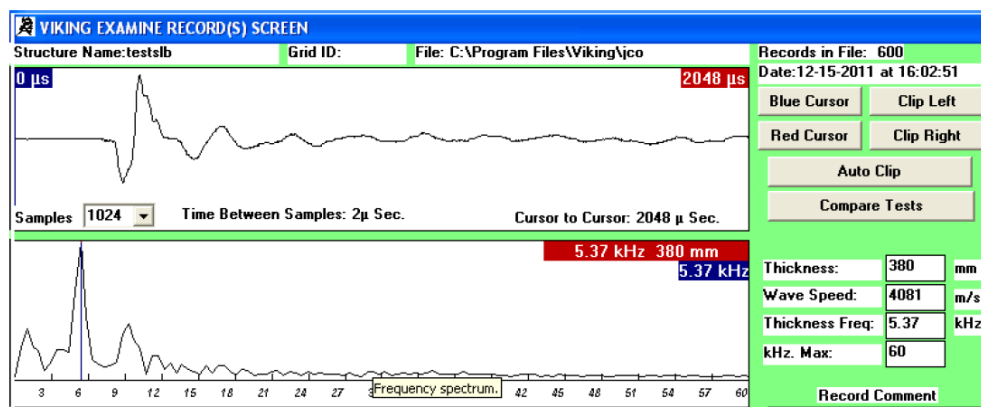


Figura 2.24 – Análise realizada no ponto A
[Germann Instruments, 2011]

Pela figura 2.24 pode “ver-se”:

Sinal contínuo. A uma frequência medida de 5,37 kHz com uma espessura estimada de 380 mm, a velocidade da onda longitudinal é de 4081 m/s. Note-se que depois de estar calibrado a frequência estimada de 5,37 kHz (a azul) coincide com a frequência medida (a vermelho) referente a 380 mm de espessura, o cursor azul no espectro de frequência está sobreposto com o cursor vermelho. A frequência é $(4081 \text{ m/s}) / (2 \times 380 \text{ mm}) = 5,37 \text{ kHz}$.

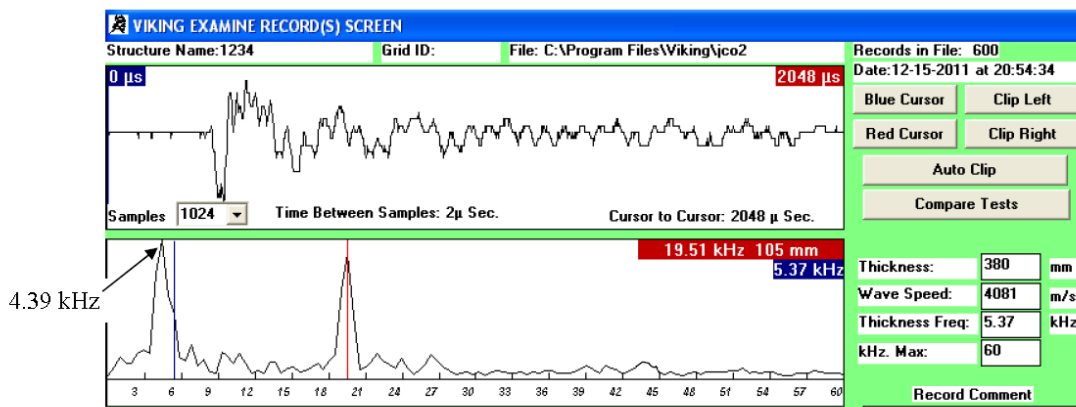


Figura 2.25 – Análise realizada no ponto B
 [Germann Instruments, 2011]

Na figura 2.25 a frequência desceu para 4,39 kHz, o que significa que o caminho percorrido pela onda longitudinal é: $(4081 \text{ m/s}) / (2 \times 4,39 \text{ kHz}) = 464$ milímetros, 84 mm superior ao ponto A. Consequentemente, a onda longitudinal percorreu em redor de uma interface de ar, que pode ser a bainha vazia. Ao mesmo tempo existe um pico de frequência (19,51 kHz) onde o cursor está posicionado vermelho. Esta frequência está relacionada com uma profundidade da superfície de reflexão de 105 mm, a profundidade da bainha vazia.

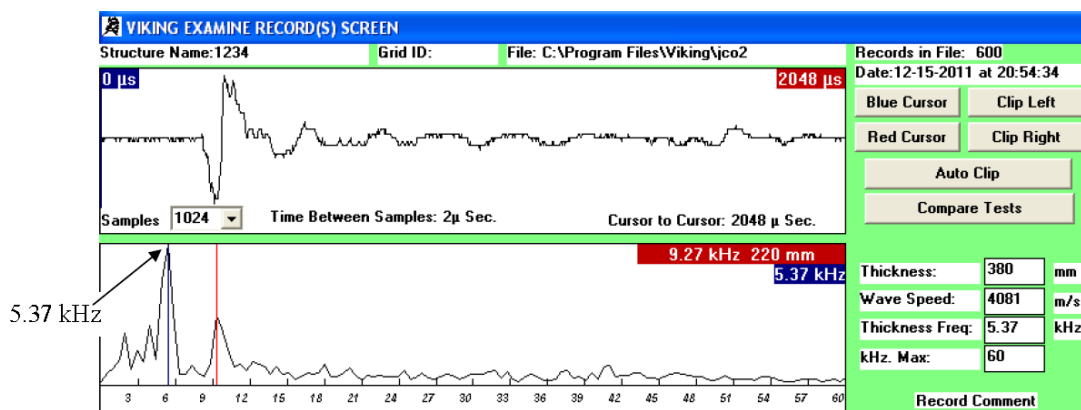


Figura 2.26 – Análise no ponto C
 [Germann Instruments, 2011]

Na figura 2.26 é medida a mesma frequência que no ponto A o que indica que a onda longitudinal percorreu a mesma distância, 380 mm, logo a bainha tem de estar totalmente injectada. A frequência adicional aos 9,27 kHz equivale aos cordões existentes na bainha. De forma a melhorar o pico de 9,27 kHz fez-se uma nova análise.

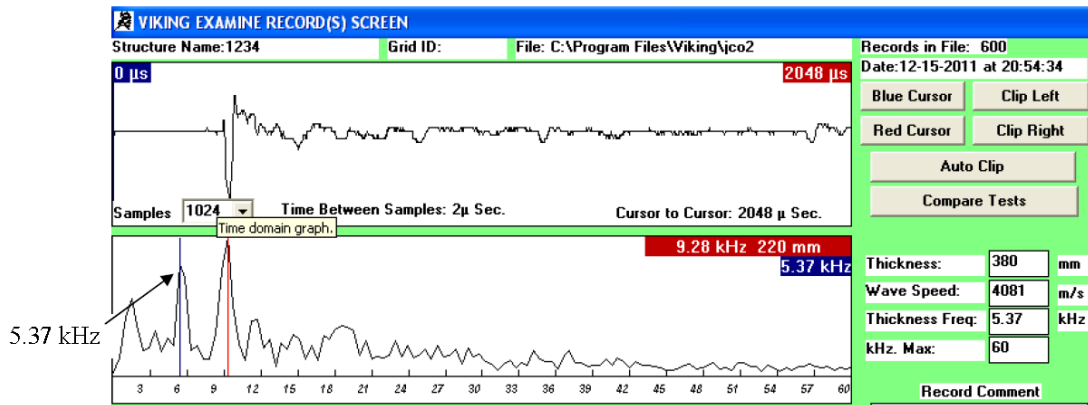


Figura 2.27 – Aperfeiçoamento da análise no ponto C
[Germann Instruments, 2011]

A figura 2.27 apresenta uma análise com um tempo de contacto inferior de forma a produzir uma maior frequência útil máxima. As conclusões são as mesmas que as da análise anterior.

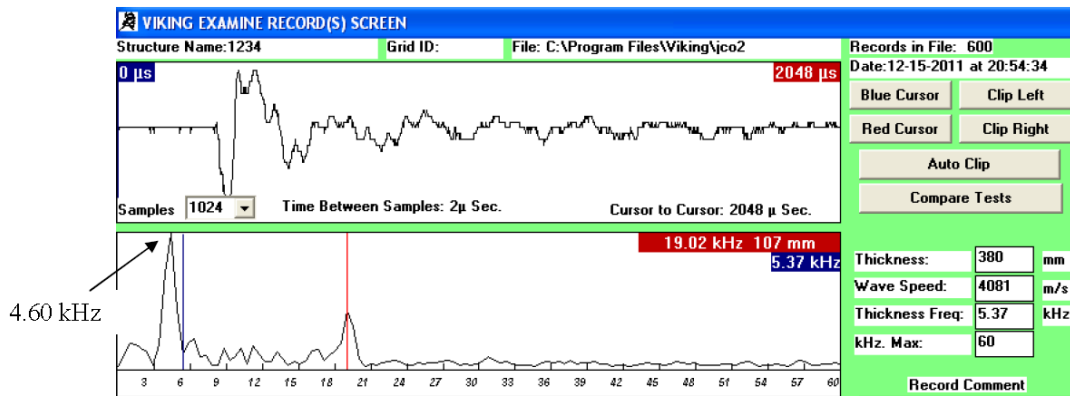


Figura 2.28 – Análise no ponto D
[Germann Instruments, 2011]

Na figura 2.28 nota-se que a frequência passou de 5,37 Hz para 4,60 Hz logo o percurso da onda longitudinal é superior a 380 mm, o que só acontece se existir ar na bainha.

Neste estudo chegou-se à conclusão que:

- os resultados obtidos pelo MIRA e pelo DOCTer Impact Echo são próximos;
- só é possível confirmar os resultados através de testes invasivos como a recolha de provetes ou perfurações;
- a equação utilizada nos testes realizados pelo DOCTer Impact Echo é válida para a reflexão dos 10 cordões.

2.6.2. Teste na ligação entre uma viga metálica e o reforço realizado em betão

O tabuleiro de vigas metálicas de uma ponte foi reforçado com 100 mm de betão reforçado com fibra. A sobreposição inclui várias camadas de armadura (figura 2.29) que interferiram com a consolidação do betão. A figura 2.30 mostra a realização do varrimento com o tomógrafo [Catalog NTD, 2010].



Figura 2.29 – Laje
[Catalog NTD, 2010]

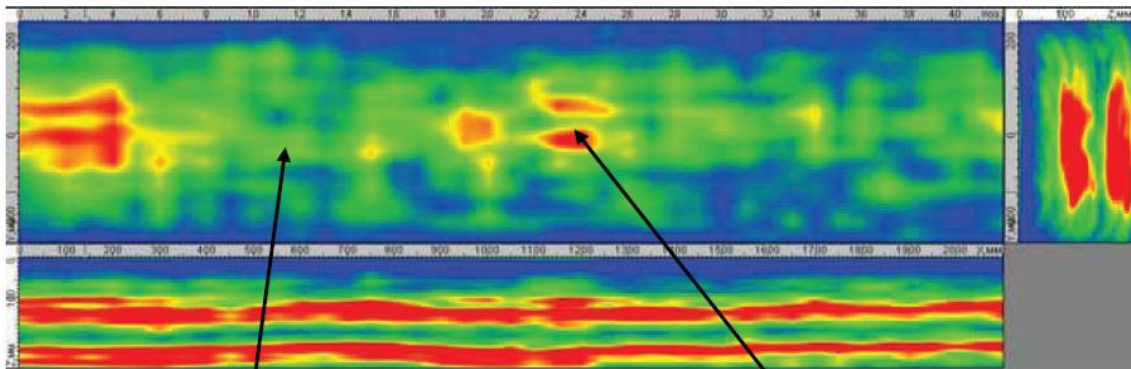


Figura 2.30 – Varrimento da laje
[Catalog NTD, 2010]

O tomógrafo ultra-sónico Mira foi utilizado para avaliar a presença de vazios na ligação do reforço com o existente. A figura 2.31 mostra exemplos dos resultados obtidos.

C-scan

B-scan



D-scan



zona sólida



zona com vazios

Figura 2.31 – Resultados obtidos pelo tomógrafo ultra-sónico Mira e amostras do betão em duas zonas distintas
[Catalog NTD, 2010]

Devido à profundidade do tableiro, o B-scan e o D-scan mostram múltiplas reflexões do fim da sobreposição. O C-scan mostra as localizações dos reflexos a 90 milímetros da superfície de topo. As regiões vermelhas representam a possível presença de espaços vazios. A subsequente perfuração confirmou os resultados do MIRA. Note-se que as regiões verdes no C-scan parecem ser reflexões a partir das barras de reforço.

2.6.3. Testes numa fundação em laje de betão

Um edifício de grandes dimensões na Polónia foi fundado 3,00 m abaixo do nível freático. A parte subterrânea do edifício foi protegida contra as águas subterrâneas por meio de impermeabilizações definidas em projecto. Quando o edifício entrou em serviço num corredor na cave com 6 m de largura apareceu água (figura 2.32). Na zona onde a inundação era maior foi realizado um poço de teste com $\pm 50 \text{ cm}^2$ (figura 2.33) para ver até onde estava molhado. Tendo-se verificado que existia água sobre a laje de fundação tomou-se a decisão de abrir uma área maior, 6,0 m x 3,0 m. Esta área mostrou que a laje de fundação tinha uma fenda em todo o comprimento (figura 2.34). Depois de secar a laje tornou-se visível que a água provinha da fenda. De forma a se quantificar os danos interiores da laje utilizou-se o tomógrafo ultra-sónico [Schabowicz et al., 2013].



Figura 2.32 – Vista geral
[Schabowicz et al., 2013]



Figura 2.33 – Poço teste
[Schabowicz et al., 2013]



Figura 2.34 – fenda na laje de fundação
[Schabowicz et al., 2013]

A laje de fundação foi marcada em quatro bandas com 0,50 m por 6,00 m cada (figura 2.35). E realizou-se um varrimento com o tomógrafo ultra-sónico em cada banda (figura 2.36)

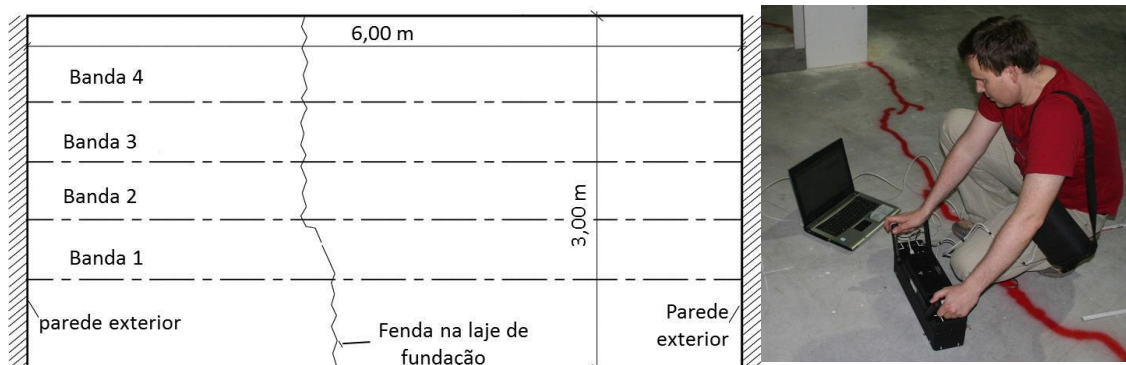


Figura 2.35 – Localização das bandas a analisar [Schabowicz et al., 2013]

Figura 2.36 – Realiz. de um varrimento [Schabowicz et al., 2013]

O tomógrafo ultra-sónico para além de ser utilizado para detecção de heterogeneidades, tais como o volume de vazios, é também uma ferramenta para obter a espessura dos elementos de betão. As imagens obtidas são apresentadas nas figuras 2.37 a 2.40.

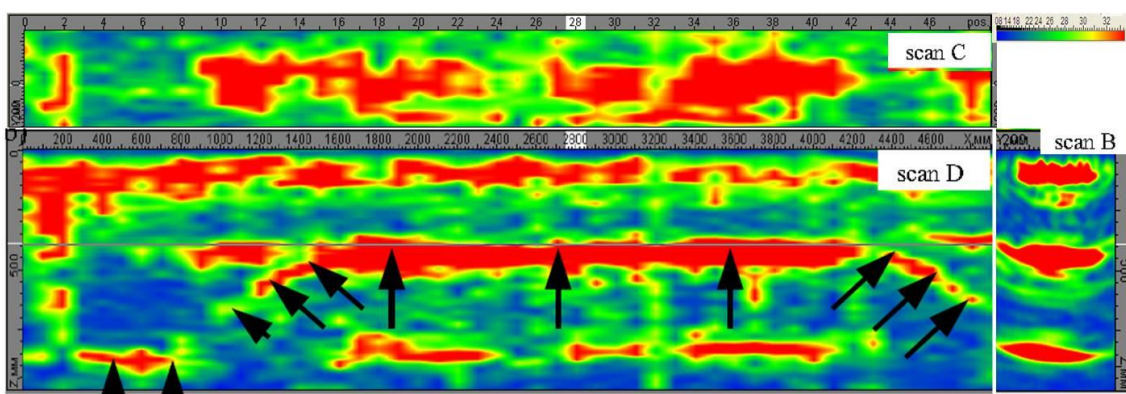


Figura 2.37 – Resultados obtidos na banda 1 [Schabowicz et al., 2013]

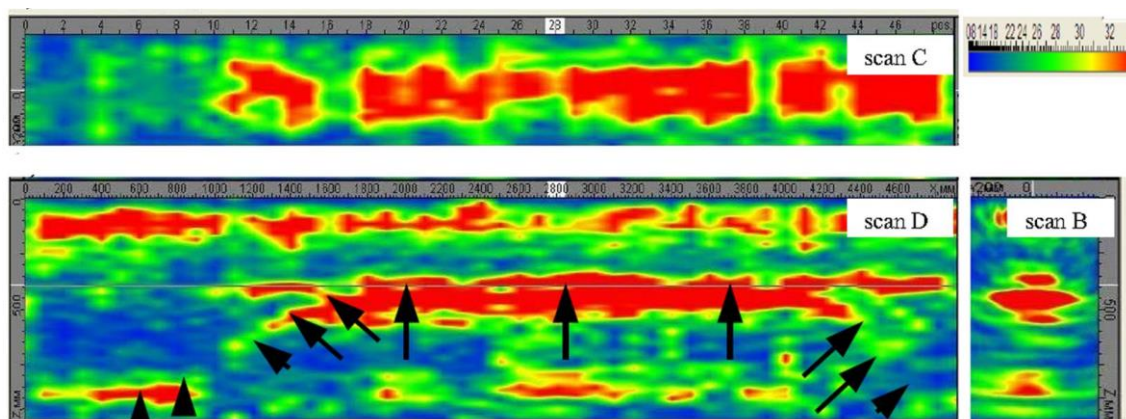


Figura 2.38 - Resultados obtidos na banda 2 [Schabowicz et al., 2013]

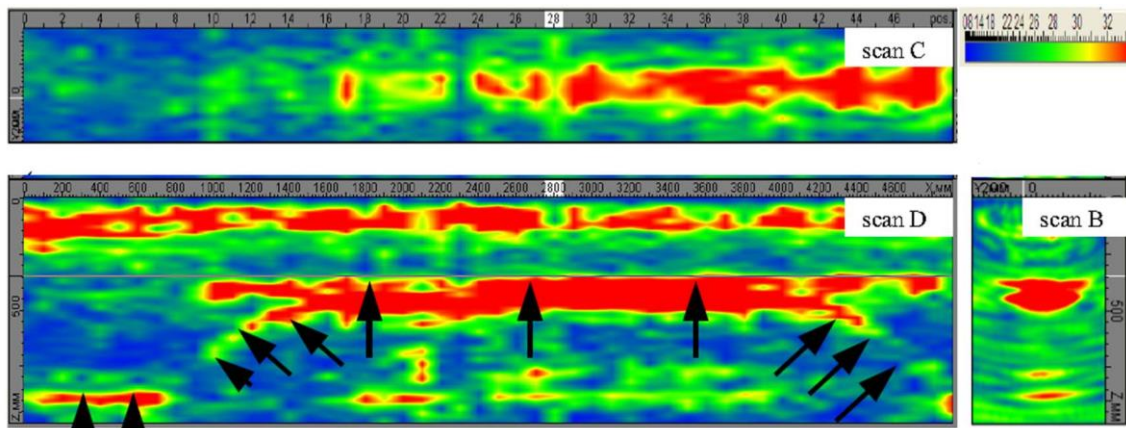


Figura 2.39 - Resultados obtidos na banda 3
[Schabowicz et al., 2013]

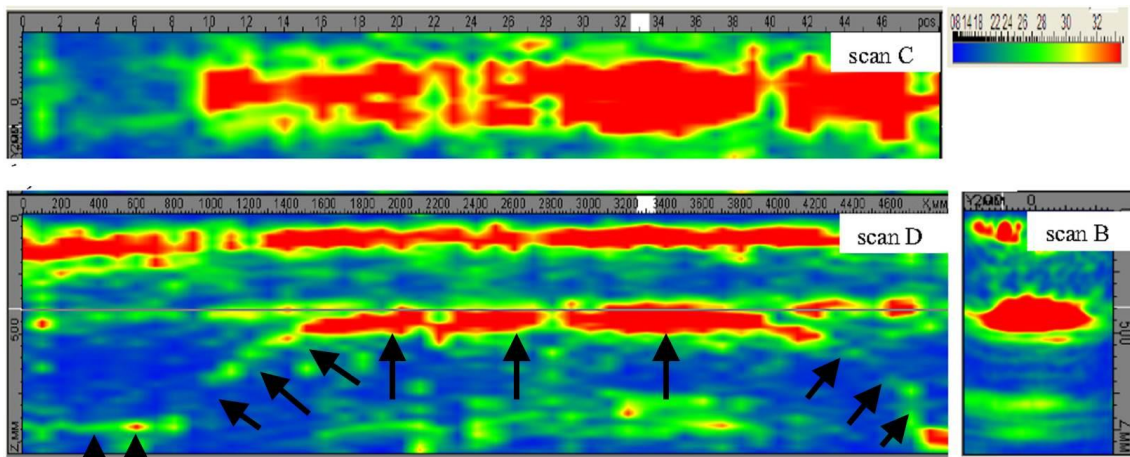


Figura 2.40 - Resultados obtidos na banda 4
[Schabowicz et al., 2013]

Das imagens obtidas pode-se verificar que a espessura da laje de fundação junto às paredes exteriores numa largura aproximada de 1,00 m é de 0,80 m conforme projecto; as setas pretas nas figuras indicam a reflexão do fim do betão. Nos restantes 4,00 m a espessura da laje é aproximadamente 0,40 m sendo a zona de transição efectuada a $\pm 45^\circ$. Esta espessura não está de acordo com o projecto. Verifica-se também que na zona dos 4,00 m há muita reflexão o que permite concluir que a zona central foi provavelmente preenchida com material heterogéneo, por exemplo restos de construção.

Perante o exposto efectuaram-se testes de tomografia ultra-sónica em zonas aleatórias e verificou-se que os resultados eram semelhantes.

Foi efectuado um cálculo à capacidade resistente da laje de fundação com dimensões obtidas através do tomógrafo. Os resultados obtidos pelo cálculo mostraram que a capacidade resistente da laje de fundação era inferior em 45% ao previsto no projecto.

Este estudo concluiu que:

- as dimensões da espessura da laje de fundação não eram as previstas no projecto;
- as diferenças na espessura da laje de fundação reduziam a capacidade resistente desta, representando um risco de segurança;
- a laje de fundação seria reparada e reforçada.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Objectivos e princípio dos ensaios

Nos ensaios com o tomógrafo de ultra-sons - MIRA pretendeu-se obter imagens que permitissem interpretar o interior do elemento estrutural em estudo.

Foram projectadas e construídas duas vigas em betão e duas vigas de betão armado pré-esforçado. As duas últimas simularam vigas em serviço numa situação real, com a particularidade de as suas bainhas de pré-esforço estarem já em processo de corrosão avançado. Foram recriadas situações de patologias comuns em estruturas deste tipo e foi sobre elas que os ensaios incidiram.

Os ensaios basearam-se em fazer varrimentos nas duas direcções e nas várias faces do elemento estrutural em estudo. O objectivo consistiu em verificar o nível de eficácia do tomógrafo ultra-sónico MIRA na determinação das espessuras das peças analisadas, na identificação das armaduras e na quantificação e qualificação dos vazios e discontinuidades existentes no interior do betão e em definir formas de interpretação das imagens obtidas das anomalias existentes.

3.2. Preparação das vigas

3.2.1. Considerações iniciais

A execução dos quatro protótipos analisados foi efectuada pela empresa Teixeira Duarte. Dois dos protótipos correspondem a duas vigas em betão e os outros dois a vigas em betão armado e pré-esforçado.

Numa viga em betão foram inseridos 3 varões de diferentes diâmetros e quatro vazios com diferentes dimensões. Na outra viga em betão simulou-se um “ninho de britas” e quatro fissuras.

Nas vigas em betão armado e pré-esforçado simularam-se defeitos de execução e elevada concentração de cloretos na calda de injeção das bainhas do pré-esforço. Nestes protótipos foram, ainda, simuladas algumas patologias como vazios no betão, “ninhos de brita” e fissuras, todas com dimensões e localizações conhecidas.

Estes protótipos simularam as principais e mais correntes anomalias construtivas, estruturais e de durabilidade presentes em estruturas de betão armado pré-esforçado deste tipo.

3.2.2. Geometria e materiais utilizados

As vigas protótipo em betão têm ambas 1,00 m de comprimento, 0,40 m de altura e 0,25 m de espessura, como se pode ver nas figuras 3.1 a 3.5.

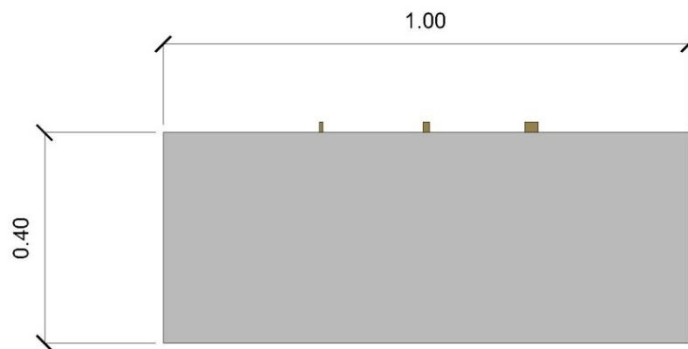


Figura 3.1 – Alçado longitudinal da Viga A (dimensões em m)

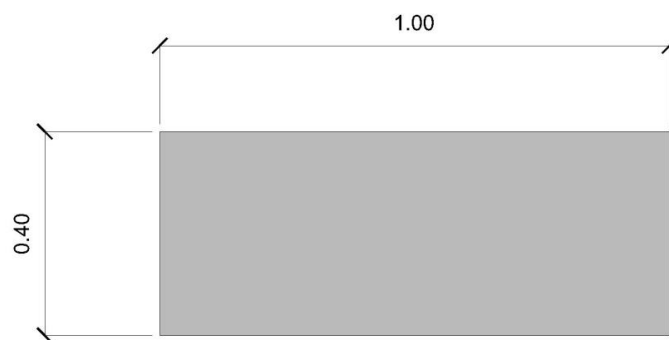


Figura 3.2 – Alçado longitudinal da Viga B (dimensões em m)

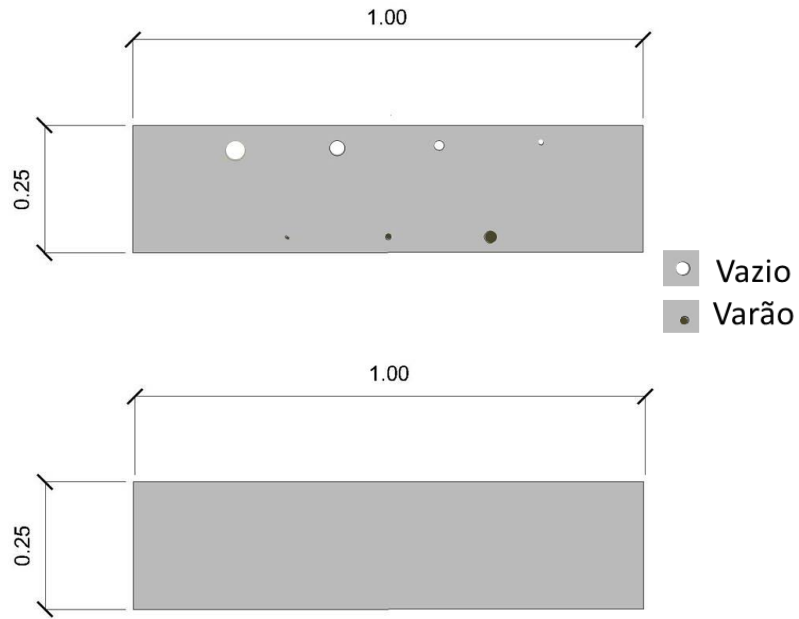


Figura.3.3 – Plantas da Viga A e da Viga B (dimensões em m)

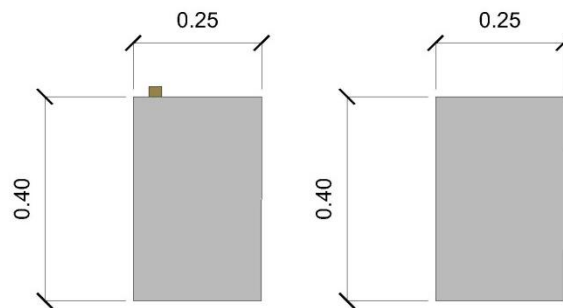


Figura 3.4 – Alçados transversais da Viga A e da Viga B (dimensões em m)

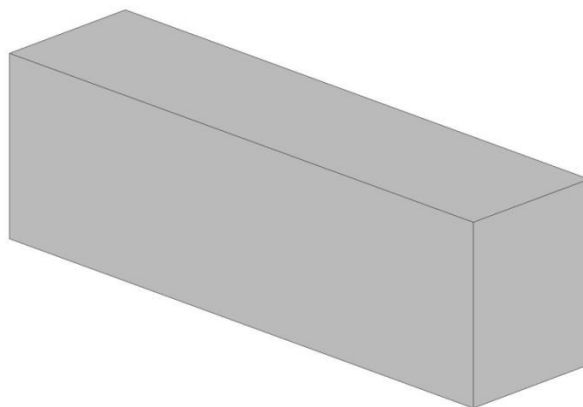


Figura 3.5 – Vista em três dimensões de uma Viga (A ou B)

As vigas protótipo em betão armado pré-esforçado têm 3,00 m de comprimento, 1,00 m de altura e 0,50 m de espessura como se pode ver nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8. Na Figura 3.9 ilustra-se a disposição espacial dos protótipos [Almeida et al., 2012].

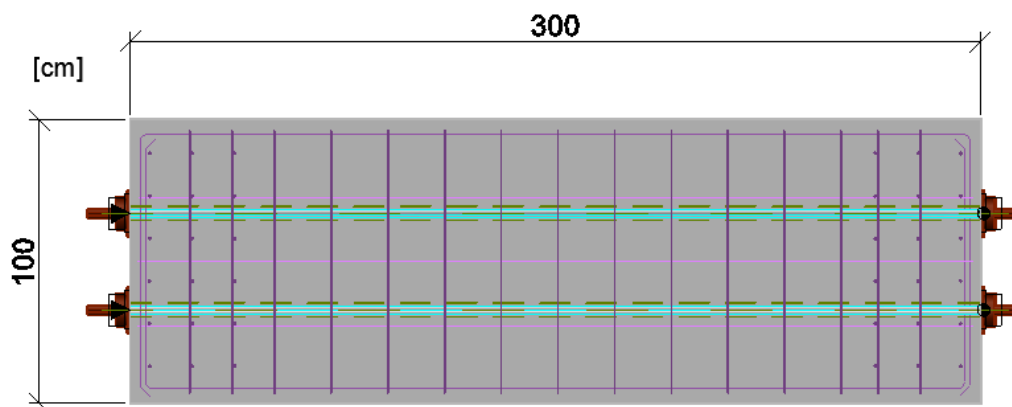


Figura 3.6 – Alçado dos protótipos 1 e 2.

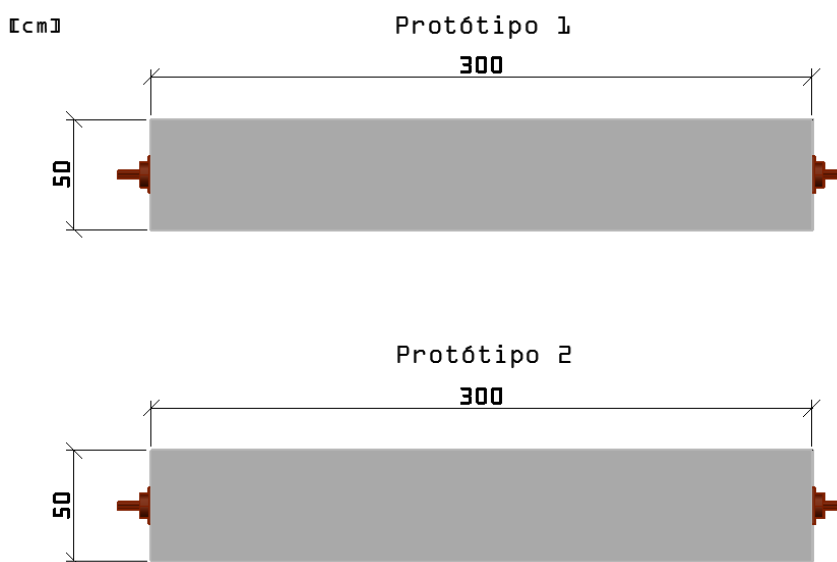


Figura 3.7 – Planta dos protótipos 1 e 2.

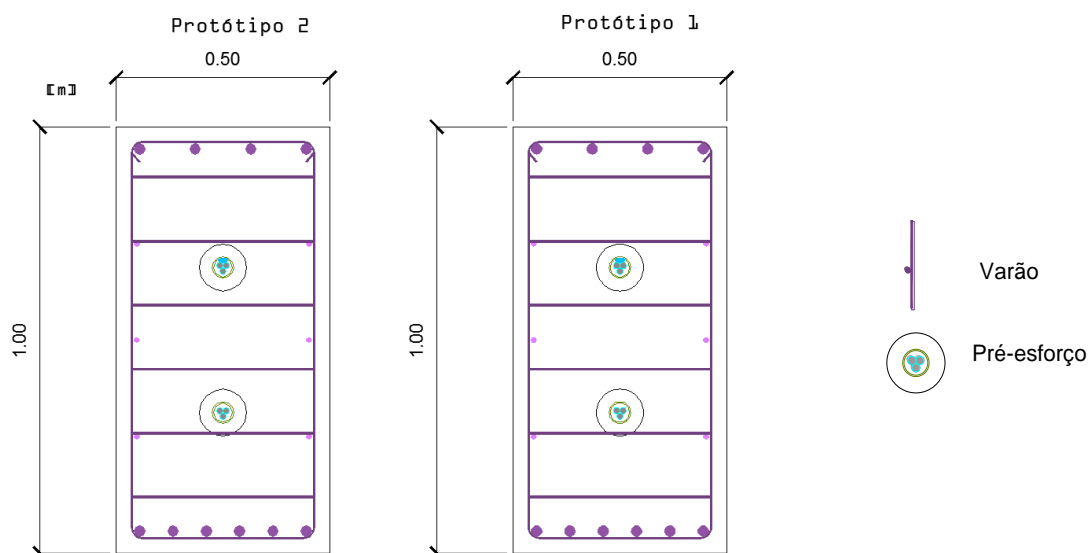


Figura 3.8 – Cortes transversais dos protótipos 1 e 2

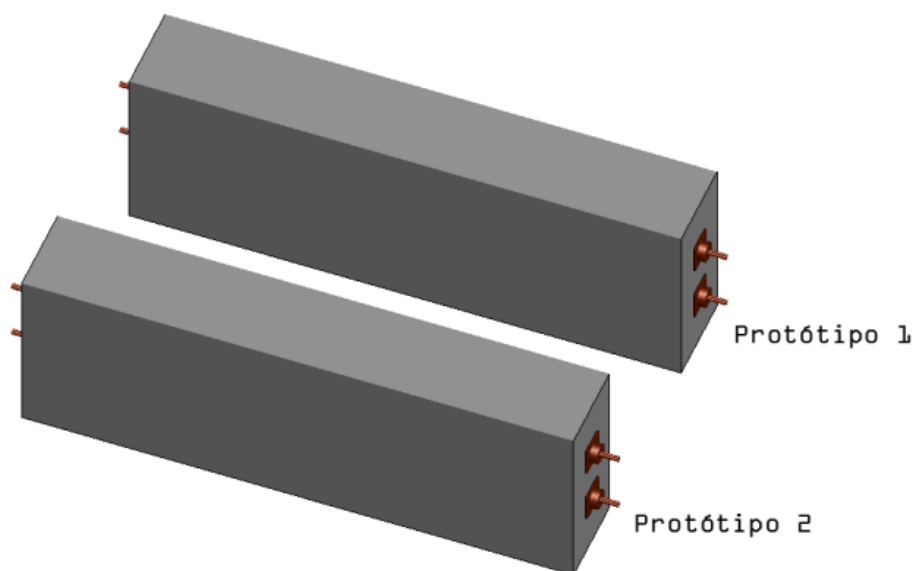


Figura 3.9 – Vista em três dimensões dos protótipos 1 e 2.

Cada protótipo das vigas de betão armado e pré-esforçado tem dois cabos de pré-esforço de três cordões 0.6”, traccionados a 500 kN. O pré-esforço é do tipo aderente, por pós-tensão. Adoptou-se um sistema de pré-esforço VSL com bainhas de aço corrugado de diâmetro interior e exterior de 50 e 55 mm, respectivamente. Foram utilizadas ancoragens activas Type E 28/35 MPa numa das extremidades dos protótipos – ambos os cabos têm ancoragens activas na mesma extremidade. Na extremidade oposta, os cabos têm ancoragens passivas.

Foram utilizados os seguintes materiais [Almeida et al., 2012]:

- i. Betão C25/30;
- ii. Aço A400 NR em armaduras ordinárias;

- iii. Cabos de pré-esforço de 3 cordões 0.6" N em aço A1600/1800;
- iv. Bainhas de aço corrugado;
- v. Ancoragens activas e passivas para cabos de pré-esforço;
- vi. Calda de cimento para injeção com dosagem de cloretos de 1.5% (por massa de cimento) e com as características listadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Características da calda de cimento
[Almeida et al., 2012]

Calda	Relação A/C
	0.50
Ensaio de fluidez NP EN 445 - método do cone (segundos)	Ensaio de fluidez (segundos)
0	8.5
30 min	9.5
Temperatura da calda (°C)	Temperatura °C
0	24.9
30 min	23.8
Varição de Volume NP EN 445 - método da proveta (%)	Varição de Volume (%)
	-1%
Exsudação NP EN 445 - método da proveta (%)	Exsudação (%)
	1%
Composição	1 m ³
Tipo e classe do cimento	Cimento Tipo II - 32.5 N
Cimento Tipo II - 32.5 N (kg/m ³)	69999
Água de poço (l/m ³)	35.000
Resistência 2 dias (MPa)	8
Resistência 7 dias (MPa)	22
Resistência 28 dias (MPa)	30
Temperatura da água antes da mistura (°C)	16.1
Temperatura do cimento antes da mistura (°C)	26.5
Temperatura ambiente (°C)	16.5
	16.0
Temperatura da calda (°C)	24.9
	23.8
Tempo de Escoamento - cone normalizado (segundos)	8.5
	9.5
Exsudação proveta 100 ml (ml)	95.0
	94.0
Varição de volume (mm)	209.0
	207.0

3.2.3. Processo de execução

- Vigas de betão

Na viga protótipo A foram colocados 3 varões com diâmetros de 6, 12 e 25 mm e 4 tubos de plástico com diâmetros de 10, 20, 30 e 40 mm de forma a simularem vazios cilíndricos.

Na viga protótipo B foram simuladas 4 fissuras e um “ninho de brita” da mesma forma que nas vigas protótipo em betão armado e pré-esforçado como se verá à frente (secção 3.2.4.).

Em qualquer das vigas é conhecida a localização das anomalias como se poderá ver na secção 3.2.4..

Após a preparação dos protótipos, procedeu-se à cofragem e betonagem dos mesmos.

- Vigas de betão armado e pré-esforçado

Os cabos e as bainhas foram imersos numa solução salina, de modo a despassivar o aço e a melhor favorecer o seu processo electroquímico de corrosão [Almeida et al., 2013]. A Figura 3.10 mostra que na execução das vigas tanto os varões de aço como as bainhas já estavam em processo de evidente corrosão.



Figura 3.10 – Corrosão das armaduras e bainha de pré-esforço.
[Almeida et al., 2013]

Foram deixados vazios ao longo das bainhas (Figura 3.11) em locais devidamente identificados (definidos na secção 3.2.4) e executados através da colocação de tubos de plástico que apoiam na bainha transversalmente nos locais pretendidos. Dentro de cada tubo foi inserido um varão de aço que entra dentro da bainha e encosta nas armaduras de pré-esforço. O varão foi retirado após a presa da calda de injeção [Almeida et al., 2013].



Figura 3.11 – Vazio na bainha assinalado a vermelho, onde será colocado um tubo transversal [Almeida et al., 2013].

Para a criação de zonas de vazios ao longo da viga, foi utilizado material excedente da empresa ‘Teixeira Duarte’, nomeadamente painéis de revestimento do tipo “pastilha de azulejo” habitualmente utilizado em piscinas. Por ser flexível, foi moldado de forma a criar bolsas de ar previstas no projecto e envolto numa aguada de cimento para colar e manter a forma pretendida. Conforme recomendação do LNEC, foi evitada a utilização de plásticos [Almeida et al., 2013].

Como se pode observar na Figura 3.12 foi colocada uma lâmina de plástico muito fina de modo a cobrir parte da secção para simular a existência de uma fissura.



Figura 3.12 – Lâmina de plástico assinalada a vermelho que simulou uma fissura. [Almeida et al., 2013]

Os ninhos de brita foram executados utilizando meias de senhora (permeáveis aos finos) cheias de brita e presas às armaduras nos locais assinalados no projecto (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Simulação de um ninho de britas.
[Almeida et al., 2013]

Em qualquer das vigas é conhecida a localização das anomalias como se verá à frente na secção 3.2.4..

Após a preparação e monitorização dos protótipos, procedeu-se à cofragem (Figura 3.14) e betonagem dos mesmos.



Figura 3.14 – Cofragem dos protótipos.
[Almeida et al., 2013]

3.2.4. Localização de anomalias

Todas as anomalias simuladas foram localizadas em posições bem definidas com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados dos ensaios.

- Vigas de betão

Nas vigas de betão, o sistema de coordenadas (xxa,yya,zza) utilizado tem como origem o canto esquerdo mais próximo da viga A (figura 3.15). Por sua vez, o sistema de coordenadas (xxb,yyb,zzb) refere-se à viga B.

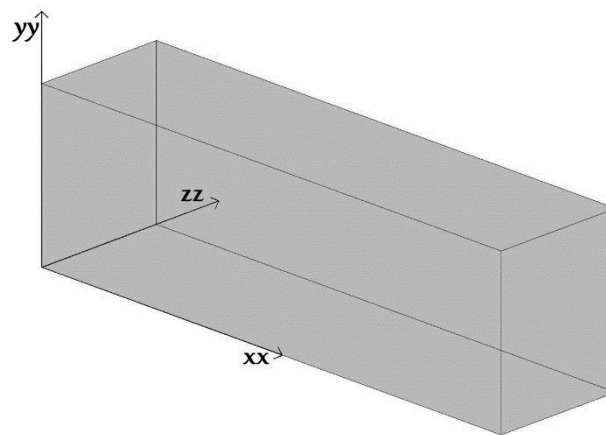


Figura 3.15 – Sistema de coordenadas utilizado nas vigas de betão.

As localizações aproximadas das singularidades criadas no protótipo A podem ser consultadas na Figura 3.16. Esta viga tem três varões de diâmetros 6, 12 e 25 mm (P1.1 a P1.3) e quatro vazios de diâmetros 10, 20, 30 e 40 mm no betão (P1.4 a P1.7), a toda a altura da peça.

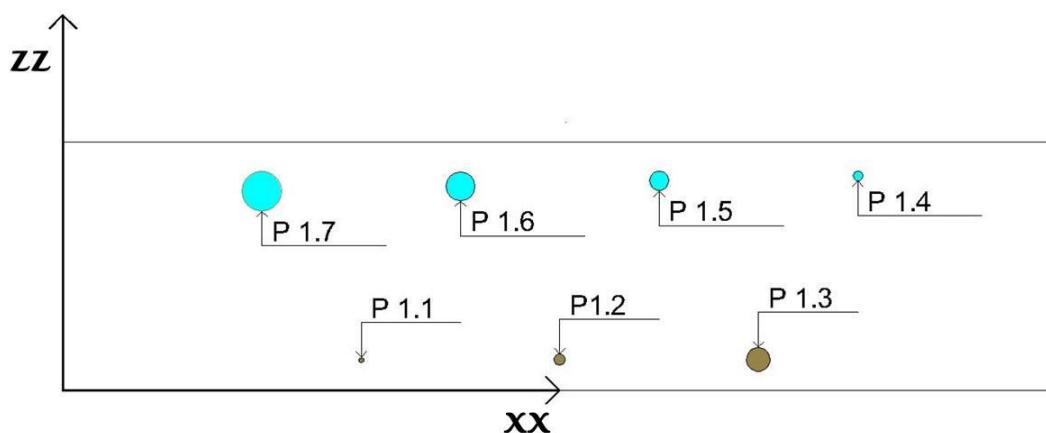


Figura 3.16 – Localização das singularidades do protótipo A

Na Tabela 3.4 estão descritas as características de cada singularidade, incluindo a nomenclatura, a localização e as características geométricas.

Tabela 3.2 - Características das singularidades do protótipo A

Singularidade	Descrição	Localização	Características geométricas	Localização (x _a ,y _a ,z _a) (m)
P1.1	Varão	Toda a altura da viga	Ø = 6 mm	(0.3 , 0 a 0.4 , 0.03)
P1.2	Varão	Toda a altura da viga	Ø = 12 mm	(0.5 , 0 a 0.4 , 0.03)
P1.3	Varão	Toda a altura da viga	Ø = 25 mm	(0.7 , 0 a 0.4 , 0.03)
P1.4	Vazio	Toda a altura da viga	Ø = 10 mm	(0.8 , 0 a 0.4 , 0.22)
P1.5	Vazio	Toda a altura da viga	Ø = 20 mm	(0.6 , 0 a 0.4 , 0.22)
P1.6	Vazio	Toda a altura da viga	Ø = 30 mm	(0.4 , 0 a 0.4 , 0.22)
P1.7	Vazio	Toda a altura da viga	Ø = 40 mm	(0.2 , 0 a 0.4 , 0.22)

Na Figura 3.17 podem ser consultadas as singularidades criadas no protótipo B. Esta viga tem quatro fissuras (P1.1 a P1.4) e um “ninho de brita” (P1.5).

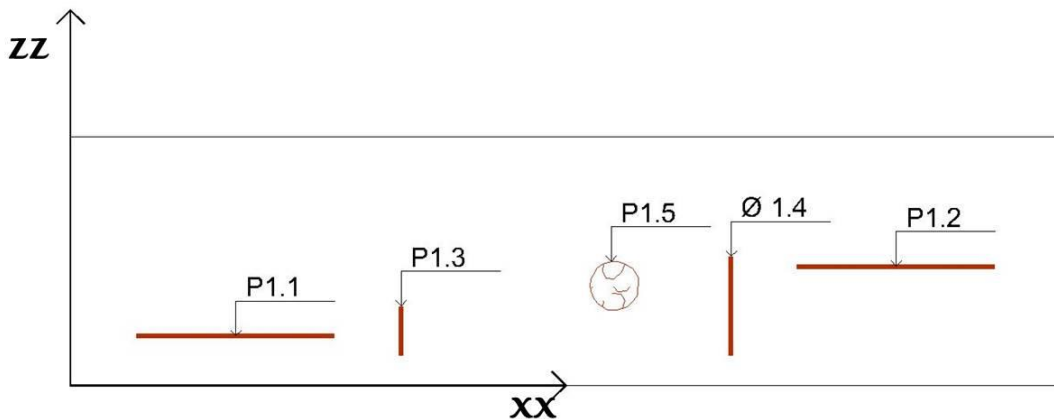


Figura 3.17– Localização das singularidades do protótipo B

Na Tabela 3.4 estão descritas as características de cada singularidade, incluindo a nomenclatura, a localização e as características geométricas.

Tabela 3.3 – Características das singularidades do protótipo B

Singularidade	Descrição	Localização	Características geométricas	Localização (xb,yb,zb) (m)
P1.1	Fissura	Toda a altura da viga	L= 20 cm	(0.05 , 0 a 0.4 , 0.05)
P1.2	Fissura	Toda a altura da viga	L= 20 cm	(0.75 , 0 a 0.4 , 0.12)
P1.3	Fissura	Toda a altura da viga	L= 5 cm	(0.33, 0 a 0.4 , 0.03.)
P1.4	Fissura	Toda a altura da viga	L= 10 cm	(0.33 , 0 a 0.4 , 0.03)
P1.5	“ninho de brita”	Zona inferior da viga	$\varnothing = 5$ cm	(0.5 , 0.20 , 0.125)

- Vigas de betão armado e pré-esforçado

Tal como nas vigas de betão, o sistema de coordenadas (xx1,yy1,zz1) utilizado tem como origem o canto esquerdo mais próximo da viga 1 (Figura 3.18) por sua vez, o sistema de coordenadas (xx2,yy2,zz2) refere-se à viga 2 e foi definido de modo semelhante.

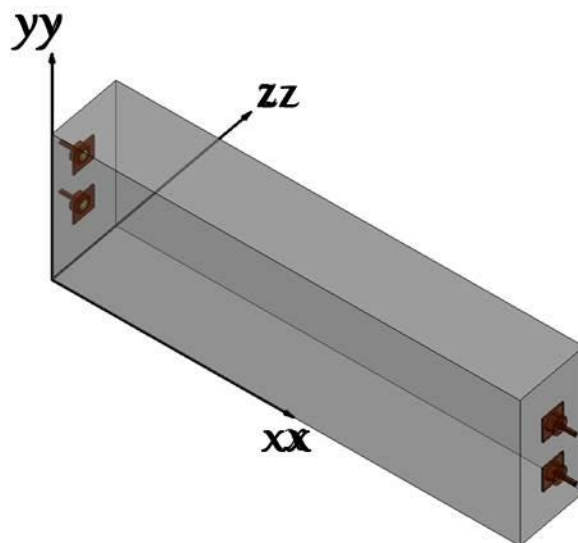


Figura 3.18 – Sistema de eixos utilizado

As localizações aproximadas das singularidades criadas no protótipo 1 podem ser consultadas na Figura 3.19. Esta viga tem três vazios no betão, com dimensões semelhantes; três ninhos de britas, sendo que um deles tem a forma esférica e outros dois paralelepédica; três vazios na bainha de pré-esforço, todos localizados na bainha superior e, por fim, uma fissura na parte inferior da viga.

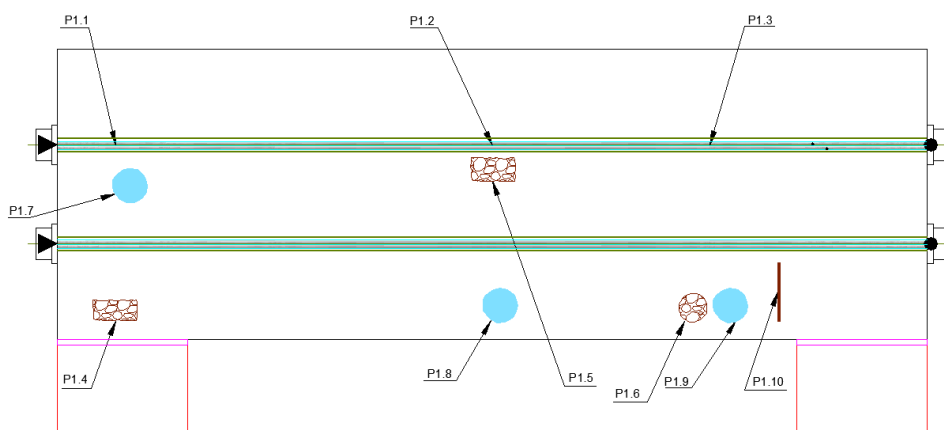


Figura 3.19 – Localizações das anomalias no protótipo 1.

[Almeida et al., 2013]

Na Tabela 3.4 estão descritas as características de cada anomalia, incluindo a nomenclatura, a localização e as características geométricas.

Tabela 3.4 – Características de cada anomalia do protótipo 1

Anomalia	Descrição	Localização	Características Geométricas	Outras Características	Localização (x1,y1,z1) (m)
P1.1	Vazio	Bainha - zona superior	10 mm x 16 mm x 70 mm	-	(0.2 , 0.67 , 0.25)
P1.2	Vazio	Bainha - zona lateral	10 mm x 16 mm x 50 mm	-	(1.5 , 0.67 , 0.25)
P1.3	Vazio	Bainha - zona inferior	10 mm x 16 mm x 30 mm	-	(2.25 , 0.67 , 0.25)
P1.4	Ninho de brita	Zona inferior do protótipo	15 mm x 7 mm x 7 mm	-	(0.2 , 0.14 , 0.38)
P1.5	Ninho de brita	Zona central do protótipo	15 mm x 8 mm x 8 mm	-	(1.5 , 0.63 , 0.29)
P1.6	Ninho de brita	Zona inferior do protótipo	Ø = 10 cm	-	(2.25 , 0.16 , 0.18)
P1.7	Vazio	Zona central do protótipo	Ø = 12 cm	-	(0.2 , 0.59 , 0.25)
P1.8	Vazio	Zona inferior do protótipo	Ø = 12 cm	-	(1.5 , 0.63 , 0.31)
P1.9	Vazio	Zona inferior do protótipo	Ø = 12 cm	-	(2.25 , 0.18 , 0.34)
P1.10	Descontinuidade para "efeito fissura"	Zona inferior do protótipo	20 x 50 cm	Lâmina posicionada transversalmente na vertical	(2.29 , 0.26 , 0 a 0.5)

Na Figura 3.20 podem ser consultadas as singularidades criadas no protótipo 2. Esta viga tem três vazios no betão de dimensões semelhantes; três ninhos de britas, sendo que um deles tem a forma paralelepípedica e outros dois esférica; seis vazios na bainha de pré-

esforço, três localizados na bainha superior e três na inferior e, por fim; uma fissura na parte inferior da viga.

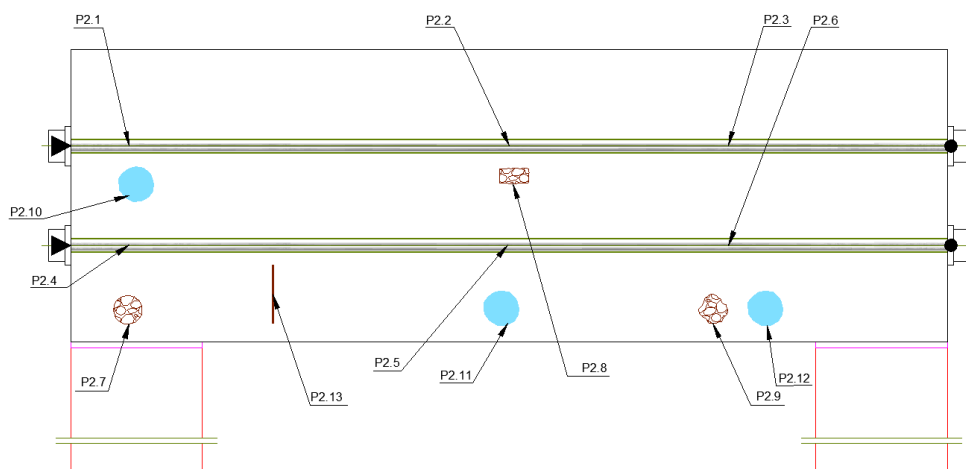


Figura 3.20 – Localizações das anomalias no protótipo 2.
[Almeida et al., 2013]

Na Tabela 3.5 encontram-se as características gerais das singularidades do protótipo 2.

Tabela 3.5 – Características de cada anomalia do protótipo 2

Anomalia	Descrição	Localização	Características Geométricas	Outras Características	Localização (x2,y2,z2) (m)
P2.1	Vazio	Bainha - zona superior	10 mm x 16 mm x 70 mm	Igual a P1.1	(0.2 , 0.67 , 0.25)
P2.2	Vazio	Bainha - zona lateral	10 mm x 16 mm x 50 mm	Igual a P1.2	(1.5 , 0.67 , 0.25)
P2.3	Vazio	Bainha - zona inferior	10 mm x 16 mm x 30 mm	Igual a P1.3	(2.25 , 0.67 , 0.25)
P2.4	Vazio	Bainha - zona lateral	10 mm x 16 mm x 30 mm	Disposição diferente de P2.1, P2.2 e P2.3	(0.2 , 0.32 , 0.25)
P2.5	Vazio	Bainha - zona inferior	10 mm x 16 mm x 70 mm	-	(1.5 , 0.32 , 0.25)
P2.6	Vazio	Bainha - zona superior	10 mm x 16 mm x 50 mm	-	(2.25 , 0.32 , 0.25)
P2.7	Ninho de brita	Zona inferior do protótipo	Ø = 10 cm	-	(0.2 , 0.14 , 0.29)
P2.8	Ninho de brita	Zona central do protótipo	10 mm x 5 mm x 5 mm	-	(1.5 , 0.59 , 0.35)
P2.9	Ninho de brita	Zona inferior do protótipo	Ø = 10 cm	-	(2.25 , 0.16 , 0.39)
P2.10	Vazio	Zona central do protótipo	Ø = 12 cm	-	(0.2 , 0.48 , 0.32)
P2.11	Vazio	Zona inferior do protótipo	Ø = 12 cm	-	(1.5 , 0.18 , 0.35)
P2.12	Vazio	Zona inferior do protótipo	Ø = 12 cm	-	(1.5 , 0.18 , 0.29)
P2.13	Descontinuidade para "efeito fissura"	Zona inferior do protótipo	20 x 50 cm	Lâmina posicionada transversalmente na vertical	(0.69 , 0.16 , 0 a 0.5)

Na Figura 3.21 é possível verificar a localização relativa das singularidades nas vigas em estudo, através da sua representação na face exterior da viga em três dimensões.

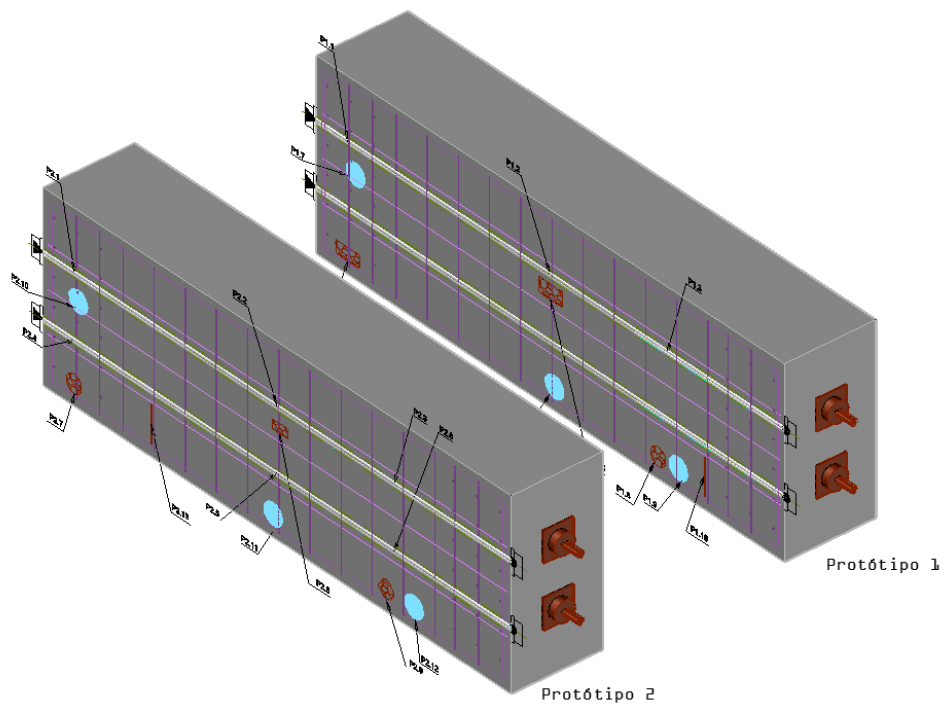


Figura 3.21 – Representação espacial das singularidades nos protótipos 1 e 2.

[Almeida et al., 2013]

3.3. Descrição do equipamento

O equipamento utilizado para obter imagens do interior do betão foi o tomógrafo por ultra-sons MIRA, que foi desenvolvido pela Germann Instruments e assenta num sistema de detecção de contrastes e densidades, através de ultra-sons.

O tomógrafo por ultra-sons MIRA é composto por (Figuras 3.22 e 3.23) [Manual MIRA, 2010]:

- i. Antena com uma matriz de 10x4 transdutores de onda de corte a baixa frequência
- ii. Bateria autónoma e bolsa para transporte
- iii. Carregador da bateria e cabo de alimentação
- iv. Caixa de transporte
- v. Computador portátil e saco de transporte
- vi. Transformador para alimentação do computador e cabo de alimentação



Figura 3.22 – Antena com a matriz de 10x4 transdutores de onda de corte a baixa frequência, bateria autônoma e bolsa para transporte, carregador da bateria e cabo de alimentação, caixa de transporte

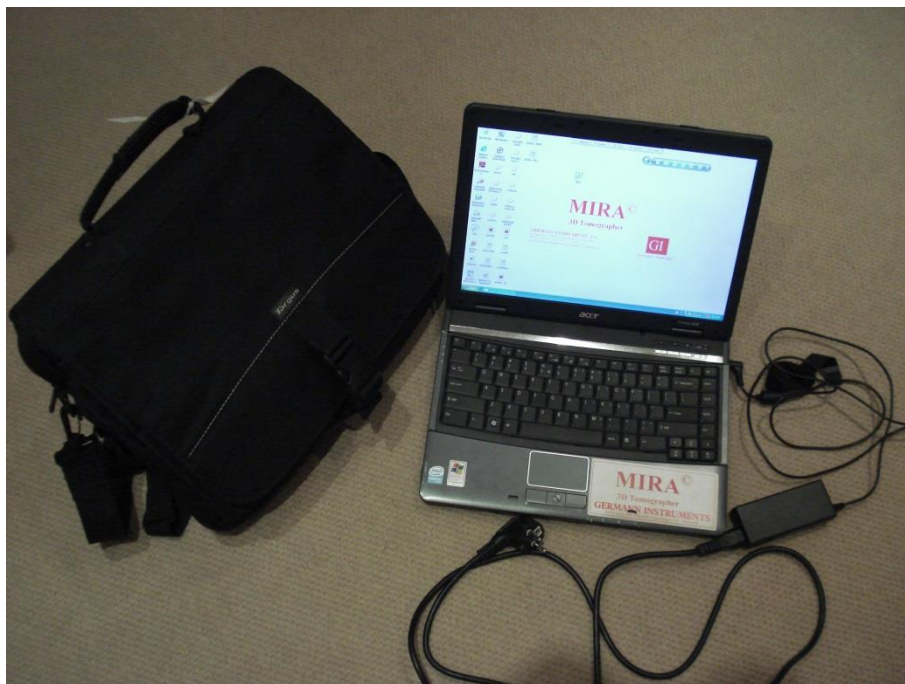


Figura 3.23 - Computador portátil e saco de transporte, transformador para alimentação do computador e cabo de alimentação

As Figuras 3.24 e 3.25 ilustram as ligações existentes entre os vários componentes do tomógrafo.

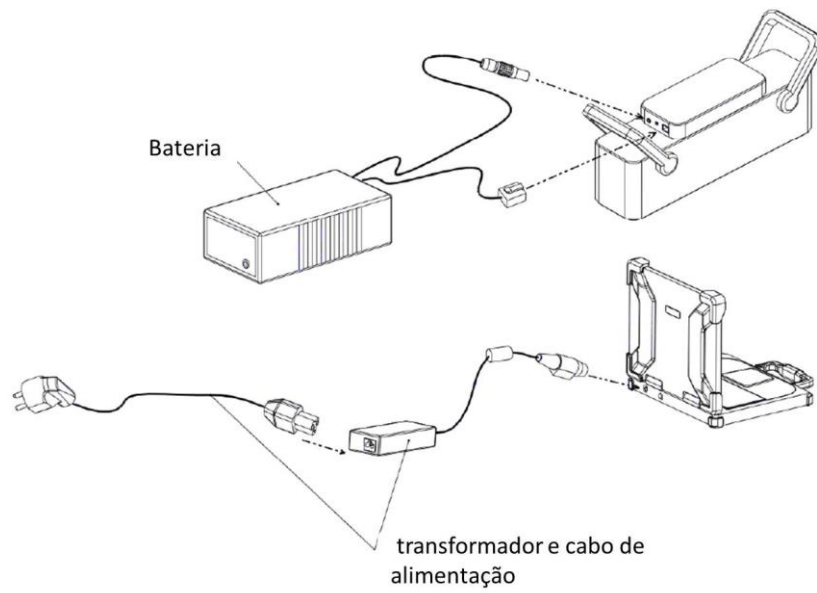


Figura 3.24 – Ligações existentes entre os diversos componentes do tomógrafo
[Manual MIRA, 2010]

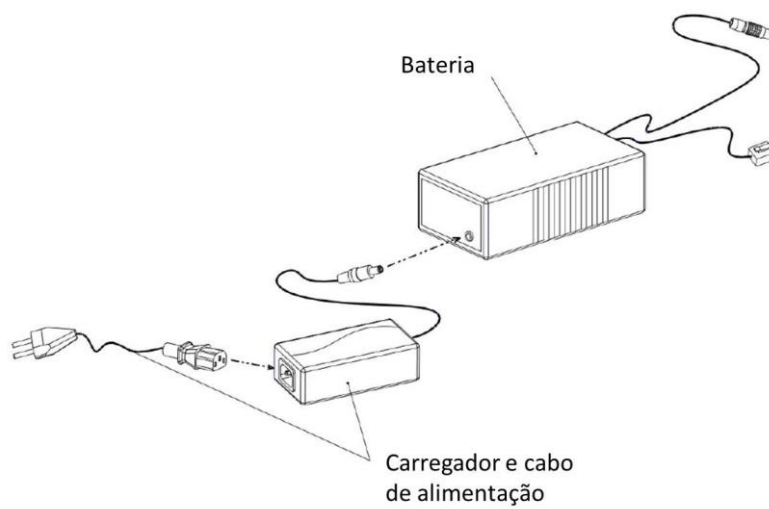


Figura 3.25 – Ligação entre o carregador e a bateria
[Manual MIRA, 2010]

As partes principais do tomógrafo são a antena e um computador portátil (Figura 3.26).



Figura 3.26 – Antena e computador portátil com o programa de controlo e análise instalado
[Catalog NDT, 2010]

A antena tem 40 transdutores de onda de corte de baixa frequência, dispostos numa matriz de 10 x 4 (10 linhas, 4 colunas). Os transdutores são sensores piezo-eléctricos de contacto pontual seco, com uma frequência central de 50 kHz. Estes transdutores possuem uma ponta de cerâmica resistente ao desgaste e uma mola independente para cada um, o que permite realizar o ensaio com total contacto dos transdutores com a superfície de betão, mesmo quando a superfície não é perfeitamente plana ou é muito rugosa. No funcionamento, os transdutores actuam como transmissores e receptores num modo sequencial. Em resumo a unidade de controlo dentro da antena excita uma linha de transdutores de cada vez, fazendo com que estes funcionem como emissores, enquanto as outras linhas de transdutores actuam como receptores. A Figura 3.27 do lado esquerdo mostra a primeira linha de transdutores actuando como transmissores e as restantes linhas de transdutores actuando como receptores. A figura do lado direito, mostra a linha seguinte de transdutores actuando como transmissores e as restantes linhas para o lado direito como receptores. Este processo é repetido até que os transdutores das primeiras nove linhas tenham actuado como transmissores [Catalog NDT, 2010].

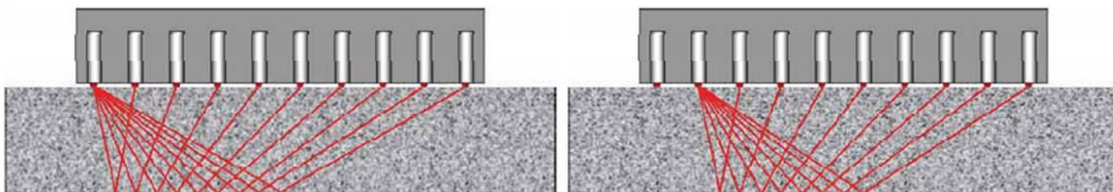


Figura 3.27 – Demonstração das duas primeiras linhas de transdutores actuando como emissores de ultra-sons
[Catalog NDT, 2010]

A Figura 3.28 mostra os 45 raios que estão envolvidos em cada uma das 4 colunas de transdutores.

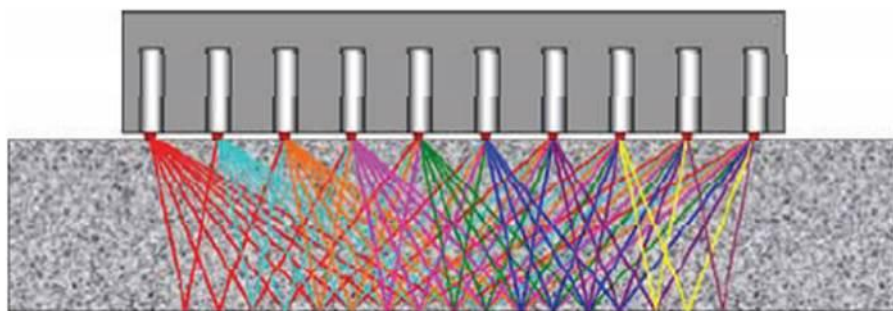


Figura 3.28 – Demonstração dos 45 raios envolvidos em cada coluna de transdutores
[Catalog NDT, 2010]

A aquisição completa de dados num local da antena, o seu processamento e a sua transferência demora menos de 3 segundos.

O computador portátil tem um programa dedicado que permite, através da ligação wireless com a antena, receber os sinais obtidos por esta, processá-los e arquivá-los como dados [Catalog NDT, 2010].

Com recurso à técnica de abertura focal sintética são construídas uma vista de frente, um corte transversal, um corte longitudinal e um modelo 3-D, como se pode ver na figura 3.36, permitindo a observação do lado oposto do objecto em teste (reflexão do fim do objecto teste), da localização da armadura existente e, mais importante, da localização de defeitos internos como vazios, fissuras ou formação de “ninhos de brita”.

A utilização do tomógrafo é facilitada pela existência do botão “Iniciar” no punho do aparelho, como se pode ver na Figura 3.29. Este botão inicia um processo de envio e recepção de sinais sem necessidade de qualquer acção no computador. Assim, o programa permite acumular o varrimento completo do objecto em teste, feito passo a passo pressionando o botão “Iniciar” (Figura 3.29) em todas as posições [Manual MIRA, 2010].



Figura 3.29 – Localização do botão Iniciar

Durante a utilização do tomógrafo, os três LEDs coloridos (verde, amarelo e vermelho), localizados no meio da tampa superior da antena, como se pode ver na Figura 3.30, dão a indicação do estado da antena [Manual MIRA, 2010].

LED verde significa que a antena está pronta para utilização. Deve acender-se um minuto depois de se ligar a antena e deve manter-se ligado todo o tempo da utilização. Caso a luz verde se apague por mais de 5 segundos, o funcionamento da antena estará instável, sendo necessário desligar a antena da bateria e verificar todas as ligações.

LED amarelo significa que não há corrente na entrada da antena. Se, durante a utilização, a luz amarela se apaga, o funcionamento da antena estará instável devido a falta de corrente. Deve-se desligar a antena da bateria e verificar o cabo de alimentação, a tensão na rede e a carga da bateria.

LED vermelho significa o envio e recepção de ondas de ultra-sons para o elemento estrutural em estudo. Durante o envio/recepção de sinais de ultra-sons a luz vermelha na antena pisca. Para os resultados obtidos serem fiáveis a antena não deve ser movida enquanto a luz vermelha está a piscar.



Figura 3.30 – Localização dos LEDs coloridos

O programa referido pode funcionar em diferentes modos de utilização, nomeadamente:

- Calibration - Este modo é utilizado no início do teste para determinar a velocidade de propagação de onda no betão. Recomenda-se que o teste seja realizado em oito ou mais posições para obter uma boa estimativa da velocidade média das ondas. A velocidade de onda determinada é representativa do betão perto da superfície. Selecionando este modo aparece um menu como o ilustrado na Figura 3.31.

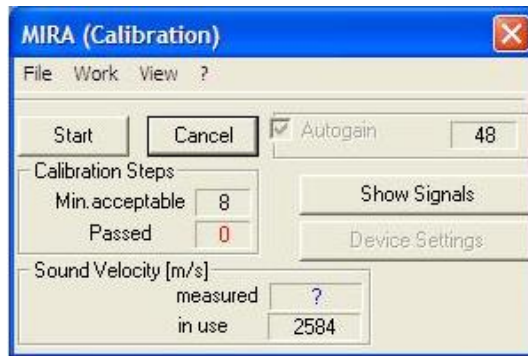


Figura 3.31 – Menu - Calibration

- Explore - Este modo é destinado a testes preliminares com varrimento simples (um único posicionamento da matriz de transdutores) em locais arbitrários na superfície do objeto de teste. Idealmente, os testes preliminares devem ser feitos em locais onde as condições internas são conhecidas. Este modo é usado para verificar as configurações do aparelho antes de iniciar o levantamento do objecto em estudo através de um “scan” .

- Scan - Este modo permite obter os dados que serão utilizados para reconstituir virtualmente e avaliar o objeto em teste. Neste modo a matriz de transdutores é colocada em posições sucessivas, deslocando-se na direcção da menor dimensão da antena. Os dados são armazenados automaticamente após a conclusão das medições.

Selecionando qualquer dos modos anteriores (Explore ou Scan) e antes de começar a operar há que se colocar nos “settings” do “Control Panel” (Figura 3.32) e no separador “view” (Figura 3.33), escolher a paleta de cores com que se verá a imagem (que pode ser alterada posteriormente). No separador “scan” (Figura 3.34) especifica-se a espessura do betão a analisar e o passo com que se movimentará a antena.

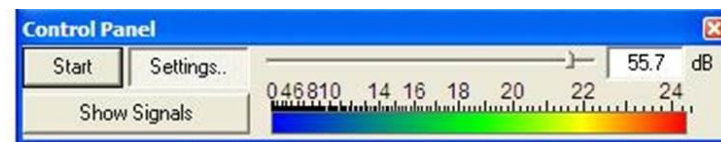


Figura 3.32 – Menu – Control Panel

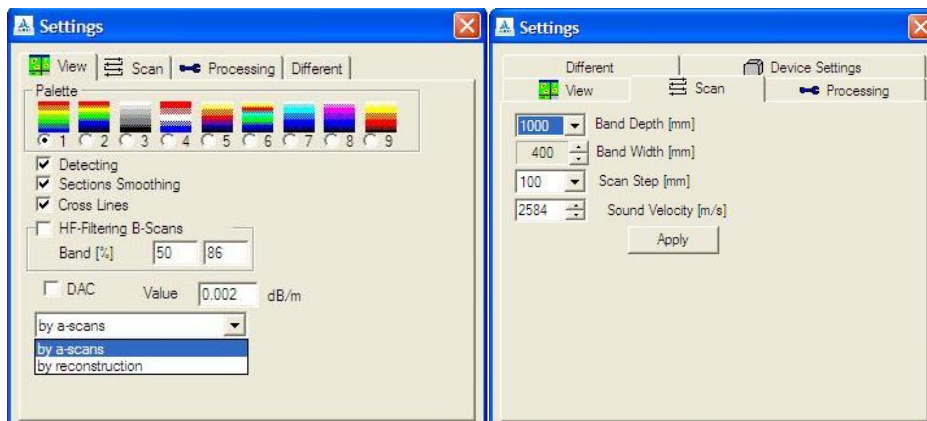


Figura 3.33 – Menu – Settings – separador View

Figura 3.34 – Menu – Settings – separador Scan

- Review - Este modo permite o estudo detalhado dos dados processados adquiridos durante o varrimento feito em explore ou em scan.

A apresentação das imagens no computador é feita com um sistema de eixos relativos à antena [Manual MIRA, 2010]:

Eixo x - perpendicular ao eixo longitudinal da antena em que a direcção positiva é na direcção da luz verde para a luz vermelha da antena e o zero é no meio da matriz de transdutores (entre a 2ª coluna e a 3ª coluna).

Eixo y – eixo longitudinal da antena em que a direcção positiva é da pega simples da antena para a pega com o botão iniciar da antena e o zero é na linha média da antena, a meio da matriz de transdutores, entre a 5ª linha e a 6ª linha.

Eixo z – eixo perpendicular à superfície onde se encosta a antena, com direcção positiva da superfície para o interior do objecto, e zero é na superfície.

Como se pode ver na Figura 3.35, as imagens fornecidas pelo programa (B-scan, C-scan e D-scan) correspondem a secções orientadas da seguinte forma:

B-scan - secção segundo um plano paralelo a YoZ.

C-scan - secção segundo um plano paralelo a XoY

D-scan - secção segundo um plano paralelo a XoZ

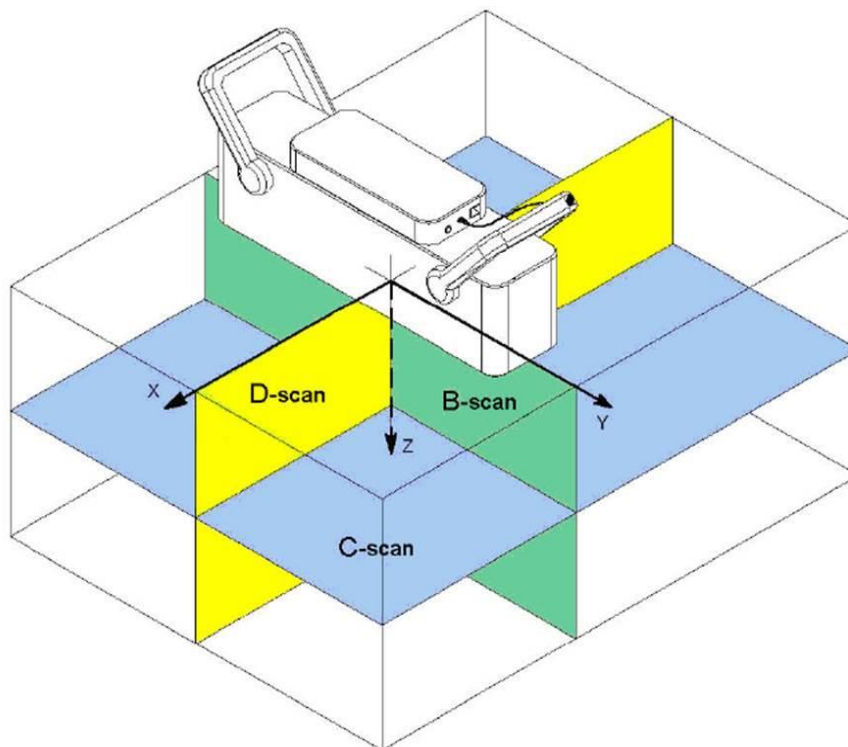


Figura 3.35 – Planos e eixos relativos à antena
[Manual MIRA, 2010]

Na Figura 3.36 mostra-se o aspecto com que estas imagens são apresentadas pelo programa.

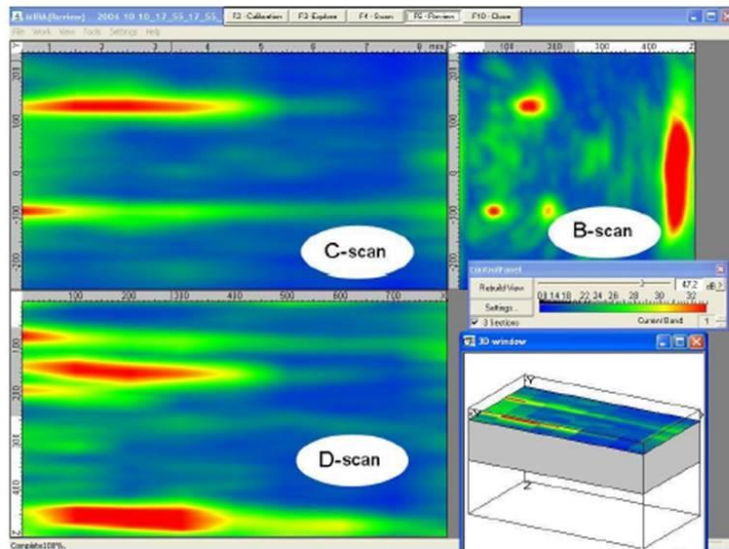


Figura 3.36 – Apresentação das imagens efectuadas pelo programa
[Manual MIRA, 2010]

Os parâmetros de funcionamento do equipamento são os apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros de funcionamento do equipamento
[Manual MIRA, 2010]

CARACTERÍSTICAS	Valores
Profundidade máxima da peça a analisar (mm)	2500
Tempo de recepção e processamento de resultados para uma posição da antena (seg.)	< 3
Tempo para começar a operar depois de ligar (min.)	< 2
Frequência das ondas de ultra-som (kHz)	50
Banda de frequências da operação (kHz)	20 ~ 100
Peso de todo o equipamento (Kg)	< 15
Tempo máximo de utilização da bateria de forma contínua (h)	8
Dimensões da antena (mm)	435x235x146
Peso da antena (Kg)	4.5
Consumo máximo de energia da antena (W)	15
Consumo médio de energia da antena (W)	10
Banda de temperaturas para utilizar o equipamento (°C)	0 ~ 45
Temperaturas de armazenamento e transporte (°C)	-20 ~ 50

3.4. Nomenclatura

Para a identificação de cada um dos ensaios realizados e gravados, foi adoptado um sistema de identificação.

O sistema identifica a viga, a face da viga em que o ensaio foi realizado, a posição da antena, o passo de varrimento e a distância a que a face da antena paralela ao eixo X da antena está do eixo da peça a analisar que está perpendicular ao eixo Y da antena. As faces foram numeradas da mesma forma em todas as vigas como mostra a Figura 3.38.

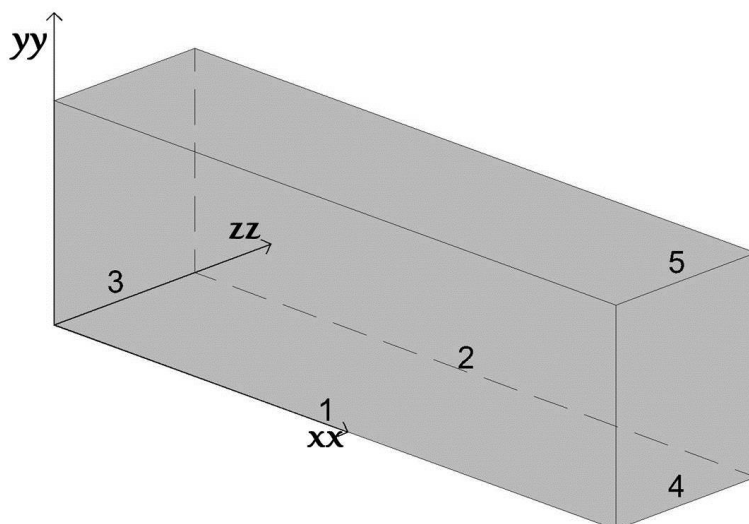


Figura 3.37– numeração das faces dos protótipos

A Tabela 3.7 apresenta a nomenclatura utilizada.

Tabela 3.7 – Nomenclatura utilizada.

Viga	Designação
Viga protótipo A	VA
Viga protótipo B	VB
Viga protótipo 1	V1
Viga protótipo 2	V2

Faces da viga	Designação
Face nº 1	F1
Face nº 2	F2
Face nº 3	F3
Face nº 4	F4
Face nº 5	F5

Posição da antena	Designação
Horizontal	H
Vertical	V

Passo do varrimento	Designação
Passo	em cm

Distância ao eixo perpendicular	Designação
Ao eixo XX	Xcm
Ao eixo YY	Ycm
Ao eixo ZZ	Zcm

Exemplificando, um ensaio realizado na viga protótipo A, na face 1 com a antena na horizontal com um passo de 10 cm e afastada do eixo Y 30 cm tem a designação VAF1H10Y30.

3.5. Descrição e procedimentos dos ensaios

As vigas protótipo foram ensaiadas com a técnica de ultra-sons já referida, recorrendo ao equipamento descrito anteriormente. Realizaram-se varrimentos sobre os elementos atrás descritos para identificar as anomalias conhecidas e localizadas (ninhos de britas, vazios no betão e nas bainhas de pré-esforço e fissuras). Naturalmente que, num caso real, a posição e tipo das anomalias não são dados conhecidos à partida.

O procedimento geral, comum a todos os ensaios, envolve os seguintes passos:

- Inspeção visual do estado dos elementos estruturais em estudo de forma a confirmar a planeza da superfície e a sua rugosidade. Superfícies lisas e planas conferem um contacto acústico mais efectivo com os transdutores, obtendo-se assim imagens de melhor qualidade. A antena pode operar sobre imperfeições até 8 mm, sendo, no entanto, recomendável o polimento de superfícies rugosas para maior precisão dos resultados obtidos.
- Preparação da superfície do elemento estrutural a inspeccionar; as superfícies que entram em contacto com a antena deverão estar isentas de quaisquer poeiras ou areias. Adicionalmente, todos os materiais com características físicas diferentes do betão, e passíveis de impedir a penetração dos ultra-sons de baixa frequência, deverão ser

previamente removidos (p.e. tintas e selantes). No presente estudo não foi necessário remover qualquer material com características físicas diferentes do betão.

- Marcação do elemento em estudo com um mapa da área de varrimento. O mapa da área de varrimento consiste na prévia definição das zonas onde será posicionada a antena e o passo correspondente (Figura 3.38). Este procedimento permite maior rigor e rapidez no varrimento e simplifica a interpretação dos resultados obtidos. A superfície do elemento estrutural em estudo deverá ser dividida, escolhendo-se a direcção em que o varrimento deverá ser executado (Figura 3.38).

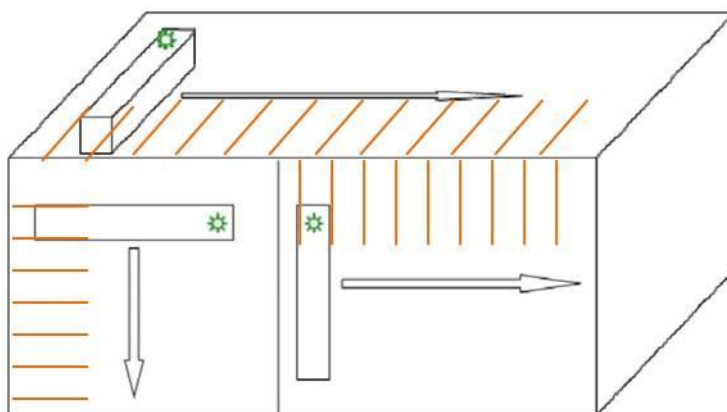


Figura 3.38 – Exemplo de um mapa da área de varrimento

- Preparação do tomógrafo para operar. Antes de ligar o tomógrafo é necessário confirmar que o programa está instalado no computador e que todas as unidades estão correctamente ligadas, conforme descrito na secção 3.3. As baterias do tomógrafo e do computador deverão estar completamente carregadas, garantindo assim a energia necessária durante toda a operação.

- Ligação do tomógrafo e do computador. Espera de 1 a 2 minutos para a ligação *wireless* entre a antena e o computador estar activa. Verificar se as luzes da antena acesas são a amarela e a verde. Não é possível iniciar os ensaios até que a luz verde tenha acendido.

- Realização da calibração. Entra-se no modo Calibration, coloca-se a antena encostada à face que se vai analisar e carrega-se no botão “Iniciar” existente no punho da antena. Repete-se este procedimento, pelo menos, 7 vezes podendo colocar a antena em diferentes locais da face. Automaticamente é medida a velocidade de propagação dos ultra-sons no betão a analisar (Figura 3.39).



Figura 3.39 – Forma de calibração

- Seleção do modo Explore. Selecionar no “Control Panel” os “settings”, colocar-se no separador “scan” e especificar a espessura do betão a analisar e o passo com que se vai efectuar os varrimentos.
- Realizar o ensaio no modo Explore em 1 ou 2 posições distintas de forma a confirmar a configuração do aparelho (Figura 3.40).



Figura 3.40 – Ensaio no modo Explore

- Efectuar o 1º varrimento. Selecionar o modo Scan, colocar a antena na primeira posição e pressionar o botão Iniciar. Quando a luz vermelha apagar colocar a antena na segunda posição e pressionar o botão Iniciar. Repetir o procedimento o número de vezes necessário para percorrer toda a banda definida. Em cada mudança de local da antena, ter atenção em verificar que todos os transdutores estão bem encostados à face (Figura 3.41).



Figura 3.41 – Ensaio no modo Scan

- Seleccionar o modo Review onde estão gravados os dados processados e adquiridos durante o varrimento realizado. É possível gravar estes dados noutra directoria e com outro nome do ficheiro. A gravação das imagens obtidas em JPEG também se efectua neste modo (Figura 3.42).

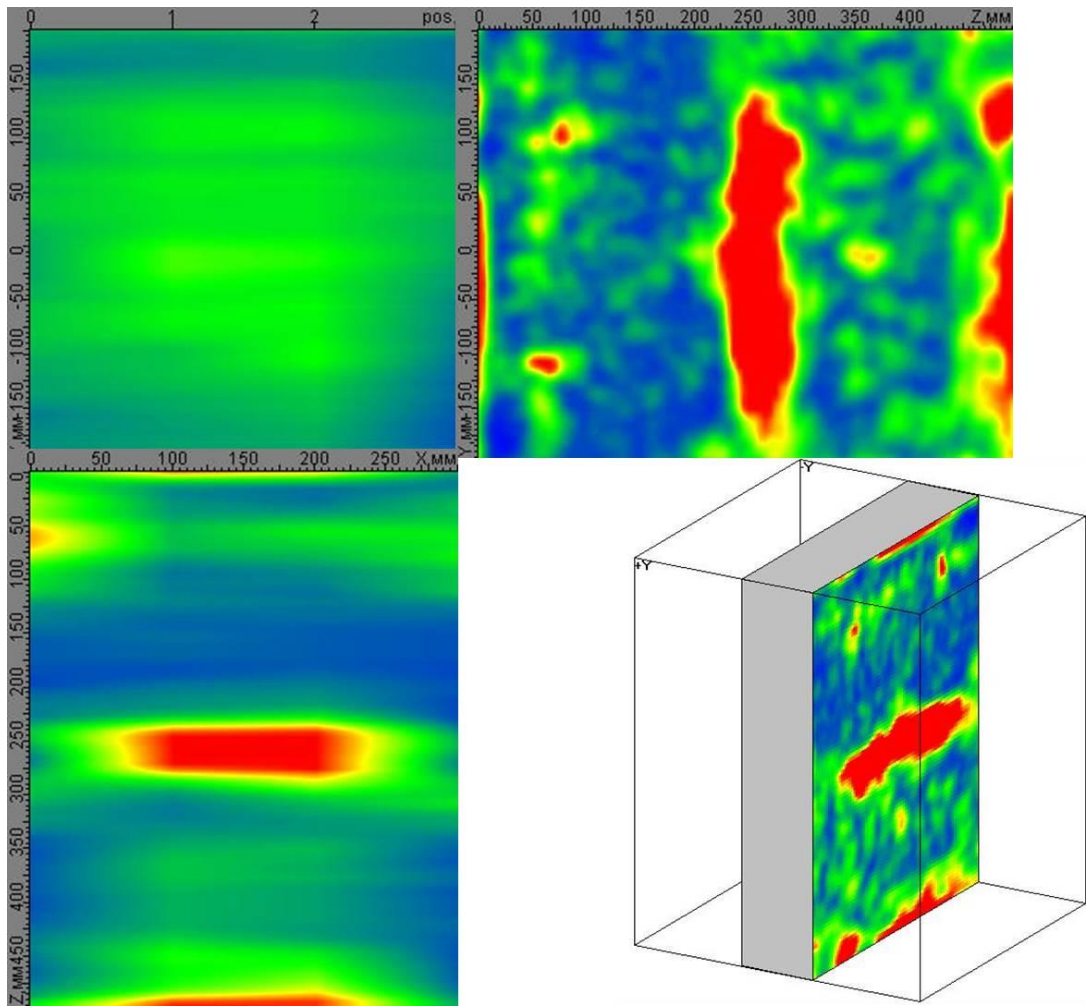


Figura 3.42 – Imagens que se vêem no modo Review

- Analisar as imagens obtidas. O programa permite a visualização da mesma imagem com mais ou menos intensidade (ajustada em decibéis) o que facilita a sua interpretação. A gravação das imagens obtidas pode ser feita em JPEG, o que possibilita o seu processamento.

- Caso as imagens obtidas não estejam muito nítidas ou estejam pouco perceptíveis é possível entrar nos “settings” do “Control Panel” (Figura 3.32) e pressionar as teclas “ALT” e “e” fazendo aparecer um novo separador nos “settings”, “device settings”. Entrando nesse separador, é possível alterar a frequência com que o ensaio foi realizado e o “gain” que muda a intensidade das imagens que se obtêm. Todos os outros parâmetros não devem ser alterados. O valor do “gain” não deve ser alto pois as reflexões com alta intensidade aparecerão todas a vermelho tornando difícil ver as diferenças.

- Efectuar novamente o 1º varrimento e analisar as imagens obtidas.

- Repetir o procedimento para cada novo varrimento. No mesmo elemento é possível manter a calibração, desde que se tenha variado os locais de posicionamento da antena para

obter a velocidade de propagação. No caso do varrimento ter outro passo, esse parâmetro deve ser alterado no separador “scan” dos “settings” do “Control Panel”.

Na Tabela 3.8 lista-se uma série de problemas comuns que podem ocorrer aquando da operação do aparelho e as formas de os solucionar.

Tabela 3.8 – Problemas comuns na utilização do tomógrafo e suas causas e soluções

[Manual MIRA, 2010]

Problema	Razões	Solução
A antena não liga, o LED amarelo não acende. O computador indica alimentação a partir da bateria recarregável ou não se liga quando está sem carga.	Ligação incorrecta ou incompleta dos cabos ou das baterias. Tensão de alimentação insuficiente da bateria seleccionada.	Verificar se as baterias são as adequadas. Verificar a tensão de alimentação, a alimentação ou a carga da bateria do sistema de operação autónomo. Utilizar outra unidade de alimentação
O computador não reconhece a antena. Os LEDs não acendem.	O cabo Ethernet está danificado ou não ligado.	Verificar a ligação do cabo Ethernet. Desligar o cabo de Ethernet de ambas as unidades e voltar a ligá-lo.
O computador não reconhece a antena. Os LEDs estão acessos e a piscar.	As definições do Windows foram alteradas ou estão instalados programas que impedem a operação da rede (Firewall, Brandmauer).	Contactar o administrador do sistema para repor as definições.

Se as acções acima descritas não permitirem restaurar a operacionalidade do Tomógrafo será necessário contactar o fabricante.

3.6. Considerações finais

O tomógrafo pode utilizar-se entre os 0 e os 45 °C, o que, no nosso país, permite a sua utilização praticamente em qualquer altura e em qualquer local. O equipamento não é pesado e é de fácil utilização, podendo-se efectuar vários varrimentos seguidos.

Durante a aplicação do modo Scan, é importante ter o passo marcado na estrutura a inspeccionar de forma a que seja fácil e rápido aplicar a antena nos locais correctos para efectuar o varrimento pretendido.

Na realização dos ensaios foram cobertos todos os tipos de anomalias existentes, nomeadamente vazios no betão, vazios nas bainhas de pré-esforço, ninhos de britas e fissuras. Pretendeu-se deste modo, avaliar quais são as anomalias mais facilmente identificáveis utilizando este método não destrutivo.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Considerações iniciais

No presente capítulo apresenta-se e discute-se os resultados da campanha experimental. A análise dos resultados consistiu essencialmente na interpretação das imagens obtidas através da técnica da tomografia ultra-sónica.

Os primeiros ensaios foram realizados nas vigas de betão (protótipo A e protótipo B) por serem vigas mais simples, concebidas exactamente para testar a capacidade do Tomógrafo MIRA. Estas vigas não estão armadas e apresentam um número reduzido de anomalias, suficientemente distantes entre si para não serem facilmente confundidas. Foram realizados varrimentos na horizontal e na vertical das várias faces de cada viga.

Os ensaios sobre estas vigas foram realizados no interior do Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais (LERM) do pavilhão de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico (Figura 4.1), mantendo-se assim sensivelmente constantes as condições ambientais existentes em todos os varrimentos.



Figura 4.1 - Protótipos A e B no Laboratório de estruturas

A análise destes resultados tem em conta a planeza, a rugosidade e a dimensão de cada face onde foi feito o varrimento, esperando-se imagens resultantes dos mesmos locais com mais ou menos nitidez dependendo destas mesmas características.

Os ensaios às vigas de betão armado e pré-esforçado (protótipo 1 e protótipo 2) foram realizados no Pólo Operacional da empresa Teixeira Duarte no Montijo, ao ar livre.

Nestas vigas não foram analisadas todas as faces. Em particular, não foi possível realizar varrimentos de ultra-sons nos seguintes locais:

- Faces 3 e Faces 4, devido às cabeças de ancoragem dos cabos de pré-esforço, que não permitem fazer um varrimento em toda a face (Figuras 4.2)
- Faces 5, devido à instrumentação existente para análise das vigas (Figura 4.3)
- Face 2 do protótipo 2, devido aos furos realizados para enchimento da bainha do cabo de pré-esforço (Figura 4.4)



Figura 4.2 – Face 3 dos protótipos 1 e 2



Figura 4.3 – Face 5 dos protótipos 1 e 2



Figura 4.4 – Face 2 do protótipo 2

Também na análise destes resultados teve-se em conta a planeza, a rugosidade e a dimensão de cada face onde foi feito o varrimento, esperando-se imagens resultantes dos mesmos locais com mais ou menos nitidez dependendo das características acima citadas.

Os varrimentos realizados nas vigas decorreram em espaços temporais distintos e, dependendo dos resultados que se iam obtendo, cada um ia sendo repetido e ajustado de acordo com os que lhe precederam. O facto de esta técnica estar ainda pouco desenvolvida também conferiu um certo grau de incerteza em relação às imagens obtidas.

O programa referido na secção 3.3. permite a visualização da mesma imagem com mais ou menos intensidade (ajustada em decibéis) o que facilita a sua interpretação. A gravação das imagens obtidas pode ser feita em JPEG, o que o possibilita o seu processamento.

4.2. Tomografia por ultra-sons no protótipo A

Inspecionaram-se as faces da viga A para se ver a planeza e rugosidade das faces. Como se pode ver pela Figura 4.5, as faces são bastante planas. As faces 1, 3 e 4 são pouco rugosas em comparação com a face 2 que apresenta maior rugosidade (face livre no processo de betonagem).



Figura 4.5 – Várias faces do protótipo A

De notar que algumas arestas e alguns vértices da viga A estavam delaminados ou descascados em vários locais (Figura 4.6)



Figura 4.6 – Descascamentos e delaminações no protótipo A

As Figuras 4.7 a 4.10 representam as localizações dos ensaios que se apresentam.

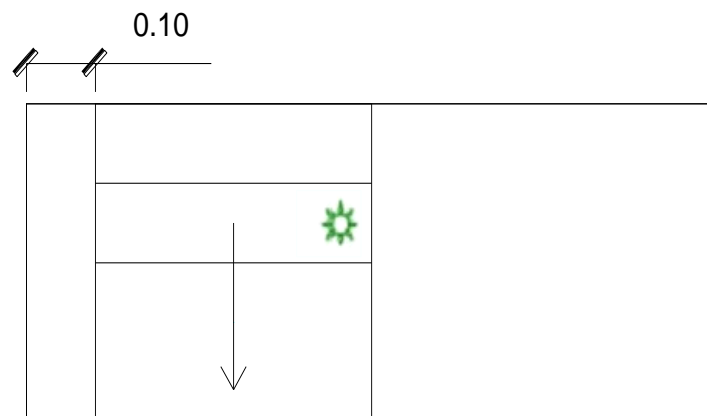


Figura 4.7 – localização do ensaio VAF1H5Y10 (dimensões em metro)

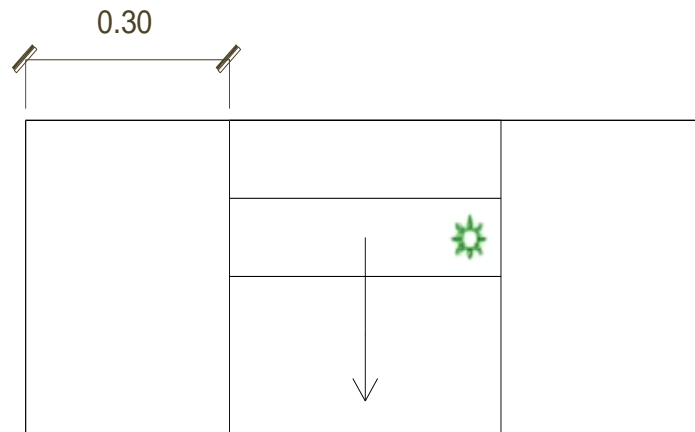


Figura 4.8 – localização do ensaio VAF1H5Y30 (dimensões em metro)

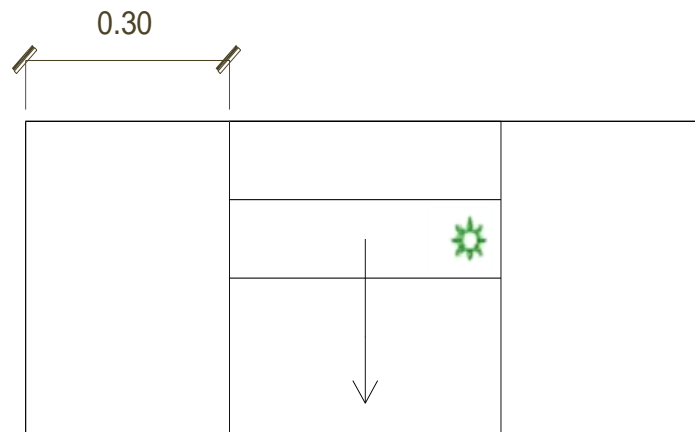


Figura 4.9 – localização do ensaio VAF2H10Y30 (dimensões em metro)

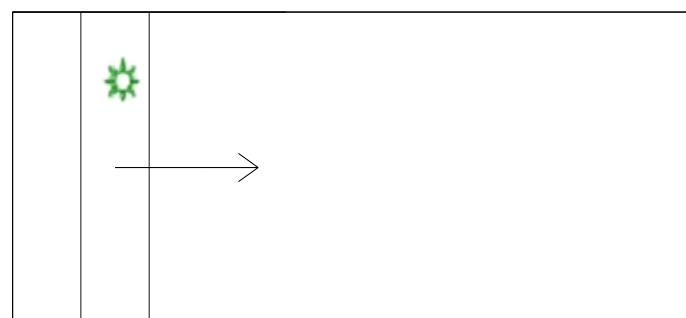


Figura 4.10 – localização do ensaio VAF1V5X0

As imagens obtidas pelo tomógrafo são apresentadas segundo eixos relativos à antena, o que dificulta a sua interpretação. A fim de facilitar a interpretação e compreensão das imagens, colocou-se uma ilustração que representa cada corte segundo os eixos relativos à

antena. A cor castanha representa os varões e a cor azul os vazios. A linha a tracejado cor-de-rosa foi colocada na imagem para indicar o fim da viga.

Nas Figuras 4.11 a 4.15 apresenta-se ilustrações representativas dos vários cortes e as imagens obtidas pelo tomógrafo em cada varrimento.

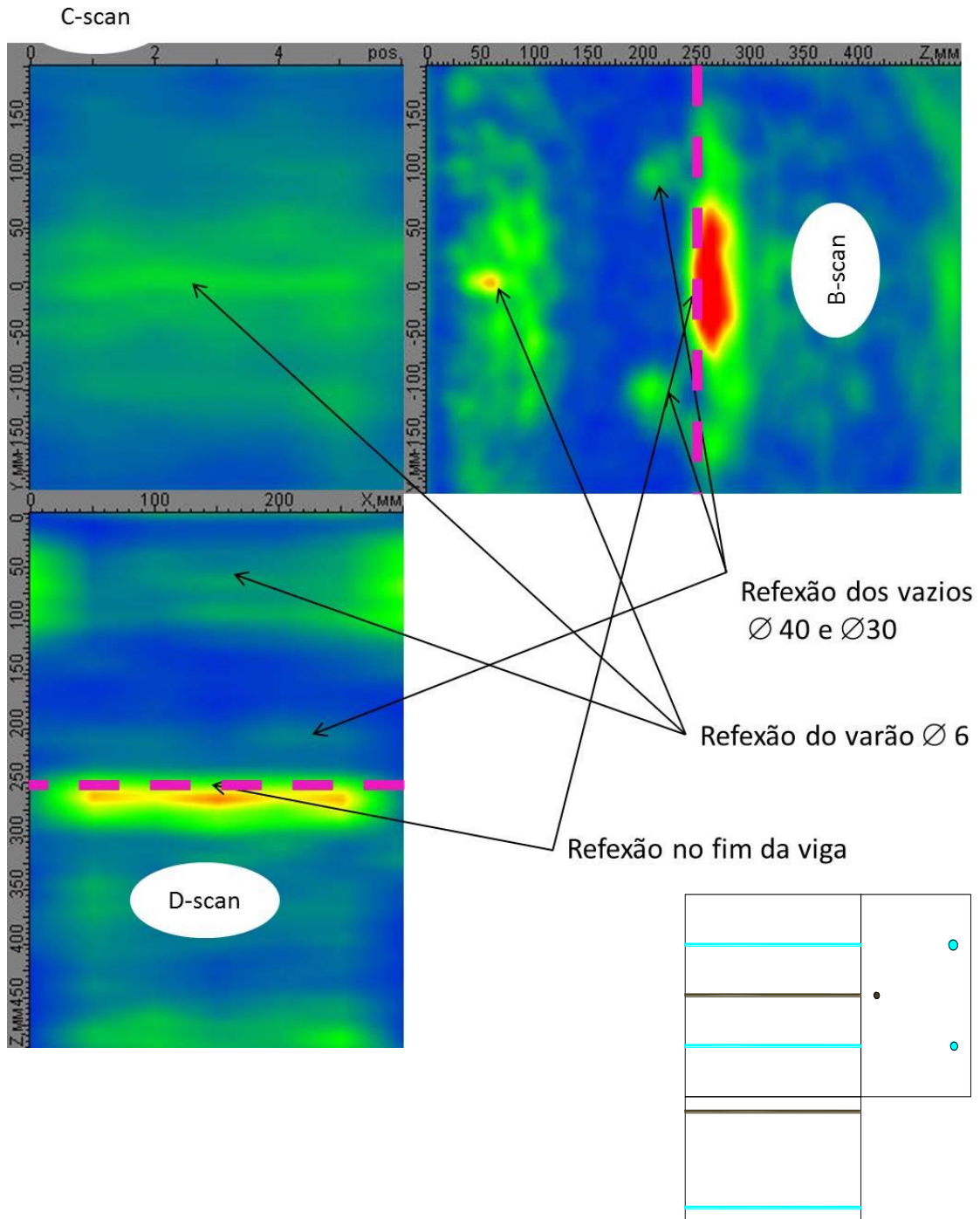


Figura 4.11 – Imagens obtidas no ensaio VAF1H5Y10

No ensaio VAF1H5Y10, tanto no B-scan como no D-scan da Figura 4.11 facilmente se identifica o fim da viga pela mancha que aparece aos 250 mm, que é produzida pelo reflexo dos ultra-sons na superfície da viga. No B-scan o varão e os vazios são perfeitamente nítidos. A imagem dá uma localização muito próxima tanto do varão como dos vazios mas não se consegue ter precisão nas respectivas dimensões. No D-scan é ainda possível identificar o desenvolvimento dos vazios e do varão.

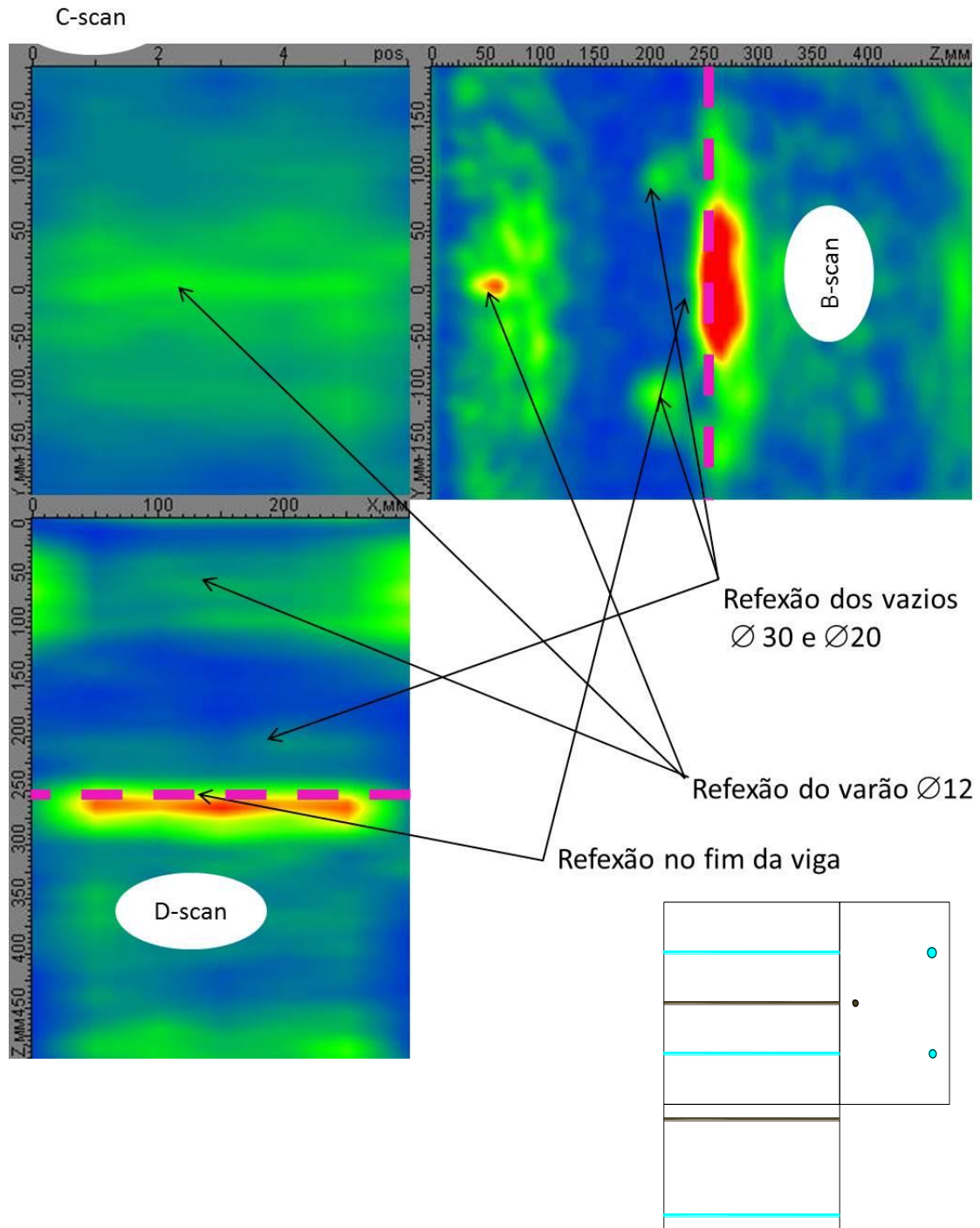


Figura 4.12 – Imagens obtidas no ensaio VAF1H5Y30

Tal como no ensaio anterior (VAF1H5Y10), no ensaio VAF1H5Y30, tanto no B-scan como no D-scan da Figura 4.12 facilmente se identifica o fim da viga pela mancha que aparece aos 250 mm. Mais uma vez, no B-scan o varão e os vazios são perfeitamente nítidos e a imagem dá uma localização muito próxima tanto do varão como dos vazios mas não se consegue ter precisão nas dimensões. No D-scan é ainda possível identificar o desenvolvimento dos vazios e do varão.

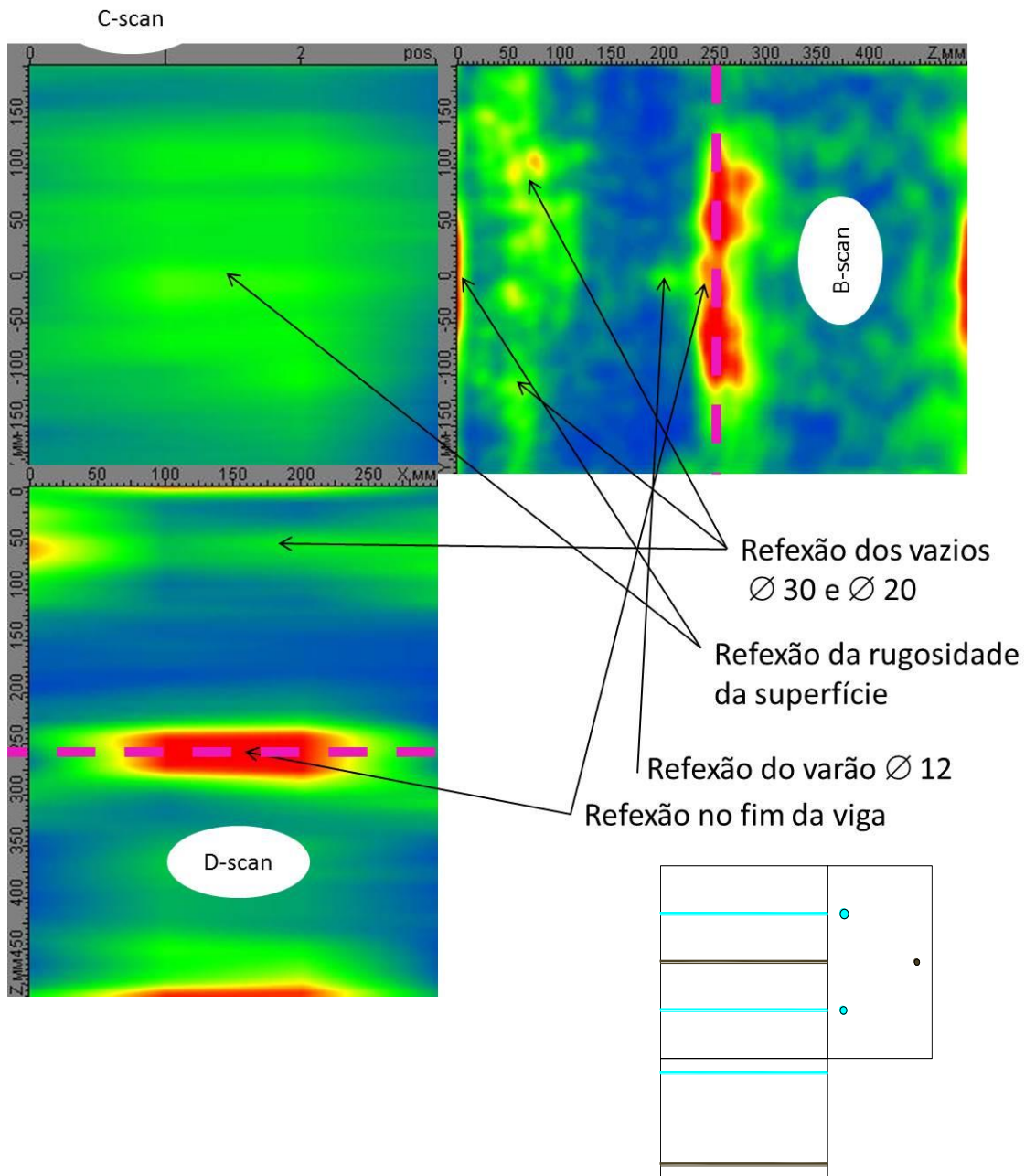


Figura 4.13 - Imagens obtidas no ensaio VAF2H10Y30

O ensaio VAF2H10Y30 foi efectuado na face oposta do ensaio anterior (VAF1H5Y10), que apresenta uma maior rugosidade. O fim da viga continua a ser facilmente identificado tanto no B-scan como no D-scan da Figura 4.13. No B-scan o varão e os vazios são visíveis

mas não são tão nítidos como no ensaio anterior (VAF1H5Y30), o que parece ser devido à rugosidade da superfície de contacto com o tomógrafo. Esta rugosidade traduz-se na perda de nitidez da imagem do C-scan e nas reflexões visíveis no B-scan, como assinalado na Figura 4.13. No D-scan é ainda possível identificar o desenvolvimento dos vazios com bastante nitidez.

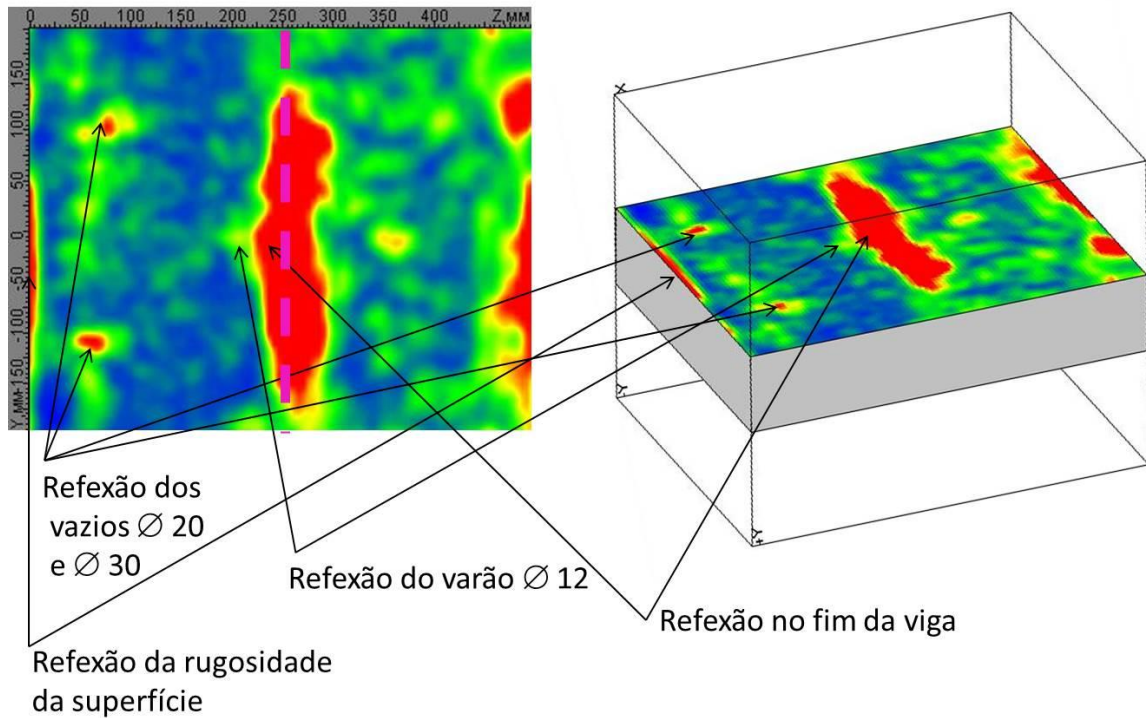


Figura 4.14 - Imagens obtidas no ensaio VAF2H10Y30 mais ou menos a meia altura do protótipo A

Por as imagens iniciais do ensaio VAF2H10Y30 não serem nítidas apresenta-se, na figura 4.14, o modelo em 3D (possibilidade que o programa apresenta) com o corte B-scan mais ou menos a meia altura do protótipo A. Esta foi, neste ensaio, a imagem mais nítida. A localização do varão e dos vazios não é tão bem definida como nos ensaios efectuados na face 1.

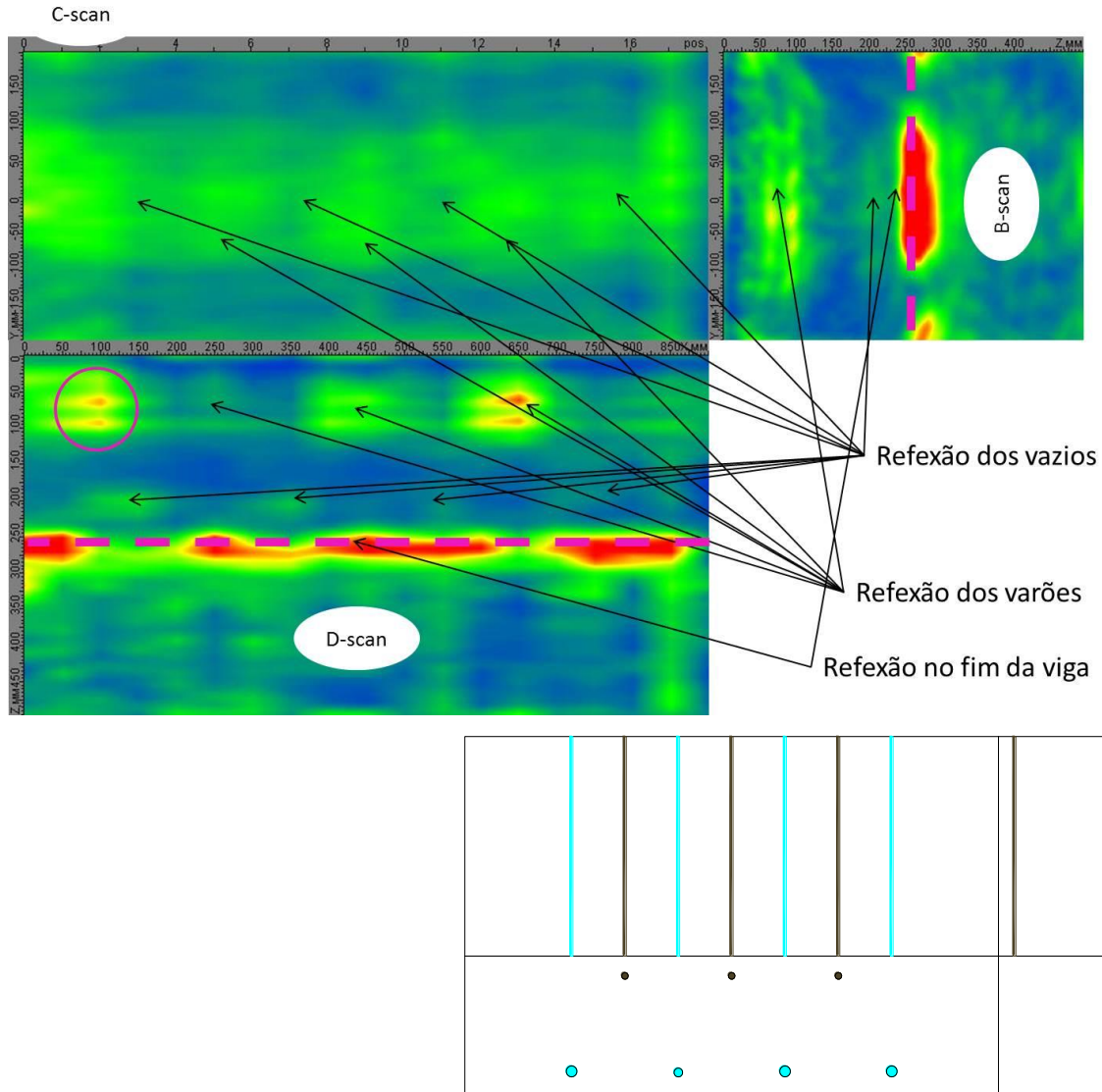


Figura 4.15 – Imagens obtidas no ensaio VAF1V5X0

Mais uma vez se identifica sem dificuldade o fim da viga nas imagens B-scan e D-scan. Na imagem B-scan é possível identificar a posição dos varões (que se apresenta duplicada devido a efeitos de eco dos ultra-sons). Nesta imagem identifica-se ainda, embora com pouca nitidez, a mancha verde ao longo dos vazios. A imagem C-scan apresenta-se muito pouco nítida, permitindo, ainda assim, perceber a existência dos alinhamentos verticais que correspondem aos vazios e aos varões de aço. Na imagem D-scan consegue-se identificar tanto os varões (igualmente com duplicação devido ao eco) como os vazios, com localizações próximas da realidade. O círculo a roxo identifica uma zona em que parecem localizar-se varões de aço onde estes, de facto, não existem. Este efeito é novamente produzido pelo fenómeno de eco ultra-sónico e, em casos reais, em que não se conhece à partida a localização dos elementos, pode dificultar a interpretação dos resultados.

Não se apresentam os ensaios efectuados nas faces 3 e 4, por as imagens não terem uma fácil interpretação devido a existir uma sobreposição de varões de um lado e de vazios do outro.

Pelos resultados dos ensaios realizados no protótipo A, verifica-se que os ensaios realizados em faces opostas permitem obter resultados semelhantes.

4.3. Tomografia por ultra-sons no protótipo B

Tal como na viga A inspecionaram-se as faces da viga B para se ver a planeza e rugosidade das faces. Como se pode observar na Figura 4.16, as faces são bastante planas. As faces 1, 3 e 4 são pouco rugosas em comparação com a face 2 (face livre no processo de betonagem).



Figura 4.16 – Várias faces do protótipo B

Também como na viga A algumas arestas e alguns vértices da viga B estavam delaminados em vários locais (Figura 4.17)



Figura 4.17– Destacamentos e delaminações no protótipo B

As Figuras 4.18 a 4.21 representam as posições de varrimentos que foram efectuados.

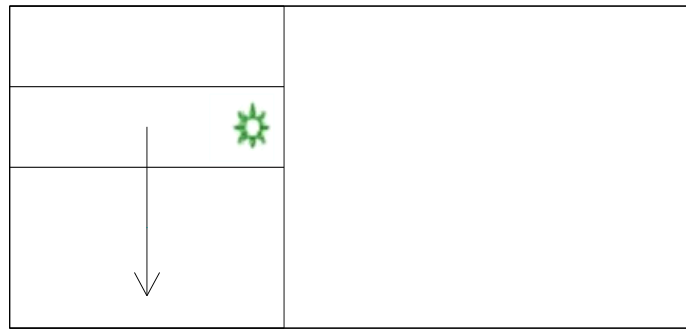


Figura 4.18 – localização do ensaio VBF1H10Y0

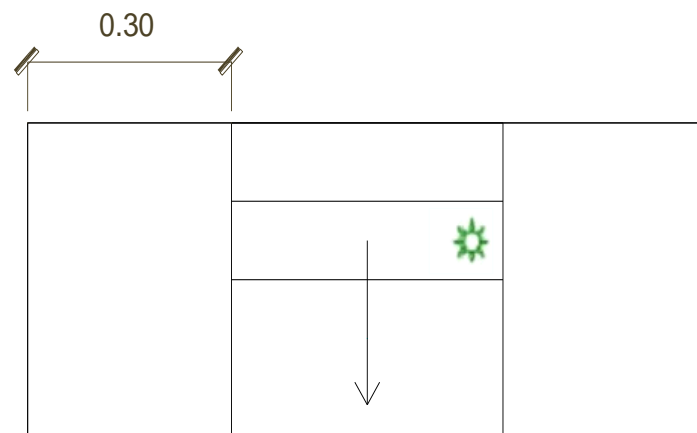


Figura 4.19 – localização do ensaio VBF1H5Y30

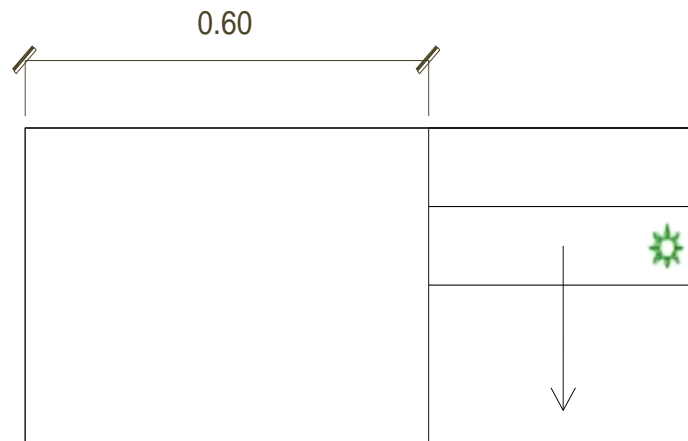


Figura 4.20 – localização do ensaio VBF1H10Y60

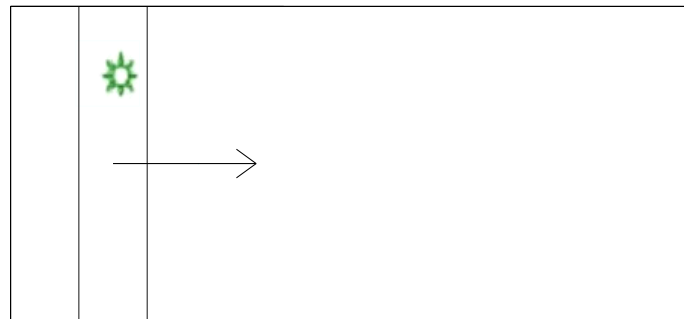


Figura 4.21 - localização do ensaio VBF1V2X0

Também nesta viga colocou-se uma ilustração que representa cada corte segundo os eixos relativos à antena. A cor castanha representa as fissuras e a cor azul o “ninho de brita”. A linha tracejada cor-de-rosa foi colocada na imagem para indicar o fim da viga.

Nas Figuras 4.22 a 4.26 apresenta-se ilustrações representativas dos vários cortes e as imagens obtidas pelo tomógrafo em cada varrimento.

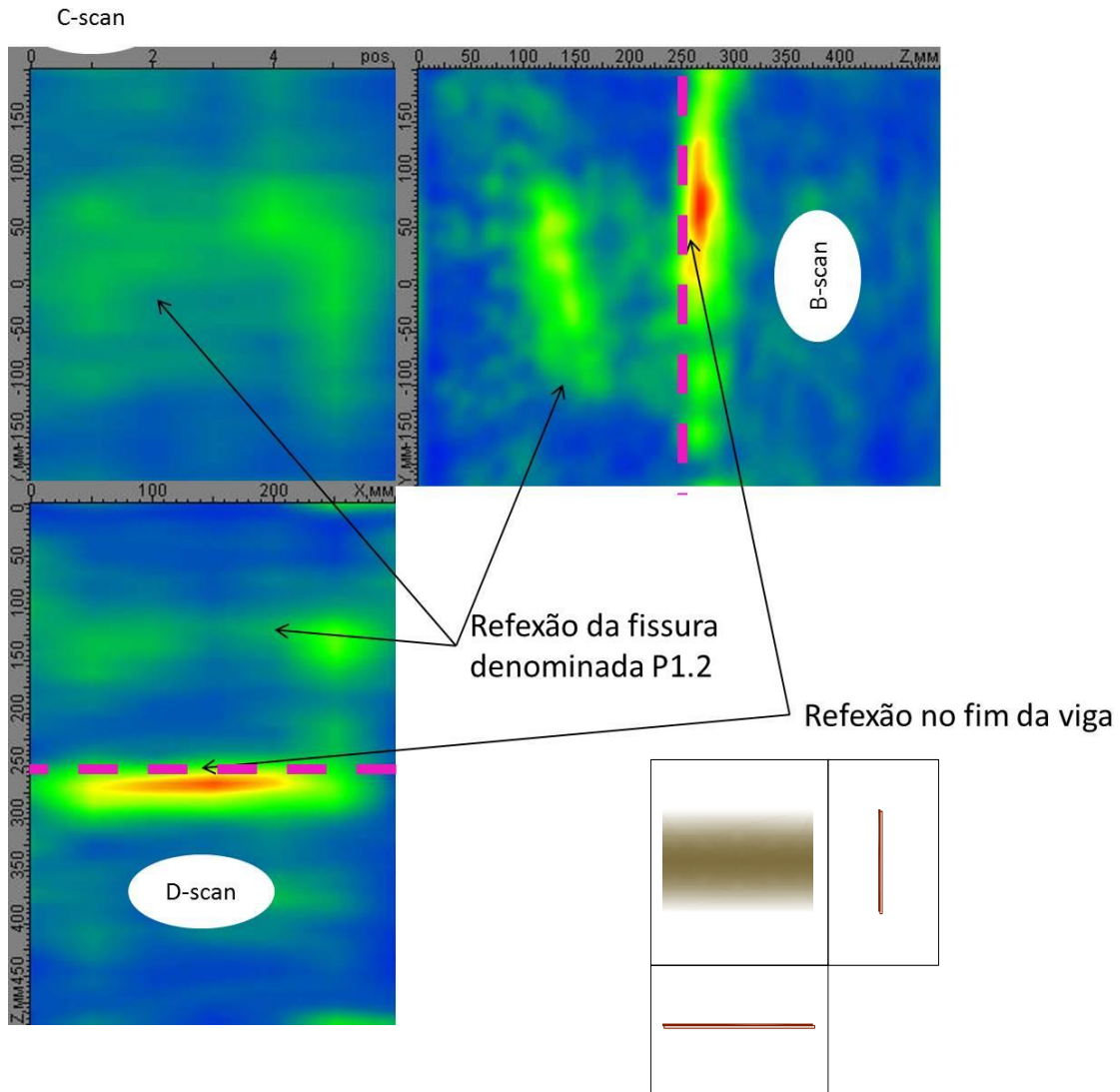


Figura 4.22 - Imagens obtidas no ensaio VBF1H5Y0 efectuado com passo de 5 cm

Tanto no B-scan como no D-scan da Figura 4.22 facilmente se identifica o fim da viga pela mancha que aparece aos 250 mm (espessura da viga). No B-scan e no D-scan é possível identificar e localizar a fissura (P1.2) e, no B-scan, pode-se mesmo medir aproximadamente o seu comprimento (cerca de 20 cm). No C-scan a fissura aparece num plano paralelo à imagem, sendo reconhecida pela mancha verde mais ou menos difusa. Quando identificada num plano perpendicular ao seu (B-scan e D-scan), a expressão da fissura denota uma espessura elevada, que não corresponde à realidade.

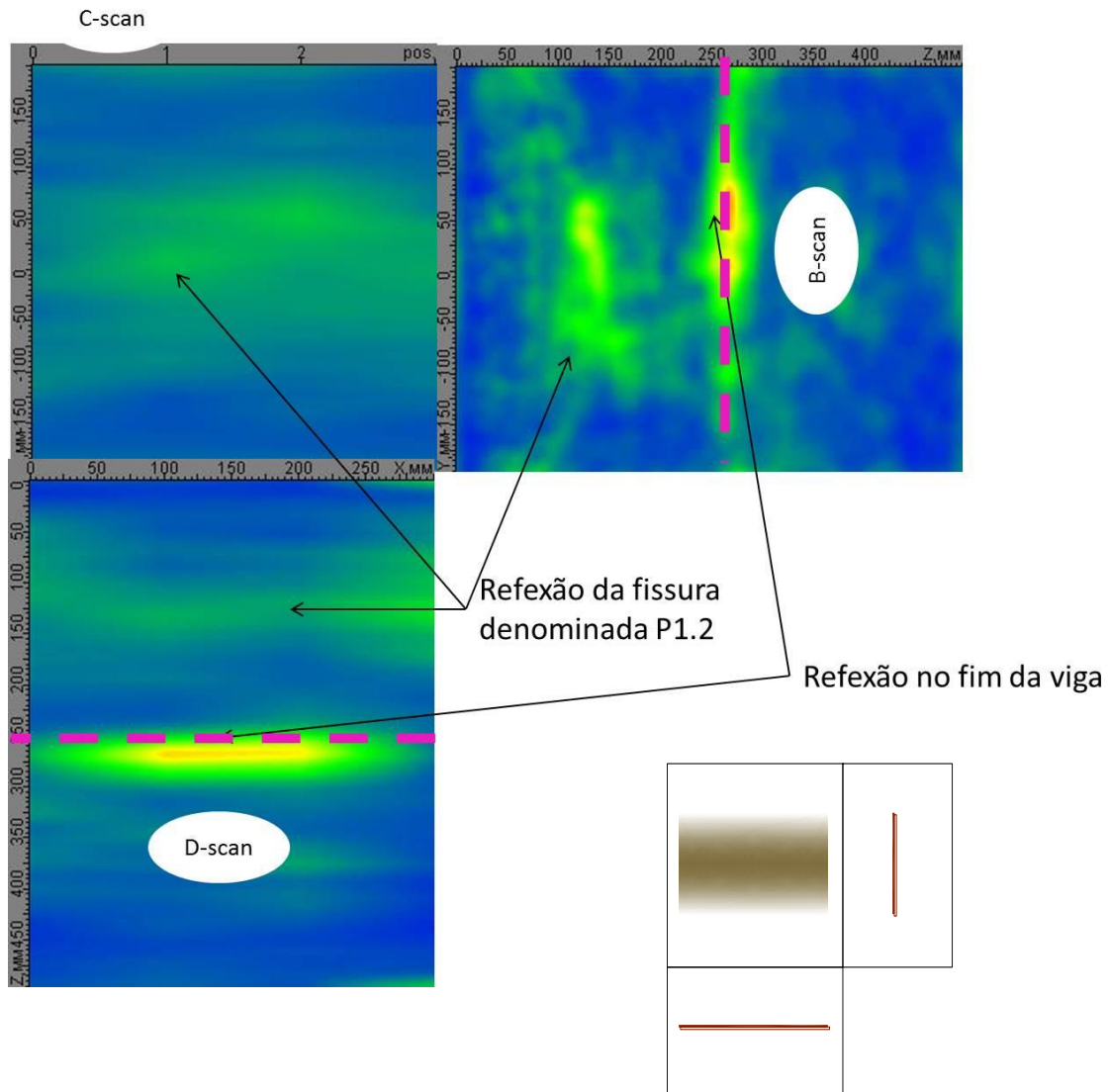


Figura 4.23 - Imagens obtidas no ensaio VBF1H10Y0 efectuado com passo de 10 cm

Na figura 4.23, referente ao ensaio VBF1H10Y0, mais uma vez é facilmente identificado o fim da viga pela mancha que aparece aos 250 mm. No B-scan é possível identificar e localizar a fissura (P1.2) mas o comprimento medido é de cerca de ± 15 cm, enquanto a verdadeira extensão da fissura é de 20 cm. No C-scan e no D-scan a fissura continua a ter expressão, como no caso anterior, compreendendo-se que se desenvolve praticamente em toda a altura da viga.

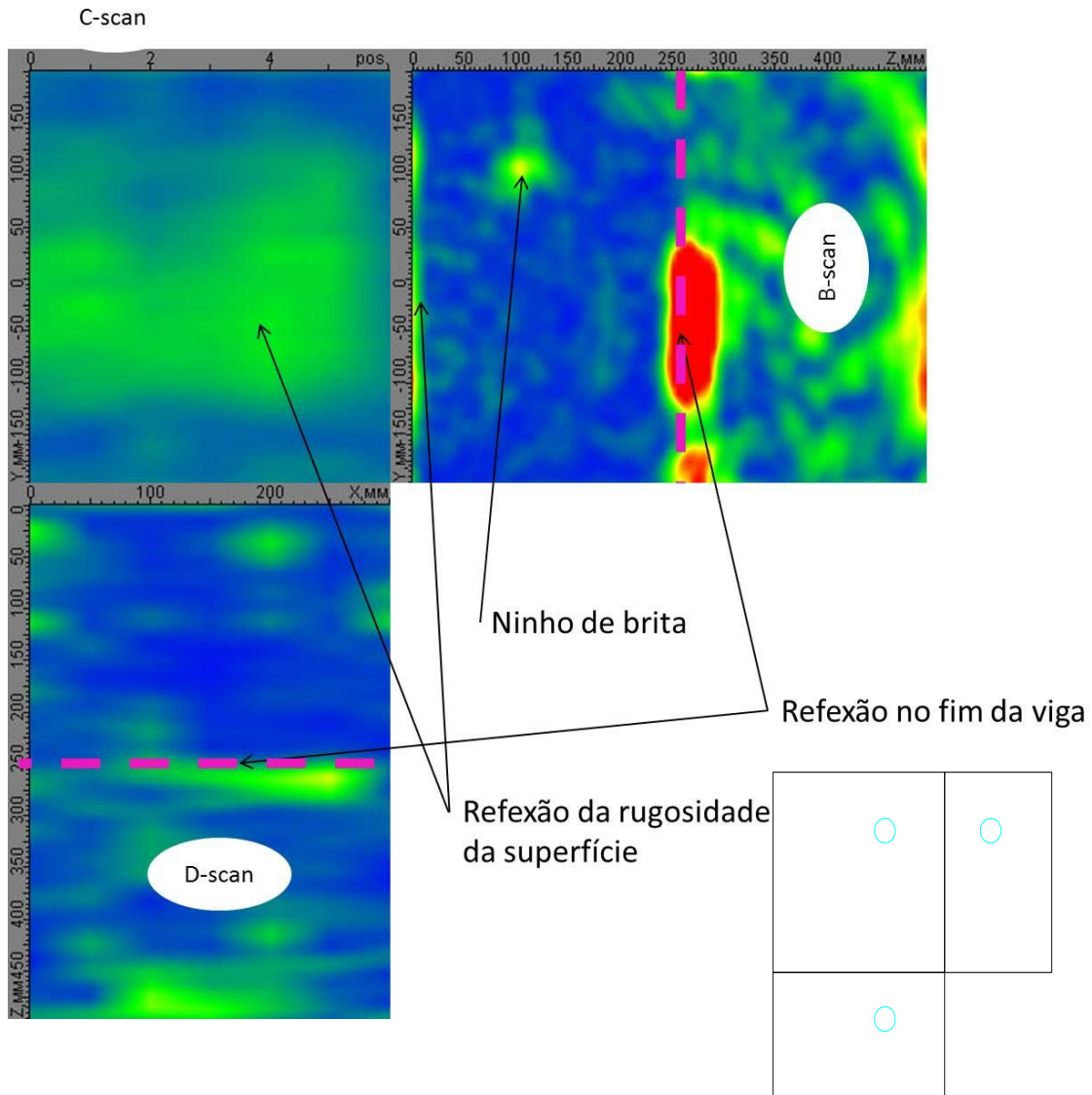


Figura 4.24 - Imagens obtidas no ensaio VBF1H5Y30

No ensaio VBF1H5Y30, para além de se identificar facilmente o fim da viga, é muito visível o “ninho de brita” que também se consegue localizar mas que parece mais pequeno do que os 10 cm. As fissuras (P1.3 e P1.4) não são identificadas. A rugosidade existente na superfície é muito visível. A superfície oposta a esta é ainda mais rugosa logo os resultados de um ensaio nessa face não melhoram.

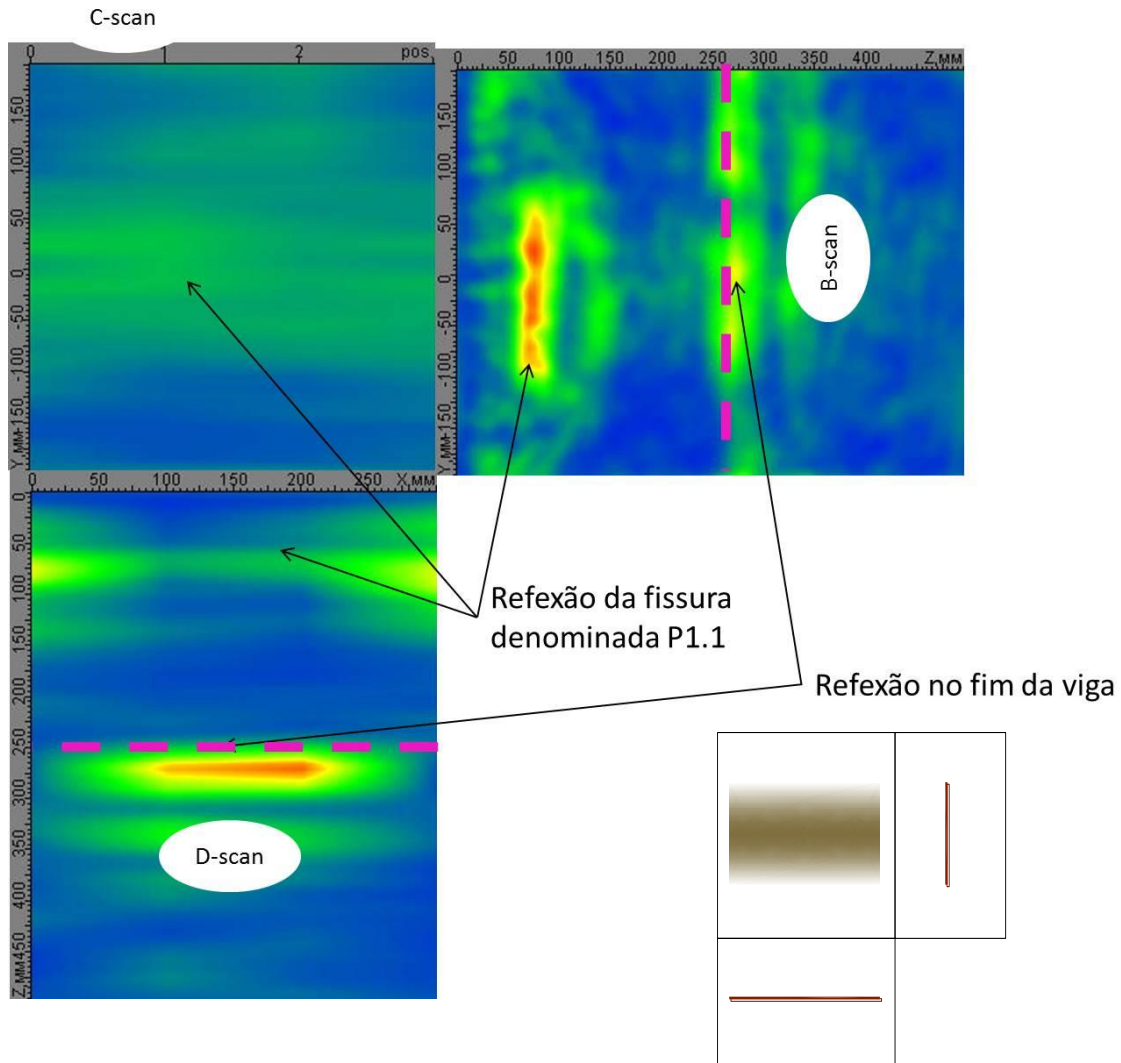
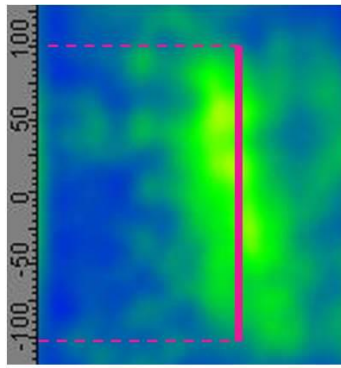
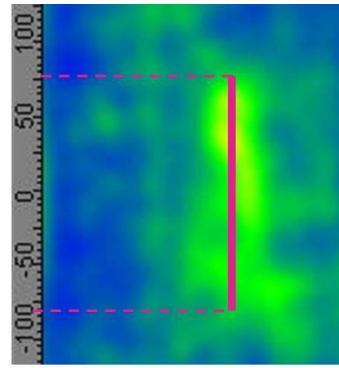


Figura 4.25 - Imagens obtidas no ensaio VBF1H10Y60

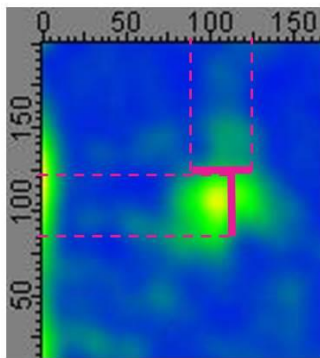
No ensaio VBF1H10Y60, o fim da viga é identificado pela mancha que aparece aos 250 mm. No B-scan é possível identificar e localizar a fissura (P1.1) com a dimensão ± 20 cm. No C-scan e no D-scan compreende-se que a fissura é praticamente em toda a altura da viga.



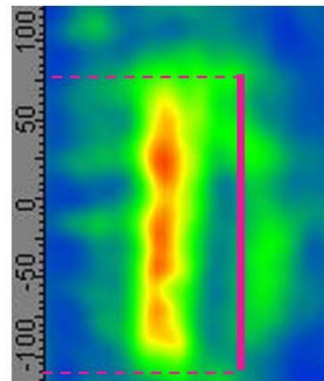
Reflexão da fissura denominada P1.2



Reflexão da fissura denominada P1.2



Ninho de brita



Reflexão da fissura denominada P1.1

Figura 4.26 – Ampliações da imagem B-scan dos ensaios VBF1H5Y0, VBF1H10Y0, VBF1H5Y30 e VBF1H10Y60

Na figura 4.26 apresentam-se ampliações do B-scan de cada um dos ensaios referidos da viga B, colocou-se linhas a cor-de-rosa para marcar as dimensões das fissuras e do ninho de brita. É possível observar-se que a fissura P1.2 no ensaio realizado com passo 5 cm (VBF1H5Y0) tem a dimensão prevista ± 20 cm enquanto no ensaio realizado com passo 10 cm (VBF1H10Y0) tem uma dimensão inferior de ± 15 cm. O ninho de brita observado é também mais pequeno do que os 10 cm existentes. Na refelexão da fissura P1.1 a dimensão é a prevista ± 20 cm.

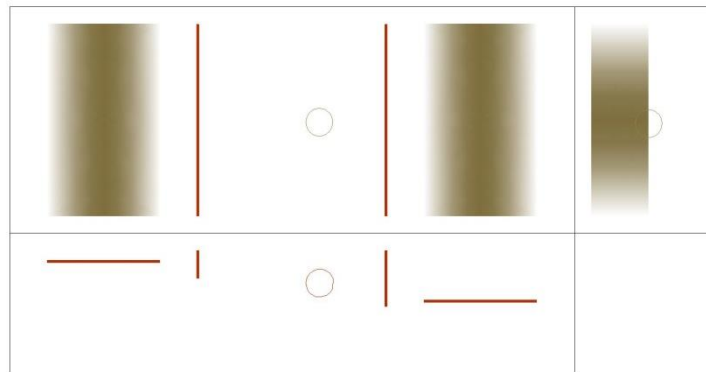
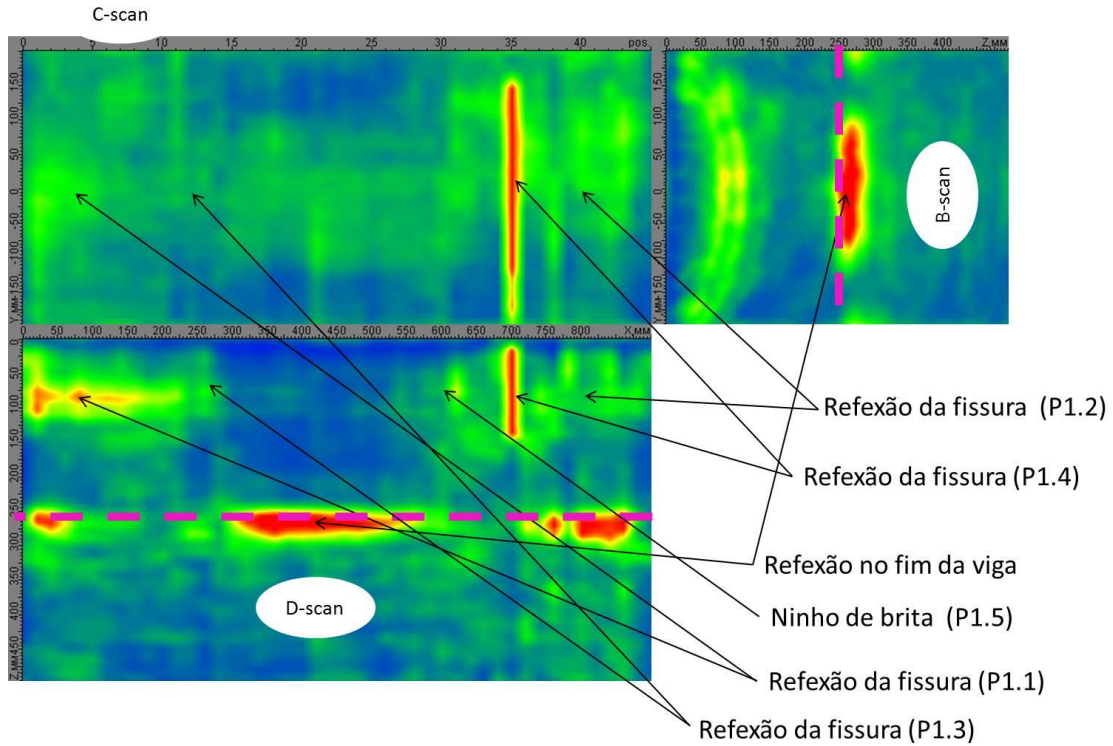


Figura 4.27 - Imagens obtidas no ensaio VBF1V2X0

O fim da viga é novamente identificado pela mancha que aparece aos 250 mm em B-scan e D-scan. No C-scan e D-scan é possível identificar e localizar praticamente todas as fissuras existentes. A identificação do ninho de brita é menos óbvia, embora esta singularidade pareça ter expressão visível em D-scan, como assinalado na figura. Este ensaio foi efectuado com passo mais reduzido, igual a 2 cm, para se conseguir identificar as fendas verticais (P1.3 e P1.4), o que parece ter resultado numa melhor identificação e definição das singularidades.

4.4. Tomografia por ultra-sons nos protótipos 1 e 2

Da mesma forma que nos protótipos A e B, inspecionaram-se as faces dos protótipos 1 e 2 tendo em atenção a planeza e rugosidade das faces. Como se pode ver pela Figura 4.28, as faces não são muito planas e a rugosidade existe em muitos locais das faces.



Figura 4.28 - Faces dos protótipos 1 e 2

As Figuras 4.29 a 4.30 representam as posições de varrimentos que serão apresentados.

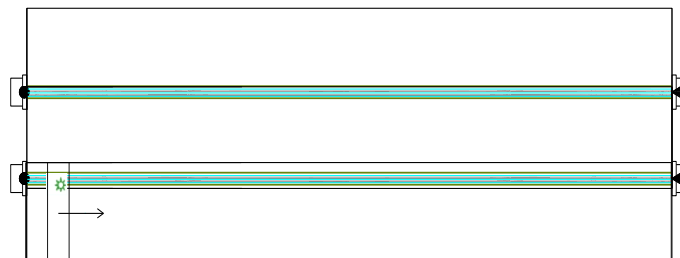


Figura 4.29 - localização do ensaio V2F2V10X0

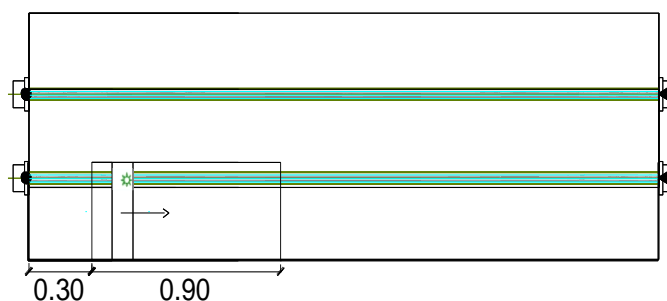


Figura 4.30 - localização do ensaio V1F2V10X0

Mais uma vez, utilizou-se uma linha tracejada a cor-de-rosa para identificar o fim da viga.

As primeiras imagens obtidas destas vigas eram muito pouco perceptíveis, verificou-se que após a calibração de qualquer destas vigas o valor do “Gain” era muito elevado. Seria pois necessário tentar com valores menos elevados, efectuando-se várias tentativas. As Figuras 4.31 a 4.33 apresentam as imagens obtidas pelo tomógrafo nos referidos varrimentos.

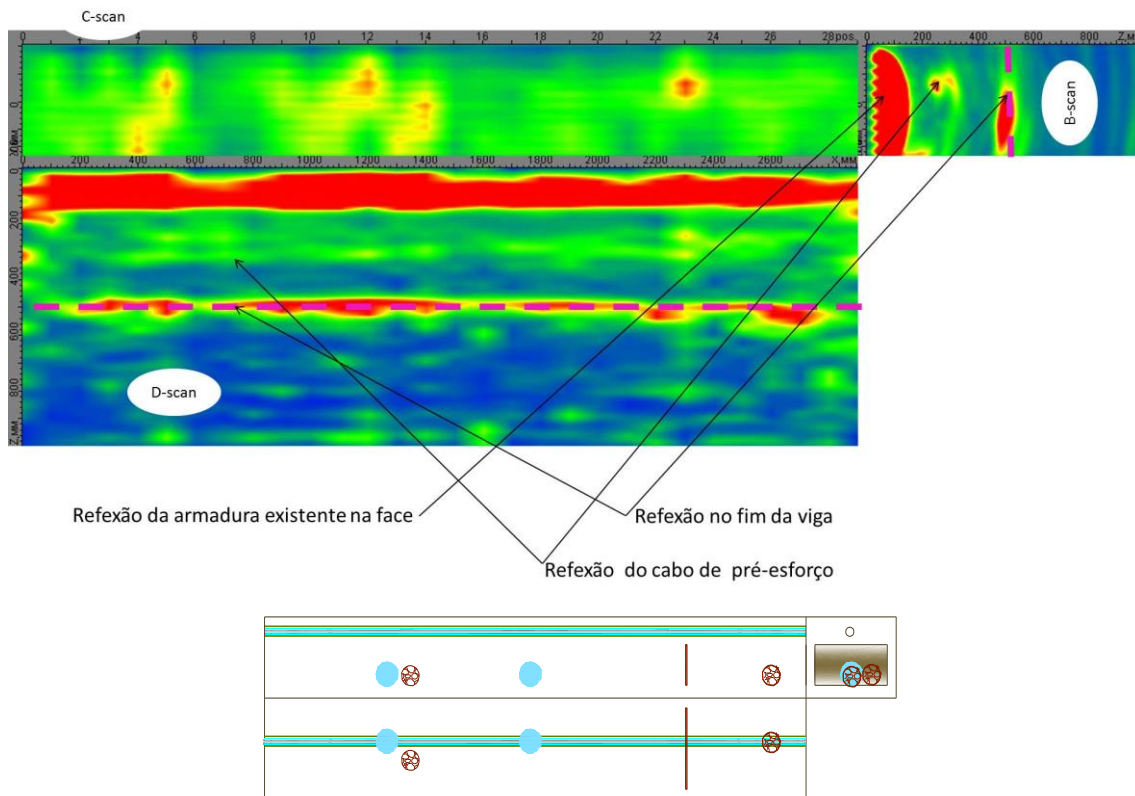


Figura 4.31 - Imagens obtidas no ensaio V2F2V10X0

A Figura 4.31 foi obtida com o “Gain” muito elevado e para que fosse possível ver mais do que uma mancha vermelha teve que se diminuir a intensidade (ajustada em decibéis). O fim da viga é identificado pela mancha vermelha aos 0,50 m. No D-scan é possível localizar o cabo de pré-esforço, mas não as anomalias existentes. No C-scan parece compreender-se a armadura existente, mas não se consegue identificar as anomalias existentes nos locais previstos. No B-scan a primeira mancha vermelha é possível que seja a reflexão da armadura existente na face e a pequena mancha vermelha seguida de outra mais pequena é possível ser o cabo de pré-esforço.

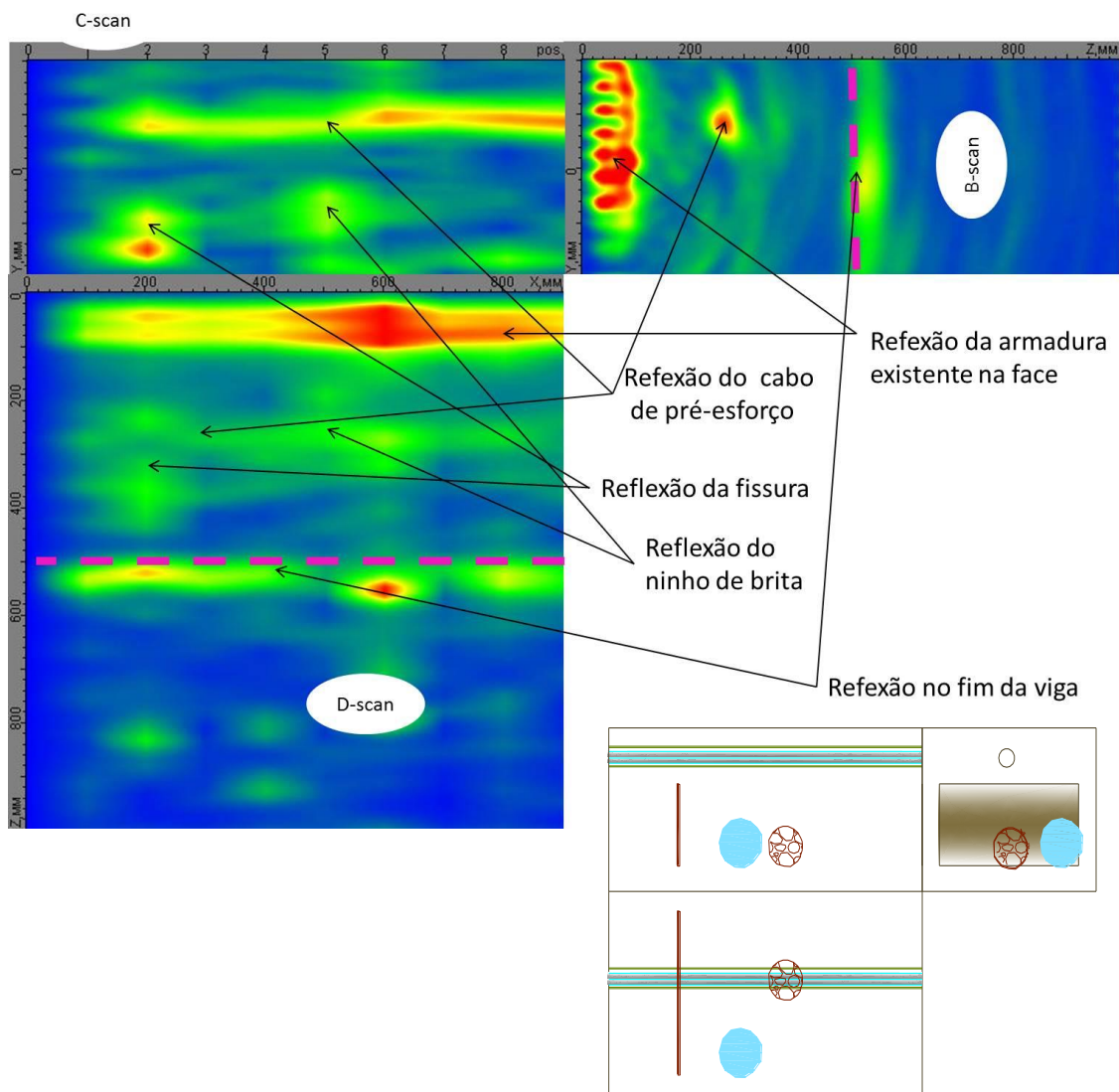


Figura 4.32 - Imagens obtidas no ensaio V1F2V10X0

A Figura 4.32 foi obtida depois de se alterar o valor do “Gain”. O fim da viga é mais uma vez identificado pela mancha aos 0,50 m. Nesta figura optou-se por apresentar no C-scan num plano a meio da viga (opção permitida pelo programa) daí só ser visível para além do cabo de pré-esforço a fissura e o ninho de brita. No B-scan identifica-se a armadura da face e o cabo de pré-esforço. No D-scan para além da armadura da face e do cabo de pré-esforço é também visível a reflexão do ninho de brita e da fissura.

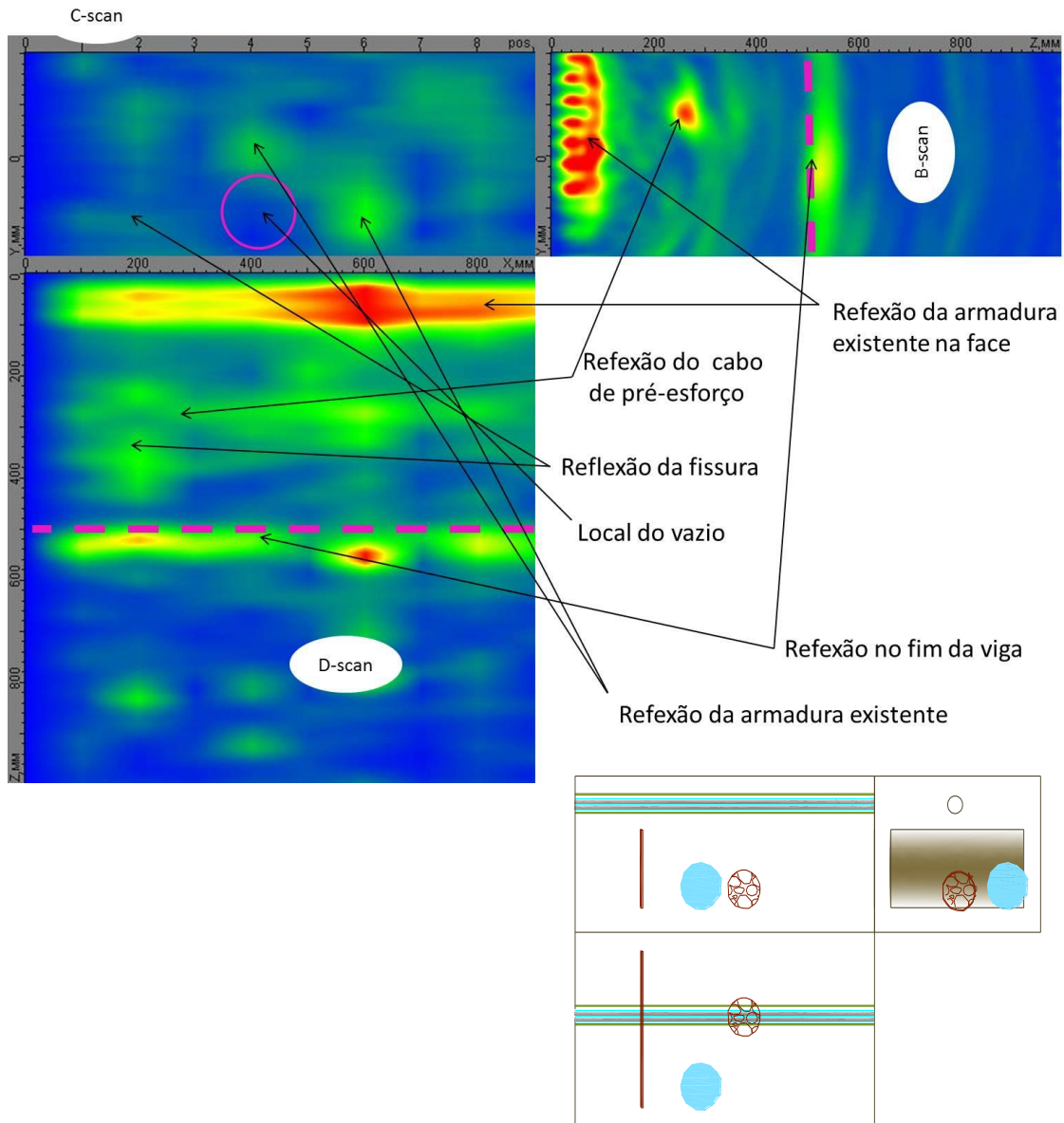


Figura 4.33 - Imagens obtidas no ensaio V1F2V10X0

A Figura 4.33 foi obtida do mesmo ensaio do que apresentado na Figura 4.31 mas o C-scan desta figura é um plano junto à face onde se localiza o vazio, assim o ninho de brita não é visível mas a fissura é. Não se consegue identificar o vazio, mas as armaduras tornam-se mais visíveis junto ao local onde é o vazio. No B-scan identifica-se a armadura da face e o cabo de pré-esforço. No D-scan para além da armadura da face e do cabo de pré-esforço é também visível a fissura. O fim da viga mantém-se identificado pela mancha aos 0,50 m.

Os varrimentos nestas vigas foram feitos com a antena na vertical devido a:

- ser mais fácil percorrer uma viga com a antena nessa posição
- a falta de planeza das faces (Figura 4.28) dificulta que os transdutores fiquem todos encostados quando a antena está na posição horizontal

Não foi possível identificar os vazios nos cabos de pré-esforço, nem os vazios no interior do betão.

4.5. Síntese dos resultados obtidos

Na presente campanha experimental as maiores diferenças entre os ensaios devem-se ao estado da superfície onde se efectua o varrimento e às diferenças de passo com que se faz o varrimento.

Por norma, usa-se o passo de 10 cm (dimensão da antena), mas nem sempre se obtêm boas imagens. Reduzir o passo permite, em princípio, obter imagens de melhor qualidade.

Os resultados obtidos pela utilização do tomógrafo de ultra-sons nos protótipos A e B (secção 4.2. e 4.3.) revelam a identificação do local de todas as singularidades das vigas protótipo – varões, vazios, fissuras e ninho de brita e no caso das fissuras revelam também, a sua dimensão de uma forma bastante precisa. Não foi, no entanto, possível identificar com clareza o tipo de anomalia através das imagens. Verifica-se, por exemplo, que um varão pode apresentar uma expressão na imagem da tomografia ultra-sónica semelhante a um vazio cilíndrico. Aparentemente qualquer alteração na densidade do material que está em observação provoca um aumento na intensidade da imagem, ajustada em decibéis.

Nos protótipos 1 e 2 foi mais difícil obter resultados, sendo estas vigas mais semelhantes às existentes na realidade. Nestas vigas foi necessário ter em atenção os parâmetros obtidos pela calibração. Não foi possível identificar os vazios colocados no interior do betão, nem os vazios dos cabos de pré-esforço, apesar de na figura 4.32 onde a reflexão do cabo de pré-esforço está a encarnado se suponha a existência de ar na bainha não sendo uma das anomalias introduzidas. Não é, mais uma vez, possível identificar o tipo de anomalia através da imagem.

A técnica dos ultra-sons aplicada nas vigas protótipo A e B revelou ser uma forma válida de identificação das anomalias correntes de uma estrutura de betão, pois, apesar de não se conseguir identificar o tipo de anomalia, foi possível identificar a localização de todas as singularidades existentes e ainda, no caso das fissuras, as suas dimensões.

A mesma técnica aplicada nas vigas protótipo 1 e 2 (vigas em betão armado e pré-esforçado) foi também válida na identificação dos ninhos de brita e das fissuras mas não indentificou nem vazios no interior do betão nem os vazios colocados nos cabos de pré-esforço.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusão do estudo efectuado

A técnica de tomografia por ultra-sons permitiu obter resultados bastante satisfatórios nas estruturas de betão, pois permitiu localizar a existência das anomalias correntes.

As anomalias observadas foram “ninhos de brita”, fissuras e vazios no betão. Os varões foram também observados mas não foi possível identificar a existência ou não de corrosão nem os respectivos diâmetros. Tal como não foi possível identificar com clareza o tipo de anomalia.

Verificou-se que se obtêm resultados semelhantes em ensaios realizados em faces opostas e que a imagem obtida pelo tomógrafo tem uma qualidade superior quando o ensaio foi realizado numa face plana e pouco rugosa.

No caso das fissuras segundo o eixo x foi importante reduzir o passo para que se tornassem visíveis nas imagens obtidas.

Nas estruturas de betão armado e pré-esforçado os resultados foram satisfatórios na identificação das armaduras passivas e dos cabos de pré-esforço, dos ninhos de brita e da fissura. Não foram identificados vazios no interior do betão nem vazios nas bainhas de pré-esforço. Também nestas vigas não foi possível identificar a existência ou não de corrosão nem identificar com clareza o tipo de anomalia.

As dimensões das vigas ensaiadas foram facilmente identificáveis em qualquer dos ensaios realizados.

O tomógrafo por ultra-sons - Mira possui como vantagens principais: utilizar uma técnica não destrutiva; ser leve, de fácil transporte e de fácil aplicação; obter e processar imagens num curto espaço de tempo (a aquisição completa de dados num local da antena, o seu processamento e a sua transferência demora menos de 3 segundos); obter imagens nos 3 planos e em 3D o que permite uma melhor visualização do interior do betão.

A utilização desta técnica seria ideal numa primeira análise de inspecção de uma estrutura, pois identifica a existência de anomalias e localiza-as, mostrando assim onde será ou não necessário a utilização de outra técnica para a identificação do tipo de anomalia.

5.2. Estudos futuros

Finalizado este estudo seria importante alisar as faces dos protótipos e realizar novos varrimentos para se tentar melhorar as imagens obtidas. Nas vigas protótipos 1 e 2 deveriam realizar-se ensaios de uma forma mais exaustiva para que se atribuisse valores ao “gain” e à frequência que permitissem obter melhores resultados. Seria também importante retirar provetes dos protótipos de forma a verificar a homogeneidade do betão, principalmente nos protótipos 1 e 2 onde aparece uma zona vermelha (possíveis vazios)

junto às armaduras e onde foi mais difícil localizar as anomalias existentes. Dever-se-ia também verificar os vazios existentes nas bainhas de pré-esforço.

Em estudos diferentes seria interessante verificar a aplicabilidade do tomógrafo em estruturas existentes comparando posteriormente os resultados obtidos pelo tomógrafo com os resultados possíveis de obter através de provetes extraídos nas zonas ensaiadas.

Outra sugestão seria um estudo em diferentes tipos de betão, com idades diferentes e diferentes quantidades de armadura junto às faces de forma criar um método para identificar qual a frequência e qual o “gain” a usar para uma melhor visualização das imagens.

A comparação de ensaios realizados em betão armado com armaduras corroídas e em betão armado com armaduras sem corrosão seria mais um estudo a realizar.

Estudos para o desenvolvimento do *software* de forma a ser possível: identificar o tipo de anomalia existente para além da sua localização; a medição de diâmetros de armadura; otimizar a medição de defeitos interiores ao betão como vazios, fissuras e ninhos de brita.

Estudos para a criação de *software* que: automatize a identificação de elementos e de defeitos existentes; e possibilite o tratamento de dados de forma numérica.

A viabilidade da aplicação do tomógrafo em materiais diferentes do betão seria mais uma sugestão.

BIBLIOGRAFIA

- 2004 - Manual de inspeção de pontes rodoviárias. Ministério Brasileiro dos Transportes. Publicação IPR- 709, Brasil.
- Almeida, A., Duarte, F., Caldas, J., Moura, R., Xavier, B., 2012 – Tomografia e reabilitação de estruturas de betão armado e pré-esforçado. Reabeat, projecto dos protótipos, memória descritiva e justificativa. Teixeira Duarte, Engenharia e Construções, S.A.
- Almeida, A., Duarte, F., Caldas, J., Moura, R., Xavier, B., 2013 – Tomografia e reabilitação de estruturas de betão armado e pré-esforçado. Reabeat, relatório de execução dos protótipos. Teixeira Duarte, Engenharia e Construções, S.A.
- Andreucci, R., 2011 - Ensaio por ultrassom. Associação Brasileira de ensaios não destrutivos e inspeção.
- Barbosa, G., 2008 - GEOS CUT – Desenvolvimento de um sensor de sismos utilizando filmes piezoelétricos. Tese para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica Industrial e Computadores. Escola de Engenharia. Universidade do Minho.
- Biscegli, C. I., 2003 - Conceitos da Física do Ultra-Som. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. ISSN 1518-7179. São Carlos, São Paulo.
- Bullock, R.E. and Whitehurst, E.A., 1959 - Effect of certain variables on pulse velocities through concrete, Highway Res. Board Bull., 206, 37, 1959.
- Bungey, J.H., Millard, S.G., Grantham, M.G., 2006 - Ultrasonic pulse velocity methods, in Testing of Concrete in Structures, Fourth edition published 2006 by Taylor & Francis.
- Busse, C., 1985 - “Imaging with optically generated thermal waves”, IEEE Trans. Sonics Ultrasonic, S432, 335-364, 1985.
- Catalog NDT, 2010 - NDT Systems. Germann Instruments.
- Dias J. A. - Ondas sísmicas. 15 Maio 2014
<http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/52_Sismologia/5203_OndasSismicas.html>
- Silva, G., 2013 - Desenvolvimento e produção de componentes soldados padrão defeituosos para ensaios não destrutivos. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Ferraro, C.C., 2003 - Advanced nondestructive monitoring and evaluation of damage in concrete materials. Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, University of Florida.
- Germann Instruments, 2011 - Injection of cable ducts evaluated by MIRA ultrasound and DOCTer impact-echo. Germann Instruments.
- Hoegh K., Khazanovich L., Yu H.T., 2011 - Ultrasonic Tomography Technique for Evaluation of Concrete Pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2232, pp. 85–94.

- International Atomic Energy Agency, 2002 - Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. Vienna.
- International Atomic Energy Agency, 2005 - Non-destructive testing for plant life assessment. Vienna.
- Jones, R., 1954 - Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique, RILEM Int. Symp. on Nondestructive Testing of Materials and Structures, Paris, Vol. 1, Paper No. A-17 January 1954, 137. RILEM Bull., 19(Part 2), Nov. 1954.
- Jones, R., 1962 - Non-Destructive Testing of Concrete, Cambridge University Press, London.
- Jones, R., Facaoaru, I., 1969 - Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method, Mater. Struct. Res. Testing (Paris), 2(19), 275, 1969.
- Kaplan, M.F., 1959 - The effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete, Mag. Concr. Res., 11(32), 85, 1959.
- Kessler, L., 1972 - Acoustic Holography, Academic Press, 1972.
- Kuttruff, H., 1991 – Ultrasonics Fundamentals and applications. Elsevier applied science. London and New York..
- Luz, A., Santos T., Barros P., Vilaça P., Quintino L., 2013 - Conceção desenvolvimento e produção de sondas de ultra-sons. Instituto Superior Técnico de Lisboa e Instituto de Soldadura e Qualidade. Consultado em 30 de Agosto de 2013.
<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572196292/ARTIGO%20ISQ.pdf>>
- Langenberg, K.J. et al.. 2001 - Inverse Scattering with Acoustic, Electromagnetic, and Elastic Waves as Applied in Nondestructive Evaluation. Chapter 2 in Wavefield Inversion. Edited by Armand Wirgin (2001).
- Machado M. D., 2005 - Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 238 pp., 2005.
- Manual MIRA, 2010 - MIRA – Tomographer, Germann Instruments.
- Marklein, R. et al., 2002 - Linear and Nonlinear Inversion Algorithms Applied in Nondestructive Evaluation. University of Kassel. Inverse Problems (2002). Inst.of Physics Publishing.
- Marques, R., 2011 - Desenvolvimento de um método de inspeção de carris ferroviários por ultrasons. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Medeiros, A., 2007 - Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado. Dissertação

para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- Moreira, A., 2010 - Aplicação de ultrasons na análise de materiais à base de cimento. Relatório submetido para conclusão da bolsa de integração à investigação – LABEST, Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural. Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.
- Naik, T.R., Malhotra, V.M., Popovics, J.S., 2004 – Chapter 8, The Ultrasonic Pulse Velocity Method, CRC Handbook on nondestructive testing of concrete. Press LLC.
- Nepomuceno, M., 1999 – Ensaio não destrutivo em betão. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica. Trabalho de síntese. Departamento de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- NP EN 12504-4, 2003. Ensaio do betão nas estruturas; Instituto Português da Qualidade; Caparica.
- Orchard, D. F., 1978 - The testing of concrete: non-destructive methods of test. Concrete Technology. Applied Science Publishes Ltd, London Vol 2, 1978.
- Qixian, L. e Bungey J. H., 1996 - 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, Vol. 10, No. 4, pp. 237-242.
- Ribeiro, J., 2013 - Aplicação de ultrasons na caracterização de estruturas de betão. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- RILEM, 1972 - NDT1, Testing of concrete by the ultrasonic method.
- Rio, J., Figueiras J., 2012 - Detecção de dano com ultrasons em elementos de betão estrutural. Encontro Nacional de Betão Estrutural (BE2012). Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), Portugal.
- Santos, M.J., 2004 - Ondas ultra-sonoras guiadas na caracterização e controlo não destrutivo de materiais. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica, na especialidade de Materiais e Campo Electromagnético. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra.
- Schabowicz, K., Hola, J., Stys, D., 2013 - The ultrasonic tomography tests of concrete in a foundation slab. Institute of Building Engineering, Wroclaw University of Technology. Poland. Consultado em 25 Julho de 2013.
<http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_14_25.pdf>
- Schickert, M., Krause, M., Müller, W., 2003 - Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. Journal of Materials in Civil Engineering © ASCE / MAY/JUNE 2003 pp. 235-246.