



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Estimativa da Resistência do Betão *In Situ*: Método Esclerométrico

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Construções

Autor

Ricardo Emanuel Almeida de Sousa

Orientadores

Prof. Doutor Fernando José Forte Garrido Branco

Prof. Doutor Daniel António Semblano Gouveia Dias da Costa

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Dissertação escrita segundo o pré-acordo ortográfico
(Válido até Dezembro de 2012)

Coimbra, Julho, 2012

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação só foi possível graças à contribuição de algumas pessoas, no entanto, considerando-a como o resultado de uma caminhada que não começou apenas na Universidade de Coimbra, agradeço a todas as pessoas que me ajudaram, uma vez que não foi uma tarefa fácil. Para não correr o risco da injustiça de esquecer de alguém, agradeço a todos os que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para a construção da pessoa que hoje sou.

No entanto, resta-me ressaltar alguns agradecimentos, particularmente, a algumas pessoas sem as quais seria mais penosa a sua concretização:

Aos meus orientadores, Professor Doutor Fernando Branco e Professor Doutor Daniel Dias da Costa, pela orientação cuidada, a disponibilidade, o conhecimento partilhado, as dúvidas tiradas, e a confiança em mim depositada na realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Nuno Neves e à sua equipa por toda a dedicação, disponibilidade e apoio prestados na realização da campanha experimental.

À Professora Doutora Cristina Maria Tavares Martins, pela ajuda e explicação na utilização de programas estatísticos.

Aos técnicos José António do laboratório de Geotecnia e Fernando Rodrigues do laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural da F.C.T.U.C., pela experiência, ajuda e paciência disponibilizadas.

Às amigas criadas e partilhadas nesta academia, pela ajuda, o companheirismo e os momentos partilhados.

À Rita, pelo carinho e força que me dá, por estarmos sempre juntos nos momentos mais importantes, e por poder sempre “contar” com ela.

À minha família, por toda a ajuda e apoio prestados.

As últimas palavras são para aos meus pais e irmã, por serem as pessoas mais importantes na minha vida. À minha irmã Inês pela felicidade, espontaneidade, carinho que me transmite e pela alegria contagiante com que me brinda. Aos meus pais pelos esforços que fizeram para que eu cumprisse esta etapa, pela sua presença constante, por terem sempre uma palavra de coragem, por terem acreditado em mim e acima de tudo pelos valores e educação que me transmitiram, fazendo de mim a pessoa que hoje sou.

RESUMO

O betão, o material mais utilizado na construção, tem na resistência à compressão a sua característica principal. A resistência real *in situ* de um determinado betão é influenciada por inúmeros factores, inerentes à constituição do próprio material, à geometria das peças, ao tipo de carregamento, ou ao ambiente em que se encontra sujeito.

Frequentemente, é necessário estimar a resistência real do betão constituinte de elementos estruturais. Habitualmente, recorria-se à execução de carotes *in situ* e ao posterior ensaio à compressão, no entanto este tipo de ensaio tem inconvenientes tais como o custo elevado, a morosidade e os danos provocados no elemento estrutural. Nesse contexto, os ensaios não destrutivos apresentam-se como uma alternativa devido ao seu baixo custo, rapidez e baixos danos provocados.

O método esclerométrico é um ensaio de medição de dureza superficial que, utilizando correlações adequadas, correlaciona a dureza superficial com a resistência à compressão. Apesar da grande difusão do método, ainda existe uma grande variedade de parâmetros que afecta a fiabilidade do resultado, os quais não vêm considerados na curva de correlação do aparelho. Aspectos como a carbonatação do betão, a sua espessura, a regularização da superfície ou a posição do esclerómetro influenciam os resultados podendo conduzir a valores estimados, através do esclerómetro, superiores aos valores da resistência à compressão obtidos por ensaio de carotes na estrutura.

O presente trabalho pretende contribuir para um maior rigor e objectividade na utilização do método esclerométrico, assim como, na interpretação dos resultados obtidos por este método na estimativa da resistência de elementos de betão. Será aplicado o método preconizado na NP EN 13791:2008 a dois tipos de betão utilizados na indústria de prefabricação. Os resultados serão comparados com os resultados de outro método indirecto de determinação da resistência do betão *in situ*, o método da determinação da velocidade de propagação de ultras-sons no betão. Por fim, será avaliada também a fiabilidade da utilização combinada dos dois métodos indirectos na obtenção da resistência à compressão *in situ*.

Palavras-chave: Betão, Resistência à compressão, Ensaios não destrutivos, Esclerómetro, Ultra-sons,

ABSTRACT

Concrete is the most common material used in construction, which is typically characterized by its compressive strength. In situ compressive strength is influenced by numerous parameters, related with the material, geometry of concrete elements, loading conditions and exposure conditions.

Estimation of in situ concrete strength is frequently required. Usually, this assessment is carried out using core sample extraction and testing. However, this method is time-consuming, expensive, and partially destructive. Therefore, non-destructive testing methods are a growing alternative due to their low cost, quickness and small damage associated.

Schmidt hammer test is a non-destructive procedure for assessing the superficial hardness, which is then correlated with the compressive strength. Despite being a wide-spread method, there are a number of parameters that influence the accuracy of the results, which are not taken into account on the correlation curves provided by the equipment manufacturer. Variables such as carbonation conditions, concrete thickness, surface roughness, and the hammer rebound direction, all condition the results, eventually leading to misleading conclusions.

The present work aims at increasing the accuracy and objectivity on the use of rebound hammer test to assess concrete compressive strength. Standard NP EN 13791:2008 was applied to two concrete mixtures in precast industry. Results were then compared with those from another indirect method for assessing in situ compressive strength based on the velocity propagation of ultrasonic waves. Finally, the combined use of both methods is addressed.

Keywords: Concrete, compressive strength, Non-destructive testing, rebound hammer, Ultrasonic.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Estruturação do trabalho.....	3
2 ESTADO DO CONHECIMENTO NO DOMÍNIO	4
2.1 Nota introdutória	4
2.2 Ensaios não destrutivos	4
2.3 Ensaio esclerométrico.....	5
2.3.1 Descrição do ensaio.....	6
2.3.2 Equipamento.....	6
2.3.3 Campo de aplicação do esclerómetro	7
2.3.4 Factores que influenciam os resultados do ensaio.....	7
2.3.5 Limitações e utilidade do esclerómetro	10
2.3.6 Correlações	10
2.4 Ensaio de ultra-sons.....	11
2.4.1 Descrição do ensaio	12
2.4.2 Equipamento.....	13
2.4.3 Campo de aplicação dos ultra-sons	14
2.4.4 Factores que influenciam os resultados do ensaio.....	15
2.4.5 Limitações e utilidade dos ultra-sons	18
2.4.6 Correlações	18
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.1 Caracterização dos betões utilizados	19
3.2 Composições dos betões.....	20
3.2.1 Cimento CEM II/A-L 42,5R.....	21
3.2.2 Agregados.....	22
3.2.3 Adjuvantes	24
3.2.4 Cinzas	24
3.3 Execução de provetes	25
3.3.1 Betonagem dos provetes cúbicos.....	25
3.3.2 Cura dos provetes cúbicos	26
3.3.3 Betonagem e cura das vigas.....	26
3.4 Procedimento dos ensaios realizados	28
3.4.1 Determinação do índice esclerométrico	28
3.4.2 Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons no betão	30
3.4.3 Ensaios de resistência à compressão	32
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	34

4.1 Resistência à compressão dos betões	34
4.2 Ensaio esclerométrico.....	36
4.2.1 Determinação dos índices esclerométricos.....	36
4.2.2 Evolução dos índices esclerométricos	37
4.2.3 Correlação $f_c \times IE$ – abordagem tipo1 NP EN 13791:2008	38
4.2.4 Correlação $f_c \times IE$ – abordagem tipo2 NP EN 13791:2008	41
4.2.5 Comparação entre as curvas de correlação.....	46
4.2.6 Comparação com outros trabalhos publicados	47
4.3 Ensaio de ultra-sons.....	48
4.3.1 Determinação da velocidade de propagação de Ultra-Sons	48
4.3.2 Evolução da velocidade de propagação de Ultra-sons	49
4.3.3 Correlação $f_c \times V$ – abordagem tipo1 NP EN 13791:2008	50
4.3.4 Correlação $f_c \times V$ – abordagem tipo2 NP EN 13791:2008	51
4.3.5 Comparação entre as curvas de correlação.....	54
4.3.6 Comparação com outros trabalhos publicados	54
4.4 Obtenção das correlações múltiplas	56
4.5 Determinação da resistência nas vigas prefabricadas.....	58
5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	60
5.1 Conclusão	60
5.2 Recomendação para trabalhos futuros.....	62
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXOS	
Anexo A - Determinação da resistência à compressão nos provetes cúbicos	A1
Anexo B - Determinação do índice esclerométrico para a posição do esclerómetro na horizontal nos provetes cúbicos.....	A2
Anexo C - Determinação do índice esclerométrico para a posição do esclerómetro na vertical (descendentes) e nos provetes cúbicos	A3
Anexo D - Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes cúbicos	A4
Anexo E - Determinação do índice esclerométrico e da velocidade de propagação de ultra-sons nas vigas prefabricadas.....	A5

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esclerómetro de Schmidt (Proceq@, 2012).....	5
Figura 2.2 - Corte esquemático do esclerómetro de Schmidt (ACI 228.1R-03, 2003).....	6
Figura 2.3 - Impressões deixadas pelo esclerómetro no betão com 8h (esq.) e 3 dias (dir.) (Malhotra, 2004).....	8
Figura 2.4 - Gráfico de correlações típico de um esclerómetro tipo N/NR (Proceq@, 2012).	11
Figura 2.5 - Equipamento de ensaio de ultra-sons (Proceq@, 2012).....	12
Figura 2.6 - Tipo de transmissão de ultra-sons (adaptado Naik et al 2004).....	13
Figura 2.7 - Esquema de funcionamento de um aparelho de medição de ultra-sons.....	14
Figura 3.1 - Valores médios indicativos da resistência à compressão do betão fabricado com 350 Kg/m ³ de cimento CEM II/A-L 42,5R (Adaptado Secil@, 2012).....	21
Figura 3.2 - Curvas granulométricas dos agregados dos utilizados.....	22
Figura 3.3 - Curva granulométrica da mistura de agregados.....	23
Figura 3.4 - Provetes cúbicos utilizados na campanha experimental.....	25
Figura 3.5 - Agulha vibratória utilizada na vibração dos provetes.....	25
Figura 3.6 - Provetes executados em cada betonagem.....	26
Figura 3.7 - Câmara de cura do laboratório de geotecnia da FCT-UC.....	26
Figura 3.8 - Aspectos da construção das vigas prefabricadas.....	27
Figura 3.9 - Geometria das vigas utilizadas nos ensaios Esclerométrico e de ultra-sons.....	28
Figura 3.10 - Cortes das vigas nas secções de realização do ensaios.....	28
Figura 3.11 - Esclerómetro utilizado na campanha experimental.....	29
Figura 3.12 - Esquema das zonas de ensaio.....	29
Figura 3.13 - Realização de ensaios esclerométricos nos provetes cúbicos.....	30
Figura 3.14 - Equipamento de transmissão de ultra-sons (PUNDIT).....	31
Figura 3.15 - Determinação das medidas dos provetes cúbicos e seus pesos.....	32
Figura 3.16 - Ensaio de provete cúbico na prensa AMSLER.....	33
Figura 3.17 - Rotura satisfatória de provetes cúbicos.....	33
Figura 3.18 - Rotura não satisfatória de provetes cúbicos.....	33
Figura 4.1 - Desenvolvimento das resistências dos betões.....	36
Figura 4.2 - Desenvolvimento dos valores médios do índice esclerométrico.....	38
Figura 4.3 - Curva de correlação entre f_c e IE (horizontal).....	40
Figura 4.4 - Comparação entre curvas de correlação com diferentes orientações de ensaio...	41
Figura 4.5 - Esquema da determinação do deslocamento da curva de base Δf (NP EN 13791:2008).....	43

Figura 4.6 Curvas de correlação entre f_c e IE para a abordagem com base numa curva de referência.....	45
Figura 4.7 - Comparação entre os dois tipos de correlação entre f_c e IE – Betão B1.....	46
Figura 4.8 - Comparação entre os dois tipos de correlação entre f_c e IE – Betão B2.....	46
Figura 4.9 - Previsão da resistência à compressão por outros autores – Betão B1.....	47
Figura 4.10 - Previsão da resistência à compressão por outros autores – Betão B2.....	48
Figura 4.11 - Desenvolvimento dos valores médios da velocidade de propagação de ultrasons no betão.....	49
Figura 4.12 - Curva de correlação entre f_c e V.....	51
Figura 4.13 - Curvas de correlação entre f_c e V para a abordagem com base numa curva de referência.....	53
Figura 4.14 - Comparação entre os dois tipos de correlação entre f_c e V – Betão B1.....	54
Figura 4.15 - Comparação entre os dois tipos de correlação entre f_c e V – Betão B2.....	54
Figura 4.16 - Previsão da resistência à compressão por outros autores – Betão B1.....	55
Figura 4.17 - Previsão da resistência à compressão por outros autores – Betão B2.....	55
Figura 4.18 - Representação tridimensional dos resultados experimentais dos provetes cúbicos.....	56
Figura 4.19 - Representação gráfica das correlações com base nos métodos combinados.....	58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Normas de referência para os ensaios não destrutivos.....	5
Quadro 2.2 - Qualidade do betão em função da UPV.....	15
Quadro 2.3 - Dimensões laterais mínimas do provete para a utilização de ultra-sons.....	17
Quadro 3.1 - Características dos betões utilizados.....	19
Quadro 3.2 - Composição do Betão B1.....	20
Quadro 3.3 - Composição do Betão B2.....	20
Quadro 3.4 - Valores médios da resistência à compressão do betão fabricado com 350 Kg/m ³ de cimento CEM II/A-L 42,5R (Adaptado Secil@, 2012).....	21
Quadro 3.5 - Distribuição granulométrica da mistura de agregados.....	23
Quadro 4.1 - Valores da resistência à compressão do betões.....	35
Quadro 4.2 - Índices esclerométricos dos provetes cúbicos ($\alpha=0$).....	37
Quadro 4.3 - Grau de correlação.....	39
Quadro 4.4 - Resultados da correlação entre f_c e IE(Horizontal) - Betão B1.....	39
Quadro 4.5 - Resultados da correlação entre f_c e IE(Horizontal) - Betão B2.....	39
Quadro 4.6 - Resultados da correlação entre f_c e IE v (Vertical) - Betão B1.....	40
Quadro 4.7 - Resultados da correlação entre f_c e IE v (Vertical) - Betão B2.....	40
Quadro 4.8 - Valores de K_1	43
Quadro 4.9 - Determinação do deslocamento da curva de base Δf - Betão B1.....	44
Quadro 4.10 - Determinação do deslocamento da curva de base Δf - Betão B2.....	45
Quadro 4.11 - Correlações $f_c \times IE$ propostas por outros autores.....	47
Quadro 4.12 - Velocidade de propagação dos ultra-sons no betão.....	49
Quadro 4.13 - Resultados da regressão não linear simples entre f_c e V para o betão B1.....	50
Quadro 4.14 - Resultados da regressão não linear simples entre f_c e V para o betão B2.....	51
Quadro 4.15 - Determinação do deslocamento da curva de base Δf - Betão B1.....	52
Quadro 4.16 - Determinação do deslocamento da curva de base Δf - Betão B2.....	53
Quadro 4.17 - Funções de correlação propostas por outros autores.....	55
Quadro 4.18 - Correlação entre f_c , IE e V para o betão B1.....	57
Quadro 4.19 - Correlação entre f_c , IE e V para o betão B2.....	57
Quadro 4.20 - Correlações utilizadas para a determinação da resistência do betão <i>in situ</i>	58
Quadro 4.21 - Valores de resistências nas vigas.....	59

SIMBOLOGIA

a/l – Relação água ligante (% em peso)

CV – Coeficiente de variação (Média/Desvio padrão)

f_c – Resistência à compressão do betão *in situ* (MPa)

IE – Índice esclerométrico com o esclerómetro na posição horizontal ($\alpha=0^\circ$)

IE_v – Índice esclerométrico com o esclerómetro na posição vertical ($\alpha=90^\circ$)

PUNDIT – Equipamento de transmissão de ultra-sons

R² – Coeficiente de Correlação

S – Desvio padrão da amostra

UPV – Velocidade de propagação de ultra-sons

V – Velocidade de propagação dos ultra-sons no betão (Km/s)

$\delta f_{m(n)}$ – Média das diferenças entre a resistência de cada carote e a resistência dada pela secção de base

Δf – Deslocamento da curva de base

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O betão é o material mais utilizado na construção pelo que é de grande importância conhecer plenamente as suas características. Num projecto de estruturas de betão a resistência à compressão do mesmo é a característica pela qual todo o dimensionamento da estrutura é elaborado. No entanto, devido às suas composições e heterogeneidade existem muitos factores que podem influenciar a sua resistência à compressão.

A conformidade da resistência à compressão do betão colocado nas estruturas é efectuada, normalmente, recorrendo-se a ensaios de compressão aos 28 dias de provetes normalizados do mesmo betão aplicado na estrutura, mas curado sobre formas normalizadas. Segundo Gonçalves (1986), a resistência determinada pela compressão dos provetes aos 28 dias designa-se por resistência potencial enquanto a resistência observada na estrutura designa-se por resistência real.

Em muitos casos existem discrepâncias entre os valores reais (dos ensaios *in situ*) e os valores potenciais (rebentamento aos 28 dias), estas discrepâncias podem dever-se ao modo de cura dos betões, a forma de aplicação, a falta de compactação, diferença de maturidade, de grau de humidade, a não homogeneidade da mistura, às diferentes condições de cura, entre outros aspectos (Bungey, e Millard, 1996).

Ora, a necessidade de conhecer a resistência real *in situ* é uma realidade. Essa necessidade advém de diversos factores tais como: a de não existência de provetes de controlo; os resultados dos provetes de controlo não apresentarem resultados satisfatórios; quando existem dúvidas acerca da qualidade do betão na estrutura; quando existem diferentes funções na estrutura para a qual não estava projectada ou em situações em que existe uma expectável diminuição da resistência (corrosões, incêndio ou explosão) (Gonçalves, 1986).

Quando existe necessidade de determinar a resistência real *in situ*, dispomos de três tipos de métodos que determinam a resistência real do betão em estruturas. Esses métodos são os ensaios de carga, os ensaios semi-destrutivos e os ensaios não destrutivos. Os ensaios de carga apenas podem ser realizados em alguns elementos singulares como vigas ou lajes. Os ensaios semi-destrutivos são essencialmente ensaios em que são retirados carotes que posteriormente são avaliados à compressão, estes ensaios, embora se designem semi-destrutivos, podem provocar consequências sérias à estrutura, como no caso de execução de carotes em pilares de secção reduzida diminuindo significativamente a estabilidade do elemento. Por fim, os ensaios não destrutivos são ensaios em que a resistência real do betão não é medida

directamente no ensaio, mas sim através de outro parâmetro que é correlacionado com a resistência aferida nos ensaios de compressão dos carotes retirados da própria estrutura. Por conseguinte, existe a necessidade da escolha dos métodos a ensaiar.

A escolha de um método a ensaiar para a determinação da resistência *in situ* do betão deve levar em consideração factores como a disponibilidade de equipamentos, o preço, a rapidez de execução, os danos provocados na estrutura e a precisão dos resultados. Neste contexto, os ensaios não destrutivos apresentam vantagens relativamente aos outros ensaios: reduzidos danos provocados na estrutura, imediata disponibilidade de resultados, rapidez de execução, baixos custos de aquisição dos equipamentos e de operacionalidade dos mesmos.

A utilização de ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos implica a obtenção de uma correlação entre a resistência à compressão *in situ* e os parâmetros medidos pelos ensaios indirectos. Com a publicação da norma NP EN 13791:2008 sobre a avaliação de resistência de betão nas estruturas, Portugal passou a ter duas abordagens para a avaliação da resistência do betão *in situ*: uma abordagem baseada na determinação da resistência com base em ensaios de carotes retirados da estrutura e outra com a obtenção de curvas de correlação entre os ensaios de compressão *in situ* e os ensaios indirectos (ultra-sons, esclerómetro e “pull-off”).

Em relação à segunda abordagem da NP EN 13791:2008 (curvas de correlação entre os ensaios de compressão *in situ* e os ensaios indirectos), além de permitir que não se recorra a utilização de um grande número de carotes, esta permite avaliar praticamente toda a uniformidade da estrutura.

Em grande número, estes ensaios indirectos apresentam uma grande variabilidade de resultados influenciada pela existência de muitas variáveis no betão (dimensão de inerte, tipo de inerte, tipo de cura, idade do betão, etc.), pelo que importa sabermos qual a sua aplicabilidade, bem como as suas limitações na aplicação da presente norma. No presente trabalho foi executada uma campanha experimental com vista à determinação da resistência *in situ* baseada na obtenção de curvas de correlação entre os ensaios de compressão *in situ* e os ensaios indirectos. Os ensaios indirectos efectuados no presente trabalho foram o ensaio de ultra-sons e o ensaio esclerométrico.

1.2 Objectivos

Este trabalho tem como objectivo principal contribuir para um maior rigor e objectividade na utilização do método esclerométrico e do método de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons no betão para a estimativa da resistência de elementos de betão.

Ao longo do mesmo, pretende-se, de igual modo, avaliar a aplicabilidade da norma NP EN 13791:2008 na utilização das duas abordagens disponíveis para a obtenção de curvas de correlação.

1.3 Estruturação do trabalho

O presente trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos cujo conteúdo seguidamente descreve-se sucintamente:

No capítulo I, é realizada a introdução ao tema, definidos os objectivos traçados, bem como é apresentada a estrutura geral do trabalho.

O capítulo II alude ao estado do conhecimento no domínio e a revisão bibliográfica, nele se descrevem, também, os ensaios utilizados, as suas aplicações, bem como as suas limitações mais comuns.

No capítulo III, são descritas as metodologias dos ensaios utilizados, nele se vão descrevendo as técnicas utilizadas, os materiais utilizados, os betões usados e os equipamentos empregados.

O capítulo IV é dedicado ao tratamento de dados e análise dos resultados. Este capítulo está subdividido de acordo com os diferentes ensaios utilizados.

No capítulo V é apresentado um resumo das considerações finais mais relevantes do trabalho, bem como são propostas recomendações para futuros trabalhos na área.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO NO DOMÍNIO

2.1 Nota introdutória

Neste capítulo são descritos os ensaios não destrutivos realizados na campanha experimental elaborada no decorrer do presente trabalho. É apresentado o ensaio esclerométrico e o ensaio de ultra-sons. Descrever-se-á também, a aplicabilidade dos ensaios, as suas limitações e cuidados a ter na realização dos mesmos.

2.2 Ensaio não destrutivos

Os ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos são todos os ensaios que podem ser usados para avaliar o elemento estrutural *in situ* sem que o elemento tenha grandes danos durante a realização do mesmo que possam significar a perda de funcionalidade ou mesmo a alteração de aparência (Malhotra, 1984).

Os ensaios não destrutivos permitem uma rápida avaliação do elemento estrutural *in situ*, não provocando danos significativos na estrutura, revelam-se mais económicos e possibilitam uma grande amostragem de resultados que também é obtida de uma forma praticamente imediata. Permitem quantificar propriedades tão variadas tais como: a densidade (ensaio de ultra-sons), módulo de elasticidade, dureza superficial, maturidade, resistência a penetração, entre outras que permitem estabelecer correlações com a resistência à compressão do betão.

Segundo Gonçalves (1986), os ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos para a estimação da resistência *in situ* do betão podem agrupar-se em duas grandes categorias:

- Métodos caracterizados por um parâmetro não destrutivo e que não medem directamente a resistência, mas outra propriedade do betão com a qual se pode estabelecer correlações empíricas.
- Métodos que medem um dado tipo de resistência que se relaciona com a resistência à compressão ou a flexão do betão.

Na primeira categoria incluem-se os métodos elaborados neste trabalho que se baseiam na medição da dureza superficial (ensaio esclerométrico) e na velocidade de propagação de ondas (ensaio de ultra-sons), no entanto ainda existem outros métodos como os que se baseiam na resistência a penetração e no método da maturidade. Na segunda categoria, tem-se os ensaios de arranque e os ensaios de tracção directa ou por flexão.

Os ensaios não destrutivos podem ser aplicados em estruturas antigas assim como estruturas novas. Em estruturas novas estes podem servir para uma monitorização da evolução das resistências da estrutura, esclarecimento de incertezas quanto à conformidade do material fornecido ou ainda no controlo da qualidade de produção *in situ* e em prefabricação, etc. Em edifícios antigos estes servem principalmente para aferir sobre a integridade das estruturas, bem como sobre a capacidade de resistência a novas solicitações para as quais não haviam sido dimensionadas.

As normas de referência para a execução dos ensaios não destrutivos utilizados no presente trabalho encontram-se no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Normas de referência para os ensaios não destrutivos

Tipo de Ensaio	ASTM	BS	NP EN
Ensaio Esclerométrico	C 805-94 (1991)	1881 :Part 202 (1986)	12504 – 2 (2003)
Ensaio de determinação de velocidade de propagação de ultra-sons	C 597-83 (1991)	1881 :Part 203 (1986)	12504 – 4 (2007)

2.3 Ensaio esclerométrico

Em 1948 o engenheiro suíço Ernst Schmidt desenvolveu um aparelho conhecido como martelo de Schmidt que permitia testar a dureza superficial do betão (Crawford, 1997; Branco, 1956). Este ensaio, conhecido por ensaio esclerométrico, é um ensaio de medição da dureza superficial, que com a existência de correlações adequadas correlaciona a dureza superficial do betão com a sua resistência à compressão. Neste ensaio é medido o recuo de uma massa incidente após o choque com uma superfície. O recuo será tanto maior quanto maior for a dureza da superfície do betão.

Apesar de ser um dos ensaios não destrutivos mais antigos é ainda um dos mais utilizados, tal acontece devido ao baixo custo que este aparelho tem, aliado à facilidade e simplicidade de manusear bem como a rapidez a avaliar e ter resultados da uniformidade do betão (OZ-Diagnóstico@, 2012a). Na Figura 2.1 pode-se verificar o aspecto actual de um esclerómetro.



Figura 2.1 - Esclerómetro de Schmidt (Proceq@, 2012)

2.3.1 Descrição do ensaio

No ensaio esclerométrico uma massa impelida por uma mola, que possui uma quantidade de energia devido a extensão da mola, embate contra um percutor em contacto com a superfície do betão a ensaiar, e por sua vez sofre um recuo. Esse recuo é o resultado do ensaio expresso através de um índice (índice esclerométrico), que é uma medida de recuo do martelo (Bungey, 1992; Branco, 1956; IAEA, 2002).

O recuo do martelo depende da energia cinética presente na massa e na mola do esclerómetro, bem como na quantidade de energia que será absorvida pelo betão na altura do embate. Existe uma parte de energia absorvida pela fricção mecânica decorrente da utilização do aparelho, no entanto a restante energia é absorvida na interacção do percutor com o betão. A interacção entre o percutor e a superfície do betão é o que possibilita a utilização do índice esclerométrico para aferição das propriedades do betão. A energia absorvida pelo betão durante o impacto está relacionada com o seu módulo de elasticidade e correspondente relação tensão-deformação pelo que, está relacionada com a resistência do betão (ACI 228.1R-03, 2003). Na Figura 2.2 pode ser visto o corte esquemático do esclerómetro durante o ensaio.

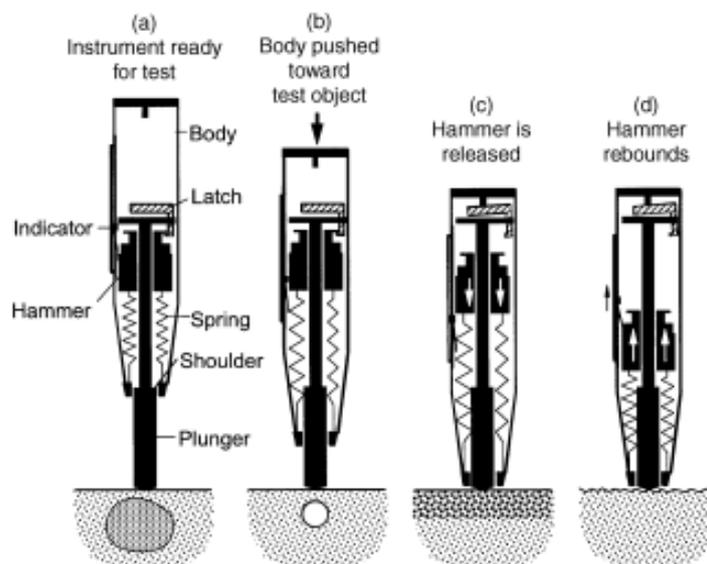


Figura 2.2 - Corte esquemático do esclerómetro de Schmidt (ACI 228.1R-03, 2003)

2.3.2 Equipamento

O equipamento para a realização dos ensaios esclerométricos é composto pelo esclerómetro, bigorna de calibração e pedra abrasiva (IAEA, 2002; André 2007a). Apesar de existir uma gama abrangente de esclerómetros, cada tipo de esclerómetro deve ser utilizado exclusivamente com a classe de resistência e o tipo de betão para os quais foi destinado (NP

EN 12504-2, 2003). De forma a fazer face a esse requisito existem diversos tipos de esclerómetros comercializados para cobrir a variedade de tipos de betões existentes no sector da construção civil. O esclerómetro mais utilizado é o de Tipo N que possui uma energia de impacto de 2,2 J e é utilizado para o controlo do betão em edifícios correntes e pontes, este é, pois, o utilizado no decorrer do presente trabalho.

A pedra abrasiva tem por objectivo a regularização das superfícies de ensaio para que fiquem o mais uniformes possível, de forma a não influenciarem o resultado. Segundo a NP EN 12504-2 (2003), a pedra abrasiva tem de ser uma pedra de carboneto de silício com grão de textura média ou material equivalente.

A bigorna para a verificação e calibração do esclerómetro é uma bigorna fabricada em aço com uma dureza mínima de 52 HRC (dureza Rocwell tipo C), uma massa de 16+/- 1 kg e um diâmetro de 150mm (NP EN 12504-2, 2003). Segundo André (2007a), apesar da norma de referência portuguesa não contemplar essa informação, deve ser aconselhável que a bigorna apresente uma forma esférica especialmente adaptada à superfície de impacto do percutor de forma a garantir estabilidade das leituras relativas aos índices esclerométricos esperados.

2.3.3 Campo de aplicação do esclerómetro

A norma NP EN 12504-2 (2003) define a forma de utilização do esclerómetro e da determinação do valor do índice esclerométrico em Portugal e na União Europeia. Segundo a norma anterior, o índice resultante do ensaio esclerométrico pode ser utilizado para a avaliação da uniformidade de um betão *in situ*, delimitando zonas com qualidade inferior ou com betão degradado, no entanto define que este ensaio não constitui uma alternativa para a determinação da resistência à compressão do betão, mas com uma correlação adequada pode permitir uma estimativa da resistência do betão *in situ*.

A norma NP – EN 13791:2008 define o procedimento para a verificação e determinação da resistência do betão *in situ*, segundo essa norma o ensaio esclerométrico pode ser utilizado em conjunto com o uso de ensaio de carotes para a determinação da resistência à compressão do betão fazendo para isso uma correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão dos carotes através de duas formas, a correlação directa entre os dados do ensaio ou o ajuste de uma curva de referência.

2.3.4 Factores que influenciam os resultados do ensaio

Vários factores podem influenciar os resultados na determinação do índice esclerométrico, tais como factores como o próprio aparelho, a pessoa que faz o ensaio, ou a heterogeneidade do betão, no entanto destaquem-se os seguintes:

- Condições da superfície a ensaiar:

Crawford (1997) indica que a rugosidade da superfície tem um efeito de extrema importância na precisão dos resultados. Um ensaio realizado sobre uma superfície rugosa poderá fazer com que a ponta do percutor cause um esmagamento excessivo que não corresponderá à real situação dos resultados, conduzindo a um valor de índice esclerométrico inferior ao que seria expectável na condição de superfície lisa (Brozovsky, e Zach, 2011).

- Idade do betão a ensaiar

Segundo Crawford (1997) Bungey e Millard (1996), deve ter-se especial precaução na realização dos ensaios em provetes com menos de três dias de idade ou uma resistência à compressão menor do que 7 MPa, uma vez que o betão ainda apresenta uma dureza superficial muito baixa e por isso o índice esclerométrico resultante terá um erro muito grande, e também, nesse caso, o esclerómetro poderá deixar a sua impressão bem distinta no betão. Na Figura 2.3 visualizam-se as impressões que o esclerómetro pode deixar no betão para idades jovens.

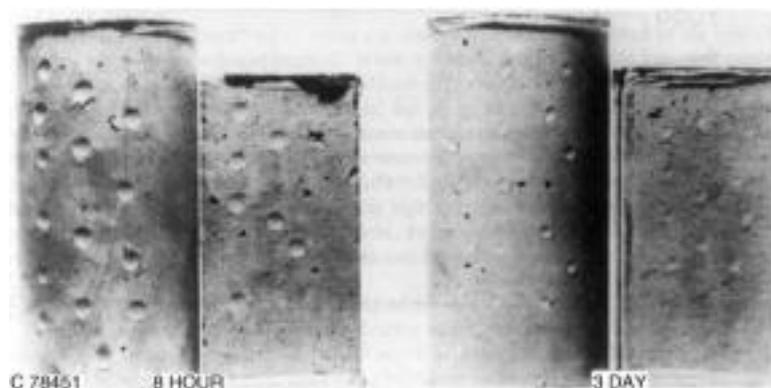


Figura 2.3 - Impressões deixadas pelo esclerómetro no betão com 8h (esq.) e 3 dias (dir.) (Malhotra, 2004)

- Carbonatação da superfície do betão:

O índice esclerométrico é afectado significativamente pela carbonatação da camada superficial do betão. Segundo Crawford (1997), os valores do índice esclerométrico podem ser 50% superiores, aos valores para um betão carbonatado superficialmente em comparação com um mesmo betão não carbonatado. Os efeitos da carbonatação são mais graves em betões mais velhos quando a camada carbonatada pode atingir vários milímetros de espessura, e em casos extremos ter 20mm (Kim et al, 2009). Nesses casos devem ser tomados em conta factores correctivos sob pena de o valor da resistência do betão ser estimado em excesso (Malhotra, 2004).

- Tipo de cimento utilizado:

De acordo com Crawford (1997), o tipo de cimento afecta significativamente as leituras no esclerómetro. Betões realizados com cimentos aluminosos podem ter valores de resistência à compressão cerca de 100% mais elevados em relação aos obtidos por uma curva de correlação com base num betão feito com cimento Portland comum, enquanto betões feitos a partir de cimentos supersulfatados podem ter uma resistência 50% inferior ao verificado na correlação do método com o esclerómetro.

- Tipo de agregado utilizado:

O tipo de agregado utilizado, assim como a presença de vazios, influenciam o valor do resultado do índice esclerométrico. Se o ensaio se realizar numa zona de presença de vazios irá conduzir a um recuo menor e por consequência o índice apresentará um resultado menor. Por contraste, se o ensaio se realizar sobre um agregado o índice será maior. A dureza do agregado também é importante pois se o resultado se realizar num betão com a mesma resistência de um betão modelo, mas com agregados mais duros, este apresentará índices esclerométricos maiores. (Pereira, 1999). Segundo Bungey e Millard (1996), um betão com agregado de calcário triturado pode conduzir a um número significativamente menor de resalto (índice esclerométrico) em comparação com um betão de cascalho de resistências iguais, o que pode conduzir a uma diferença de resistência de 6-7 MPa.

- Orientação do ensaio:

A orientação do ensaio influencia o resultado do ensaio esclerométrico devido a acção da gravidade. Preferencialmente, o ensaio deve ser realizado numa posição horizontal e sempre perpendicularmente á superfície a ensaiar. A utilização de ensaios em posições verticais pode conduzir a resultados maiores e menores que o valor de referência para a posição horizontal (Branco, 1956; André, 2007a ; Malhotra, 2004).

- Variação da humidade das peças:

Segundo Crawford (1997) e Malhotra (2004), o teor de humidade do betão tem efeito nos resultados do ensaio esclerométrico. Os testes efectuados em provetes saturados mas com a superfície seca conduzem, no geral, a índices esclerométricos menores que os de provetes secos ao ar.

- Movimentos do elemento a ensaiar:

Elementos que não pertençam a uma estrutura fixa devem estar rigidamente ligados de forma a não conduzirem a movimentações da peça. Segundo Crawford (1997), qualquer movimento da peça causado pelo impacto do esclerómetro na superfície de ensaio resulta na diminuição do índice esclerométrico. Bungey e Millard (1996) afirmam que não basta existir uma ligação rígida do elemento à estrutura mas que a massa efectiva do elemento em teste deve ser suficientemente grande para evitar que este sofra também vibração causada pelo impacto do martelo. A massa de provetes pode ser efectivamente aumentada colocando esses provetes numa tensão de compressão na ordem de 15% da resistência à compressão espectável para o tipo de betão (Malhotra, 2004).

2.3.5 Limitações e utilidade do esclerómetro

O martelo desenvolvido por Schmidt é um método barato e rápido para o teste não destrutivo de betão no laboratório e *in situ* (Qasrawi, 2000), no entanto as suas limitações devem ser reconhecidas e tidas em conta na utilização do esclerómetro (Bungey e Millard, 1996).

Segundo Malhotra (2004) e Gonçalves (1986), o esclerómetro não pode ser considerado como um substituto dos ensaios de compressão normalizados sobre carotes, mas sim como um método para determinar a uniformidade do betão em estruturas, comparando uma dada zona do betão com outras zonas diminuindo, assim, o número de carotes necessários a executar na estrutura (NP EN 12504-2, 2003).

O índice esclerométrico apenas avalia a qualidade do betão numa camada muito superficial não sendo possível a distinção de zonas internas mais fracas, a camada que avalia é de até 30mm segundo a BS 1881:Part 202 (1986), no entanto Malhotra (2004) e Qasrawi (2000) afirmam que essa camada pode ser superior até um máximo de 50mm.

A estimativa da resistência de betão pelo método esclerométrico pode ser possível com um precisão na ordem de +/- 15 a 20%, mas somente para determinadas amostras, curadas e ensaiadas em condições semelhantes, às amostras das quais foram estabelecidas as curvas de correlação do equipamento (Malhotra, 2004). No entanto, estes desvios de precisão podem ser reduzidos se for desenvolvida uma correlação entre o betão a testar em vez de recorrer as correlações fornecidas pelo fabricante do esclerómetro (Malhotra, 2004).

2.3.6 Correlações

Para o estabelecimento de uma curva de correlação existem muitos métodos, no entanto, segundo André (2007a), um procedimento simples consiste em elaborar vários provetes

cúbicos de um determinado betão e realizar sobre os mesmos o ensaio esclerométrico de acordo com a NP EN 12504-2 (2003), posteriormente proceder ao ensaio desses cubos numa máquina de ensaios à compressão. Com cada par de resultados dos ensaios à compressão e ensaios esclerométricos consegue-se construir um gráfico com relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão.

Normalmente, os esclerómetros já trazem no próprio aparelho um gráfico com correlações entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão para diversas posições de ensaio, no entanto estas correlações apenas são válidas para a gama de betões e idades com que foram obtidas as correlações. Na Figura 2.4 uma correlação típica de um esclerómetro.

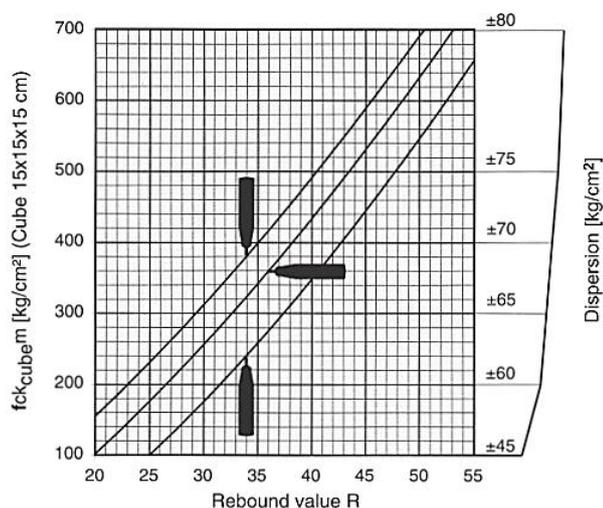


Figura 2.4 - Gráfico de correlações típico de um esclerómetro tipo N/NR (Proceq®, 2012)

2.4 Ensaio de ultra-sons

O ensaio de ultra-sons é um ensaio totalmente não destrutivo, que não provoca qualquer tipo de danos causados no betão nem sequer na superfície. É um ensaio que consiste na determinação da velocidade de propagação de uma onda ultra-sónica, entre dois pontos de medida (OZ-Diagnóstico®, 2012b).

A variável em que é expresso o resultado deste ensaio é a velocidade de propagação de ondas (V) calculada através da seguinte expressão:

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

onde,

V, é a velocidade de propagação de ultra-sons, L o comprimento do percurso e T é o tempo de percurso.

Segundo Gonçalves (1986), a primeira referência a este tipo de ensaio surge em 1877 quando Rayleigh demonstrou que existia uma relação entre a velocidade de propagação de ondas num corpo e o módulo de elasticidade do corpo. No entanto, só entre 1938 e 1940 existiram as primeiras tentativas de aplicação deste método com Powers, Obert, Hornibrook e Thomson a serem os primeiros a utilizar o método, contudo o equipamento de medida não era muito preciso o que provocava erros grosseiros (Naik et al, 2004).

Após a II guerra mundial, houve um grande aumento na investigação dos testes não destrutivos usando ultra-sons, situação que conduziu ao desenvolvimento de equipamentos cada vez mais fiáveis e robustos sendo que, em 1980, os equipamentos já eram semelhantes aos que se utilizam actualmente (Naik et al, 2004).

Na Figura 2.5 é apresentado um equipamento de ensaio de ultra-sons comercializado actualmente pela empresa Proceq.



Figura 2.5 - Equipamento de ensaio de ultra-sons (Proceq@, 2012)

2.4.1 Descrição do ensaio

Antes da descrição do ensaio importa referir o tipo de transmissão de ultra-sons existente uma vez que este afecta a forma de realização do ensaio. A norma NP EN 12504-04 (2007) estabelece que existem três tipos de transmissão de ultra-sons possíveis (Figura 2.6), a transmissão directa em que os transdutores são colocados em face opostas, a transmissão semi-directa em que os transdutores são colocados em faces perpendiculares e a transmissão indirecta em que os transdutores são colocados na mesma face (Abo-Qudais, 2005).

Na transmissão directa e semi-directa o processo de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons está de acordo com a equação 2.1, em que com o comprimento determinado entre a posição dos transdutores e com o tempo medido pelo aparelho consegue-se determinar a velocidade de propagação de ultra-sons. Na transmissão indirecta não é conhecida nenhuma distância entre os transdutores pelo que o processo passa pela colocação dos transdutores com diversas distâncias entre eles por forma a retirar os tempos de percurso, ora, com esses dados constrói-se uma recta em que o declive representa a velocidade de

propagação de ultra-sons no betão. O método indirecto não é utilizado no presente trabalho pois este conduz a maiores erros e incertezas, no entanto o processo de determinação da velocidade quando a transmissão é indirecta encontra-se descrito na NP EN 12504-04 (2007).

Este ensaio começa com a marcação das zonas onde se coloca os transdutores, após a qual se mede o comprimento de percurso com uma exactidão de $\pm 1\%$.

A calibração do aparelho é efectuada fazendo uma leitura do tempo de percurso numa barra na qual está predefinido o tempo de percurso de ultra-sons e regulando o aparelho por forma a apresentar esse valor de tempo de percurso.

Neste ensaio deve-se garantir um contacto adequado entre o betão e os transdutores, para isso, e previamente à colocação dos transdutores, coloca-se uma camada muito fina de um produto de ligação (Abo-Qudais,2005). Seguidamente, coloca-se os transdutores em posição e pressiona-se contra a superfície de betão de forma a diminuir a camada de produto de ligação. Estabelecida a ligação entre os transdutores e o betão, regista-se o tempo de percurso fornecido no mostrador digital. Com o tempo determinado e medida a distância entre transdutores, retira-se a velocidade de propagação de ultra-sons no betão (equação 2.1).

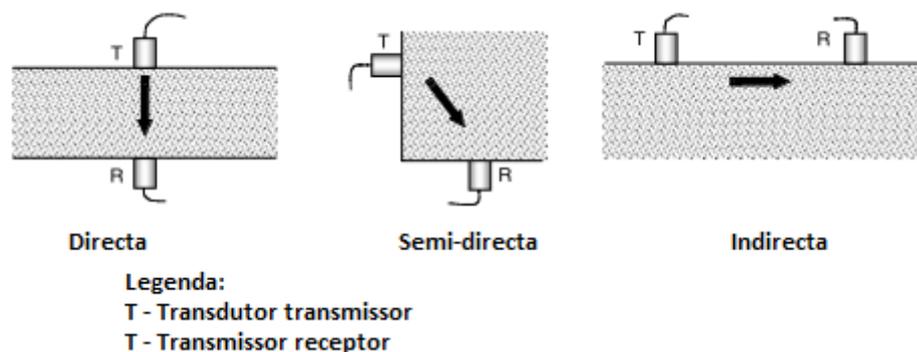


Figura 2.6 - Tipo de transmissão de ultra-sons (adaptado Naik et al 2004)

2.4.2 Equipamento

Os aparelhos de ultra-sons são constituídos por (Gonçalves, 1986; Naik et al 2004; Bungey e Millard, 1996; Pereira, 1991):

- Um gerador de impulsos que gera impulsos eléctricos repetidos e os envia pelo cabo de conexão para o transdutor emissor.
- Um transdutor emissor que recebe os impulsos eléctricos emitidos pelo gerador de impulsos e os transforma em ondas ultra-sónicas emitindo-as pelo betão.

- Um transdutor receptor que recebe as ondas ultra-sónicas e as transforma em impulsos eléctricos, transmitindo depois através de um cabo para um amplificador.
- Um amplificador que amplifica o sinal captado pelo transmissor receptor de forma a ser detectado pela unidade de medição do tempo.
- Uma unidade de medição do tempo que, após detectar o sinal de amplificação da onda por parte do amplificador, quantifica o intervalo de tempo entre a emissão da onda e a recepção.
- Um mostrador digital que mostra digitalmente o tempo decorrido entre a transmissão e a recepção da onda (tempo de percurso).

Um esquema genérico do funcionamento do equipamento é mostrado na Figura 2.7.

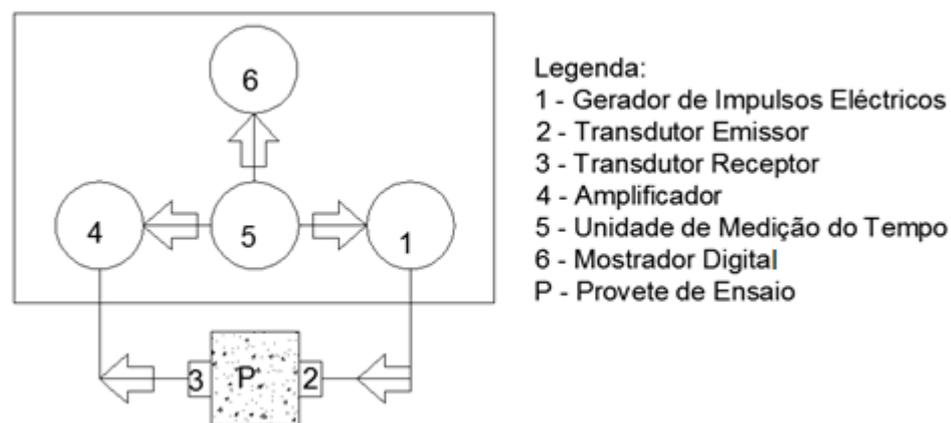


Figura 2.7 - Esquema de funcionamento de um aparelho de medição de ultra-sons

2.4.3 Campo de aplicação dos ultra-sons

O ensaio de medição de velocidade de propagação de ultra-sons pode, (segundo Gonçalves, 1986; Bungey e Millard, 1996; André, 2007b), ser utilizado para a medição da uniformidade do betão, a medição das mudanças ocorridas ao longo do tempo no betão, detecção e medição aproximada de fendas e vazios no betão e estimativa da resistência do betão.

A medição da uniformidade do betão pode ser efectuada com este método, pois ele permite mapear o betão por valores de velocidade de propagação; diferentes valores da velocidade de propagação indicam diferenças de resistências no betão (OZ-Diagnóstico@, 2012b).

O ensaio de medição de velocidade de propagação de ultra-sons é o único ensaio completamente não destrutivo, o que permite que se consiga efectuar ensaios numa zona de

ensaio mais do que uma vez permitindo, por conseguinte, acompanhar da evolução da estrutura (Bungey e Millard, 1996).

A existência de vazios ou fendas faz com que a onda ultra-sónica tenha de contornar esse defeito (pois a onda ultra-sonica não pode circular através do ar), fazendo com que exista uma redução de velocidade de propagação de ultra-sons, permitindo, em alguns casos, detectar esses defeitos. A norma NP EN 12504-4 (2007) estabelece a forma da sua determinação (André, 2007b).

A estimativa de resistência do método de medição de velocidade de ultra-sons apenas é válida se forem estabelecidas razoáveis correlações entre a velocidade de propagação de ultra-sons e a resistência à compressão para o próprio betão, no entanto esta forma de estimativa não tem grande popularidade quando comparada com outros métodos (Bungey e Millard, 1996).

De uma forma geral e genérica, poderemos classificar o betão, quanto à qualidade, de uma forma simples como efectuado por Qasrawi (2000) e Brozovsky, J. (2009), que utilizam o Quadro 2.2 para aferirem acerca da qualidade do betão.

Quadro 2.2 - Qualidade do betão em função da UPV

UPV (Km/s)	<2000	2000-3000	3000-3500	3500-4500	>4500
Qualidade do betão	Muito Fraco	Fraco	Duvidosa	Bom	Excelente

2.4.4 Factores que influenciam os resultados do ensaio

O uso de ultra-sons para analisar as características do betão deve apenas ser utilizado por pessoal qualificado para o efeito, pessoal que tenha experiência na realização do ensaio e da interpretação de resultados dado que existem diversos factores que influenciam os resultados do ensaio, são factores esses inerentes à constituição do próprio material ou mesmo da operação de realização do ensaio:

- Teor de humidade:

O teor de humidade no betão pode afectar severamente o resultado dos ensaios, dois provetes do mesmo betão submetidos a processos de cura diferentes (um com condições de cura normalizada e outro com uma cura ambiente) podem apresentar valores significativamente diferentes. Parte dessas diferenças advém das condições de cura durante a hidratação do cimento e outra parte devido a presença de água nos vazios (IAEA, 2002; NP EN 12504-4, 2007).

- Temperatura do betão:

Segundo IAEA (2002) e Crawford (1997), para valores de temperatura entre 10°C e 30°C não existem diferenças significativas entre os valores de velocidade obtidos, no entanto fora do intervalo de temperaturas estabelecido dever-se-ão efectuar correcções à velocidade de propagação.

- Contacto entre os transdutores e a superfície de betão:

Como referido já anteriormente, a ligação entre os transdutores e o betão revela-se muito importante, assim um mau contacto entre estes pode originar leituras erradas da velocidade de propagação dos ultra-sons, pelo que a superfície do betão deve ter um produto de boa transmissão acústica (NP EN 12504-4, 2007; Abo-Qudais, 2005).

- Comprimento do percurso:

O comprimento do percurso efectuado pelo impulso ultra-sónico influencia as leituras da velocidade de propagação de ultra-sons no betão. De facto, o valor do comprimento do percurso deve ser suficientemente grande de forma a que a heterogeneidade do betão não influencie as leituras das velocidades, bem como não propicie leituras que apenas determinem a velocidade de propagação nos agregados ou no cimento. Assim, é recomendável que, para a dimensão máxima do agregado entre 20mm e 40mm, a leitura seja efectuada num comprimento mínimo de 150mm enquanto que para valores da máxima dimensão do agregados inferiores a esse intervalo os valores de comprimento de percurso de 100mm são aceitáveis (NP EN 12504-4, 2007).

- Dimensão e formato do provete:

A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas é independente do formato e do tamanho do provete excepto se a aresta mínima for mais pequena do que um certo valor. A grandeza da redução depende sobretudo da razão entre o comprimento da onda ultra-sónica e o comprimento da menor aresta, este factor de influência na velocidade de ultra-sons é significativo quando essa razão é superior à unidade. Para diminuir estes efeitos foram estabelecidas dimensões mínimas admissíveis no provete para a transmissão de ultra-sons, o qual pode ser visto no Quadro 2.3 (NP EN 12504-4, 2007; IAEA: 2002).

- Tipo e dimensão do agregado:

Um estudo efectuado por Hamassaki em 1986 (em Naik et al.) chegou à conclusão que betões com resistências à compressão semelhantes podem ter diferentes velocidades de propagação de ultra-sons em função do tipo de agregado utilizado. (Abu-Qudais, 2005)

- Influência das armaduras:

As velocidades de propagação de ultra-sons medidas em betão armado, em que na proximidade existam varões de aço, são geralmente mais altas do que em relação ao betão simples. Tal facto advém da velocidade de propagação de ultra-sons no aço ser até cerca de duas vezes superior à velocidade de propagação no betão, assim devem ser evitadas medições em zonas com presença de armaduras (NP EN 12504-4, 2007).

- Heterogeneidade do betão:

O betão, sendo um material heterogéneo, apresenta muitas vezes vazios e fissuras interiores. Quando uma onda ultra-sónica encontra a presença de ar não existe praticamente a transferência de energia o que provoca que essa onda tenha de procurar a passagem por uma zona directa aumentando, desse modo, a distância de percurso real e diminuindo a velocidade de propagação de ultra-sons (NP EN 12504-4, 2007).

- Razão água/cimento:

O aumento da razão água/cimento (W/C) conduz a diminuição da velocidade de propagação de ultra-sons devido à diminuição da densidade e das resistências à compressão do betão (Crawford, 1997).

- Idade do ensaio

O aumento da resistência do betão indica um aumento da velocidade de propagação de ondas, assim, para o mesmo betão, mas em idades diferentes, poderão obter-se velocidades diferentes fruto das resistências diferentes.

Quadro 2.3 - Dimensões laterais mínimas do provete para a utilização de ultra-sons

Frequência do transdutor kHz	Velocidade de propagação de ultra-sons no betão (km/s)		
	V _c = 3,5 Km/s	V _c = 4,0 Km/s	V _c = 4,5 Km/s
	Dimensão lateral mínima recomendada do provete (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

2.4.5 Limitações e utilidade dos ultra-sons

De acordo com Naik et al (2004), o método de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons é um excelente meio para investigar a uniformidade do betão. O teste em si é de fácil utilização e permite uma utilização em laboratório e *in situ* com bastante facilidade. Com a existência cada vez maior de dispositivos digitais compactos e portáteis que se tornam baratos e fáceis de manusear o teste de ultra-sons acrescenta valor ao controlo da qualidade do betão *in situ*.

Como é um ensaio verdadeiramente não destrutivo, permite a realização de vários testes sobre a zona de ensaio do mesmo provete permitindo monitorizar a evolução da velocidade de propagação de ultra-sons sempre na mesma zona.

Devido à existência de um grande número de variáveis a afectar os parâmetros de resistência do betão e a sua velocidade de propagação de ondas, não é fácil definir exactamente a precisão deste ensaio.

Para avaliar as resistências do betão à compressão e a flexão é importante que se estabeleçam, anteriormente, correlações em laboratório do betão a ensaiar *in situ* antes de se realizarem ensaios de medição *in situ* da velocidade na estrutura.

O ensaio de ultra sons encontra-se normalizado pela norma NP – EN 12504 -4 :2007.

2.4.6 Correlações

Para o estabelecimento de uma curva de correlação existem muitos métodos, mas, como referido na secção 2.3.6 deste documento e na NP EN 12504:4:2007, um procedimento simples poderá ser adoptado, e o mesmo consiste no seguinte: elaboração de vários provetes cúbicos de um determinado betão e realização sobre eles da medição da velocidade de propagação de ultra-sons de acordo com a NP EN 12504:4:2007; posteriormente, o ensaio desses cubos à compressão. Com cada par de resultados quer dos ensaios à compressão, quer dos ensaios esclerométricos, consegue-se construir uma correlação empírica entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultra-sons.

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais e as composições dos betões utilizados, assim como os procedimentos executados tanto na execução dos provetes de ensaio como na realização dos ensaios não-destrutivos e destrutivos.

3.1 Caracterização dos betões utilizados

Neste trabalho foram utilizados dois betões utilizados na prefabricação pesada: o betão C50/60XC4D22CL0,2S4, designado por betão B1 e o betão C50/60XC4D22CL0,2S5, designado por betão B2.

As características dos betões utilizados são apresentadas no Quadro 3.1.

Estes betões de prefabricação, devido ao próprio segmento desta indústria, são distintos de outros betões utilizados na construção tradicional, isto é, são produzidos de forma a garantirem uma optimização dos recursos na execução da betonagem, garantindo também elevadas resistências a curto prazo. Com a obtenção de elevadas resistências a curto prazo, permite-se a adopção de ciclos de produção mais rápidos, reduzindo ou mesmo dispensando a necessidade de cura por calor e efectuando uma optimização de todo o processo produtivo.

Quadro 3.1 - Características dos betões utilizados

	Betão B1	Betão B2
Ligantes (Kg)		
Cimento CEM II/A-L 42,5R	293	450
Cinzas	157	-
Água (Litros)		
	150	140
Razão Água Ligante (A/L)		
	0,333	0,311
Desenvolvimento da resistência		
	Médio	Rápido
Resistências médias (Mpa)		
18 Horas	-	33,2
3 Dias	-	56,1
7 Dias	52,5	62,7
28 Dias	65,2	68,4

3.2 Composições dos betões

No Quadro 3.2 e no Quadro 3.3 são apresentadas as constituições dos betões utilizados na campanha experimental, a principal diferença em termos de composições tem a ver com a presença das adições de cinzas no betão B1.

Quadro 3.2 - Composição do Betão B1

Composição do Betão B1 (Quantidades/ m³ de amassadura)					
Componentes		Peso (Kg)	Massa volúmica (Kg/m³)	Volume (m³)	d Max (mm)
Agregados					
Agregado 1	Seixo 2	416	2620	0,159	25,63
Agregado 2	Seixo 1	260	2620	0,099	13,73
Agregado 3	Brita 0,5	355	2640	0,134	6,58
Agregado 4	Areia Grossa	498	2640	0,189	5,04
Agregado 5	Areia Fina	213	2630	0,081	0,68
Ligante					
	CEM II/A-L 42,5R	293	3050	0,096	
Adições					
	Cinzas	157	2300	0,068	
Água					
		150	1000	0,150	
Adjuvantes					
Adjuvante 1	Chrysoplast 820	4,5	1180	0,004	
Adjuvante 2	SIKA Viscocrete 3005	5,4	1050	0,005	

Quadro 3.3 - Composição do Betão B2

Composição do Betão B2 (Quantidades/ m³ de amassadura)					
Componentes		Peso (Kg)	Massa volúmica (Kg/m³)	Volume (m³)	d Max (mm)
Agregados					
Agregado 1	Seixo 2	360	2620	0,137	25,63
Agregado 2	Seixo 1	285	2620	0,109	13,73
Agregado 3	Brita 0,5	333	2640	0,126	6,58
Agregado 4	Areia Grossa	544	2640	0,206	5,04
Agregado 5	Areia Fina	293	2630	0,111	0,68
Ligante					
	CEM II/A-L 42,5R	450	3050	0,148	
Água (Litros)					
		140	1000	0,140	
Adjuvantes:					
Adjuvante 1	Chrysoplast 820	2,25	1180	0,002	
Adjuvante 2	SIKA Viscocrete 3005	6,75	1050	0,006	

3.2.1 Cimento CEM II/A-L 42,5R

O Cimento Portland de Calcário CEM II/A-L 42,5R apresenta, na sua constituição, 80% a 94% de clínquer Portland e cerca de 6% a 20% de calcário (Secil@, 2012), é caracterizado pela sua elevada versatilidade, pois pode ser utilizado em betões de várias classes de resistência e permite a conjugação de betões de elevada resistência com uma boa trabalhabilidade.

É um cimento especialmente formulado para a utilização em betões prontos de elevada e média resistência, betões projectados, betões pré-esforçados, reparação de betão estrutural e, claro, na indústria de prefabricação ligeira e pesada (Secil@, 2012). Na execução das duas betonagens foi utilizado este cimento produzido pela fábrica da Secil em Maceira-Liz.

Na Figura 3.1 e Quadro 3.4 são apresentados os valores médios da resistência à compressão de um betão fabricado com 350kg/m³ de cimento CEM II/A-L 42,5R.

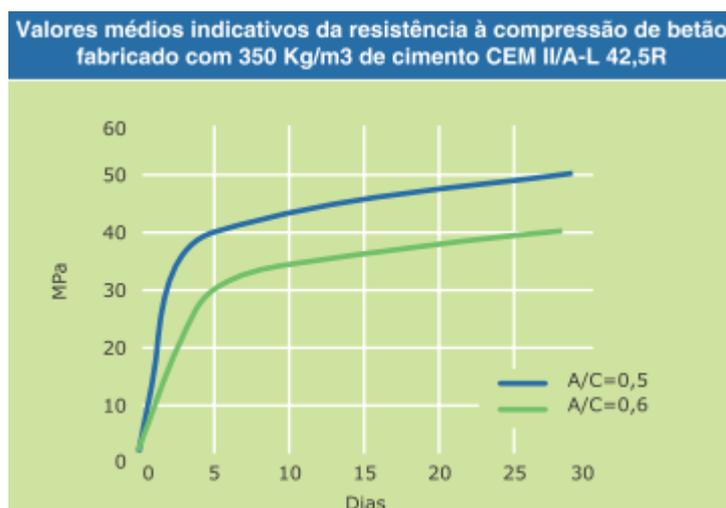


Figura 3.1 - Valores médios indicativos da resistência à compressão do betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM II/A-L 42,5R (Adaptado Secil@, 2012)

Quadro 3.4 - Valores médios da resistência à compressão do betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM II/A-L 42,5R (Adaptado Secil@, 2012)

Resistência à Compressão (Mpa) CEM II/A-L 42,5R			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	
2 dias	7 dias	28 dias	
≥20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

NP EN 196-1

3.2.2 Agregados

Os agregados constituem o esqueleto do betão propriamente dito, estes materiais influenciam grande parte das propriedades do betão em particular através da sua distribuição granulométrica, influenciando, desse modo, a resistência entre a pasta de cimento e a superfície, bem como a tensão de rotura (Coutinho 1988).

Nas misturas dos betões utilizados foram utilizados cinco agregados que variam entre si na granulometria, na origem do material e no processo de obtenção. Os seixos 1 e 2 são materiais de origem quartzítica obtidos por fragmentação mecânica da pedra e provêm da pedreira da empresa Sorgila, situada em Portela do Outeiro – Colmeias. A brita 0,5 é um material de origem calcária que também é obtido por fragmentação mecânica da pedra, sendo que provém da empresa Iberobrita, em Barrocal – Pombal. A areia grossa e areia fina constituem os agregados de menor dimensão da mistura, estes são materiais de origem siliciosa obtidos por fragmentação de rochas por desgaste e provêm das unidades de extracção da empresa Argilis, em Albergaria dos Doze e Charneca da Guia, respectivamente para a areia grossa e fina.

Na Figura 3.2 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados utilizados na formulação dos betões.

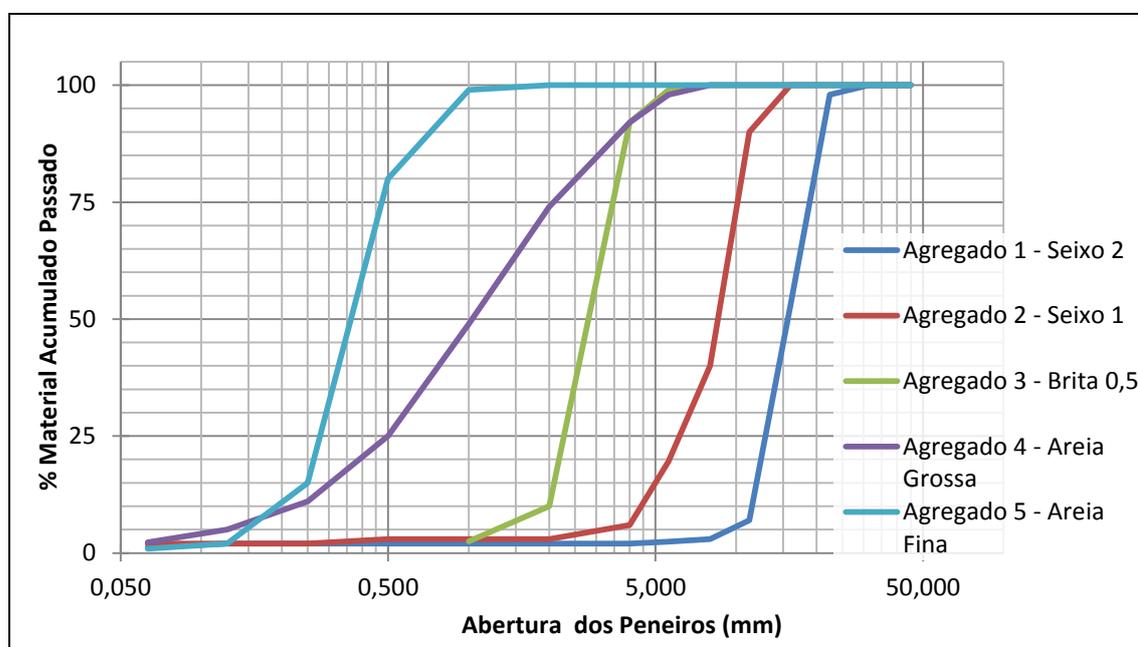


Figura 3.2 - Curvas granulométricas dos agregados dos utilizados

Quadro 3.5 - Distribuição granulométrica da mistura de agregados

Peneiro	Abertura (mm)	Betão B1		Betão B2	
		Retidos (%)	Passados (%)	Retidos (%)	Passados (%)
2"	50,0	0,0	100,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5	0,0	100,0	0,0	100,0
1"	25,0	0,8	99,2	0,7	99,3
3/4"	19,0	8,7	91,5	7,8	92,5
1/2"	12,5	20,0	79,7	18,0	82,0
3/8"	9,50	25,5	74,4	23,6	76,5
1/4"	6,30	33,1	67,5	31,5	69,3
n. 4	4,75	38,0	60,5	36,5	62,5
n. 8	2,36	49,1	50,1	47,8	52,1
n. 16	1,18	58,6	42,4	57,6	44,0
n. 30	0,600	66,7	34,4	65,9	35,4
n. 50	0,300	73,9	25,6	73,3	25,2
n. 100	0,150	80,2	20,5	79,8	19,6
n. 200	0,075	85,7	17,4	85,4	16,4
Prato		100,0	0,0	100,0	0,0

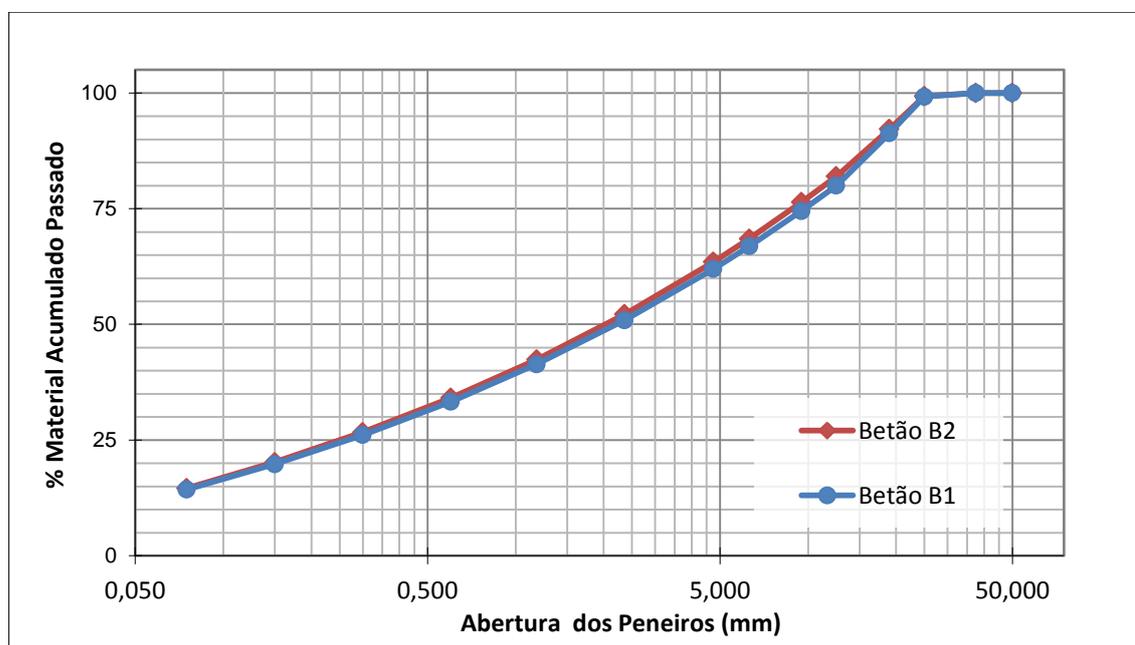


Figura 3.3 - Curva granulométrica da mistura de agregados

3.2.3 Adjuvantes

Os adjuvantes são produtos adicionados em pequenas quantidades quando comparadas com a massa de cimento (< 5%), que são adicionados antes ou durante a amassadura, provocando modificações nas propriedades do betão, tanto fresco como endurecido.

Na composição dos betões usados foram utilizados dois adjuvantes que têm a sua principal função de redutores de água. Os produtos adicionados foram o plastificante Chrysoplast 820, produzido na CHRYSO, e um superplastificante Viscocrete 3005, produzido pela SIKA.

A utilização destes adjuvantes é especialmente recomendada na elaboração de betões para prefabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ (Sika@, 2012; Chryso@ 2012), pois permitem:

- Aumentar a tensão de rotura;
- Aumentar a trabalhabilidade, mantendo as dosagens de água e de cimento;
- Execução de betonagens mais rápidas em época fria;
- Reduzir a dosagem de cimento sem alteração da tensão de rotura ou da trabalhabilidade;
- Descofragens rápidas;
- Resistências adequadas quando solicitadas a idades muito jovens;

3.2.4 Cinzas

As cinzas são adições de origem de subprodutos industriais que são adicionados à mistura com a finalidade de melhorar algumas propriedades ou de adquirir novas propriedades. Com a adição de cinzas os betões apresentam menores resistências iniciais, todavia, num prazo de 3-6 meses apresentam maiores resistências mecânicas.

As cinzas apenas foram utilizadas na composição do betão B1 e tiveram origem na central termoelétrica do Pego.

3.3 Execução de provetes

3.3.1 Betonagem dos provetes cúbicos

Ao longo da elaboração deste trabalho foram executados 36 provetes cúbicos utilizando-se, para isso, moldes cúbicos com aresta de 150mm, como apresentado na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Provetes cúbicos utilizados na campanha experimental

As misturas de betão foram efectuadas na central de betão da empresa UniBetão, em Leiria, tendo sido, posteriormente, transportados até ao local de betonagem (Urqueira - Ourém) em camião betoneira.

Na execução dos provetes cúbicos, o enchimento dos moldes fez-se em camadas, recorrendo-se, posteriormente, à vibração do betão com o auxílio de uma agulha vibratória (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Agulha vibratória utilizada na vibração dos provetes

Em cada betonagem foram executados 18 provetes cúbicos (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Provetes executados em cada betonagem

3.3.2 Cura dos provetes cúbicos

Os provetes foram desmoldados após vinte e quatro horas, transportando-se, posteriormente, desde o local de betonagem (Urqueira-Ourém) até a câmara de cura do laboratório de Geotecnia da FCT-UC (Figura 3.7), onde foram colocados a uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa de 95%, a fim de ser submetido a condições de cura normalizada conforme preconizado na NP EN 12390-2-2009.



Figura 3.7 - Câmara de cura do laboratório de geotecnia da FCT-UC

Os provetes permaneceram na câmara de cura desde a idade de 24h até à idade de realização dos ensaios, tendo sido retirados um pouco antes da realização dos ensaios de forma a realizar-se a secagem.

3.3.3 Betonagem e cura das vigas

Ao mesmo tempo que foram executados os provetes cúbicos, foi executado o enchimento de duas vigas, uma com o betão B1 e outra com o betão B2. O enchimento das mesmas foi efectuado pela empresa Mecanotubo. Nessas vigas foram realizados ensaios não destrutivos nas idades de 3 e 7 dias para a viga 1, enchida com o betão B1, e aos 2 e 6 dias para a viga 2,

enchida com betão B2. A cura das vigas foi executada ao ar livre, tendo sido descofradas passado 24 h.

As vigas utilizadas nos ensaios experimentais são duas vigas das várias vigas de apoio ao tabuleiro do viaduto da Ribeira Seca na subconcessão do pinhal interior no bloco IC3- Avelar Sul/Avelar Norte, são vigas prefabricadas na Urqueira pela empresa Mecanotubo e posteriormente levadas até ao local de montagem em transporte especial.

Estas vigas possuem um vão de 33m.

Na Figura 3.8 poderão ser vistos os aspectos da construção das vigas na pista de prefabricação.



a) Armadura das Vigas

b) Cofragem das vigas

c) Viga após a descofragem

Figura 3.8 - Aspectos da construção das vigas prefabricadas

Na Figura 3.9 está representada a geometria das vigas, enquanto que na Figura 3.10 estão representados alguns cortes das vigas, também nas figuras se encontram as localizações dos locais onde se realizaram os ensaios indirectos (ensaio esclerométrico e de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons). Marcado a azul, são as zonas onde se realizaram os ensaios esclerométricos com o esclerómetro na posição horizontal, e marcadas a vermelho estão as localizações das zonas onde se procedeu à determinação da velocidade de propagação de ultra-sons no betão.

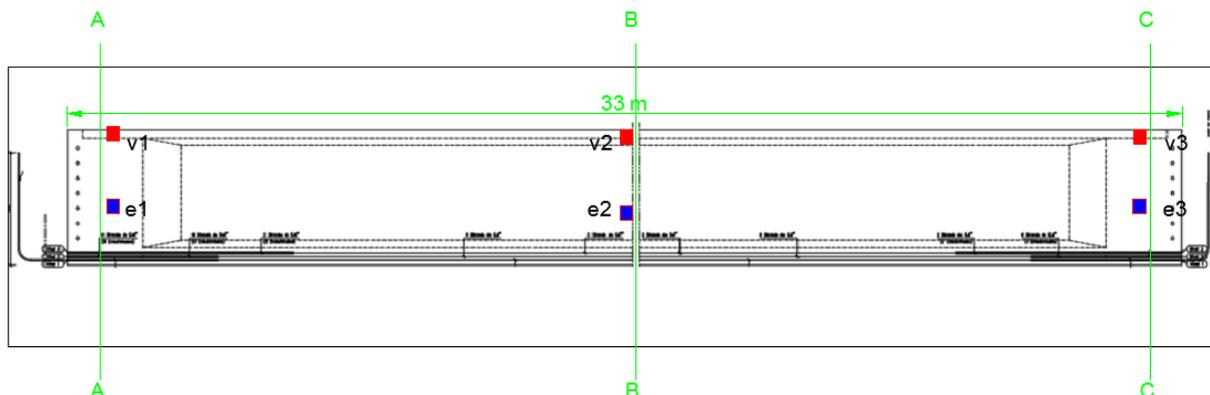


Figura 3.9 - Geometria das vigas utilizadas nos ensaios Esclerométrico e de ultra-sons

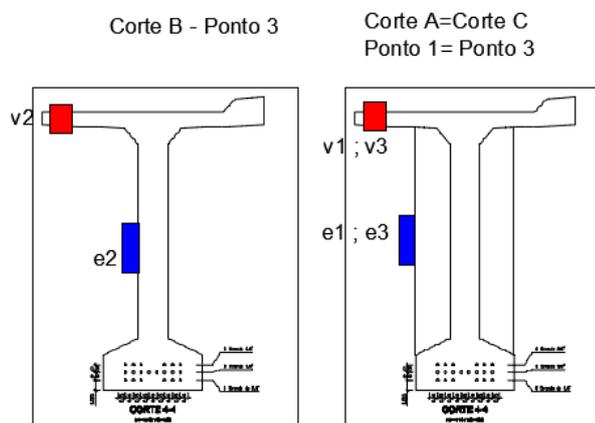


Figura 3.10 - Cortes das vigas nas secções de realização dos ensaios

3.4 Procedimento dos ensaios realizados

Na campanha experimental realizaram-se ensaios de compressão, de determinação de índices esclerométricos e de determinação de velocidade de propagação de ultra-sons. Foram estabelecidas seis idades diferentes para a realização dos ensaios de forma a abranger uma ampla gama de resistências de betão. Os ensaios realizaram-se nas idades de 1, 3, 7, 14, 22 e 28 dias para o betão B1, e 2 aos 2, 3, 8, 15, 21 bem como aos 28 dias para o betão B2.

3.4.1 Determinação do índice esclerométrico

Na execução do ensaio esclerométrico utilizou-se o esclerómetro de Schmidt do tipo NR com energia de impacto de 2,2 J. Para a realização deste ensaio foi seguida a norma NP EN 12504-2:2003, no entanto como não dispúnhamos de uma bigorna de calibração não foi efectuada a calibração do aparelho na bigorna. Na Figura 3.11 pode ver-se o esclerómetro utilizado na realização dos ensaios experimentais deste trabalho, assim como a pedra de amolar para alisar superfícies de ensaio e rolos de registos de índices esclerométricos.



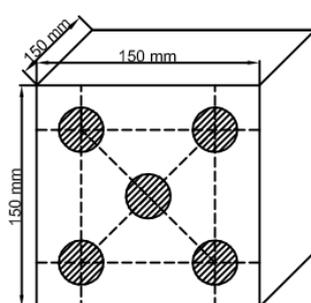
Figura 3.11 - Esclerómetro utilizado na campanha experimental

Foram realizados ensaios de determinação do índice esclerométrico nas duas vigas betonadas e nos provetes cúbicos. Os ensaios foram realizados sempre em posição horizontal nos provetes e na estrutura, no entanto, e de forma a obter uma comparação sobre a influência entre a posição do esclerómetro na vertical e na horizontal, foram efectuadas medições com o esclerómetro na vertical ($\alpha=90^\circ$) nos provetes cúbicos.

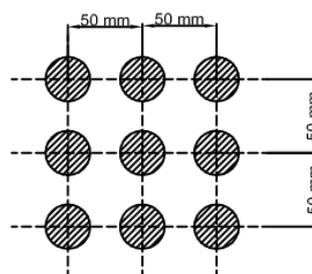
Nos provetes os ensaios foram efectuados sempre nas faces perpendiculares, a face de enchimento de forma a garantir previamente uma face mais lisa, não dispensando no entanto o alisamento da superfície com a pedra de amolar.

De modo a definir as posições onde se efectua o ensaio, foram definidos cinco pontos em cada face para a execução do mesmo nos provetes cúbicos e, nesse sentido, executando o ensaio em duas faces opostas, completando assim um total de 10 leituras para a determinação do índice esclerométrico nos provetes cúbicos (Figura 3.12-a).

Nos ensaios executados na estrutura foi definida uma malha de nove pontos nas áreas de ensaio, tendo-se obtido nove leituras para a determinação do índice tal como preconiza a norma 12504-2:2003 (Figura 3.12-b).



a) Zona de ensaio de provete cubico

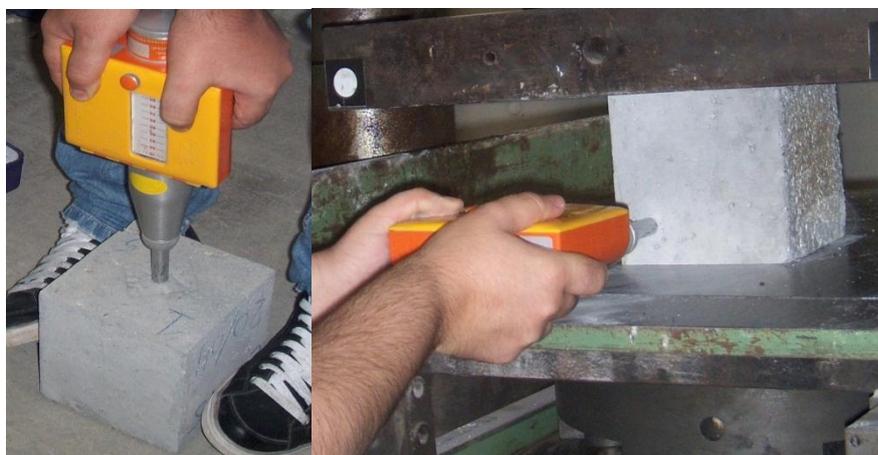


b) Zona de ensaio na estrutura

Figura 3.12 - Esquema das zonas de ensaio

Segundo Bungey (1992), a determinação do índice esclerométrico deve ser efectuada numa estrutura rígida e imóvel, assim no ensaio com o esclerómetro na posição horizontal para a determinação do índice os provetes foram colocados na prensa e submetidos a uma carga que permitisse a imobilização dos mesmos. Na determinação do índice esclerométrico com o esclerómetro na posição vertical nos cubos não se conseguiu uma forma de imobilização adequada. Nos ensaios nas vigas, devido ao seu peso próprio e volume, não foi necessário aprovisionar nada para garantir as vigas imóveis.

A Figura 3.13 demonstra a execução do ensaio esclerométrico numa posição vertical e horizontal.



a) Ensaio esclerométrico na horizontal

b) Ensaio esclerométrico na vertical

Figura 3.13 - Realização de ensaios esclerométricos nos provetes cúbicos

3.4.2 Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons no betão

O ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons foi executado recorrendo-se à utilização do aparelho da C.N.S Electronics LTd denominado PUNDIT. Este aparelho possui dois transdutores (receptor e transmissor) de frequência de 54kHz, cabos com 1m de comprimento e uma barra de calibração com um tempo predefinido para o tempo de percurso dos ultra-sons (Figura 3.14).

O ensaio foi efectuada segundo a NP EN 12504-4:2007 segundo a qual se deve garantir um contacto apropriado entre a superfície do betão e a face dos transdutores, assim, e mesmo para as faces com acabamento suficientemente liso, deve-se utilizar produtos de ligação tais como a vaselina, massa lubrificante ou consistente, sabão líquido ou a pasta de glicerol. Neste trabalho utilizou-se como produto de ligação um gel de transmissão de ultra-sons hospitalar, comercializado pela Vital Care, que apresenta uma excelente condução ultra-sónica e é um produto que não deixa manchas na superfície do betão.



Figura 3.14 - Equipamento de transmissão de ultra-sons (PUNDIT)

Antes do início da medição do tempo de percurso é preciso efectuar a calibração do aparelho, calibração que passa pela transmissão de ultra-sons através de uma barra circular fornecida com o aparelho, na qual se conhece previamente o tempo de percurso de ultra-sons. Posto isto calibrar-se o aparelho para que este apresente o tempo de percurso da barra de calibração, neste caso de 26 μ s.

A norma de execução do ensaio (NP EN 12504-4, 2007) define que as leituras podem ser de três tipos consoante o tipo de transmissão. Assim, existe a transmissão directa, isto é, efectuada com os transdutores em faces opostas; a transmissão indirecta, em que os transdutores se encontram em faces perpendiculares, e a transmissão indirecta, em que os dois transdutores se encontram na mesma face. (Figura 2.6) Neste trabalho, em virtude de apresentar resultados mais precisos bem como a sua possibilidade de execução, optou-se pela transmissão directa.

O ensaio iniciou-se com a marcação de uma grelha de pontos em faces opostas; no caso dos provetes cúbicos essa grelha é a grelha definida para as leituras do índice esclerométrico (Figura 3.9 - a); nas vigas, a marcação dos pontos e leituras da velocidade de propagação de ultra-sons não foi efectuada na mesma zona da dos ensaios esclerométricos devido a essa zona ter uma grande quantidade de armadura, o que afecta grandemente a velocidade de propagação. As zonas de ensaio na viga estão dispostas nas Figuras 3.9 e 3.10.

Com a marcação da grelha de pontos onde se executa o ensaio reduz-se o erro, atingindo uma precisão de $\pm 1\%$, como referido na NP EN 12504-4 (2007). Após a grelha de pontos, coloca-se cada um dos transdutores numa face oposta à outra em contacto com o betão e através da utilização do gel de ultra-sons. Os transdutores são então pressionados contra a superfície de betão de uma forma uniforme repetindo as leituras até se registrar o tempo mínimo de percurso que corresponde à indicação de que a espessura do produto de ligação foi reduzida a um mínimo, de acordo com NP EN 12504-4 (2007).

Em cada ensaio a cada provete foram efectuadas cinco leituras em postos distintos do provete, sendo que a velocidade de propagação de ultra-sons no provete corresponde à velocidade a que corresponde a média dos tempos de percurso. Na estrutura foram efectuadas três leituras em cada zona considerada (Figura 3.9 e Figura 3.10), com o valor da velocidade de propagação de ultra-sons a ser igual à velocidade a que corresponde a média dos tempos de percurso nas três leituras.

3.4.3 Ensaios de resistência à compressão

Em cada idade considerada, foram ensaiados à compressão três provetes de cada tipo de betão utilizado, de forma a retirar a evolução da resistência dos betões bem como a de obtenção dos pares de resultados de ensaios à compressão e ensaios não destrutivos, também realizados nessas datas.

Todos os provetes, antes dos ensaios à compressão, foram pesados bem como retiradas todas as medidas para posterior avaliação no caso de existirem valores não esperados, como refere a norma NP EN 12390-3 (2009). Os ensaios à compressão realizaram-se após a execução dos ensaios de determinação do índice esclerométrico e da velocidade de propagação de ultra-sons.



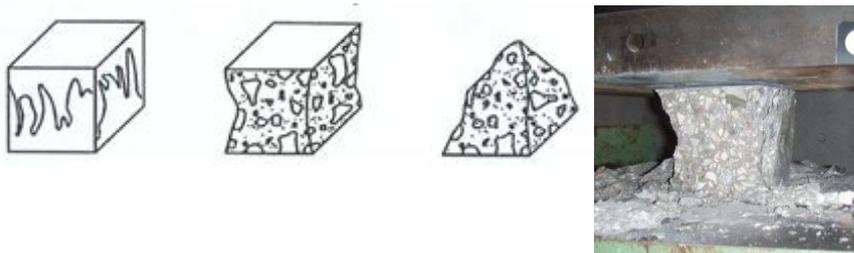
Figura 3.15 - Determinação das medidas dos provetes cúbicos e seus pesos

Para a determinação da resistência à compressão nos provetes foi utilizada a prensa hidráulica AMSLER (capacidade máxima de 500 toneladas) do laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural da F.C.T.U.C.. Uma vez garantida a centralidade do provete na prensa, iniciou-se o ensaio com a aplicação de uma carga a uma velocidade uniforme até à ruptura dos provetes. A velocidade de ensaio foi de 13,5 KN/s como especificado na NP EN 12390-3 (2009).



Figura 3.16 - Ensaio de provete cúbico na prensa AMSLER

Nos ensaios de compressão de provetes é necessário a inspeção visual da rotura dos provetes que é classificada como rotura satisfatória ou não satisfatória. Para o caso de provetes com roturas não satisfatórias, os resultados do ensaio à compressão nesses provetes é desprezado. Nas Figuras 3.11 e 3.12 são apresentadas, respectivamente, as roturas satisfatórias e roturas não satisfatórias em provetes cúbicos.



a) Roturas satisfatórias de provetes cúbicos

b) Rotura satisfatória de um provete cubico

Figura 3.17 - Rotura satisfatória de provetes cúbicos

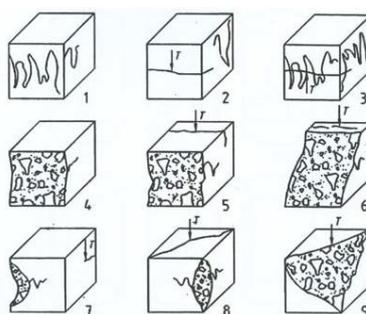


Figura 3.18 - Rotura não satisfatória de provetes cúbicos

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios à compressão assim como os resultados dos ensaios indirectos, o ensaio esclerométrico e de velocidade de ultra-sons. Além da apresentação dos resultados, também é executado o tratamento destes, com obtenção das curvas de correlação entre os ensaios não destrutivos e a resistência do betão à compressão. No final do capítulo é apresentada a aplicação da NP EN 13791:2008 para a determinação de resistência à compressão *in situ* nas vigas prefabricadas com os betões B1 e B2.

4.1 Resistência à compressão dos betões

No Quadro 4.1 encontram-se os resultados da resistência à compressão para os betões B1 e B2. Nas idades de realização dos ensaios verifica-se que o betão B2 apresenta sempre valores de resistência à compressão mais elevados e menores valores do coeficiente de variação quando em comparação com o betão B1.

No caso do betão B1, o provete B1P6 apresentou um valor de resistência à compressão inferior aos restantes provetes do mesmo betão e para a mesma idade; analisando os pesos dos provetes, verifica-se que este é o provete mais leve nessa série de ensaios, pesando 7,6 Kg, enquanto os outros provetes apresentam peso sempre superior a 7,8 kg, tal pode advir de uma má vibração do betão, entre outros aspectos que conduziram a uma densidade menor. Para a série de ensaios poder-se-ia ter optado pela exclusão deste provete visto que apresenta uma densidade inferior aos restantes, no entanto optou-se pela não exclusão devido à necessidade da utilização de dezoito pares de resultados para o estabelecimento de correlações directas entre os ensaios não destrutivos e a resistência à compressão. Caso se optasse pela exclusão do provete B1P6, a média de resistência aos sete dias não se alteraria muito passando a ser de 31,2MPa, no entanto o coeficiente de variação passaria de 15,1% para 11,5%.

O coeficiente de variação descrito nos ensaios representa a variabilidade dos ensaios e é definido como o desvio padrão da amostra sobre a média dessa mesma amostra.

Quadro 4.1 - Valores da resistência à compressão do betões

Betão B1					Betão B2				
Idade (Dias)	Provetes	Resistência (MPa)	Média (MPa)	CV (%)	Idade (Dias)	Provetes	Resistência (MPa)	Média (MPa)	CV (%)
1 Dia	B1P1	6,0	6,5	7,5%	2 Dias	B2P1	53,9	54,2	0,6%
	B1P2	6,7				B2P2	54,3		
	B1P3	6,9				B2P3	54,5		
3 Dias	B1P4	33,7	29,1	15,1%	3 Dias	B2P4	60,1	60,5	0,8%
	B1P5	28,7				B2P5	60,3		
	B1P6	24,9				B2P6	61,1		
7 Dias	B1P7	40,7	39,1	5,7%	8 Dias	B2P7	70,2	73,5	4,7%
	B1P8	36,6				B2P8	77,1		
	B1P9	40,0				B2P9	73,2		
14 Dias	B1P10	50,4	46,6	7,5%	14 Dias	B2P10	69,3	72,8	6,1%
	B1P11	46,1				B2P11	71,3		
	B1P12	43,5				B2P12	77,8		
22 Dias	B1P13	50,1	51,4	5,0%	21 Dia	B2P13	66,6	74,1	9,5%
	B1P14	54,3				B2P14	75,1		
	B1P15	49,6				B2P15	80,5		
28 Dias	B1P16	57,4	59,2	3,2%	28 Dia	B2P16	80,1	79,7	7,0%
	B1P17	61,1				B2P17	85,1		
	B1P18	59,2				B2P18	73,9		

A Figura 4.1 representa a evolução das resistências médias para os betões B1 e B2. O betão B2 é um betão com uma evolução de resistência muito maior ao fim dos primeiros dias de betonagem mantendo, aos sete dias, uma resistência próxima da atingida aos 28 dias. O betão B1 é um betão que, devido a adição de cinzas, possui uma resistência inicial mais reduzida, no entanto vai aumentando a resistência ao longo do tempo.

A necessidade da utilização destes dois tipos de betão na prefabricação advém da necessidade de rentabilização das pistas de prefabricação. Por vezes, existe a necessidade de aplicar ou cortar os cabos de pré-esforço em idades jovens, por forma a retirar das pistas de fabricação as vigas. Assim, torna-se necessário que vigas betonadas a menor tempo tenham uma resistência que lhe permita à retirada ou aplicação do pré-esforço. Com a utilização do betão B2 consegue-se as dezoito horas resistências médias (fcm) de 33,2 MPa (segundo dados da Unibetão).

Assim, o betão B2 é utilizado quando se pretende cortar os cabos de pré-esforço num curto espaço de tempo após a betonagem, pois este atinge a resistência necessária para os cabos de pré-esforço serem cortados num curto espaço de tempo após a betonagem.

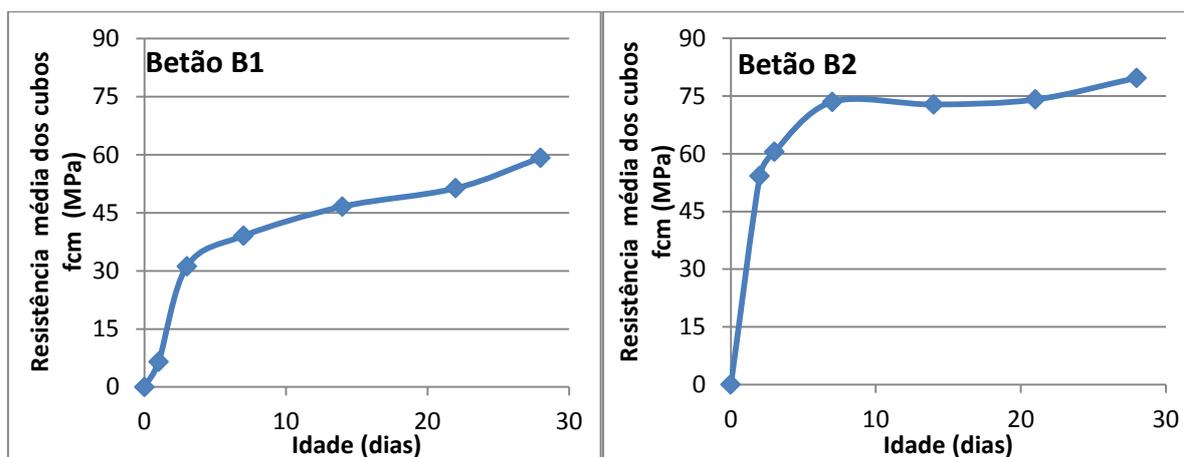


Figura 4.1 - Desenvolvimento das resistências dos betões

4.2 Ensaio esclerométrico

4.2.1 Determinação dos índices esclerométricos

A determinação dos índices esclerométricos teve por base a norma NP EN 12504-2 (2003). Segundo essa norma, a determinação do índice faz-se com a mediana das leituras obtidas numa área de ensaio, no entanto alguns autores, em outros estudos, fizeram segundo a média das leituras. Neste trabalho fez-se uma comparação inicial entre a média e a mediana das leituras, todavia, como estas duas grandezas não diferiam significativamente, os resultados eram também muito semelhantes, pelo que se optou pela utilização da mediana tal como referido na norma.

No Quadro 4.2 estão representados os índices esclerométricos obtidos com o esclerómetro na posição horizontal ($\alpha=0$) para os dois tipos de betão. A determinação desses índices pode ser visível no Anexo B.

Quadro 4.2 - Índices esclerométricos dos provetes cúbicos ($\alpha=0$)

Provete ID #	Índice Esclerométrico (IE)	Provete ID #	Índice Esclerométrico (IE)
B1P1	12,0	B2P1	28,5
B1P2	12,0	B2P2	30,5
B1P3	12,0	B2P3	30,0
B1P4	22,5	B2P4	32,0
B1P5	22,0	B2P5	33,0
B1P6	24,0	B2P6	33,0
B1P7	28,5	B2P7	36,0
B1P8	24,0	B2P8	38,0
B1P9	25,0	B2P9	37,0
B1P10	34,0	B2P10	38,0
B1P11	28,0	B2P11	39,0
B1P12	29,5	B2P12	41,0
B1P13	36,0	B2P13	39,5
B1P14	34,0	B2P14	41,0
B1P15	34,0	B2P15	43,0
B1P16	38,5	B2P16	43,0
B1P17	36,0	B2P17	45,0
B1P18	36,0	B2P18	43,5

Para se comparar a determinação dos índices com o esclerómetro na posição vertical ($\alpha=0$) e posição vertical em termos de obtenção de correlações, foram determinados os valores dos índices esclerométricos na posição vertical ($\alpha=0$), no entanto esses valores não se apresentam aqui, mas no Anexo C.

4.2.2 Evolução dos índices esclerométricos

Por forma a analisar qual a evolução dos índices esclerométricos com o aumento da resistência dos betões, foi efectuada, ao longo do tempo, uma análise da evolução dos índices esclerométricos médios.

Na Figura 4.2 é apresentada a evolução do valor médio do índice esclerométrico com o esclerómetro na posição horizontal. Como se pode verificar, para idades mais jovens do betão a evolução do índice esclerométrico é mais acentuada nos primeiros dias começando a descer gradualmente com o aumento da idade; este princípio está de encontro com Bungey e Millard (1996) que demonstram que, em idades jovens, o valor obtido do índice esclerométrico poderia, até, ser inconclusivo.

A diferença entre o índice esclerométrico entre os dois betões é mais acentuada no início da idade, e tal advém da resistência do betão B1 nos primeiros dias após a betonagem ser muito menor comparavelmente com o betão B2.

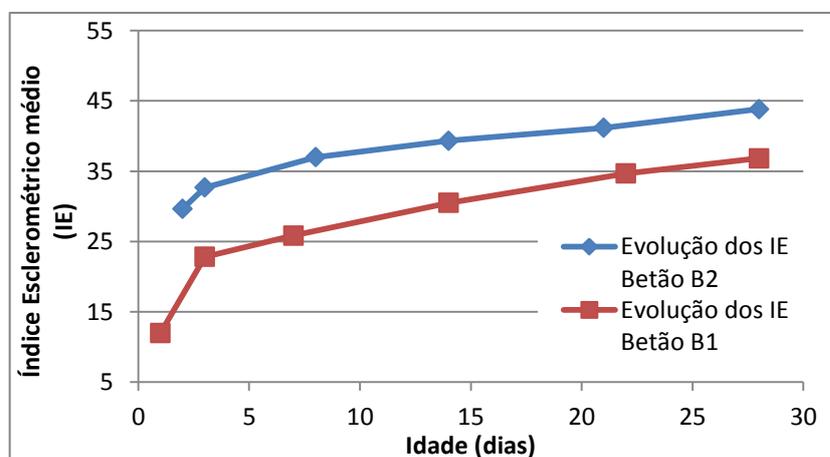


Figura 4.2 - Desenvolvimento dos valores médios do índice esclerométrico

4.2.3 Correlação $f_c \times IE$ – abordagem tipo1 NP EN 13791:2008

Para a obtenção de correlações entre os valores medidos nos ensaios indirectos e a resistência à compressão, a norma NP EN 13791:2008 estabelece a descrição de dois processos para determinação das curvas de correlação: uma com base numa regressão não linear simples, processo no qual se necessita de um mínimo de dezoito pares de resultados entre ensaios indirectos e os resultados dos ensaios de resistência à compressão; e um outro processo em que se efectua a adaptação de uma curva de referência, sendo que para este se necessita de um mínimo de nove pares de resultados.

Nesta secção é apresentada a abordagem tipo um da norma para a determinação de curvas de correlação com base na regressão não linear simples entre os valores dos ensaios indirectos e os resultados dos ensaios à compressão dos provetes cúbicos. Para esta abordagem foram testados os seguintes modelos de curva:

a) Linear $f_c = a \times IE + b$ (4.1)

b) Potência $f_c = a \times IE^b$ (4.2)

c) Exponencial $f_c = a \times e^{b \times IE}$ (4.3)

d) Polinómio (2º grau) $f_c = a \times IE^2 + b \times IE + c$ (4.4)

e) Logarítmica $f_c = a \times \ln(IE) + b$ (4.5)

Onde IE representa o índice esclerométrico e f_c representa a resistência do betão obtida no ensaio de compressão em provetes cúbicos de 150 mm de aresta (valores em MPa).

O grau de correlação das variáveis na abordagem do tipo 1 será avaliado segundo o Quadro 4.3 utilizado por Brozovsky et al. (2009).

Quadro 4.3 - Grau de correlação

Valores de R^2	Grau de correlação
$R^2 < 0,3$	Inexistência de correlação
$0,3 \geq R^2 < 0,5$	Baixa correlação
$0,5 \geq R^2 < 0,7$	Correlação significativa
$0,7 \geq R^2 < 0,9$	Alto grau de correlação
$R^2 \geq 0,9$	Alta coesão entre as variáveis

Os resultados das correlações obtidas encontram-se no Quadro 4.4 e Quadro 4.5 respectivamente para o betão B1 e betão B2.

Da análise do valor de R^2 pode-se constatar que as correlações adaptam-se bem aos resultados dos ensaios com valores de R^2 sempre superiores a 0,85 pelo que pelo Quadro 4.3 podemos verificar que existe um grande grau de coesão entre as variáveis. O betão B1 é um betão que consegue obter melhores valores de correlação quando comparado com os betões do tipo B2. As funções de polinómio de 2º grau adaptam-se melhor ao betão do tipo B1 enquanto o betão B2 a melhor correlação é a função do tipo potência. Originalmente Ernest Schmidt referia que as correlações entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico deveriam apresentar-se como funções do tipo linear, no entanto Pascale et al (2000) utilizou funções do tipo potência pelo que se pode considerar estas correlações aceitáveis.

Quadro 4.4 - Resultados da correlação entre f_c e IE (Horizontal) - Betão B1

Betão B1	$f_c(IE)$	R^2
Linear	$f_c = 2,0093 \times IE - 15,811$	0,9506
Potência	$f_c = 0,0618 \times IE^{1,9289}$	0,9518
Exponencial	$f_c = 3,3852 \times e^{0,0827 \times IE}$	0,8676
Polinómio (2º grau)	$f_c = -0,0213 \times IE^2 + 3,0625 \times IE - 27,206$	0,9574
Logarítmica	$f_c = 44,734 \times \ln(IE) - 106,18$	0,9495

Quadro 4.5 - Resultados da correlação entre f_c e IE (Horizontal) - Betão B2

Betão B2	$f_c(IE)$	R^2
Linear	$f_c = 1,8038 \times IE + 1,8887$	0,8869
Potência	$f_c = 1,9771 \times IE^{0,982}$	0,9007
Exponencial	$f_c = 25,09 \times e^{0,0269 \times IE}$	0,8903
Polinómio (2º grau)	$f_c = -0,0291 \times IE^2 + 3,9417 \times IE \pm 36,652$	0,8913
Logarítmica	$f_c = 65,574 \times \ln(IE) - 167,54$	0,8914

Na Figura 4.3 são evidenciadas as curvas de correlação que melhor se adaptam aos dois tipos de betão em estudo, bem como a dispersão de valores entre os pares de resultados de ensaios compressão e ensaios esclerométricos.

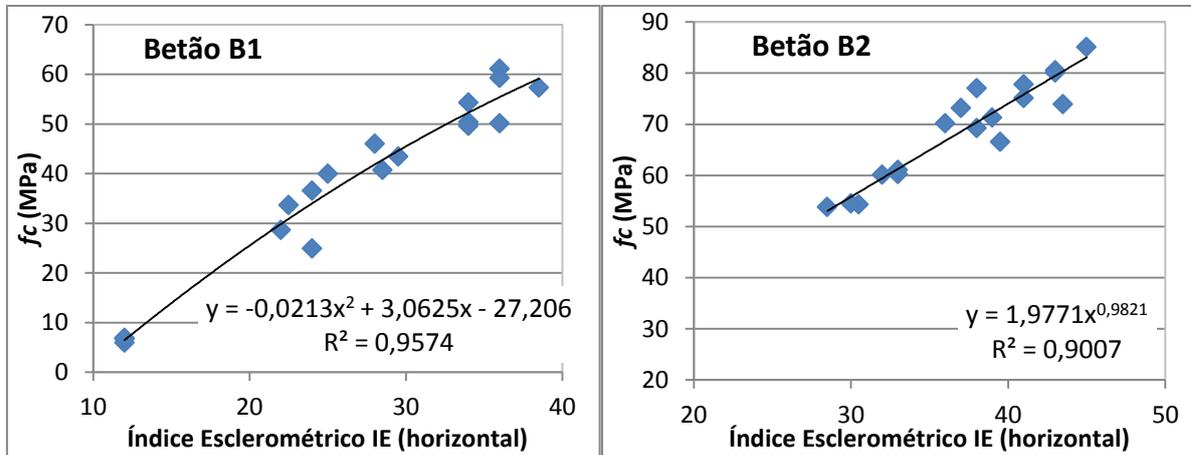


Figura 4.3 - Curva de correlação entre f_c e IE (horizontal)

A direcção do esclerómetro na realização do ensaio influencia os valores obtidos para os índices bem como as correlações, assim foram definidas correlações entre o ensaio à compressão e os índices esclerométricos em posição vertical ($\alpha = 90$). Para estas correlações foram testadas igualmente as equações de 4.1 a 4.5, os resultados das correlações encontram-se nos Quadros 4.6 e Quadro 4.7 para o betão B1 e betão B2.

Quadro 4.6 - Resultados da correlação entre f_c e IE_v (Vertical) - Betão B1

Betão B1	$f_c(IE_v)$	R^2
Linear	$f_c = 2,4879 \times IE_v - 11,806$	0,8405
Potência	$f_c = 0,7426 \times IE_v^{1,3084}$	0,787
Exponencial	$f_c = 11,597 \times e^{0,058 \times IE_v}$	0,7829
Polinómio (2º grau)	$f_c = 0,0004 \times IE_v^2 + 2,4712 \times IE - 11,62$	0,8405
Logarítmica	$f_c = 55,863 \times \ln(IE_v) - 128,91$	0,8376

Quadro 4.7 - Resultados da correlação entre f_c e IE_v (Vertical) - Betão B2

Betão B2	$f_c(IE_v)$	R^2
Linear	$f_c = 1,7576 \times IE_v + 12,499$	0,7507
Potência	$f_c = 3,6643 \times IE_v^{0,8457}$	0,7879
Exponencial	$f_c = 29,268 \times e^{0,0264 \times IE_v}$	0,7613
Polinómio (2º grau)	$f_c = -0,1451 \times IE_v^2 + 11,028 \times IE - 132,37$	0,8158
Logarítmica	$f_c = 56,235 \times \ln(IE_v) - 125,54$	0,7734

Da análise dos resultados dos Quadros 4.6 e 4.7 é possível verificar que os valores de R^2 são aceitáveis quando comparados com a classificação das correlações no Quadro 4.4. As correlações que melhor se ajustam aos resultados experimentais apresentam valores de R^2 de

0,8405 e de 0,815 para o betão B1 e B2 respectivamente, comparativamente aos valores obtidos com o esclerómetro na posição horizontal (Quadros 4.4 e 4.5) existem diferenças significativas em termos do grau de correlação. As correlações em que a orientação do ensaio é na posição vertical apresentam sempre valores do coeficiente de correlação inferiores aos ensaios efectuados na posição horizontal. Contudo, importa referir ainda que para a orientação do ensaio vertical este betão apresenta menos pares de resultados por não ter sido possível avaliar o valor do índice esclerométrico nessa posição em três cubos de B1P1 a B1P3.

Analisando a Figura 4.4 onde se encontra as curvas de correlação e os pares de resultados experimentais para as duas orientações do ensaio é perfeitamente visível que para cada tipo de orientação do esclerómetro corresponde a uma curva de correlação diferente, mais visível ainda é a diferença em termos do tipo de funções da curva de correlação para as duas orientações.

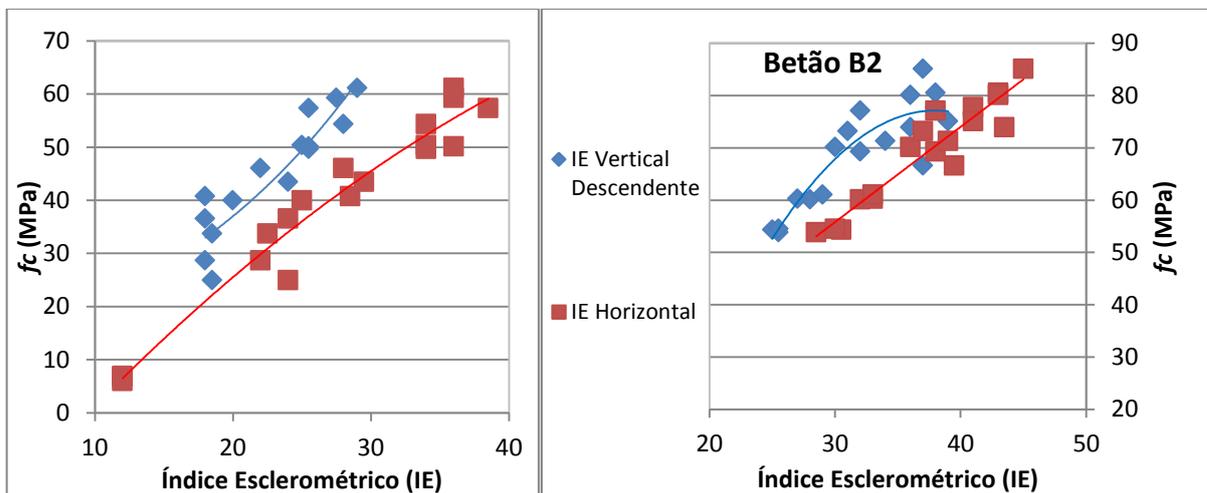


Figura 4.4 - Comparação entre curvas de correlação com diferentes orientações de ensaio

As diferenças das dispersões de pontos e correlações segundo as orientações do ensaio pode ficar-se a deverem ao facto de não se ter conseguido imobilizar os provetes na orientação de ensaio vertical de uma forma eficaz, o que, por vezes, provocava ligeiros movimentos nos provetes cúbicos que podem ter influenciado estes resultados.

4.2.4 Correlação $f_c \times IE$ – abordagem tipo2 NP EN 13791:2008

Como referido na norma NP EN 13791:2008 e referido na secção 4.2.3 existe um processo alternativo à regressão não linear simples para o estabelecimento de correlações entre os ensaios indirectos e a resistência à compressão *in situ*. Esse processo é aplicável quando se dispõe de mais de 9 pares de resultados entre os ensaios indirectos e os ensaios de compressão. Esta abordagem tem por base o ajustamento de uma curva de referência previamente definida na norma através de um deslocamento Δf . Esta abordagem da norma é

uma abordagem igual para todos os ensaios indirectos aplicáveis na norma (esclerómetro, ultra-sons e arranque), só diferindo a função da curva de base para cada ensaio bem como o intervalo de aplicação.

Assim, de forma genérica, é apresentada, de seguida a forma de cálculo do deslocamento da curva de referência para ensaios indirectos (Figura 4.5):

- 1) Calcular para cada par de resultados do ensaio a diferença entre a resistência dada pelo ensaio à compressão e o valor obtido da resistência à compressão obtido na curva de base em função do resultado do ensaio não destrutivo, $\delta f = f_{is} - f_r$;
- 2) Calcular a média das diferenças entre a resistência dada pelo ensaio à compressão e o valor obtido pela curva de base ($\delta f_{m(n)}$) e o desvio padrão dessas diferenças (s);
- 3) Calcular o deslocamento da curva de base $\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 \times s$;
- 4) Deslocar a curva base do valor Δf a fim de obter a relação entre o ensaio de determinação do índice esclerométrico e a resistência à compressão *in situ* ;

Onde:

Δf Deslocamento da curva de base ;

$\delta f_{m(n)}$ Média das diferenças entre a resistência dada pelo ensaio à compressão e o valor obtido pela curva de base ;

f_{is} Resistência à compressão dada pelo ensaio do cubo ;

f_r, f_v, f_F Resistência à compressão obtida pela curva de referência dos ensaios indirectos (r - esclerómetro, v - ultra-sons; F – Força de arranque) ;

S Desvio- padrão das diferenças entre a resistência dada pelo ensaio à compressão e o valor obtido pela curva de base ;

k_1 Valor dependente do número de pares de resultados de ensaios à compressão e ensaios indirectos (Quadro 4.8) ;

A curva de referência aplicável ao índice esclerométrico é a definida pelas seguintes funções:

$$f_R = 1,25 \times R - 23 \quad 20 \leq R \leq 24 \quad (4.6)$$

$$f_R = 1,73 \times R - 34,5 \quad 24 \leq R \leq 50 \quad (4.7)$$

Quadro 4.8 - Valores de K_1

Número de pares de resultados	Valor de K_1
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
15	1,48

Nota: Na norma NP EN 13791:2008 o índice esclerométrico é representado por R em vez de IE como no presente trabalho, tal advém da nomenclatura inglesa (Rebound Number).

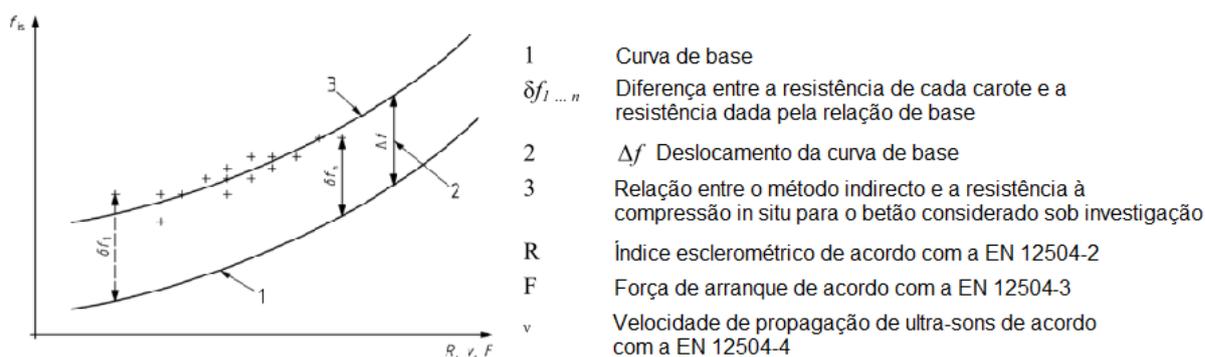


Figura 4.5 - Esquema da determinação do deslocamento da curva de base Δf (NP EN 13791:2008)

A norma refere a utilização de um mínimo de nove pares de resultados entre ensaios de compressão e ensaios esclerométricos para a utilização desta relação, no entanto sempre que possível foram utilizados os dezoito pares de resultados (Monteiro e Gonçalves, 2009). Para o betão B1 os pares de resultados dos Cubos 1, 2 e 3 não foram contabilizados para adopção desta curva de referência pois encontravam-se fora dos valores de aplicação da curva de referência ($IE < 20$).

No Quadro 4.9 é apresentado o cálculo do valor de deslocamento da curva de base para o betão B1 e no Quadro 4.10 o mesmo cálculo para o betão B2.

Quadro 4.9 - Determinação do deslocamento da curva de base Δf - Betão B1

Provete ID #	Índice Esclerométrico (R)	Resistência (N/mm ²)	Curva Básica (N/mm ²)	δf (N/mm ²)	Correlação (N/mm ²)
B1P4	22,5	33,7	5,13	28,58	26,3
B1P5	22,0	28,7	4,50	24,15	25,7
B1P6	24,0	24,9	7,02	17,92	28,2
B1P7	28,5	40,7	14,81	25,92	36,0
B1P8	24,0	36,6	7,02	29,54	28,2
B1P9	25,0	40,0	8,75	31,20	30,0
B1P10	34,0	50,4	24,32	26,07	45,5
B1P11	28,0	46,1	13,94	32,11	35,2
B1P12	29,5	43,5	16,54	26,94	37,7
B1P13	36,0	50,1	27,78	22,34	49,0
B1P14	34,0	54,3	24,32	30,03	45,5
B1P15	34,0	49,6	24,32	25,31	45,5
B1P16	38,5	57,4	32,11	25,27	53,3
B1P17	36,0	61,1	27,78	33,34	49,0
B1P18	36,0	59,2	27,78	31,46	49,0
Número de Provetes:	15 Provetes K1 =1,48				
Média	30,133		Média $\delta f_{m(n)}$	27,3	N/mm ²
Desvio Padrão	5,680		Desvio Padrão	4,14	N/mm ²
			Deslocamento Δf	21,212	N/mm ²

Com o valor do deslocamento Δf determinado a norma impõe ainda um limite de validade para as correlações obtidas (Brozovsky, 2009; Monteiro e Gonçalves, 2009), que no caso do índice esclerométrico esse limite é de ± 2 índices fora da gama para a qual foram estabelecidas as correlações.

Assim a curva de correlação do índice esclerométrico e da resistência à compressão para o betão B1 passa a ser definida pelas seguintes funções:

$$f_R = 1,25 \times R - 23 + 21,212 \quad 20 \leq R \leq 24 \quad (4.8)$$

$$f_R = 1,73 \times R - 34,5 + 21,212 \quad 24 \leq R \leq 40,5 \quad (4.9)$$

Quadro 4.10 - Determinação do deslocamento da curva de base Betão B2

Proвете ID #	Índice Esclerométrico (R)	Resistência (N/mm ²)	Curva Básica (N/mm ²)	Δf (N/mm ²)	Correlação (N/mm ²)
B2P1	28,5	53,86	14,81	39,05	49,0
B2P2	30,5	54,31	18,27	36,04	52,5
B2P3	30,0	54,51	17,40	37,11	51,6
B2P4	32,0	60,12	20,86	39,26	55,1
B2P5	33,0	60,26	22,59	37,67	56,8
B2P6	33,0	61,05	22,59	38,46	56,8
B2P7	36,0	70,17	27,78	42,39	62,0
B2P8	38,0	77,09	31,24	45,85	65,5
B2P9	37,0	73,21	29,51	43,70	63,8
B2P10	38,0	69,28	31,24	38,04	65,5
B2P11	39,0	71,31	32,97	38,34	67,2
B2P12	41,0	77,79	36,43	41,36	70,7
B2P13	39,5	66,60	33,84	32,77	68,1
B2P14	41,0	75,11	36,43	38,68	70,7
B2P15	43,0	80,55	39,89	40,66	74,1
B2P16	43,0	80,10	39,89	40,21	74,1
B2P17	45,0	85,11	43,35	41,76	77,6
B2P18	43,5	73,94	40,76	33,19	75,0
Número de provetes:		18 Provetes K1 = 1,48			
Média	37,278		Média Δf_{m(n)}	39,1	N/mm ²
Desvio Padrão	5,103		Desvio Padrão	3,31	N/mm ²
			Deslocamento Δf	34,24452	N/mm ²

Assim como definido para betão B1 passamos a ter a seguinte correlação:

$$f_R = 1,73 \times R - 34,5 + 34,24452 \quad 26,5 \leq R \leq 47 \quad (4.10)$$

Na Figura 4.7 estão representadas as curvas de correlação para os dois tipos de betão obtidas pela 2ª abordagem da NP EN 13791:2008.

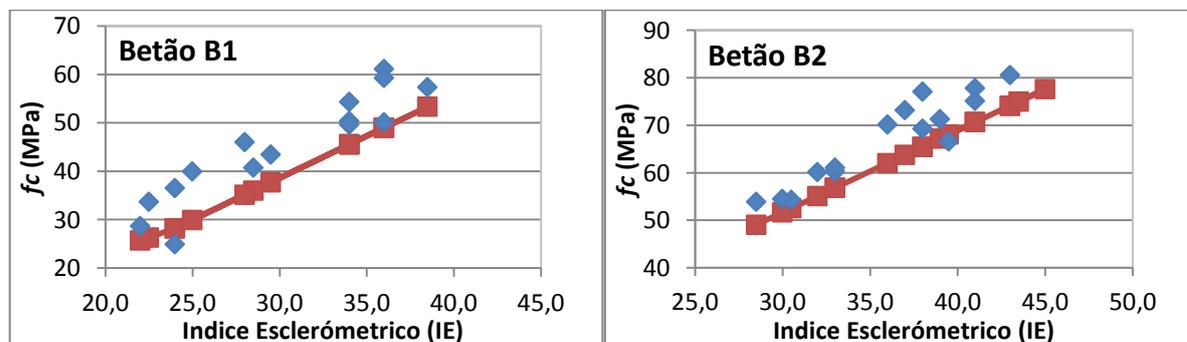


Figura 4.6 Curvas de correlação entre f_c e IE para a abordagem com base numa curva de referência

4.2.5 Comparação entre as curvas de correlação

Nas Figuras 4.7 para o betão B1 e 4.8 para o betão B2, são apresentados gráficos nos quais estão presentes as duas correlações obtidas pelas duas abordagens da norma.

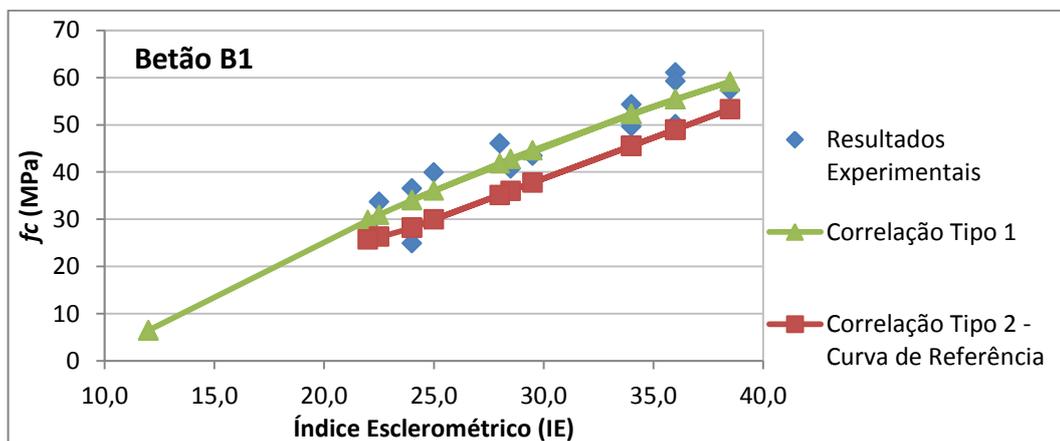


Figura 4.7 - Comparação entre os dois tipos de correlação entre f_c e IE – Betão B1

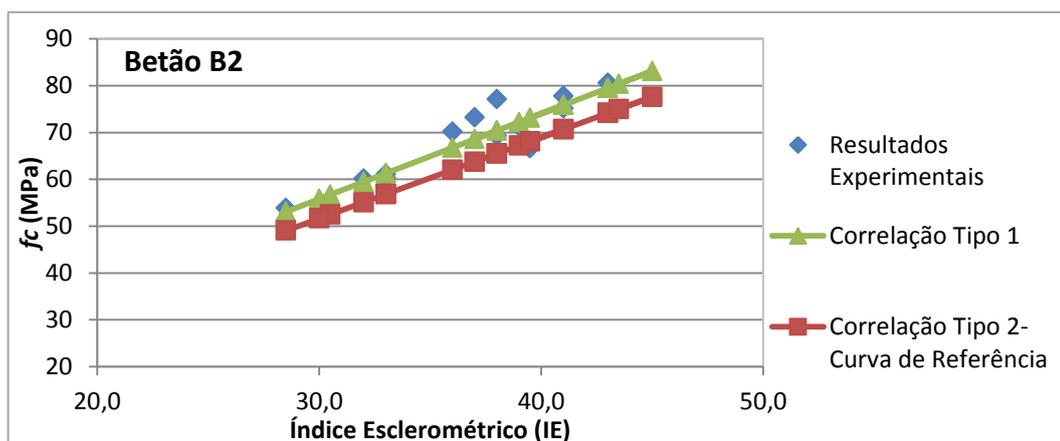


Figura 4.8 - Comparação entre os dois tipos de correlação entre f_c e IE – Betão B2

Analisando as figuras anteriores nota-se que para os dois tipos de betão as correlações da abordagem do tipo 1 da norma (correlações directas entre ensaios) apresentam sempre resultados de resistência à compressão superiores aos da abordagem do tipo 2. Apesar da abordagem do tipo 2 ser uma abordagem mais conservativa, pois permite a utilização de menos pares de resultados entre carotes e ensaios indirectos, quando existe a utilização de um número igual ao necessário para a utilização do tipo 1 (betão B2), esta apresenta sempre valores de resistência à compressão inferiores a abordagem do tipo 1.

Os valores entre as duas abordagens serão mais significativos quando a correlação da abordagem do tipo 1 apresentar um tipo de função diferente da função de correlação da abordagem do tipo 2 (função linear).

4.2.6 Comparação com outros trabalhos publicados

Já foram efectuados trabalhos de estabelecimento de correlações para betões na gama de resistências do presente trabalho, pelo que tem todo o interesse uma comparação dos valores previstos para a resistência à compressão entre os diversos autores, no Quadro 4.11 estão apresentadas as correlações a que esses autores chegaram. De salientar que o autor “escala do esclerómetro” é a referência ao gráfico de correlação que o próprio aparelho já possui no seu verso, semelhante ao apresentado na Figura 2.4.

Quadro 4.11 - Correlações $f_c \times IE$ propostas por outros autores

Autores	Betão B1	Betão B2
Autor (Ricardo Sousa)	$f_c = -0,0213 \times IE^2 + 3,0625 \times IE - 27,206$	$f_c = 1,9771 \times IE^{0,982}$
Escala Esclerómetro (Proceq)	Gráfico do Aparelho	
Hobbs e Kebir (2007)	$f_c = 2,1683 \times IE - 27,747$	
Qasrawi (2000)	$f_c = 1,353 \times IE - 17,391$	
Pascale et al (2000)	$f_c = 0,000135 \times IE^{3,4424}$	

Na Figura 4.9 e Figura 4.10 estão representadas graficamente as funções das correlações descritas por outros autores para os intervalo de índices esclerométricos obtidos no programa experimental do presente trabalho.

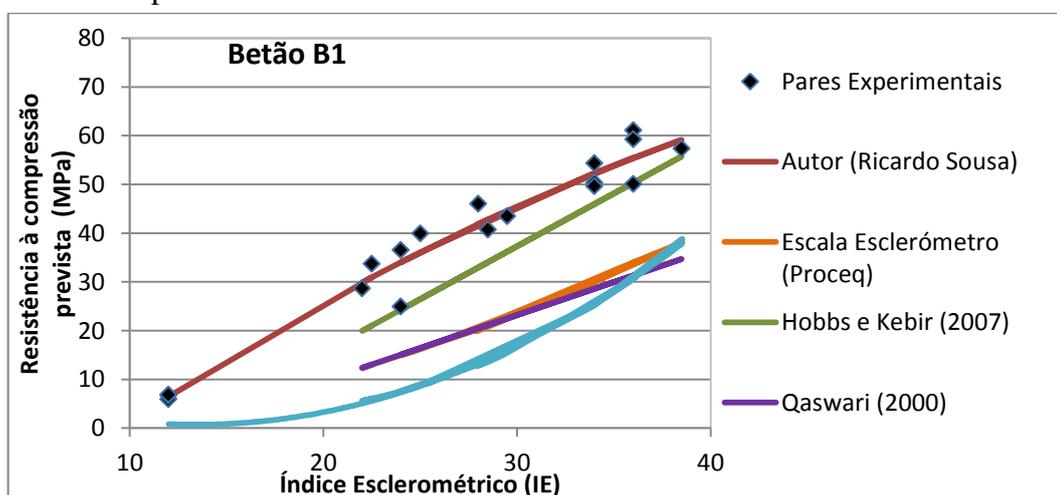


Figura 4.9 - Previsão da resistência à compressão por outros autores – Betão B1

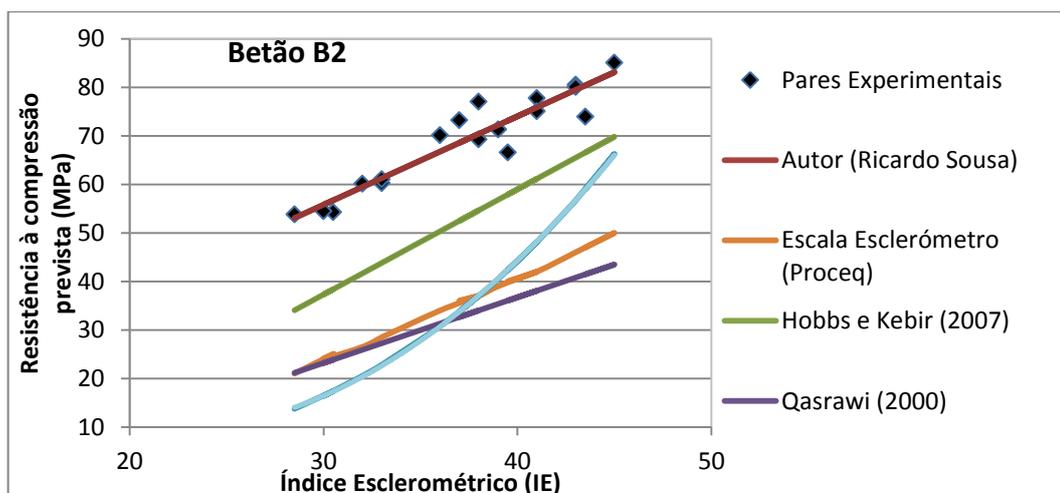


Figura 4.10 - Previsão da resistência à compressão por outros autores – Betão B2

Da análise das Figuras 4.9 e 4.10 pode-se verificar que nenhuma abordagem está suficientemente próxima da correlação que se obteve neste trabalho (correlação do autor) nem dos pares de resultados experimentais, sendo que para o betão B1 a correlação apresentada por Hobbs e Kebir (2007) é a mais próxima. Nesta correlação para os maiores valores dos índices esclerométricos aproxima-se razoavelmente da obtida no presente trabalho, no entanto para valores baixos do índice apresenta diferenças de 10 MPa na resistência estimada. Para o betão B2 não existe nenhuma correlação proposta por outro autor que se adapte aos pontos experimentais sendo que a correlação mais próxima da correlação obtida neste trabalho apresenta sempre diferenças superiores a 10 Mpa.

Pela análise do gráfico pode-se ainda verificar que a utilização da correlação gráfica presente no aparelho é completamente desaconselhável, com a excepção nos casos que se conheçam as composições com que foram elaboradas, o que não é o caso no presente trabalho.

4.3 Ensaio de ultra-sons

4.3.1 Determinação da velocidade de propagação de Ultra-Sons

A determinação da velocidade de propagação de ultra-sons teve por base a norma NP EN 12504-4 (2007). Por essa norma e para transmissões directas (caso do presente trabalho) e semidirectas a velocidade de propagação de ultra-sons no betão é determinada pela equação 2.1 (Capítulo - 2 secção 2.1), onde a distância corresponde a distância entre a posição dos transdutores e o tempo corresponde ao tempo médio das medições.

No Quadro 4.12 é apresentada a velocidade de propagação de ultra-sons no betão para os dois tipos de betão utilizados.

Quadro 4.12 - Velocidade de propagação dos ultra-sons no betão

Betão B1				Betão B2			
Provete ID #	Comprimento de ensaio (mm)	Tempo (μ s)	Velocidade (km/s)	Provete ID #	Comprimento de ensaio (mm)	Tempo (μ s)	Velocidade (km/s)
B1P1	150,85	45,5	3,3125	B2P1	149,73	32,8	4,5594
B1P2	150,17	43,9	3,4192	B2P2	149,66	32,8	4,5600
B1P3	150,62	44,6	3,3771	B2P3	149,85	32,6	4,5994
B1P4	149,58	33,3	4,4892	B2P4	150,13	32,3	4,6538
B1P5	149,80	33,5	4,4690	B2P5	150,16	31,9	4,7043
B1P6	149,67	34,4	4,3559	B2P6	150,17	32,1	4,6782
B1P7	149,80	31,6	4,7345	B2P7	150,22	31,4	4,7902
B1P8	150,09	32,7	4,5955	B2P8	149,97	31,1	4,8284
B1P9	150,05	31,8	4,7215	B2P9	149,91	31,2	4,8110
B1P10	149,87	31,7	4,7278	B2P10	149,82	31,0	4,8391
B1P11	150,09	31,7	4,7317	B2P11	149,71	31,1	4,8107
B1P12	149,90	31,9	4,7050	B2P12	149,75	30,7	4,8715
B1P13	149,55	31,2	4,7963	B2P13	149,92	31,3	4,7837
B1P14	149,85	31,2	4,7998	B2P14	150,07	31,0	4,8378
B1P15	149,63	31,4	4,7592	B2P15	149,73	30,6	4,8995
B1P16	149,88	31,2	4,7977	B2P16	150,16	30,7	4,8944
B1P17	149,96	31,0	4,8343	B2P17	149,88	30,5	4,9109
B1P18	149,77	31,2	4,7942	B2P18	150,07	30,7	4,8883

4.3.2 Evolução da velocidade de propagação de Ultra-sons

De forma a analisar a evolução da velocidade de propagação de ultra-sons ao longo do aumento da resistência dos betões foi efectuado um gráfico da evolução da velocidade média de propagação de ultra-sons ao longo do tempo. Assim, na Figura 4.11 é apresentado o desenvolvimento dos valores médios da velocidade de propagação de ultra-sons.

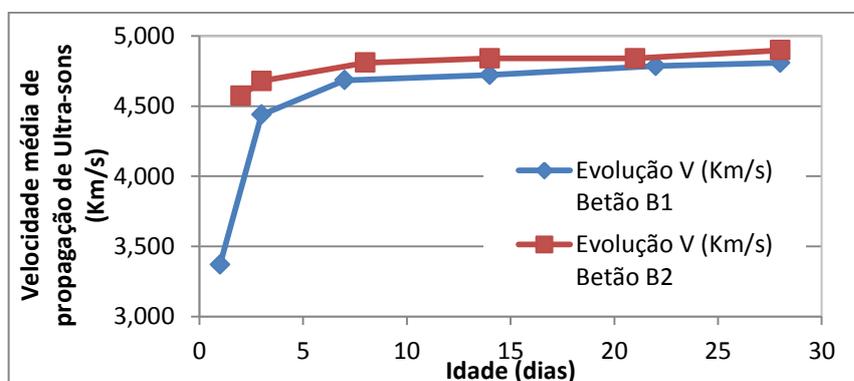


Figura 4.11 - Desenvolvimento dos valores médios da velocidade de propagação de ultra-sons no betão

Na Figura 4.12 verifica-se que para os primeiros dias (< 3 dias) existe um grande aumento da velocidade de propagação de ultra-sons, sendo que a partir dos sete dias o aumento da velocidade de propagação de ultra-sons é praticamente uniforme e menos acentuado.

4.3.3 Correlação $f_c \times V$ – abordagem tipo1 NP EN 13791:2008

Como referido em 4.2.4, a norma NP EN 13791 (2008) estabelece dois processos para o estabelecimento de curvas de correlação entre ensaios indirectos e a resistência à compressão, assim nesta secção serão estabelecidas correlações directas (abordagem tipo 1 da norma) com base nos 18 pares de resultados entre ensaio de ultra-sons e resistência à compressão. Assim para o estabelecimento das curvas de correlação pela abordagem do tipo 1 entre a velocidade de propagação de ultra-sons e a resistência à compressão foram testadas os seguintes modelos de função:

a) Linear $f_c = a \times V + b$ (4.11)

b) Potência $f_c = a \times V^b$ (4.12)

c) Exponencial $f_c = a \times e^{b \times V}$ (4.13)

d) Polinómio (2º grau) $f_c = a \times V^2 + b \times V + c$ (4.14)

e) Logarítmica $f_c = a \times \ln(V) + b$ (4.15)

Onde V representa a velocidade de propagação de ultra-sons no betão e f_c representa a resistência do betão *in situ* obtida segundo o ensaio de compressão em provetes cúbicos de 150 mm de aresta (valores em MPa).

Os resultados das correlações obtidas para os modelos de curva testados encontram-se no Quadro 4.13 e Quadro 4.14 para o betão B1 e B2 respectivamente. Analisando o valor de R^2 nos Quadros 4.13 e 4.14 e tomando como base o definido no Quadro 4.3 pode-se constatar que existe uma grande correlação entre as variáveis. O betão B1 é um betão que consegue obter melhores valores de correlação quando comparado com os betões B2, no entanto ambas as correlações têm valores de R^2 suficientemente grandes para serem considerados aceitáveis.

Quadro 4.13 - Resultados da regressão não linear simples entre f_c e V para o betão B1

Betão B1	$f_c(V)$	R^2
Linear	$f_c = 31,783 \times V - 103,34$	0,8655
Potência	$f_c = 0,0051 \times V^{5,8734}$	0,9829
Exponencial	$f_c = 0,0463 \times e^{1,4622 \times V}$	0,9876
Polinómio (2º grau)	$f_c = 36,81 \times V^2 - 267,82 \times V + 491$	0,9577
Logarítmica	$f_c = 126,55 \times \ln(V) - 149,82$	0,8463

Quadro 4.14 - Resultados da regressão não linear simples entre f_c e V para o betão B2

Betão B2	$f_c(V)$	R^2
Linear	$f_c = 79,671 \times V - 311,17$	0,9253
Potência	$f_c = 0,0097 \times V^{5,6732}$	0,9434
Exponencial	$f_c = 0,2233 \times e^{1,1994 \times V}$	0,9448
Polinómio (2º grau)	$f_c = 108,61 \times V^2 - 948,96 \times V + 2122,7$	0,9402
Logarítmica	$f_c = 376,63 \times \ln(V) - 519,46$	0,9229

Na Figura 4.13 estão representadas graficamente as melhores funções de correlação para os dois tipos de betão. As funções do tipo exponencial são as que melhor se adaptam a as correlações entre resistência a compressão e velocidade de propagação de ultra-sons, o que vai de encontro ao descrito e obtido experimentalmente em Fernandes (2011).

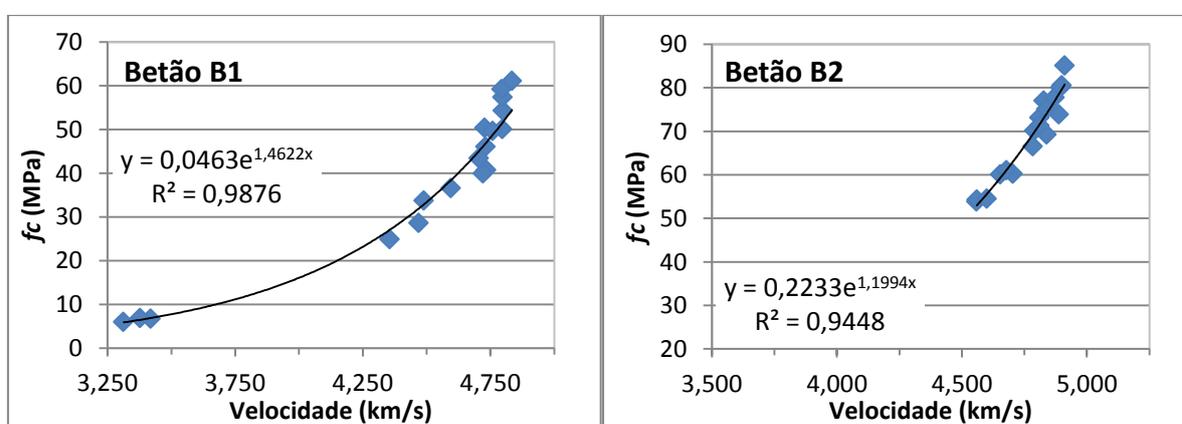


Figura 4.12 - Curva de correlação entre f_c e V

4.3.4 Correlação $f_c \times V$ – abordagem tipo2 NP EN 13791:2008

Como definido em 4.2.4 a Norma NP EN 13791:2008 estabelece um processo de estabelecimento de uma correlação alternativo à regressão não linear simples, para o caso em que não exista um mínimo de 18 pares de resultados entre os ensaios indirectos e os ensaios de compressão. Esta abordagem tem por base o ajustamento de uma curva de referência previamente definida na norma através de um deslocamento Δf e é aplicável quando se dispõe de um mínimo de 9 pares de resultados entre ensaios.

Tomando por base o definido para o ensaio esclerométrico em 4.2.4 a determinação do deslocamento Δf é igual para os diferentes tipos de ensaios indirectos só mudando a curva de base. Dessa forma a curva de base para o ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons é a seguinte:

$$f_v = 62,5 \times V^2 - 497,5 \times V + 990 \quad 4 \leq V \leq 4,8 \quad (4.16)$$

Como nos cubos P1, P2 e P3 observavam-se velocidades de propagação de ultra-sons inferiores a 4 Km/s, esses cubos não entraram para a determinação do deslocamento (Δf) da curva de base. Apesar da curva de referência apenas admitir valores de $V \leq 4,8$ Km/s nestes betões apresentavam-se velocidades superiores pelo que se decidiu utilizar na mesma essa curva de referência até a velocidade limite 4,911 Km/s (Betão B2).

Os Quadros 4.15 e 4.16 apresentam o cálculo do valor do deslocamento da curva de base para os betões B1 e B2 respectivamente.

Quadro 4.15 - Determinação do deslocamento da curva de base Δf - Betão B1

Provete ID #	Comprimento de ensaio (mm)	Tempo (μ s)	Velocidade (mm/ μ s = km/s)	Resistência (N/mm ²)	Curva Básica (N/mm ²)	δf (N/mm ²)	Correlação (N/mm ²)
B1P4	149,58	33,3	4,49	33,7	16,18	17,53	22,2
B1P5	149,80	33,5	4,47	28,7	14,92	13,73	20,9
B1P6	149,67	34,4	4,36	24,9	8,81	16,13	14,8
B1P7	149,80	31,6	4,73	40,7	35,56	5,17	41,6
B1P8	150,09	32,7	4,60	36,6	23,65	12,90	29,7
B1P9	150,05	31,8	4,72	40,0	34,34	5,61	40,3
B1P10	149,87	31,7	4,73	50,4	34,92	15,47	40,9
B1P11	150,09	31,7	4,73	46,1	35,29	10,76	41,3
B1P12	149,90	31,9	4,70	43,5	32,82	10,65	38,8
B1P13	149,55	31,2	4,80	50,1	41,63	8,50	47,6
B1P14	149,85	31,2	4,80	54,3	41,98	12,37	48,0
B1P15	149,63	31,4	4,76	49,6	37,92	11,71	43,9
B1P16	149,88	31,2	4,80	57,4	41,76	15,61	47,8
B1P17	149,96	31,0	4,83	61,1	45,59	15,53	51,6
B1P18	149,77	31,2	4,79	59,2	41,40	17,84	47,4
Número de provetes:		15 Provetes K1 = 1,48					
Média			4,687	Média $\delta f_{m(n)}$		12,6	N/mm ²
Desvio Padrão			0,1433	Desvio Padrão		3,97	N/mm ²
Deslocamento Δf						6,008	N/mm ²

Com o valor do deslocamento Δf determinado a norma impõe ainda um limite de validade para as correlações obtidas, que no caso da velocidade de propagação de ultra-sons esse limite é de $\pm 0,05$ km/s fora do intervalo para a qual foram estabelecidas as correlações. Assim as curvas de correlação entre velocidade de propagação de ultra-sons no betão e a resistência à compressão passa a ser definida pelas seguintes função para o betão B1:

$$f_v = 62,5 \times V^2 - 497,5 \times V + 990 + 6,008 \quad 4,306 \leq V \leq 4,884 \quad (4.17)$$

Quadro 4.16 - Determinação do deslocamento da curva de base Δf - Betão B2

Provete ID #	Comprimento de ensaio (mm)	Tempo (μ s)	Velocidade (mm/ μ s = km/s)	Resistência (N/mm ²)	Curva Básica (N/mm ²)	δf (N/mm)	Correlação (N/mm ²)
1	149,73	32,84	4,559	53,9	20,95	32,90	45,51
2	149,66	32,82	4,560	54,3	21,00	33,30	45,56
3	149,85	32,58	4,599	54,5	23,96	30,55	48,51
4	150,13	32,26	4,654	60,1	28,35	31,78	52,90
5	150,16	31,92	4,704	60,3	32,76	27,50	57,32
6	150,17	32,10	4,678	61,1	30,44	30,61	55,00
7	150,22	31,36	4,790	70,2	41,00	29,17	65,56
8	149,97	31,06	4,828	77,1	44,96	32,13	69,52
9	149,91	31,16	4,811	73,2	43,13	30,08	67,69
10	149,82	30,96	4,839	69,3	46,11	23,17	70,67
11	149,71	31,12	4,811	71,3	43,11	28,21	67,66
12	149,75	30,74	4,872	77,8	49,65	28,14	74,21
13	149,92	31,34	4,784	66,6	40,34	26,26	64,90
14	150,07	31,02	4,838	75,1	45,97	29,14	70,53
15	149,73	30,56	4,900	80,5	52,82	27,73	77,38
16	150,16	30,68	4,894	80,1	52,23	27,86	76,79
17	149,88	30,52	4,911	85,1	54,13	30,98	78,69
18	150,07	30,70	4,888	73,9	51,54	22,41	76,09
Número de provetes:		18 Provetes K1 = 1,48					
Média			4,773	Média $\delta f_{m(n)}$		29,0	N/mm ²
Desvio Padrão			0,118002749	Desvio Padrão		3,00	N/mm ²
Deslocamento Δf						24,556	N/mm ²

Assim como definido para o betão B1 obtivemos a seguinte correlação para o betão B2:

$$f_v = 62,5 \times V^2 - 497,5 \times V + 990 + 24,556 \quad 4,509 \leq V \leq 4,961 \quad (4.18)$$

Na Figura 4.13 estão representadas as curvas de correlação para os dois tipos de betão obtidas pela 2ª abordagem da NP EN 13791:2008.

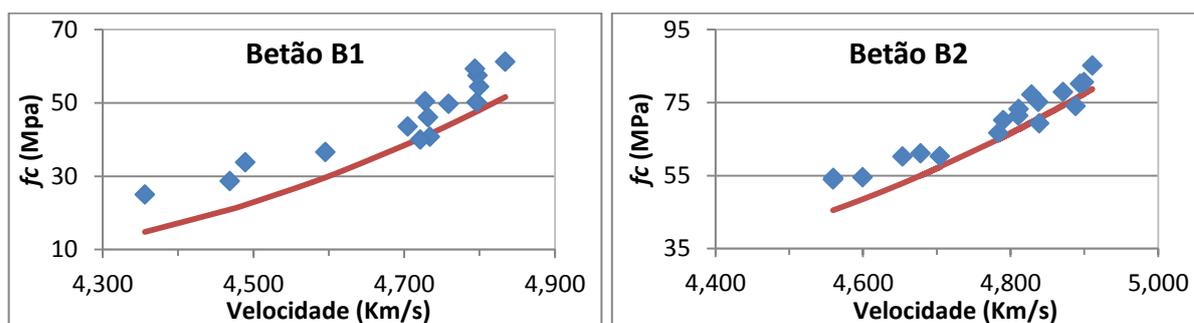


Figura 4.13 - Curvas de correlação entre f_c e V para a abordagem com base numa curva de referência

4.3.5 Comparação entre as curvas de correlação

Analisando as curvas de correlação obtidas pelas duas abordagens da norma representadas no mesmo referencial (Figura 4.15 para Betão B1 e Figura 4.16 para Betão B2) nota-se para os dois tipos de betão que as correlações da abordagem do tipo 1 da norma (correlações directas entre ensaios) dão sempre resultados superiores aos da abordagem do tipo 2, no entanto para maiores velocidades de propagação os valores entre as duas correlações tendem a ficar cada vez mais próximos. Estes resultados podem advir da utilização da curva de base além dos limites definidos na norma ou então devido a diferença entre os dois tipos de curva.

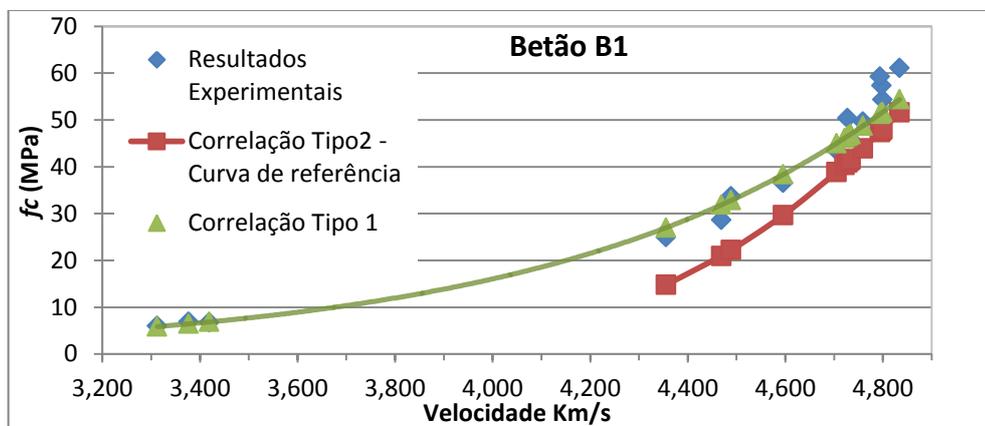


Figura 4.14 - Comparação entre os dois tipos de correlação entre f_c e V – Betão B1

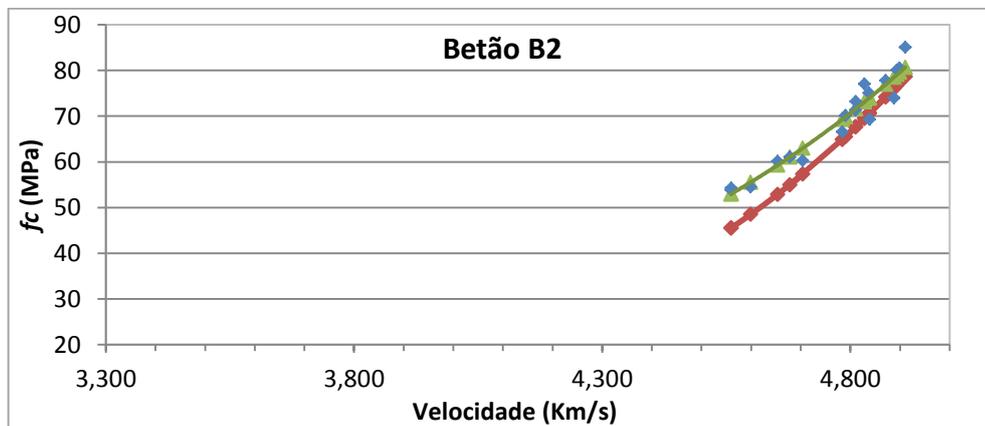


Figura 4.15 - Comparação entre os dois tipos de correlação entre f_c e V – Betão B2

4.3.6 Comparação com outros trabalhos publicados

Já foram efectuados trabalhos de estabelecimento de correlações para betões na gama de resistências do presente trabalho, pelo que tem todo o interesse uma comparação dos valores previstos para a resistência à compressão entre os diversos autores, no Quadro 4.17 estão apresentadas as correlações a que esses autores chegaram.

Quadro 4.17 - Funções de correlação propostas por outros autores

Autores	Betão B1	Betão B2
Autor (Ricardo Sousa)	$f_c = 0,0463 \times e^{1,4622 \times V}$	$f_c = 0,2233 \times e^{1,1994 \times V}$
Hobbs e Kebir (2007)	$f_c = 12,289 \times V^2 - 49,024 \times V + 24,271$	
Qasrawi (2000)	$f_c = 36,72 \times V - 129,077$	
Pascale et al (2000)	$f_c = 10^{-28} \times V^{8,1272}$	

Na Figura 4.16 e Figura 4.17 estão representadas graficamente as funções das correlações descritas por outros autores para os intervalo de velocidade de propagação de ultra-sons obtidos no programa experimental do presente trabalho.

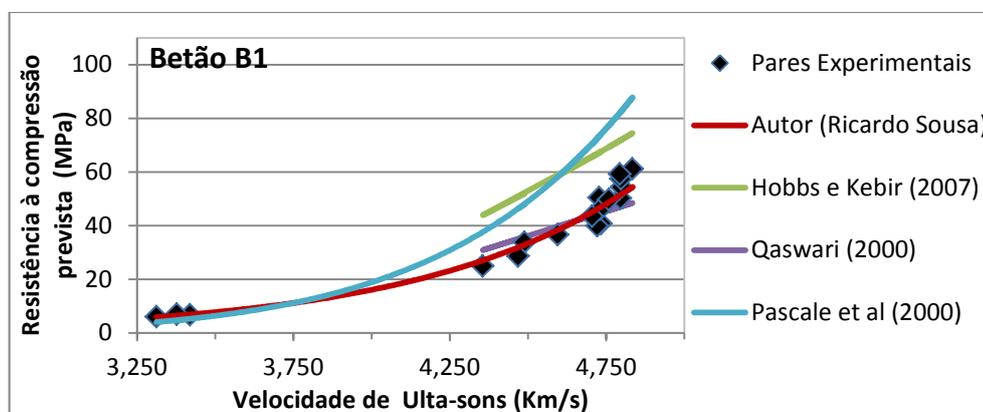


Figura 4.16 - Previsão da resistência à compressão por outros autores – Betão B1

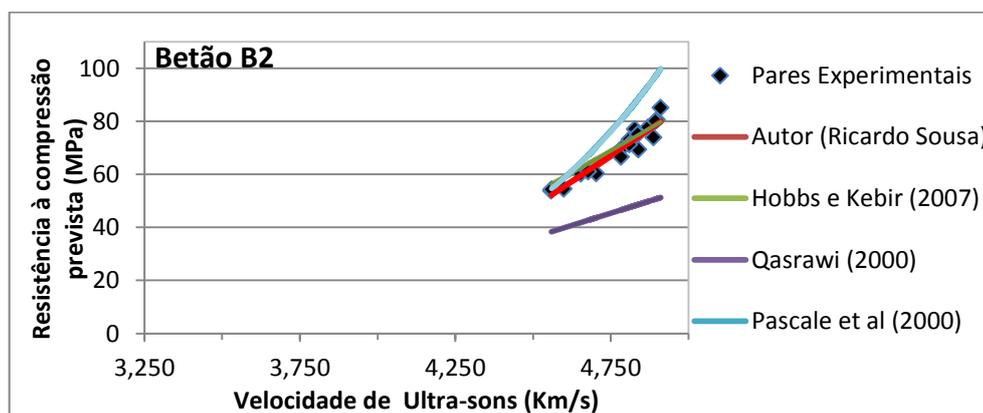


Figura 4.17 - Previsão da resistência à compressão por outros autores – Betão B2

Da análise das Figuras 4.16 e 4.17 verifica-se que a correlação definida por Pascale et al (2000) representa razoavelmente os dados experimentais dos dois betões em velocidades de propagação baixas, e que a correlação de Hobbs e Kebir (2007) adapta-se muito bem aos dados experimentais do betão B2, nenhuma das outras correlações se adaptam a qualquer tipo dos dados experimentais. Desta forma demonstra-se que as correlações apenas podem ser usadas no próprio betão para as quais são obtidas

4.4 Obtenção das correlações múltiplas

Segundo Samarin (2004) a aplicação de métodos combinados para a determinação da resistência à compressão no betão teve o seu início em 1950 com estudos efectuados em que o objectivo da utilização de um método combinado era o aumento da fiabilidade do método quando comparado com a fiabilidade de um método isolado.

Correlações múltiplas podem ser efectuadas de duas fórmulas fazendo o ajuste de uma superfície aos pontos tridimensionais que representam os resultados no ensaio à compressão e nos ensaios indirectos, ou seccionando intervalos de resistência à compressão e com base nesses intervalos realizar uma correlação entre a velocidades de propagação de ultra-sons e o índice esclerométrico (Qasrawi, 2000).

Assim dessa forma nesta secção apenas será estabelecidas correlações com base nos resultados de cada provete no ensaio esclerométrico, ensaio de ultra-sons e ensaio à compressão, tentando ajustar uma curva a esses valores (Figura 4.18) e comparando com os valores de R^2 nas correlações dos ensaios simples.

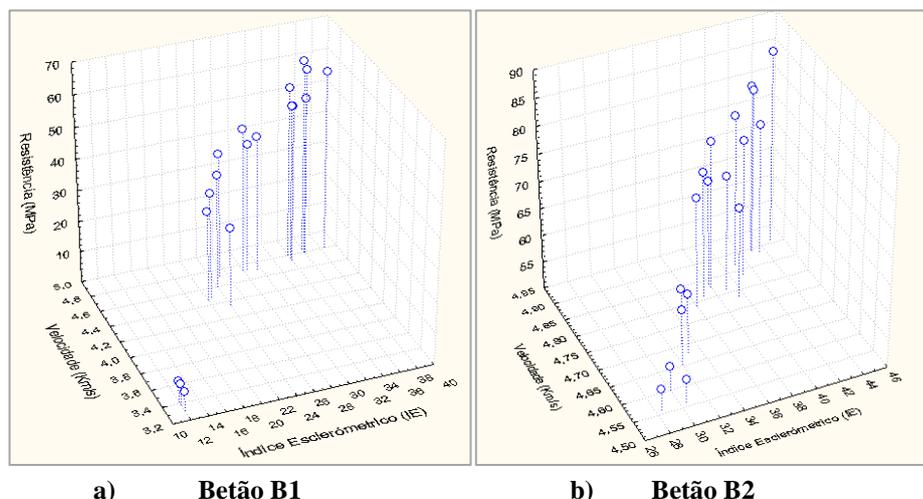


Figura 4.18 - Representação tridimensional dos resultados experimentais dos provetes cúbicos

Para a análise do estudo de ajuste de uma superfície com uma variável dependente e duas variáveis independentes recorreu-se a utilização de software estatístico (MatLab e Statistica) que permite testar modelos de superfície. Assim nos estudos de regressão não linear múltipla, visando a escolha do modelo de superfície que melhor se ajusta a correlação $V \times IE \times Fc$ foram testados os seguintes modelos de superfície:

a)
$$fc = a + b \times IE + c \times V \quad (4.19)$$

b)
$$fc = a \times IE^b + c \times V^d + e \quad (4.20)$$

$$c) \quad f_c = a \times IE^b \times V^c \quad (4.21)$$

$$d) \quad f_c = e^{(a \times IE^b \times V^c)} \quad (4.22)$$

$$e) \quad f_c = e^{(a+b \times IE^c + d \times V^e)} \quad (4.23)$$

Nos Quadros 4.18 e 4.19 representam respectivamente para o betão B1 e betão B2 as funções de superfície que melhor se ajustaram aos dados experimentais bem como o coeficiente de correlação obtido nesse ajustamento.

Quadro 4.18 - Correlação entre f_c , IE e V para o betão B1

Função	Betão B1 - f_c (IE,V)	Coefficiente de correlação (R^2)
a)	$f_c = -44,145 + 1,49544 \times IE + 9,45962 \times V$	0,9651
b)	$f_c = 0,005441 \times IE^{0,65585} \times V^{4,38561}$	0,9813
c)	$f_c = -44,145 + 1,49544 \times IE + 9,45962 \times V$	0,9799
d)	$f_c = e^{(1,5657 \times IE^{0,2090} \times V^{0,1397})}$	0,9809
e)	$f_c = e^{(-5,5806 + 0,825 \times 10^{-4} \times IE^{2,32621} + 3,55042 \times V^{0,619227})}$	0,9820

Quadro 4.19 - Correlação entre f_c , IE e V para o betão B2

Função	Betão B2 - f_c (IE,V)	Coefficiente de correlação (R^2)
a)	$f_c = -246,96 + 0,3973 \times IE + 63,1182 \times V$	0,9284
b)	$f_c = -4,2 \times 10^{-5} \times IE^{2,99777} + 0,151 \times 10^{-8} \times V^{15,1608} + 40,0833$	0,94072
c)	$f_c = 0,012086 \times IE^{0,07882} \times V^{5,34804}$	0,9347
d)	$f_c = e^{(0,5170 \times IE^{0,1212} \times V^{1,3161})}$	0,9364
f)	$f_c = e^{(3,5506 + 0,88 \times 10^{-4} \times IE^{1,7715} + 0,401 \times 10^{-6} \times V^{9,2093})}$	0,94071

Da análise dos Quadros 4.18 e 4.19 verifica-se a existência de uma grande coesão entre as variáveis quando da observação do valor de R^2 que toma valores sempre superiores a 0,92. Numa análise aos métodos separados verificamos que os valores apresentados pela correlação $f_c \times V$ – Abordagem tipo1 EN 13791:2008 descritos na secção 4.3.3 apresentam valores do coeficiente de correlação superiores aos obtidos nos métodos combinados pelo que neste caso não é viável a aplicação de métodos combinados para a determinação da resistência à compressão *in situ*, no entanto Qasrawi (2000) no seu estudo chegou a conclusão que para o caso dos betões utilizados por ele a utilização de métodos combinados era mais exacta que a de utilização de métodos simples.

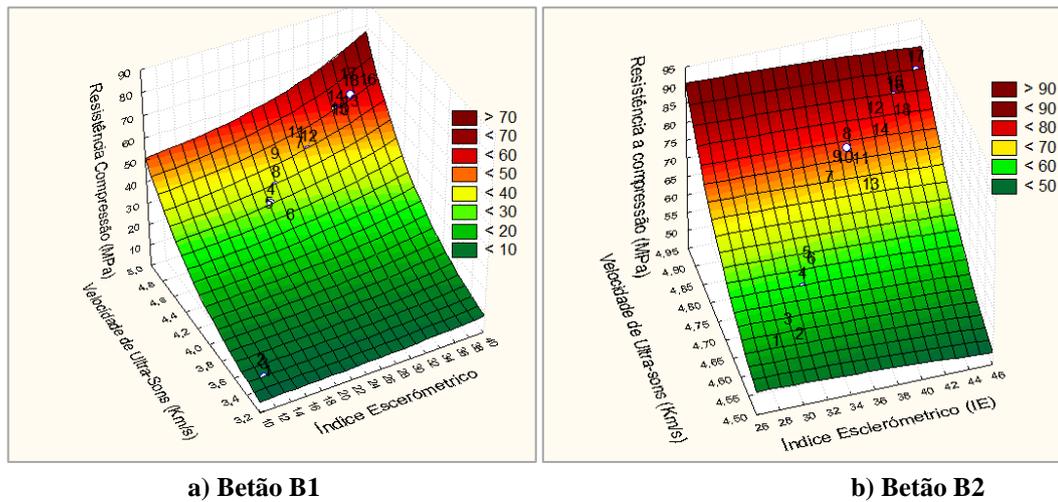


Figura 4.19 - Representação gráfica das correlações com base nos métodos combinados

4.5 Determinação da resistência nas vigas prefabricadas

Como referido no capítulo 3 ao mesmo tempo que se efectuou a betonagem dos provetes cúbicos também se realizou a betonagem das vigas 1 e 2 com os betões utilizados no enchimento dos provetes cúbicos, nestas vigas foram realizados os ensaios indirectos com vista a determinação de resistência à compressão após o estabelecimento das correlações para o ensaio esclerométrico e ensaio de ultra-sons.

Assim para a determinação da resistência da viga foram definidos 3 locais de ensaio nestas (Figura 3.9 e Figura 3.10), onde se realizaram os ensaios esclerométrico e de ultra-sons. Estes ensaios foram executados nas idades de 3 e 7 dias para a viga 1 (Betão B1) e de 2 e 6 dias para a viga 2 (Betão B2). Nos ensaios realizados na viga de betão B1 aos 7 dias e na viga de betão B2 aos 6 dias não foi possível obter resultados no ponto intermédio devido a inexistência de plataforma de segurança para a realização dos mesmos.

A determinação dos índices esclerométricos e da velocidade de propagação de ultra-sons encontra-se no Anexo E. No Quadro 4.20 estão representados as correlações pré estabelecidas e usadas para determinar a resistência nas vigas, enquanto no Quadro 4.21 estão representadas as resistências obtidas nos pontos de ensaio segundo as correlações.

Quadro 4.20 - Correlações utilizadas para a determinação da resistência do betão *in situ*

Abordagem		Correlação para o betão B1	Correlação para o betão B2
Índice Esclerométrico	Tipo1	$f_c = -0,0213 \times IE^2 + 3,0625 \times IE - 27,206$	$f_c = 1,9771 \times IE^{0,982}$
	Tipo2	$f_r = 1,73 \times R - 34,5 + 21,212$ Com $24 \leq R \leq 40,5$	$f_r = 1,73 \times R - 34,5 + 34,24452$ Com $26,5 \leq R \leq 47$

Velocidade de Ultra-sons	Tipo1	$f_c = 0,0463 \times e^{1,4622 \times V}$	$f_c = 0,2233 \times e^{1,1994 \times V}$
	Tipo2	$f_v = 62,5 \times V^2 - 497,5 \times V + 990 + 6,0078$ Com $4,306 \leq V \leq 4,887$	$f_v = 62,5 \times V^2 - 497,5 \times V + 990 + 24,556$ Com $4,501 \leq V \leq 4,961$

Quadro 4.21 - Valores de resistências nas vigas

Betão B1 Viga 1							
		1 Dias 24/04 (MPa)			7 Dias 30/04 (MPa)		
	Localização	P1-A	P2-B	P3-C	P1-A	P2-B	P3-C
Índice Esclerométrico	Abordagem 1	41,84	41,84	45,50	50,66	-	50,66
	Abordagem 2	35,15	35,15	38,61	43,80	-	43,80
Ultra-sons	Abordagem 1	41,37	41,26	43,40	53,21	-	52,86
	Abordagem 2	32,10	33,65	36,61	50,02	-	49,54
	CV	12,7%	11,0%	10,0%	8,1%	-	7,9%

Betão B2 Viga 2							
		2 Dias 26/04 (MPa)			6 Dias 30/04 (MPa)		
	Localização	P1-A	P2-B	P3-C	P1-A	P2-B	P3-C
Índice Esclerométrico	Abordagem 1	66,73	64,91	74,00	63,09	-	64,91
	Abordagem 2	62,02	60,29	68,94	58,56	-	60,29
Ultra-sons	Abordagem 1	63,36	63,43	63,12	64,42	-	64,48
	Abordagem 2	57,76	57,84	57,47	59,03	-	59,10
	CV	5,9%	5,1%	10,9%	4,8%	-	4,7%

Pela análise do Quadro 4.21 constata-se que pelas diferentes abordagens se obtém diferentes valores de estimativa da resistência à compressão bem distintos entre si, no entanto, a abordagem 2 para os ensaios realizados apresenta sempre valores mais conservativos quando comparados com a abordagem um.

Os ensaios de determinação de propagação de velocidade de ultra-sons conduziram a estimativas de resistência sempre com valores próximos nas três zonas de ensaio, enquanto o ensaio esclerométrico apresentou discrepâncias razoáveis entre zonas, o que demonstra a elevada variabilidade na determinação do índice esclerométrico em comparação com a determinação da velocidade de propagação de ultra-sons. Atendendo ao coeficiente de variação pode-se verificar que para maiores valores de resistência menor é a diferença entre ensaios e por consequente o valor de coeficiente de variação.

A utilização de uma destas abordagens para o controlo de produtos de prefabricação implica a escolha da melhor correlação, bem como de um intervalo de confiança adequado. Como visto embora as 4 correlações para obtenção da resistência a compressão *in situ* obtidas neste trabalho possam ser utilizadas estas conduzem a valores bem diferentes, pelo que a escolha de um método torna-se difícil.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusão

A revisão bibliográfica efectuada, assim como o procedimento experimental apresentados ao longo do presente trabalho proporcionaram a redacção de algumas conclusões, as quais importa sintetizar.

O ensaio esclerométrico, apesar de merecer por parte de muitos investigadores um descrédito relativamente à sua capacidade para estimar a resistência real *in situ* do betão, com o estabelecimento de correlações adequadas, é um método que permite a determinação da resistência à compressão. É especialmente apontado para análise comparativa da resistência de elementos unicamente com base na sua dureza superficial, indicando zonas com valores diferentes. É um ensaio que não inflige qualquer dano significativo na estrutura e que, aliado ao seu baixo custo, à disponibilidade imediata de resultados e à facilidade e rapidez de execução, o tornam o ensaio mais utilizado na construção civil. Apresenta uma grande variabilidade de resultados na determinação do índice esclerométrico pois apenas permite a caracterização de uma zona muito superficial e possui muitas variáveis que podem afectar o resultado, no entanto, devido à sua facilidade e baixo custo, com a realização de mais ensaios na proximidade de uma zona de ensaio que apresente valores anormais, pode-se eliminar a incerteza quanto a essa zona de ensaio.

Relativamente ao método da determinação da velocidade de propagação de ultra-sons, também é um método que não é aconselhado por muitos autores, para a determinação da resistência, no entanto, com o estabelecimento de correlações adequadas, é um método que permite a determinação da resistência à compressão. É um método mais complexo quando comparado com o ensaio esclerométrico e que exige a utilização de pessoal qualificado para a sua realização, pois tem um grande número de factores que podem influenciar os resultados do ensaio (presença de armaduras, carbonatação, etc.), é um método que para determinações mais correctas e exactas necessita que seja determinada a velocidade com base numa transmissão directa.

O principal objectivo deste trabalho passou pela avaliação da aplicabilidade do ensaio esclerométrico para a determinação da resistência à compressão pela norma NP EN 13791:2008. Neste sentido, uma das primeiras conclusões experimentais obtidas foi, efectivamente, a de que os ensaios esclerométricos e de ultra-sons podem ser utilizados para determinar a resistência *in situ*. De facto, apesar das correlações apresentadas ao longo do trabalho se referirem apenas aos betões produzidos, obtidas entre as diferentes grandezas dos ensaios, conduzem a valores de coeficiente de correlação elevados o que demonstra a

possibilidade da determinação da resistência à compressão com base nos ensaios indirectos, após o estabelecimento de uma correlação adequada.

As duas abordagens da norma conduziram a resultados (correlação directa entre ensaios de carotes e ensaios indirectos; ajustamento de curva de referência) de correlação muito razoáveis, sendo que a 2ª abordagem da norma apresentou sempre resultados inferiores à primeira abordagem o que vai de encontro com o expectável visto tratar-se de uma abordagem que pode conter menos resultados de ensaios e, por conseguinte, mais incerta.

A 1ª abordagem da NP EN 13791 (2008), apresenta valores de coeficiente de correlação elevados para todas as curvas testadas, no entanto, sem uma análise mais cuidada e com base apenas nos valores dos coeficientes de correlação a escolha de uma correlação poderá conduzir a erros. De facto, apesar de os coeficientes de correlação serem todos elevados, os intervalos dos testes podem ser de tal maneira reduzidos que conduzam a pontos experimentais muito próximos e a valores de coeficiente de correlação elevados para as diversas funções. Numa análise gráfica poderá ser mais facilmente perceptível as diferenças entre as correlações estimadas, no presente trabalho obtiveram-se para os mesmos pares de resultados correlações em que a função apresentava curvatura positiva e outras com curvaturas negativas. Para estes casos um maior número de resultados ou com um intervalo menos limitativo pode ser a opção para a escolha da correlação a adoptar.

Na 2ª abordagem da NP EN 13791 (2008), existem umas considerações a fazer quanto à sua aplicabilidade tais como, por exemplo, a colocação das curvas de base num nível baixo para que o deslocamento de base seja sempre positivo, no entanto, de facto, para os chamados betões velhos o deslocamento pode não ser sempre positivo (Monteiro e Gonçalves, 2009). Esta abordagem conduziu a resultados mais conservativos que os da abordagem do tipo 1 neste trabalho, no entanto não se pode generalizar pois em situações que as abordagens apresentem correlações com funções de tipo diferentes poderá ocorrer diferenças não conservativas.

No que diz respeito à curva de base do ensaio esclerométrico, esta não tem em consideração a posição do esclerómetro que, como verificado, afecta as correlações, assim sendo, a resistência pela relação da curva básica é discutível, além disso a curva básica não permite a utilização deste método para valores fora do intervalo considerado aplicável, no entanto existem índices esclerométricos superiores e inferiores ao estipulado.

Na determinação da velocidade de propagação de ultra-sons pela 2ª abordagem a gama de intervalos utilizável para esta abordagem é limitativa, pois não permite a utilização do método para velocidades diferentes do intervalo considerado, o que, como foi evidenciado nos resultados experimentais deste trabalho, existem betões que apresentam velocidades

superiores a esse intervalo. Além disso, na curva de base é absurdo ter uma velocidade de propagação de 4,0 Km/s quando a resistência do betão é de 0 MPa. A utilização de uma curva de base cuja função é do tipo polinomial de 2º grau é contrária ao função tipo que muitos autores (Fernandes, 2011) descrevem para a previsão da resistência a compressão com base na velocidade de propagação de ultra-sons, o que poderá conduzir a diferenças consideráveis entre as duas abordagens.

Em suma, a determinação da resistência à compressão através de relações empíricas obtidas com base em ensaios indirectos e ensaios de compressão em carotes é uma realidade. A escolha da abordagem a utilizar, além de ter em conta o número de pares de resultados que se dispõe, deve ter em conta a exactidão que se pretende; na abordagem do tipo 1 é possível obter intervalos de confiança e de predição para as correlações, conseguindo-se definir com alguma exactidão os intervalos expectáveis de resistência. A abordagem do tipo 2 é uma abordagem utilizada quando se dispõe de menos pares de resultados de ensaios, é uma abordagem mais conservativa, no entanto não é possível definir qual a confiança da estimativa (Monteiro e Gonçalves, 2009).

5.2 Recomendação para trabalhos futuros

Os ensaios esclerométricos e de determinação de velocidade de propagação de ultra-sons no betão são bastante utilizados na engenharia civil, contudo não existe um grande esclarecimento quanto à fiabilidade dos mesmos, ora, assim sendo, tem todo o interesse o estudo aprofundado desta temática, pelo que se apresentam, de seguida, alguns campos de investigação que futuramente poderão merecer atenção:

- Estudo semelhante ao executado neste trabalho, mas, com maior diversidade de betões utilizados e maior número de pares de resultados, que permita o tratamento de dados de forma estatística, criando intervalos de confiança e de predição.
- Existe uma grande diversidade de betões utilizados actualmente, betões leves, betões brancos, betões com adição de fibras etc.. A determinação da resistência *in situ* nesses betões com base em ensaios indirectos será possível? Qual a fiabilidade? Nesse sentido e de forma a responder a algumas destas perguntas importa avaliar a aplicabilidade da determinação da resistência nesses betões.
- No sector da reabilitação, por vezes, é necessário avaliar a resistência da estrutura existente, tendo em conta que são betões com alguma idade, com poucas ou nenhuma adições e com gamas de resistências mais baixas. Nesse sentido é de todo o interesse uma análise da aplicabilidade da utilização de métodos indirectos para a determinação da resistência *in situ* de betões na reabilitação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abo-Qudais, S.A. (2005). “Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves”. *Construction and Building Materials*, Vol.19, pp. 257- 263.

American Concrete Institute, ACI 228.1R-03, 2003, “In-Place Methods to Estimate Concrete Strength”, Detroit.- USA.

ASTM (1985), “Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete”. C805-85, American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM (1983), “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete” C597-83, American Society for Testing and Materials, USA.

André, J. (2007a). “O ensaio Esclerométrico: como e quando o utilizar”. *Betão – Revista APEB*, Número 17, pp. 27-37.

André, J. (2007b). “O ensaio de Ultra-sons: como e quando o utilizar”. *Betão – Revista APEB*, Número 19, pp. 23-32.

Branco, Abilio A. C (1956). “ Concreto: Julgamento e Inspeção pelo esclerômetro de Schmidt”. Gráfica Milone Ltda, Rio de Janeiro.

Brozovsky, J. (2009). “Evaluation of calculation correlation efficiency as mentioned in EN13791 In Order to Determination Concrete Compression Strength by Nondestructive Testing”. The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Ljubljana , Slovenia, pp 221-231.

Brozovsky, J., Procházka, D. and Beneš, D. (2009). “Determination of High Performance Concrete Strength by Means of Impact Hammer”. The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Ljubljana, Slovenia, pp 233-241.

Brozovsky, J. and Zach, J. (2011). “Influence of Surface Preparation Method on the Concrete Rebound Number obtained from Impact Hammer Test”. 5th Pan American Conference for NDT, Cancun, México.

Bungey, J. H. (1992). “Testing Concrete In Structures: A Guide to Equipment for Testing Concrete in Structures”. CIRIA, London.

Bungey, J. H., Millard, (1996), “Testing of concrete in structures”. 3º Ed., Chapman & Hall, London.

Chryso@ (2012). http://pt.chryso.com/upload/t_documents/Fichier_L1/49075/CHRYSO%C2%AEPlast%20820.pdf . Chryso (Página de internet oficial), Paço de Arcos.

Crawford, G. I. (1997). “Guided to Nondestructive Testing of Concrete”. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington.

Fernandes, L. M. M. C (2011) “Determinação da resistência a compressão do betão através de ensaios de carotes”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Gonçalves, A. F. (1986). “Novos ensaios não destrutivos para a determinação da resistência do betão nas estruturas”. LNEC, Lisboa.

Hobbs, B., Kebir, T. M. (2007). “Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings”. Forensic Science International Volume 167, Issues 2–3, pp. 167–172.

IAEA. (2002). “Guidebook on non-destructive testing of concrete structures”. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Malhotra, V. M. (1984). “In Situ / Nondestructive Testing of Concrete – A Global Review”, Em: Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP – 82. American Concrete Institute, Detroit (USA).

Malhotra, V. M. (2004). “Surface Hardness Methods.” Em: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds), CRC handbook on non-destructive testing of concrete, 2ªed.(2004). CRC Press, Boston (USA).

Monteiro, A., Gonçalves, A, (2009). “Assessment of characteristic compressive strength in structures by the rebound hammer test according to EN 13791: 2007”. Non-Destructive Testing in Civil Engineering – 09, Nantes, France.

Naik, T. R., Malhotra, V. M., Popovics, S. (2004). “The ultrasonic pulse velocity method.” Em: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds), CRC handbook on non-destructive testing of concrete, 2ªed.(2004), CRC Press, Boston (USA).

NP EN 12504-2 (2003). “Ensaios do betão nas estruturas. Parte 2: Determinação do índice esclerométrico.” Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 12504-4 (2007). “Ensaio do betão nas estruturas. Parte 2: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons.” Instituto Português da Qualidade, Portugal.

NP EN 13791 (2008). “Avaliação da resistência à compressão do betão nas estruturas e produtos prefabricados”. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

OZ-Diagnóstico@ (2012a). <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20001.pdf>. OZ-Diagnóstico (Página de internet oficial) OZ-Diagnóstico, Lisboa.

OZ-Diagnóstico@ (2012b). <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20004.pdf>. OZ-Diagnóstico (Página de internet oficial) OZ-Diagnóstico, Lisboa.

Pascale, G., Leo, A. D., Carli, R. (2000). “Evaluation of Actual Compressive Strength of High Strength Concrete by NDT”. 15th World Conference on Nondestructive Testing, WCNDT, Roma, em www.ndt.net.

Pereira, J. P. V. (1999). “Avaliação da resistência à compressão do betão através de ensaios não destrutivos.”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Proceq@ (2012). <http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto.html>. Proceq (Página de internet oficial) Proceq Equipments, England.

Qasrawi, H. Y. (2000). “Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted”. *Cement and Concrete Research* Vol.30, 5, pp. 739-746.

Samarin, A. (2004). “Combined Methods” Em: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds), *CRC handbook on non-destructive testing of concrete*, 2ª edição, CRC Press, Boston (USA).

Secil@ (2012), <http://www.secil.pt/pdf/CEMIAL425R.pdf>. Secil (Página de internet oficial), Lisboa.

Sika@ (2012), <http://pt01.webdms.sika.com/files/show.do?documentID=18> Sika (Página de internet oficial), Vila Nova de Gaia.

Kim, J., Kim, C., Yi, S., Lee, Y. (2009), “Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete”, *Cement & Concrete Composites* Volume 31, Issue 2, pp. 139-144.

ANEXOS

Anexo A - Determinação da resistência à compressão nos provetes cúbicos

Betão B1								
ID #	Aresta 1 (mm)	Aresta 2 (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Peso (g)	Densidade (kg/m ³)	Máxima Carga kN	Resistência (N/mm ²)
B1P1	150,9	149,7	150,2	22574,7	7918	2335	135	6,0
B1P2	150,2	150,0	150,0	22522,5	7938	2350	152	6,7
B1P3	150,6	150,0	151,6	22587,0	7834	2288	156	6,9
B1P4	149,6	152,7	150,1	22840,9	7863	2294	770	33,7
B1P5	149,8	152,7	150,9	22874,5	8029	2326	655	28,7
B1P6	149,7	149,5	149,7	22371,2	7622	2275	558	24,9
B1P7	149,8	150,1	149,9	22477,5	7970	2366	915	40,7
B1P8	150,1	151,2	149,9	22693,6	8072	2372	830	36,6
B1P9	150,1	149,9	149,8	22489,5	8046	2388	899	40,0
B1P10	149,9	149,8	153,0	22447,5	8029	2339	1131	50,4
B1P11	150,1	150,1	150,7	22534,5	7938	2337	1038	46,1
B1P12	149,9	150,0	151,3	22486,5	7959	2339	978	43,5
B1P13	149,6	151,3	149,5	22626,9	7953	2351	1134	50,1
B1P14	149,9	152,7	150,6	22879,1	8049	2337	1243	54,3
B1P15	149,6	153,0	149,8	22890,4	8034	2343	1136	49,6
B1P16	149,9	151,0	150,2	22636,4	8054	2370	1299	57,4
B1P17	150,0	151,8	149,9	22759,4	8115	2378	1391	61,1
B1P18	149,8	151,4	149,9	22667,7	8060	2372	1343	59,2

Betão B2								
ID #	Aresta 1 (mm)	Aresta 2 (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Peso (g)	Densidade (kg/m ³)	Máxima Carga kN	Resistência (N/mm ²)
B2P1	149,7	149,9	151,4	22438,5	8247	2427	1209	53,9
B2P2	149,7	150,4	149,9	22513,4	8221	2436	1223	54,3
B2P3	149,9	149,8	151,9	22452,0	8192	2401	1224	54,5
B2P4	150,1	150,0	150,2	22515,0	8177	2418	1354	60,1
B2P5	150,2	151,4	150,1	22729,7	8254	2419	1370	60,3
B2P6	150,2	149,6	152,7	22465,4	8233	2400	1372	61,1
B2P7	150,2	150,6	152,8	22618,6	8278	2395	1587	70,2
B2P8	150,0	152,1	150,2	22813,4	8337	2434	1759	77,1
B2P9	149,9	149,8	151,6	22462,5	8226	2416	1645	73,2
B2P10	149,8	151,4	149,9	22687,2	8228	2420	1572	69,3
B2P11	149,7	151,5	150,2	22685,6	8231	2415	1618	71,3
B2P12	149,8	152,8	149,8	22878,8	8315	2425	1780	77,8
B2P13	149,9	150,1	150,8	22504,5	8178	2411	1499	66,6
B2P14	150,1	150,0	151,7	22510,5	8255	2417	1691	75,1
B2P15	149,7	152,1	149,0	22778,4	8295	2444	1835	80,5
B2P16	150,2	153,0	150,1	22976,0	8363	2425	1840	80,1
B2P17	149,9	151,0	149,9	22633,4	8178	2410	1926	85,1
B2P18	150,1	153,2	150,2	22993,7	8354	2419	1700	73,9

Anexo B - Determinação do índice esclerométrico para a posição do esclerómetro na horizontal nos provetes cúbicos

Leituras	Betão B1																																							
	1 Dias 24/04					3 Dias 26/04					7 Dias 30/04					14 Dias 7/05					22 Dias 15/05					28 Dias 21/05														
	Cubo P1	Cubo P2	Cubo P3	Cubo P4	Cubo P5	Cubo P6	Cubo P7	Cubo P8	Cubo P9	Cubo P10	Cubo P11	Cubo P12	Cubo P13	Cubo P14	Cubo P15	Cubo P16	Cubo P17	Cubo P18	Cubo P1	Cubo P2	Cubo P3	Cubo P4	Cubo P5	Cubo P6	Cubo P7	Cubo P8	Cubo P9	Cubo P10	Cubo P11	Cubo P12	Cubo P13	Cubo P14	Cubo P15	Cubo P16	Cubo P17	Cubo P18				
1	12	13	11	20	22	22	28	25	34	31	28	39	30	33	36	36	33	33	34	34	31	28	39	30	33	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	33				
2	12	12	13	22	22	22	32	24	25	34	29	31	35	34	38	34	38	34	34	28	28	29	31	35	34	38	34	38	34	38	34	38	34	38	34	38				
3	14	12	15	25	27	26	29	30	35	Esmag.	31	35	37	34	41	36	38	34	35	Esmag.	31	35	37	34	41	36	38	34	35	37	34	41	36	38	34	38				
4	13	10	12	20	21	23	28	24	23	38	28	33	34	32	38	34	38	34	28	28	28	33	35	34	32	39	32	39	32	36	36	36	36	36	36	36				
5	11	-	12	26	21	24	29	30	25	36	28	41	27*	35	37	37	37	37	27*	35	35	26	41	27*	35	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	45*			
6	12	11	12	20	22	25	28	20	25	34	27	25	32	29	40	36	37	37	27	27	27	32	36	32	29	40	36	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37			
7	12	12	16	22	21	22	32	23	23	34	25	31	32	30	38	34	38	34	25	25	25	31	32	30	34	38	34	38	34	38	34	38	34	38	34	38	34			
8	12	13	16	26	29*	24	34	26	27	36	24	33	36	34	41	36	41	36	24	24	24	33	36	34	34	41	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	36		
9	11	11	12	24	24	29*	28	24	23	41*	30	26	38	34	40	36	40	36	23	23	23	26	38	34	36	40	Esmag.	40	Esmag.	40	Esmag.	40	Esmag.	40	Esmag.	40	Esmag.	36		
10	11	12	12	23	21	23	31	20	26	33	26	30	37	38	35	33	40	36	26	26	26	30	37	38	35	33	40	36	37	38	35	33	40	36	37	38	35	33		
Índice Esclerométrico	12	12	12	22,5	22	24	28,5	24	25	34	28	29,5	36	34	38,5	36	34	34	25	25	28	28	36	34	34	38,5	36	34	34	34	34	34	34	34	34	36	36			
CV (%)	7,86%	8,25%	14,14%	10,50%	8,96%	7,01%	7,94%	12,13%	9,55%	4,40%	8,17%	9,93%	8,38%	8,21%	5,82%	6,52%	8,10%	4,61%	12,13%	9,55%	4,40%	8,17%	9,93%	8,38%	8,21%	5,82%	6,52%	8,10%	4,61%	12,13%	9,55%	4,40%	8,17%	9,93%	8,38%	8,21%	5,82%	6,52%	8,10%	4,61%

Leituras	Betão B2																																						
	2 Dias 26/04					3 Dias 27/04					8 Dias 2/05					14 Dias 8/05					21 Dias 15/05					28 Dias 22/05													
	Cubo P1	Cubo P2	Cubo P3	Cubo P4	Cubo P5	Cubo P6	Cubo P7	Cubo P8	Cubo P9	Cubo P10	Cubo P11	Cubo P12	Cubo P13	Cubo P14	Cubo P15	Cubo P16	Cubo P17	Cubo P18	Cubo P1	Cubo P2	Cubo P3	Cubo P4	Cubo P5	Cubo P6	Cubo P7	Cubo P8	Cubo P9	Cubo P10	Cubo P11	Cubo P12	Cubo P13	Cubo P14	Cubo P15	Cubo P16	Cubo P17	Cubo P18			
1	29	30	30	34	33	31	37	Esmag.	36	29*	35	35	38	39	39	44	43	44	36	36	36	35	38	39	39	44	43	44	43	44	43	44	43	44	43	44	43	44	
2	28	31	35	23*	33	34	34	Esmag.	40	37	42	41	41	43	44	40	45	47	40	40	40	41	41	41	44	44	44	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	47
3	34	31	34	35	36	33	38	39	40	37	39	41	43	41	45	51*	49	47	40	40	40	41	43	41	45	51*	49	47	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	47
4	25	28	Aggeg.	29	33	29	26*	38	36	36	38	41	39	41	43	38	42	42	29	29	29	41	39	41	43	38	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
5	29	26	26	26	34	32	31	37	36	38	38	38	35	42	44	40	46	46	36	36	36	38	35	42	44	40	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
6	25	28	30	32	31	28	38	Esmag.	41	39	42	41	41	40	42	46	46	46	41	41	41	41	41	41	42	42	42	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
7	27	29	34	31	32	Esmag.	35	40	37	42	40	42	39	37	42	43	42	42	37	37	37	42	39	37	42	43	44	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
8	33	32	34	32	31	36	38	38	42	42	41	44	42	42	44	48	46	46	42	42	42	44	42	42	44	48	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
9	30	32	30	30	34	34	36	34	37	38	39	38	39	41	35*	48	45	42	37	37	37	38	39	41	35*	48	45	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
10	28	32	30	34	31	35	35	35	37	37	35	40	40	42	41	44	43	43	37	37	37	40	40	42	42	41	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	43
Índice Esclerométrico	28,5	30,5	30	32	33	33	36	38	37	38	39	41	39,5	41	43	43	43	43	37	37	37	41	39,5	41	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
CV (%)	10,33%	6,95%	9,42%	9,01%	4,85%	7,70%	7,22%	5,73%	7,30%	5,69%	6,46%	6,27%	5,70%	4,43%	4,43%	8,48%	4,32%	4,32%	7,30%	5,69%	6,46%	6,27%	5,70%	4,43%	4,43%	8,48%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	4,32%	5,25%

Legenda:	Aggeg.	Valor não contabilizado para a determinação do índice esclerométrico por existir um agregado na zona de ensaio
	Esmag.	Valor não contabilizado para a determinação do índice esclerométrico por existir um esmagamento superficial do betão
	-	Valor não contabilizado para a determinação do índice esclerométrico por não ser apresentado no esclerómetro
	XX*	Valor não contabilizado para a determinação do índice esclerométrico por diferir mais de 6 unidades da mediana

Anexo C - Determinação do índice esclerométrico para a posição do esclerómetro na vertical (descendentes) e nos provetes cúbicos

Leituras do índice	Betão B1																	
	1 Dias 24/04			3 Dias 26/04			7 Dias 30/04			14 Dias 7/05			22 Dias 15/05			28 Dias 21/05		
	Cubo P1	Cubo P2	Cubo P3	Cubo P4	Cubo P5	Cubo P6	Cubo P7	Cubo P8	Cubo P9	Cubo P10	Cubo P11	Cubo P12	Cubo P13	Cubo P14	Cubo P15	Cubo P16	Cubo P17	Cubo P18
1	-	-	-	19	18	18	16	18	20	26	21	20	21	24	23	25	28	34*
2	-	-	-	18	15	15	29*	19	23	26	23	25	26	28	25	25	29	34
3	-	-	-	22	24	21	23	25*	23	28	24	27	24	33	25	27	34	31
4	-	-	-	18	16	19	17	20	19	26	22	23	26	27	25	25	26	23
5	-	-	-	16	17	15	19	17	20	22	21	20	20	26	21	25	28	26
6	-	-	-	19	18	18	18	20	18	24	21	28	23	28	29	27	30	27
7	-	-	-	16	18	16	18	17	21	19	22	24	31	30	31	26	29	28
8	-	-	-	21	24	22	24	25*	31*	28	22	32*	25	34	33*	32	34	37*
9	-	-	-	17	21	20	19	18	19	23	19	22	26	28	25	22	30	30
10	-	-	-	20	16	12	16	18	18	24	22	28	31	26	20	32	27	26
Índice Esclerométrico	-	-	-	18,5	18,5	18	18	18	20	25	22	24	25,5	28	25	25,5	29	27,5
CV	-	-	-	11%	15%	18%	15%	6%	9%	11%	6%	13%	14%	11%	14%	12%	9%	12%

Leituras do índice	Betão B2																	
	2 Dias 26/04			3 Dias 27/04			8 Dias 2/05			14 Dias 8/05			21 Dias 15/05			28 Dias 22/05		
	Cubo P1	Cubo P2	Cubo P3	Cubo P4	Cubo P5	Cubo P6	Cubo P7	Cubo P8	Cubo P9	Cubo P10	Cubo P11	Cubo P12	Cubo P13	Cubo P14	Cubo P15	Cubo P16	Cubo P17	Cubo P18
1	26	25	26	27	27	27	31	32	28	32	24*	32	37	41	34	38	46*	28*
2	21	25	25	28	27	29	30	30	32	36	29	38	37	38	38	31	36	36
3	30	26	31	29	31	32	30	33	33	35	32	43	38	43	38	40	37	38
4	27	24	23	27	25	27	30	34	26	30	34	31*	36	39	38	36	38	35
5	21	26	21	20*	23	29	18*	32	32	32	35	33	33	46*	34	38	36	22*
6	24	25	25	25	26	29	32	37	30	34	34	40	39	42	37	31	38	37
7	22	23	26	29	26	26	29	32	34	32	30	38	38	36	34	34	37	34
8	29	20	30	32	32	33	38*	38	34	40*	37	38	39	42	44	40	39	41
9	26	25	23	26	28	29	27	28	28	32	34	39	34	37	40	34	34	34
10	25	25	27	31	28	27	29	29	30	34	28	35	32	39	38	26*	34	36
Índice Esclerométrico	25,5	25	25,5	28	27	29	30	32	31	32	34	38	37	39	38	36	37	36
CV	13%	7%	12%	8%	10%	8%	5%	10%	9%	6%	9%	9%	7%	6%	8%	10%	5%	6%

Legenda: - Valor não contabilizado para a determinação do índice esclerométrico por não ser apresentado no esclerómetro
 XX* Valor não contabilizado para a determinação do índice esclerométrico por diferir mais de 6 unidades da mediana

Anexo D - Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes cúbicos

Betão B1																			
Posição	1 Dias 24/04			3 Dias 26/04			7 Dias 30/04			14 Dias 7/05			22 Dias 15/05			28 Dias 21/05			
	Cubo P1	Cubo P2	Cubo P3	Cubo P4	Cubo P5	Cubo P6	Cubo P7	Cubo P8	Cubo P9	Cubo P10	Cubo P11	Cubo P12	Cubo P13	Cubo P14	Cubo P15	Cubo P16	Cubo P17	Cubo P18	
1	44,7	46,6	43,8	33,4	33,3	33,5	32,4	33,2	32,3	31,7	31,4	31,6	30,9	31,2	31,3	31,0	30,8	31,0	
2	46,2	42,8	45,3	32,5	32,8	34,3	31,2	32,6	31,2	31,8	31,8	31,9	30,8	31,1	31,9	31,4	31,1	31,5	
3	44,3	42,9	45,8	33,2	33,9	34,6	31,7	32,3	31,8	31,7	31,8	32,4	31,4	31,6	32,0	31,3	31,0	31,5	
4	49,4	44,5	44,8	34,0	34,2	34,7	32,0	32,6	32,0	31,7	31,7	32,1	31,4	31,5	31,0	31,1	30,9	31,0	
5	43,1	42,8	43,3	33,5	33,4	34,7	30,9	32,6	31,6	31,6	31,9	31,3	31,4	30,7	31,0	31,4	31,3	31,2	
Média	45,54	43,92	44,60	33,32	33,52	34,36	31,64	32,66	31,78	31,70	31,72	31,86	31,18	31,22	31,44	31,24	31,02	31,24	
CV:	5,33%	3,79%	2,32%	1,64%	1,63%	1,48%	1,90%	1,01%	1,30%	0,22%	0,61%	1,34%	0,97%	1,14%	1,54%	0,58%	0,62%	0,80%	
Distância de Percuro (mm)	150,85	150,17	150,62	149,58	149,80	149,67	149,80	150,09	150,05	149,87	150,09	149,90	149,55	149,85	149,63	149,88	149,96	149,77	
Velocidade (Km/s)	3,3125	3,4192	3,3771	4,4892	4,4690	4,3559	4,7345	4,5955	4,7215	4,7278	4,7317	4,7050	4,7963	4,7998	4,7592	4,7977	4,8343	4,7942	

Betão B2																			
Posição	2 Dias 26/04			3 Dias 27/04			8 Dias 2/05			14 Dias 8/05			21 Dias 15/05			28 Dias 22/05			
	Cubo P1	Cubo P2	Cubo P3	Cubo P4	Cubo P5	Cubo P6	Cubo P7	Cubo P8	Cubo P9	Cubo P10	Cubo P11	Cubo P12	Cubo P13	Cubo P14	Cubo P15	Cubo P16	Cubo P17	Cubo P18	
1	32,8	32,2	32,3	33,1	31,8	32,0	31,2	31,0	31,1	31,1	31,1	30,8	31,2	31,3	30,2	30,4	30,8	30,8	
2	33,2	32,7	32,6	32,4	31,6	32,8	31,2	31,2	31,3	30,8	31,4	30,5	31,3	31,2	30,5	30,7	30,3	30,5	
3	32,3	32,3	32,3	32,4	32,0	31,9	31,5	31,1	31,2	31,1	31,0	30,3	31,7	30,7	30,7	30,8	30,6	30,6	
4	32,7	33,6	32,6	31,7	31,8	31,7	31,5	30,8	31,2	31,0	31,2	31,1	31,2	31,0	30,6	30,9	30,2	31,1	
5	33,2	33,3	33,1	31,7	32,4	32,1	31,4	31,2	31,0	30,8	30,9	31,0	31,3	30,9	30,8	30,6	30,7	30,5	
Média	32,84	32,82	32,58	32,26	31,92	32,10	31,36	31,06	31,16	30,96	31,12	30,74	31,34	31,02	30,56	30,68	30,52	30,70	
CV:	1,15%	1,87%	1,00%	1,82%	0,95%	1,30%	0,48%	0,54%	0,37%	0,49%	0,62%	1,09%	0,66%	0,77%	0,75%	0,63%	0,85%	0,83%	
Distância de Percuro (mm)	149,73	149,66	149,85	150,13	150,16	150,17	150,22	149,97	149,91	149,82	149,71	149,75	149,92	150,07	149,73	150,16	149,88	150,07	
Velocidade (Km/s)	4,5594	4,5600	4,5994	4,6538	4,7043	4,6782	4,7902	4,8284	4,8110	4,8391	4,8107	4,8715	4,7837	4,8378	4,8995	4,8944	4,9109	4,8883	

Anexo E - Determinação do índice esclerométrico e da velocidade de propagação de ultra-sons nas vigas prefabricadas

Determinação de índice esclerométrico nas vigas prefabricadas

Leituras	Betão B1 Viga 1						Betão B2 Viga 2					
	3 Dias - 26/04			7 Dias - 30/04			2 Dias - 26/04			6 Dias - 30/04		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto1	Ponto 2	Ponto 3
1	28	26	32	33	-	37	34	32	42	34	-	35
2	28	28	30	32	-	35	42	32	40	34	-	34
3	28	28	29	37	-	29	36	35	37	35	-	34
4	26	27	29	36	-	33	40	42*	35	32	-	37
5	26	27	30	32	-	30	37	40	40	34	-	35
6	32	28	31	33	-	30	34	32	38	34	-	36
7	27	28	31	32	-	32	36	39	40	35	-	36
8	28	28	28	35	-	34	36	35	40	37	-	33
9	35*	28	30	32	-	33	34	34	34	35	-	34
Índice Esclerométrico	28	28	30	33	-	33	36	34,5	40	34	-	35
CV	7%	3%	4%	6%	-	8%	8%	9%	7%	4%	-	4%

Legenda :	XX*	Valor não contabilizado para o índice esclerométrico por diferir da mediana mais de 6 unidades
------------------	------------	--

Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons nas vigas prefabricadas

Leituras	Betão B1 Viga 1						Betão B2 Viga 2					
	3 Dias - 26/04			7 Dias - 30/04			2 Dias - 26/04			6 Dias - 30/04		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto1	Ponto 2	Ponto 3
1	17,7	17,2	17,2	16,8	-	16,9	17,1	17,1	17,3	17,1	-	17,5
2	17,5	17,5	17,2	17	-	16,9	17,2	17,4	17,5	16,9	-	17,1
3	17,6	17,3	17,1	17,2	-	16,7	17,2	17,5	17,2	17,4	-	17,3
Média	17,60	17,33	17,17	17,00	-	16,83	17,17	17,33	17,33	17,13	-	17,30
CV:	0,57%	0,88%	0,34%	1,18%	-	0,69%	0,34%	1,20%	0,88%	1,47%	-	1,16%
Distância (mm)	81,79	80,52	80,34	81,93	-	81,05	80,84	81,64	81,57	80,92	-	81,72
Velocidade (Km/s)	4,6472	4,6454	4,6800	4,8194	-	4,8149	4,7091	4,7100	4,7060	4,7230	-	4,7237