



ENSAIOS DE DIAGNÓSTICO E DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

ANTÓNIO JOSÉ DA FONSECA CAMELO RIBEIRO

novembro de 2019



ENSAIOS DE DIAGNÓSTICO E DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

ANTÓNIO JOSÉ DA FONSECA CAMELO RIBEIRO

Outubro de 2019

ENSAIOS DE DIAGNÓSTICO E DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

ANTÓNIO JOSÉ DA FONSECA CAMELO RIBEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Carlos Manuel da Silva Félix

Coorientador: Professor Doutor Carlos Filipe Guedes Rodrigues

OUTUBRO DE 2019

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
Símbolos	xxi
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Ensaio de caracterização do betão.....	5
CAPÍTULO 3 Modelos experimentais	61
CAPÍTULO 4 Campanha experimental.....	75
CAPÍTULO 5 Considerações Finais.....	131
Referências Bibliográficas	135
Anexo.....	139

RESUMO

A extensa utilização do betão estrutural no decorrer do último século é justificada pelas diversas vantagens que lhe são reconhecidas, de que se salienta a economia das soluções e as características de resistência e de durabilidade. Contudo, as propriedades do betão endurecido são influenciadas por inúmeros fatores, como seja a sua composição e colocação em obra, a agressividade do meio ambiente e as condições de utilização e de conservação. Tais fatores podem determinar a variabilidade das suas características e condicionar o necessário conhecimento relativo ao comportamento estrutural das construções e à sua durabilidade.

Devido ao custo elevado normalmente associado a este tipo de construções, torna-se necessária a aplicação de metodologias *in situ* e em laboratório para avaliação do seu estado, de forma a obter dados relativos às propriedades mecânicas e físicas e de durabilidade, para a verificação da conformidade e controlo de qualidade ao longo do tempo, de forma a garantir o seu correto serviço e segurança na sua utilização.

A presente dissertação é dedicada às técnicas de caracterização *in situ* das propriedades resistentes e de deformabilidade do betão. No decorrer de uma campanha experimental são avaliadas as potencialidades e as limitações de diferentes tipos de ensaios não-destrutivos ou semi-destrutivos, conduzidos sobre provetes de betão em diferentes idades, com ou sem a presença de armadura e com diferentes condições de humidade. As grandezas que se procura caracterizar são sobretudo o módulo de elasticidade e as resistências à compressão e à tração do betão.

Na sequência da campanha experimental são propostas correlações para cada um dos ensaios e analisados os resultados obtidos através da sua comparação com os encontrados na bibliografia especializada e através do confronto com os valores reais das propriedades em apreço, obtidos em ensaios laboratoriais sobre provetes normalizados, considerados no presente trabalho como valores de referência.

Palavras-chave: Propriedades do betão, Métodos de avaliação direta e indireta, Ensaio *in situ*, Índice esclerométrico, *Pull-off*, Velocidade de propagação de ultrassons, Correlações.

ABSTRACT

The extensive use of structural concrete over the last century is justified by the various advantages recognized by it, which highlights the economy of solutions and characteristics of resistance and durability. However, the properties of hardened concrete are influenced by numerous factors, such as their composition and putting into work, the aggressiveness of the environment and the conditions of use and conservation. Such factors can determine the variability of their characteristics and condition the necessary knowledge related to the structural behavior of the buildings and their durability.

Due to the high cost normally associated with this type of construction, it is necessary to apply *in situ* and laboratory methodologies to evaluate their state in order to obtain data on mechanical and physical properties and durability, for the verification of its compliance and quality control over time to ensure its correct service and safety in its use.

This dissertation is dedicated to the techniques of *in situ* characterization of the resistant properties and concrete deformability. During an experimental campaign, the potentialities and limitations of different types of non-destructive or semi-destructive tests are evaluated, conducted on concrete specimens at different ages, with or without the presence of armor and with different humidity conditions. The characteristics that are sought to characterize are above all the modulus of elasticity and resistance to concrete compression and traction.

Following the experimental campaign, correlations are proposed for each of the testing methods and analyzed the results obtained through their comparison with those found in specialized bibliography and through the confrontation with the actual value of the properties obtained in laboratory tests on standard specims, considered in the present study as reference values.

Keywords: Concrete mechanical and physical properties, Direct and indirect evaluation methods, *In situ* testing, concrete test rebound hammer, *Pull-off*, measurment of velocity of ultrasonic pulse in concrete, Correlations.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com a contribuição de várias pessoas que prestaram apoio essencial para o desenvolvimento e término do presente tema de dissertação. Por essa razão deixo os meus agradecimentos a todos que, de uma forma ou de outra, me ajudaram nesta fase da minha vida.

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores Professor Doutor Engenheiro Carlos Félix e Professor Doutor Engenheiro Carlos Rodrigues pela disponibilidade demonstrada na partilha de conhecimentos, discussão de ideias, resolução de impasses e esclarecimento de dúvidas que se apresentaram durante o desenvolvimento deste tema e na realização da campanha experimental no Laboratório de estruturas do ISEP e familiarização com o equipamento disponibilizado.

Agradeço ao Grupo ABB, ao Engenheiro João Freita e Senhor Maia a disponibilidade e atenção prestadas no fornecimento do betão necessário para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Laboratório de Estruturas do CONSTRUCT/LABEST, da FEUP, e em particular à Engenheira Paula Silva pela realização dos ensaios laboratoriais e pelas informações e apoio prestados.

Ao Laboratório de Estruturas do ISEP pela disponibilização dos equipamentos de ensaio e demais meios indispensáveis à realização da campanha de ensaios.

À Engenheira Maria de Fátima Silva pela disponibilidade e atenção prestada na realização da campanha experimental no Laboratório de Materiais de Construção do ISEP.

Ao meu grande amigo e colega Carlos Azevedo pela ajuda e companhia prestada na central de betão, na elaboração dos provetes e seu transporte e durante a campanha experimental.

Por fim, à minha família e amigos de quem sempre tive apoio incondicional, prestado em todas as fases da minha vida; sei que poderemos contar sempre uns com os outros.

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução.....	1
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização do Relatório.....	2
CAPÍTULO 2	Ensaio de caracterização do betão.....	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Classificação de ensaios.....	6
2.3	Ensaio de betão endurecido em laboratório	8
2.3.1	Introdução	8
2.3.2	Resistência à compressão.....	11
2.3.3	Resistência à tração e à tração por flexão.....	14
2.3.4	Resistência à flexão	17
2.3.5	Módulo de elasticidade	19
2.4	Ensaio do betão <i>in situ</i>	22
2.4.1	Introdução	22
2.4.2	Ensaio de carotes e provetes normalizados	24
2.4.3	Determinação do índice esclerométrico	28
2.4.4	Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons.....	36
2.4.5	Ensaio de tração direta.....	55
CAPÍTULO 3	Modelos experimentais	61
3.1	Introdução.....	61
3.1.1	Definição da amostra.....	61

ÍNDICE DE TEXTO

3.1.2	Dimensões	62
3.1.3	Composição do betão	64
3.1.4	Elaboração e cura de provetes	65
3.2	Caracterização mecânica dos modelos experimentais	67
3.2.1	Introdução	67
3.2.2	Determinação da resistência à compressão	68
3.2.3	Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	70
3.2.4	Determinação do módulo de elasticidade por compressão.....	72
3.2.5	Determinação da resistência à flexão.....	73
CAPÍTULO 4	Campanha experimental	75
4.1	Introdução.....	75
4.2	Programa de ensaios.....	75
4.3	Determinação do índice esclerométrico.....	77
4.3.1	Procedimento	77
4.3.2	Conclusão do ensaio	82
4.4	Determinação da velocidade de propagação de ultrassons	92
4.4.1	Procedimento	92
4.4.2	Conclusão do ensaio	94
4.5	Determinação da resistência à tração direta.....	119
4.5.1	Procedimento	119
4.5.2	Conclusão do ensaio	123
CAPÍTULO 5	Considerações Finais	131
5.1	Conclusões	131
5.2	Desenvolvimentos Futuros	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição estatística das propriedades dos materiais [7].	10
Figura 2.2 - Prensa MTS durante a realização do ensaio à compressão (LABEST).	13
Figura 2.3 - Retificação de provetes.	13
Figura 2.4 - Algumas roturas satisfatórias de provetes cubico e cilíndricos.	14
Figura 2.5 - Algumas roturas não satisfatórias de provetes cúbico e cilíndricos.	14
Figura 2.6 - Mecanismo de rotura [7].	16
Figura 2.7 - Prensa SATÉC, durante a realização do ensaio determinação da resistência à tração por compressão (LABEST).	16
Figura 2.8 - Equipamento de auxílio para marcação das linhas.	17
Figura 2.9 - Equipamento com suportes temporário e posicionador.	17
Figura 2.10 - Aplicação da carga nos provetes: carga em dois pontos e carga a meio vão [16].	18
Figura 2.11 - Representação esquemática da relação tensões-extensões para análise estrutural [6].	19
Figura 2.12 - Dispositivo de ensaio para obtenção do módulo de elasticidade [7].	20
Figura 2.13 - Diagrama tensão/tempo para determinação do módulo de elasticidade [18].	21
Figura 2.14 - Equipamento de extração de carotes [3].	25
Figura 2.15 - Esquema para ilustração da operação do martelo de ressalto [22].	29
Figura 2.16 - Redução do valor de ressalto devido à carbonatação [24].	31
Figura 2.17 - Curva de base para o ensaio com o esclerómetro.	34
Figura 2.18 - Correlação entre a resistência à compressão e o índice R	35
Figura 2.19 - Calibração do aparelho com a barra de referência.	37
Figura 2.20 - Posicionamento dos transdutores.	38
Figura 2.21 - Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons na transmissão indireta [28].	39

Figura 2.22 - Secção transversão com armadura lateral [26].....	42
Figura 2.23 - Razão entre diâmetro do varão e V.P.U. paralela ao percurso [26].....	43
Figura 2.24 - Secção transversal com armadura perpendicular ao percurso [26].	44
Figura 2.25 - Relação da razão entre diâmetro do varão e velocidade de propagação [26].	44
Figura 2.26 - Medição de profundidade de fissura. [5]	47
Figura 2.27 - Disposição dos transdutores pelo método descrito na [26].	48
Figura 2.28 - Avaliação de fenda oblíqua [26].....	49
Figura 2.29 - Disposição dos transdutores e respetiva representação gráfica para determinação da profundidade da fenda [26].	49
Figura 2.30 - Estimar a espessura da camada de betão de qualidade inferior [29].....	50
Figura 2.31 - Módulo de elasticidade dinâmico e estático em função da V.P.U. (Adaptado[26]).	52
Figura 2.32 - Curva de base para o ensaio da V.P.U. pelo método de transmissão direto.	53
Figura 2.33 - Correlação entre V.P.U. e resistência à compressão do betão (P.Turgut. [32]).....	54
Figura 2.34 - Equipamento “Limpet”. [3]	55
Figura 2.35 - Equipamento “Tripod”.	55
Figura 2.36 - Esquema do ensaio “pull-off” [5].	56
Figura 2.37 - Plano de localização dos discos no provete [34].....	56
Figura 2.38 - Modos possíveis de rotura [37].....	57
Figura 2.39 - Típica correlação do ensaio de tração direta com resistência à compressão típica.	58
Figura 3.1 - Organogramas da distribuição e dependência dos provetes e ensaios a efetuar.	62
Figura 3.2 - Disposição da grelha de ensaio.	64
Figura 3.3 - Disposição da armadura dos moldes prismáticos e cilíndricos utilizados para elaboração dos provetes.	65
Figura 3.4 - Processo de obtenção das amassaduras.....	66
Figura 3.5 - Enchimento dos moldes.	66
Figura 3.6 - Desmoldagem, colocação em tanque e posterior remoção do tanque de imersão.	67
Figura 3.7 - Exemplos tipo das roturas satisfatórias obtidas.....	69
Figura 3.8 - Exemplo tipo de rotura satisfatória à esquerda; Rotura insatisfatória à direita.....	71

Figura 3.9 - Ensaio à flexão de lajeta com armadura.	73
Figura 4.1 - Posição e direção do martelo esclerométrico.....	77
Figura 4.2 - Causas para eliminação de leituras.	78
Figura 4.3 - Áreas de leituras efetuadas e eliminadas em diferentes idades do betão.	79
Figura 4.4 - Comparação do esmagamento em diferentes idades do betão.	80
Figura 4.5 - Áreas de leituras esclerométricas válidas (Preto) e Inválidas (Azul).	81
Figura 4.6 - Comparação da evolução do índice esclerométrico entre amassaduras.....	83
Figura 4.7 - Evolução do índice esclerométrico entre lajetas das diferentes amassaduras.	85
Figura 4.8 - Curva de relação entre a resistência à compressão e índice esclerométrico.	87
Figura 4.9 - Dispersão dos valores de resistência à compressão estimada com diferentes correlações. .	89
Figura 4.10 - Representação gráfica da evolução da resistência à compressão em função do índice esclerométrico.	91
Figura 4.11 – Disposição dos transdutores pelo método direto.....	92
Figura 4.12 – Disposição dos transdutores pelo método indireto.....	93
Figura 4.13 – Disposição de transdutores para avaliação de defeitos e profundidade de fendas pelo método indireto.	93
Figura 4.14 - Gel acoplante (https://biologik.pt/shop/gel-contacto-incolor/).	94
Figura 4.15 – Evolução da V.P.U. ao longo do tempo, pelo método direto.....	96
Figura 4.16 - Representação da Evolução da V.P.U. entre as diferentes amassaduras pelo método Indireto.....	97
Figura 4.17 - Média dasV.P.U. entre lajetas com e sem armadura pelo método direto.	99
Figura 4.18 - V.P.U. Máximas obtidas nos alinhamentos com e sem armadura nas lajetas com armadura pelo método direto.	100
Figura 4.19 - Média das V.P.U. entre lajetas com e sem armadura pelo método indireto.....	102
Figura 4.20 - Máximas V.P.U. obtidas nos alinhamentos com e sem armadura nas lajetas com armadura pelo método indireto.	103
Figura 4.21 - Variação percentual da V.P.U. entre os métodos de transmissão.....	105
Figura 4.22 - Comparação dos resultados obtidos das V.P.U. em diferentes condições de humidade...	106

Figura 4.23 - Curva de relação entre a resistência à compressão e V.P.U.	107
Figura 4.24 - Comparação dos valores da resistência à compressão obtidos em função da V.P.U..	109
Figura 4.25 - Estudo comparativo da estimativa do módulo de elasticidade estático.....	111
Figura 4.26 - Representação gráfica da evolução da resistência à compressão.	113
Figura 4.27 - Representação gráfica da evolução do módulo de elasticidade.....	114
Figura 4.28 - Representação gráfica da evolução do módulo de elasticidade.....	115
Figura 4.29 - Lajetas fissuradas.....	116
Figura 4.30 - V.P.U da lajeta com armadura Pré e após fendilhação.	117
Figura 4.31 - V.P.U da lajeta sem armadura antes e após corte com rebarbadora.	118
Figura 4.32 - Procedimento de colagem dos discos.	120
Figura 4.33 - Áreas de leituras Pull-off válidas (vermelho) e Inválidas (cinzento).	121
Figura 4.34 - Exemplo de roturas inválidas mais comuns.	122
Figura 4.35 - Roturas obtidas nas lajetas da amassadura 3.	122
Figura 4.36 - Exemplo de roturas válidas (rotura pelo substrato).....	122
Figura 4.37 - Representação da dispersão das tensões médias de tração direta.	124
Figura 4.38 - Reta de correlação com resistência à compressão em função das tensões médias de tração direta de ambas as lajetas.....	125
Figura 4.39 - Reta de correlação e intervalos de confiança de 95% dos parâmetros de regressão.....	125
Figura 4.40 - Retas de correlação com resistência à tração em função dos ensaios “Pull-off”.	126
Figura 4.41 - Reta de correlação e respetivo intervalo de confiança de 95% dos parâmetros de regressão.	127
Figura 4.42 - Dispersão da resistência à compressão estimada por diferentes autores.....	128
Figura 4.43 - Comparação dos resultados obtidos da resistência à tração.....	129
Figura 4.44 - Representação da variação entre valores de tração simples equivalente a cilindros e tração direta.	130

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais métodos de ensaio.....	7
Tabela 2.2 - Plano de amostra normativo.....	8
Tabela 2.3 - Características de resistência e de deformação do betão [6].	9
Tabela 2.4 - Nº mínimo de leituras e coeficiente de variação associado a construção de boa qualidade.	24
Tabela 2.5 - Margem k associada a pequeno número de resultados de ensaio.....	27
Tabela 2.6 - Mínima resistência à compressão <i>in situ</i> característica [1].....	27
Tabela 2.7 - Coeficiente k_1 Função do número de pares de resultados.	34
Tabela 2.8 - Correções na V.P.U. devido à temperatura [26].....	41
Tabela 2.9 - Incidência das dimensões do provete sobre a transmissão dos impulsos ultrassónicos [28].	41
Tabela 2.10 - Classificação da qualidade do betão com base na V.P.U [11].	45
Tabela 2.11 - Valores do coeficiente de poisson dinâmico [26].....	51
Tabela 2.12 - Relação V.P.U. e os módulos de elasticidade dinâmico e estático [26].	52
Tabela 3.1 - Número de modelos experimentais a elaborar.....	62
Tabela 3.2 - Resumo das dimensões e respetivos requisitos normativos para os provetes a elaborar. ...	63
Tabela 3.3 – Características dos provetes para ensaio.	63
Tabela 3.4 - Composição das amassaduras.....	64
Tabela 3.5 - Temperatura da água de imersão e duração de cura.	67
Tabela 3.6 - Características físicas dos provetes de ensaio.....	68
Tabela 3.7 - Resultados obtidos do ensaio de provetes à compressão.	69
Tabela 3.8 - Resistência <i>in situ</i> característica.....	70
Tabela 3.9 - Resultados obtidos do ensaio de provetes à tração por compressão.....	71
Tabela 3.10 - Resultados de módulo de elasticidade obtidos do ensaio de provetes à compressão.....	73

Tabela 4.1 - Ensaios efetuados e respetiva idade do betão da 1ª campanha experimental.	76
Tabela 4.2 - Ensaios efetuados e respetiva idade do betão da 2ª campanha experimental.	76
Tabela 4.3 - Resultados da evolução do índice esclerométrico com o tempo.	83
Tabela 4.4 - Variação da mediana do índice esclerométrico entre lajes com e sem armadura.	84
Tabela 4.5 - Resultados obtidos do ensaio esclerométrico nas lajes para elaboração das correlações.	86
Tabela 4.6 - Cálculo do deslocamento da curva base do ensaio determinação do índice esclerométrico.	86
Tabela 4.7 - Avaliação da resistência à compressão <i>in situ</i> pelo Índice esclerométrico.	88
Tabela 4.8 - Valores de resistência à compressão <i>in situ</i> estimada por diferentes autores.	89
Tabela 4.9 - Evolução da resistência característica à compressão <i>in situ</i> obtido pelo ensaio índice esclerométrico.	90
Tabela 4.10 - Evolução da resistência à compressão <i>in situ</i> nas lajetas pelo ensaio determinação do índice esclerométrico.	91
Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de determinação da V.P.U. pelo método direto.	95
Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de determinação da velocidade de ultrassons pelo método indireto.	97
Tabela 4.13 - Variação da V.P.U. médias entre lajes com e sem armadura pelo método direto.	98
Tabela 4.14 - Máximas V.P.U. nos alinhamentos com e sem armadura das lajes com armadura pelo método direto.	100
Tabela 4.15 - Variação da V.P.U. média entre lajes com e sem armadura pelo método indireto.	101
Tabela 4.16 - Máximas V.P.U. nos alinhamentos com e sem armadura das lajes com armadura pelo método indireto.	103
Tabela 4.17 - Variação da V.P.U. entre o método direto e indireto.	104
Tabela 4.18 - Resultados da V.P.U. para as diferentes condições de humidade.	106
Tabela 4.19 - Resultados obtidos do ensaio V.P.U pelo método direto nas lajes para elaboração das correlações.	107
Tabela 4.20 - Cálculo do deslocamento da curva base, obtidos do ensaio V.P.U. pelo método direto.	107
Tabela 4.21 - Avaliação da resistência à compressão <i>in situ</i> pelo V.P.U.	108
Tabela 4.22 - Valores de resistência à compressão estimada por diferentes autores em função da V.P.U.	109

Tabela 4.23 - Resumo de valores da deformabilidade da lajeta sem armadura.....	111
Tabela 4.24 - Resumo de valores da deformabilidade da lajeta com armadura.	111
Tabela 4.25 - Resistência característica à compressão obtida pelo ensaio V.P.U. transmissão direta....	112
Tabela 4.26 - Resistência à compressão obtidas nas lajes pelo ensaio V.P.U. transmissão direta.....	113
Tabela 4.27 - Módulo de elasticidade obtido nas lajes pelo ensaio V.P.U. transmissão Método direto.	114
Tabela 4.28 - Módulo de elasticidade obtida nas lajes pelo ensaio V.P.U. transmissão método indireto.	115
Tabela 4.29 - Resultados de V.P.U. antes e após fendilhação da lajeta com armadura.	117
Tabela 4.30 - Resultados de V.P.U. antes e após corte com rebarbadora na lajeta sem armadura.....	118
Tabela 4.31 - Estimativa da profundidade da fenda obtida pelo método [30]e [3].....	119
Tabela 4.32 - Estimativa da profundidade da fenda obtida pelo método BS 1881 203 (alternativa 1)...	119
Tabela 4.33 - Descrição das características do equipamento de ensaio Pull-off.....	120
Tabela 4.34 - Resultados obtidos do ensaio de tração direta.....	123
Tabela 4.35 - Variação das tensões nas lajetas com e sem armadura das diferentes amassaduras.	123
Tabela 4.36 - Resultados utilizados para obtenção da reta de correlação da resistência à compressão.	124
Tabela 4.37 - Parâmetros de regressão linear da correlação com a resistência à compressão.	125
Tabela 4.38 - Resultados utilizados para obtenção da reta de correlação com resistência à tração simples.	126
Tabela 4.39 - Parâmetros de regressão linear da correlação com a resistência à tração.....	127
Tabela 4.40 - Resistência à compressão estimada de diferentes autores em função da resistência à tração direta.....	128
Tabela 4.41 - Variação de valores de tração simples equivalente a cilindros e da relação estabelecida.	129
Tabela 4.42 - Variação entre valores de tração simples equivalente a cilindros e tração direta.	129

SÍMBOLOS

- Letras maiúsculas latinas

A_c – Área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada

D – Diâmetro do disco

D_{carote} - Diâmetro da carote

E_c – Módulo de elasticidade estático

$E_{cm}(t)$ – Módulo de elasticidade à idade de t dias

E_{cm} – Módulo de elasticidade aos 28 dias de idade

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico

F – Carga máxima

F_h - Carga de rotura por tração direta

I – Distância entre os roletes inferiores de apoio

K – Fator corretivo

L – Comprimento

L_s - Comprimento do varão

M – Momento Flector

R – Índice esclerométrico utilizado na determinação do valor do deslocamento da curva base

$R_{m,n,carb.}$ – Valor médio do índice esclerométrico R , medido em betão não carbonatado

$R_{m,carb.}$ – Valor médio do índice esclerométrico R , medido em betão carbonatado

R_i – Desvio de cada ponto de ensaio da reta de melhor ajuste

S_n – Desvio padrão da amostra

Se_y – Desvio padrão do resíduo aleatório

T – Tempo que os ultrassons levam a atravessar o comprimento de percurso

SÍMBOLOS

T_d – Tempo de propagação pelo centro do defeito

T_h - Tempo de propagação em betão homogéneo

T_2^2 – Tempo de propagação pela superfície de betão do mesmo tipo sem defeitos

T_1^2 – Tempo de propagação com fenda

$T_{(\Delta t_i)}$ – Temperatura em °C durante o intervalo de tempo Δt_i

V – Velocidade de propagação dos ultrassons

V_s – Velocidades de propagação na camada inferior de betão são

V_d – Velocidade de propagação na camada danificada

V_c – Velocidade de propagação corrigida devido à influencia da armadura

X_i – Valores dos resultados individuais

\bar{X} – Média dos resultados obtidos

Z_f - Coeficiente de tempo para redução do valor de índice esclerométrico

- Letras minúsculas latinas

a - Distância vertical do bordo da armadura até ao bordo do transdutor mais próximo do varão

a – Distância do ponto de aplicação da carga no prisma ao apoio mais próximo

a – Dimensão transversal mínima da área projetada do defeito

b – Ordenada na origem

b - Distância do bordo da armadura à superfície do betão

d – Diâmetro do transdutor

d - Diâmetro

d_g - Dimensão máxima do agregado

d_1 e d_2 – Dimensões laterais do provete

f – Frequência da onda

f_v - Valor inicial da resistência *in situ*, obtida a partir da curva de base da velocidade de propagação do som

$f_{m(n),is}$ – Média dos resultados $f_{is,i}$ da resistência à compressão de n carotes

$f_{is,v}$ - Resultado do ensaio da resistência à compressão *in situ* estimada com base em ensaios ultrassônicos calibrados com ensaios de carotes

$f_{is,menor}$ – Menor valor da resistência à compressão das carotes ensaiadas

$f_{is,i}$ – Valor individual da resistência à compressão de carote ou provete

$f_{is,R}$ – Resultado do ensaio da resistência à compressão *in situ*, estimada com base em ensaios com esclerómetro calibrado com ensaio de carotes

$f_{is,h}$ - Resultado do ensaio da resistência à compressão *in situ* estimada com base em ensaios “pull-off” calibrados com ensaios de carotes

$f_{is,h,t}$ - Resultado do ensaio da resistência à tração simples *in situ* estimada com base em ensaios “pull-off” calibrados com ensaios de carotes

f_{ctm} – Tensão média de rotura à tração simples

$f_{ctm,fl}$ – Tensão média de rotura à tração por flexão simples

f_{ct} - Tensão de rotura à tração simples

$f_{ct,sp}$ – Tensão de rotura à tração por compressão diametral

$f_{ct,fl}$ – Tensão de rotura à tração por flexão

f_{cm} – Resistência média à compressão do betão

f_{ck} – Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 d de idade

$f_{ck,is}$ - Resistência à compressão *in situ* característica

$f_{ck,is,cyl}$ - Resistência à compressão *in situ* característica expressa em resistência equivalente dum cubo de 150 mm de lado

$f_{ck,is,cube}$ - Resistência à compressão *in situ* característica expressa em resistência equivalente dum cilindro de 150 x 300 mm

$f_{ck,cyl}$ – Resistência característica à compressão do betão determinada em cilindro

$f_{ck,cub}$ - Resistência característica à compressão do betão determinada em cubos

f_{cf} – Resistência à flexão

f_c – Resistência à compressão

f_R – Valor inicial da resistência *in situ*, obtido a partir da curva base do esclerómetro

f_h - Resistência à tração direta

SÍMBOLOS

Δf – descolamento da curva base

h - Profundidade da fenda

k – Margem que depende do número n de resultados de ensaio

k_1 – Coeficiente que dependo do número de pares de ensaio

k_2 – È dado em disposições nacionais ou se não for dado é igual a 1.48

l - Distância horizontal entre transdutores

m – Declive da reta

n – Número de amostras

n – Frequência de ressonância do elemento

s – Desvio padrão dos resultados dos ensaios

s – Coeficiente que depende do tipo de cimento

t – Idade do betão em dias

t_{n-2} – Valor t student

t_T – Idade do betão corrigida em função da temperatura, que substitui t nas expressões correspondentes

Δt_i – Número de dias em que se mantém a temperatura T

v – Velocidade de propagação dos ultrassons. Utilizado na determinação do valor do deslocamento da curva base

x – Distância entre o ponto mais próximo da zona ativa do transdutor e a fenda

x_i – Valor da abcissa do ponto utilizado para criar a reta de correlação, correspondente ao parâmetro obtido pelo método indireto *in situ*

x_0 – Distância do transdutor emissor para qual o declive altera

x_0 – Coordenada da abcissa da reta $\hat{y}_{(x_0)}$

y_i - Valor da abcissa do ponto utilizado para criar a reta de correlação, corresponde ao valor da resistência à compressão obtida em laboratório

$\hat{y}_{(x_0)}$ – Coordenada do eixo das ordenadas da reta de melhor ajuste

$\Delta y(f_{is,h})$ - Intervalo de confiança 95% da resistência à compressão

$\Delta y(f_{is,h,t})$ – Intervalo de confiança 95% da resistência à tração simples

- Letras minúsculas gregas

$\beta_{cc}(t)$ - Coeficiente que depende da idade do betão t

Δ - Variação

γ - Razão da velocidade de propagação corrigida e de propagação no aço

γ_{cred} - Coeficiente parcial de segurança relativo ao betão reduzido

δ_f - Diferença entre a resistência de cada carote e a resistência dada pela relação base

ε_u - Extensão média correspondente ao ciclo de carga inferior

ε_o - Extensão média correspondente ao ciclo de carga superior

λ - Comprimento de onda

ν - Coeficiente de Poisson dinâmico

ρ - Massa volúmica

σ_u - Tensão inferior antes do início do terceiro ciclo de carga

σ_o - Tensão superior durante o terceiro ciclo de carga

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

São reconhecidas as inúmeras vantagens da utilização do betão estrutural, de que se salienta a economia das soluções e as características de resistência e de durabilidade. Estas vantagens fizeram deste material, no último século, o material de eleição nas obras de engenharia civil em Portugal. Contudo, as propriedades do betão endurecido são influenciadas por inúmeros fatores, como seja a sua composição e colocação em obra, a agressividade do meio ambiente e as condições de utilização e de conservação. Tais fatores podem determinar a variabilidade das suas características e condicionar o necessário conhecimento relativo ao comportamento estrutural e à sua durabilidade, de forma a garantir a sua segurança em condições de serviço.

É neste contexto que surge com frequência a necessidade de avaliar a resistência e a deformabilidade dos materiais em estruturas existentes e em construção, como por exemplo: para verificar a conformidade, controlo de qualidade, dimensionamento de soluções de reforço ou reabilitação estrutural, avaliação da resistência e da sua integridade devido ao efeito da deterioração nas estruturas, e verificação da segurança da estrutura enquanto se encontra em serviço.

Para tal, estão disponíveis metodologias de ensaio em laboratório e *in situ* para a sua avaliação. Os ensaios *in situ* permitem, de forma rápida, sem danos e de forma menos dispendiosa do que os ensaios laboratoriais, determinar e avaliar a uniformidade do betão, presença de vazios ou fendas, variação das propriedades com o tempo, módulo de elasticidade dinâmico e estático, resistência à tração direta e resistência à compressão, com a elaboração de relações entre os parâmetros de caracterização diretos e indiretos.

Alguns destes ensaios fornecem medições que podem ser aplicadas diretamente na sua caracterização, como por exemplo da resistência à compressão e profundidade de carbonatação. Mas, em muitos casos, os ensaios apenas são úteis com correta interpretação dos parâmetros, que caracterizam de forma indireta as propriedades pretendidas a avaliar, como por exemplo: determinação do índice esclerométrico, tração direta e determinação da velocidade de propagação dos ultrassons.

Para a sua caracterização torna-se necessário o desenvolvimento de relações entre as metodologias de ensaios, *in situ* e em laboratório, efetuados em estruturas existentes ou em construção, com a utilização de metodologias de análise estatística, para obter a melhor aproximação possível com o esperado.

Para o estabelecimento de relações com a resistência é necessária a elaboração de ensaios *in situ* e ensaios em laboratório em provetes normalizados (para correlações de estruturas recentes de betão novo) e carotes (para betão de estruturas existentes), para vários níveis de resistência.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo da presente dissertação é estabelecer e analisar a fiabilidade de correlações entre as diferentes metodologias de ensaio de caracterização das propriedades mecânicas e físicas do betão, pela comparação entre os resultados obtidos de ensaios em laboratório com os obtidos nos *ensaios in situ* e outros autores, bem como avaliar a influência da maturidade do betão ao longo do tempo, armadura, humidade e integridade nos parâmetros utilizados na sua caracterização, tendo, para este efeito, sido elaborados provetes cilíndricos de betão para ensaio em laboratório e lajetas de betão com e sem armadura, para efetuar os ensaios *in situ*.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, identificados e descritos de seguida.

No primeiro capítulo "Introdução" é feita a introdução do tema a desenvolver e apresentados os objetivos para a sua concretização.

No segundo capítulo "Ensaio de caracterização do betão" efetua-se uma revisão bibliográfica das várias normas, Europeias e Americanas, descrevendo os fatores que influenciam a escolha do método de ensaio a empregar, para representar, com um determinado grau de certeza, a propriedade avaliada em determinada zona de ensaio. São descritos os métodos de ensaio de betão endurecido (laboratório) e ensaio do betão nas estruturas (*in situ*), e os procedimentos de como desenvolver as respetivas relações entre os parâmetros de caracterização diretos e indiretos.

Abordam-se os requisitos da avaliação de conformidade e classificação normativa das propriedades mecânicas do betão, que traduzem a sua aptidão para desempenhar as funções para que foi concebido durante o período de vida útil definido no projeto

No terceiro capítulo "Modelos experimentais", é feita a descrição das dimensões, composição do betão e metodologia para obtenção dos modelos experimentais e sua caracterização, através do ensaio de provetes normalizados em laboratório.

No quarto capítulo “ Campanha experimental” é efetuada a descrição do programa experimental aqui desenvolvido e são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios realizados nas lajetas, pela análise dos desvios entre as estimativas obtidas com os resultados das propriedades das amassaduras obtidos da caracterização dos modelos experimentais em laboratório e comparação das mesmas com outras obtidas da revisão bibliográfica, bem como a avaliação dos fatores que influencia os parâmetros indiretos na caracterização das amassaduras.

No quinto capítulo “Considerações Finais” é efetuada a síntese das conclusões, da precisão das correlações desenvolvidas e das encontras da consulta da bibliografia da especialidade e da avaliação da influência da maturidade do betão ao longo do tempo, presença de armadura e humidade e técnica do operador.

Em “Anexos” estão incluídos os resultados obtidos dos métodos de ensaio elaborados.

CAPÍTULO 2

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Pode ser necessário efetuar os ensaios de caracterização das propriedades do betão para verificação da conformidade e controlo de qualidade do betão fornecido em obra e avaliação do betão após endurecido ao longo do tempo para avaliação do desempenho e adequabilidade da estrutura de acordo com as funções que deve desempenhar.

É possível a caracterização da sua resistência e deformabilidade, através de provetes de betão moldados em obra e ensaiados em laboratório. Este método tem limitações, como deteção tardia de problemas, devido à elaboração dos ensaios aos 7 e 28 dias, custo elevado e pelo facto de os provetes não representarem a qualidade do betão em estruturas, devido às diferenças no grau de compactação e cura.

Estes problemas podem ser ultrapassados pela avaliação do betão *in situ* de estruturas existentes, de acordo com os procedimentos e métodos descritos na norma NP EN 13791:2008 [1].

Os ensaios de elementos *in situ* permitem avaliar uma vasta gama de características de estruturas existentes em betão, que inclui: (ACI 437R-91 [2]e [1]).

- Resposta dinâmica dos elementos individuais da estrutura;
- Suscetibilidade dos elementos estruturais a deformações excessivas a longo prazo;
- Estabilidade, resistência para verificar a possibilidade de remover cofragens, segurança, rigidez e durabilidade da estrutura e seus elementos;
- Quando, na avaliação da aptidão estrutural, houver dúvidas acerca da resistência à compressão na estrutura devido a execução deficiente (vibração excessiva ou ausente), deterioração do betão provocada por fogo ou outras causas;
- Para avaliação da aptidão estrutural no caso de não conformidade da resistência à compressão obtida a partir dos provetes normalizados;

- Para avaliação da conformidade da resistência do betão *in situ* quando especificada numa especificação ou norma de produto;
- Estruturas deterioradas que evidenciam fraqueza estrutural, como presença de fendas, delaminação, corrosão da armadura, deformação excessiva;
- Estruturas em que existe dúvida na sua adequabilidade para resistir a carga para a qual foi dimensionada;
- Avaliação das estruturas após sofrer intervenção de reforço ou de reparação para resistir a novas solicitações devido à alteração da sua ocupação e utilização;

2.2 CLASSIFICAÇÃO DE ENSAIOS

Estes testes podem ser efetuados *in situ* ou relacionados com ensaios laboratoriais de amostras de betão recolhidas em obra.

É possível identificar três categorias de ensaio de verificação e caracterização do betão [3],

- Ensaio de controlo, normalmente efetuados pelo empreiteiro ou fornecedor, com intuito de assegurar a aceitabilidade do material fornecido ou efetuar possíveis ajustes para assegurar a sua conformidade [4].
- Ensaio de conformidade elaborados de acordo com amostragem e planeamento normativo, com os requisitos definidos na Tabela 2.4 e Tabela 2.2, para verificação da conformidade das especificações do betão [4].
- Ensaio secundários, necessários para a monitorização a longo prazo da estrutura, efetuados em betão endurecido, ou retirados de elementos estruturais existentes.

Os métodos de ensaio *in situ* disponíveis podem ser classificados pelos seguintes grupos [5]:

- Ensaio destrutivos: método convencional permite a avaliação da resistência do betão, através do ensaio de carotes extraídos do elemento estrutural de betão. Este método não é possível na maioria dos casos como por exemplo para elementos esbeltos.
- Ensaio não destrutivos: as propriedades resistentes não são avaliadas diretamente, sendo avaliadas outras, obtendo as propriedades resistentes por correlação. Estes métodos têm a vantagem de não danificar os elementos de betão.
- Ensaio semi-destrutivos: o betão é ensaiado até à rotura, mas o dano resultante é localizado e o membro ensaiado não é enfraquecido de nenhuma forma significativa.

Os principais ensaios e técnicas disponíveis para avaliação de propriedades mecânicas, físicas e químicas do betão estão listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Principais métodos de ensaio.

Método	Regulamento	Propriedade avaliada	Principal aplicação	Danos superficiais
Resistência à compressão	NP EN 12390-3 2011	Resistência à compressão	Avaliação da resistência (Laboratório)	N/A
Resistência à tração por compressão	NP EN 12390-6 2011	Resistência à tração por compressão	Avaliação da resistência (Laboratório)	N/A
Resistência à flexão	NP EN 12390-5 2009	Resistência à flexão	Avaliação da resistência (Laboratório)	N/A
Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão	NP EN 12390-13 2014	Módulo de elasticidade secante	Avaliação da resistência (Laboratório)	N/A
Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (frequência de ressonância)	BS 1881-209 1990/ASTM C 215	Módulo de elasticidade dinâmico	Avaliação da resistência por correlação (Laboratório)	N/A
Determinação da força de arranque (Pull-out)	NP EN 12504-3 2007	Resistência ao arranque	Avaliação da resistência por correlação (IN-SITU)	Moderado
Determinação da resistência à tração direta (Pull-off)	EN 1542 1999/ASTM C1583-13	Resistência à tração direta	Avaliação da resistência por correlação (IN-SITU)	Moderado
Determinação do índice esclerométrico	NP EN 12504-2 2012	Dureza superficial	Avaliação da resistência por correlação (IN-SITU)	Mínimo
Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons	NP EN 12504-4 2007	Velocidade de propagação/Módulo de elasticidade dinâmico, e estático	Avaliação da uniformidade e resistência por correlação (IN-SITU)	Nenhum
Medição da resistência à penetração	BS 1881-207 1992/ACI 228.1R-03/ASTM C 803	Profundidade de penetração de sonda metálica	Avaliação da resistência por correlação (IN-SITU)	Moderado
Ensaio de tração por flexão (Break-off test)	BS 1881-207 1992/ASTM C 1150	Resistência à Tração por flexão	Avaliação da resistência por correlação (IN-SITU)	Moderado
Fratura interna (Internal fracture)	BS 1881-207 1992	Resistência à tração axial	Avaliação da resistência por correlação (IN-SITU)	Moderado
Determinação da resistência à penetração de cloretos (Ensaio de imersão (3 meses))	LNEC E 390-1993	Parâmetro de penetração dos iões cloreto	Avaliação da Durabilidade (Laboratório)	N/A
Determinação da resistência à penetração de cloretos (Método da célula de difusão (30 a 40 dias))	LNEC E 383-1993	Coefficiente de difusão aparente dos iões cloreto	Avaliação da Durabilidade (Laboratório)	N/A
Determinação da resistência do betão à penetração dos cloretos por difusão unidirecional	NP EN 12390-11 2017	Coefficiente de difusão em regime estacionário e não estacionário/Teor de cloretos	Avaliação da Durabilidade e qualidade (Laboratório)	N/A
Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário	LNEC E 463-2004	coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário	Avaliação da Durabilidade e qualidade (Laboratório)	N/A
Indicação elétrica da capacidade do betão resistir à penetração dos cloretos (56 dias)	ASTM C1202-12	Resistência a penetração dos iões cloreto por condutividade elétrica do betão	Avaliação da Durabilidade e qualidade (Laboratório)	N/A
Determinação teor de iões cloreto	BS 1881-124 2015	Determinação do Conteúdo de iões cloreto	Avaliação da Durabilidade e qualidade (Laboratório)	N/A
Determinação da profundidade de carbonatação pelo método Fenolftaleína	EN 14630 2006/RILEM CPC-18	Profundidade média de penetração	Avaliação da Durabilidade (In-situ)	Moderado
Determinação da resistência à carbonatação (Ensaio acelerado)	LNEC E 391-1993	Medir resistência à penetração de CO ₂ (Medição da profundidade de carbonatação)	Avaliação da Durabilidade e qualidade (Laboratório)	Moderado
Determinação da resistência potencial à carbonatação do betão (método acelerado(70 dias))	BS 1881-210 2013	Medir resistência à penetração de CO ₂ (Medição da profundidade de carbonatação)	Avaliação da Durabilidade e qualidade (Laboratório)	Moderado
Profundidade de penetração da água sob pressão	NP EN 12390-8 2009	Profundidade de penetração da água	Avaliação da Durabilidade e qualidade (Laboratório)	N/A
Determinação da absorção de água (Imersão)	BS 1881-122 1983	Profundidade de penetração da água	Avaliação da Durabilidade (Laboratório)	N/A
Medição da permeabilidade ao gás e absorção por capilaridade da água	RILEM TC 116-PCD	Coefficiente de permeabilidade a gás(O ₂ , N ₂) + absorção capilar da água	Avaliação da Durabilidade e qualidade (Laboratório/in situ)	Moderado
Estimar resistência à compressão do betão pelo método da maturidade	ASTM C 1074-98	Índice de maturidade	Avaliação da resistência por correlação e Durabilidade (Laboratório)	Nenhum
Radiografia	BS 1881-205 1986	Localização de vazios e armadura	Inspecção e avaliação da uniformidade do betão (IN-SITU)	Nenhum
Medição da resistividade do betão	RILEM TC 154-EMC 2000	Resistividade elétrica	Avaliação da Durabilidade (Laboratório/in situ)	Nenhum
Potencial elétrico (Half-cell potencial)	RILEM TC 154-EMC 2003/ASTM C 876-15	Potencial elétrico	Avaliação da Durabilidade (in situ)	Moderado
Deteção de armadura/Medição electromagnética do recobrimento (Covermeter)	BS 1881-204 1998	Estimar posição, profundidade e dimensões da armadura	Controlo de qualidade	Nenhum

2.3 ENSAIOS DE BETÃO ENDURECIDO EM LABORATÓRIO

2.3.1 Introdução

O betão endurecido pode apresentar uma elevada variabilidade nas suas propriedades, em resultado não só da sua composição, mas também do processo de fabrico e colocação em obra, da agressividade do meio ambiente e das condições de utilização.

As suas propriedades de resistência e de deformabilidade podem ser determinadas através do ensaio de provetes normalizados, ainda que o seu resultado seja influenciado por fatores como taxa de aplicação da carga e tipo de prensa utilizada, teor de humidade, dimensões dos provetes, condições de cura e número de provetes ensaiados.

No presente capítulo é feita uma abordagem às metodologias e procedimento de ensaio de provetes normalizados para a caracterização das propriedades do betão.

PROPRIEDADES RESISTENTES DO BETÃO

A NP EN 206:2013+A1-2017 [4] define os requisitos da resistência mecânica para o betão endurecido e a NP EN 13791 [1] para o betão em estruturas. Ambas as normas especificam a caracterização da composição e propriedades de betão endurecido e fresco em função de um plano de amostras, resumido na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Plano de amostra normativo.

Nº provetes/amassadura			
	Ensaio	Provetes/amassadura	
NP EN 206-1	Resistencia á compressão+Resistencia á tração	Inicial	≥ 3
		Identidade	≥ 2
		Conformidade	≥ 3
NP EN 13791	In situ	≥ 3	

Para betão de massa volúmica normal, $2000 \text{ kg/m}^3 < \rho \leq 2600 \text{ kg/m}^3$, betão pesado ($C_{cyl/cub}$), $\rho > 2600 \text{ kg/m}^3$ e para betão leve ($LC_{cyl/cub}$), $\rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$, a norma NP EN 206:2013 [4] classifica o betão endurecido relativamente à sua resistência à compressão. Para a sua classificação utiliza-se a resistência característica aos 28 dias obtidos a partir de provetes cilíndricos $f_{ck,cyl}$ de 150 mm de diâmetro por 300mm de altura ou a partir de provetes cúbicos $f_{ck,cub}$ de 150 mm de aresta.

De acordo com a norma NP EN 1992-1-1:2010 [6], os valores característicos da resistência f_{ck} e as correspondentes características mecânicas estão resumidas no Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Características de resistência e de deformação do betão [6].

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

VALORES CARACTERÍSTICOS

De acordo com a NP EN 1992-1-1:2010 [6] e a NP EN 206:2013+A1:2017[4], é designada por classe de resistência do betão, a tensão de rotura à compressão determinada aos 28 dias. As classes de resistência do betão estão relacionadas com o valor característico (quantilho de 5%), como sendo o valor abaixo do qual se espera que ocorram 5% dos valores da população de todos os possíveis resultados da resistência.

Admitindo uma distribuição normal de probabilidade (ver Figura 2.1), o valor característico da resistência que corresponde ao quantilho dos 5% pode ser obtido a partir da expressão(2.1), que pode ser completamente definida por dois parâmetros estatísticos; a média da amostra \bar{X} e respetivo coeficiente de variação *c. v.*, aplicando as equações (2.2), (2.3) respetivamente.

$$f_{ck} = f_{cm} * (1 - 1.64 * c. v.) \tag{2.1}$$

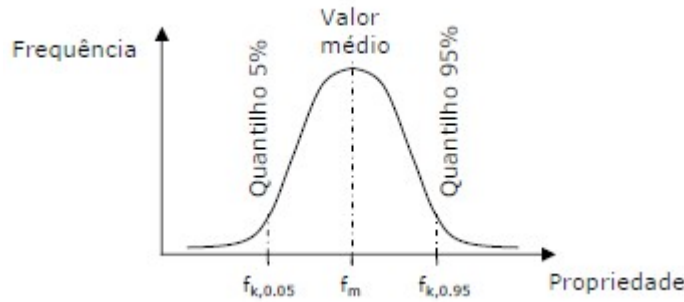


Figura 2.1 - Distribuição estatística das propriedades dos materiais [7].

VARIAÇÕES DA RESISTÊNCIA

Não obstante todos os cuidados que possam ser tidos no processo de fabrico e de endurecimento e de cura dos provetes de betão, e os cuidados na condução dos ensaios laboratoriais, os resultados apresentam sempre uma certa variabilidade. As variações na resistência podem ter origem nas seguintes causas:

- Variação na resistência de lote para lote de betão devido às diferentes proporções e características dos materiais que a compõem, sua produção, entrega, e processo de manuseamento e condições climáticas.
- Variações nas amostras, preparação dos provetes, cura e procedimentos de ensaio.

Os procedimentos estatísticos como cálculo de média, desvio padrão e coeficiente de variação pela aplicação das equações (2.2), (2.3), (2.4) respetivamente, fornecem ferramentas para avaliação e interpretação dos resultados obtidos nos ensaios para comparação de diferentes grupos de valores, ou para estimar a dispersão, no caso da ausência de amostras com tamanhos estatisticamente válidos [8].

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \tag{2.2}$$

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \tag{2.3}$$

$$C.V. = \frac{S_n}{\bar{X}} \tag{2.4}$$

Onde:

\bar{X} – Média dos resultados obtidos;

X_i – Valores dos resultados individuais;

n – Número de amostras;

S_n – Desvio padrão da amostra;

Como valores de referência para tradução da qualidade de execução no fabrico do betão podem considerar-se os seguintes valores de C.V. [9].

Não admissível na execução de estruturas de betão armado: C.V. > 25%

Condições de execução médias: C.V.= 20% a 25%

Condições de execução boas: C.V.= 15% a 20%

Condições de execução muito boas: C.V.= 10% a 15%

De acordo com a norma NP EN 1992:2010 [6], se os valores de C.V. obtidos do emprego de metodologias de avaliação da resistência à compressão forem inferiores a 10%, o valor de coeficiente parcial de segurança relativo ao betão em estruturas existentes poderá ser reduzido para o valor de $\gamma_{red3} = 1.35$ em vez de $\gamma_{red2} = 1.45$.

2.3.2 Resistência à compressão

O betão é geralmente classificado, pelas normas nacionais e internacionais, de acordo com a sua resistência à compressão [10].

A resistência à compressão é das propriedades do betão mais utilizada para o dimensionamento das estruturas de betão armado. A resistência à compressão pode ser determinada pelo ensaio de carotes extraídos de estruturas existentes e do ensaio em laboratório de provetes normalizados [11].

Na ausência de adjuvantes, para uma temperatura média de 20°C e uma cura de acordo com NP EN 12390-2:2009 [12], a tensão de rotura do betão à compressão em várias idades, $f_{cm}(t)$, pode ser estimada pela equação (2.5), em função do coeficiente $\beta_{cc}(t)$, com uma evolução da resistência à compressão para diferentes classes de betão, obtida pela equação (2.7), que varia com o tipo de cimento. De acordo com a norma [6], esta regra não deverá ser utilizada retrospectivamente para justificar a posteriori uma resistência não conforme à de referência.

Para outros valores de temperatura, diferentes de 20 °C, a NP EN 1992-1-1:2010/AC [6] especifica o método pela aplicação da equação (2.6) para corrigir a idade do betão em função da temperatura (t) na expressão de $\beta_{cc}(t)$.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm} \quad (2.5)$$

Com:

$$t = t_T = \sum_{i=1}^n e^{-(4000/[273+T_{(\Delta t_i)}]-13.65)} * \Delta t_i \quad (2.6)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right\}} \quad (2.7)$$

Em que:

$f_{cm}(t)$ – Tensão média de rotura do betão à compressão idade de t dias;

f_{cm} – Tensão média de rotura aos 28 dias de acordo com a Tabela 2.3;

$\beta_{cc}(t)$ - Coeficiente que depende da idade do betão t ;

t – Idade do betão em dias;

s – Coeficiente que depende do tipo de cimento, dado por;

=0.20 para cimentos de resistência CEM 42.5R, CEM 52.2N e CEM52.5R (Classe R);

=0.25 para cimentos de resistência CEM 32.5R, CEM 42.5N (Classe N);

=0.38 para cimentos de resistência CEM 32.5 N (Classe S);

t_T – Idade do betão corrigida em função da temperatura, que substitui t nas expressões correspondentes;

$T_{(\Delta t_i)}$ – Temperatura em °C durante o intervalo de tempo Δt_i ;

Δt_i – Número de dias em que se mantém a temperatura T ;

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PROVETES DE BETÃO ENDURECIDO

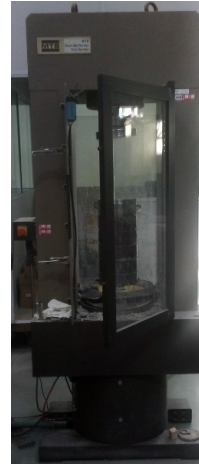
O método para determinação da resistência à compressão de provetes de betão endurecido, é definido pela norma NP EN 12390-3 [13]. O princípio é ensaiar os provetes até a rotura numa máquina de ensaio de compressão e de acordo com a norma NP EN 12390-4, (ver Figura 2.2), regista-se a carga máxima suportada pelo provete e calcula-se a resistência à compressão do betão.

Verifica-se que a resistência cilíndrica é da ordem de 0.80 da resistência cúbica, a diferença é originada pelo atrito entre as faces dos provetes e os pratos das prensas que impedem a deformação transversal do betão conduzindo a maiores valores da resistência [7].

É considerada boa prática incluir a medição da massa volúmica antes da determinação da resistência à compressão.



a) Posicionamento de provete na prensa



b) Vista geral da prensa MTS

Figura 2.2 - Prensa MTS durante a realização do ensaio à compressão (LABEST).

PROCEDIMENTO

Previamente ao posicionamento dos provetes na prensa, devem ser removidos quaisquer resíduos ou material estranho das superfícies dos pratos da máquina de ensaio.

As faces de contacto dos provetes que estarão em contacto com os pratos devem ser retificadas (Figura 2.3) de forma a garantir a linearidade da superfície de aplicação da carga [14].



a) Faces de provetes a retificar



b) Face retificada

Figura 2.3 - Retificação de provetes.

A carga deve ser aplicada a uma velocidade constante, dentro do intervalo $(0.6 \pm 0.2) \text{ MPa/s}$, sem choques, aumentando-a de forma contínua, até à rotura e por fim registar a carga máxima de rotura e tipo de rotura.

Na Figura 2.4 estão exemplificados alguns tipos de rotura satisfatória e na Figura 2.5 alguns tipos de rotura não satisfatório.

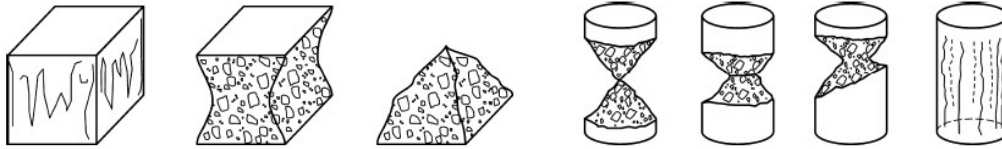


Figura 2.4 - Algumas roturas satisfatórias de provetes cubico e cilíndricos.

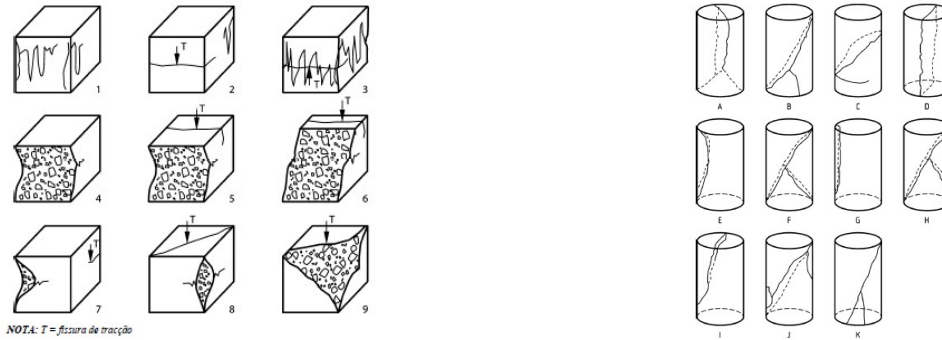


Figura 2.5 - Algumas roturas não satisfatórias de provetes cúbico e cilíndricos.

A resistência à compressão é dada pela equação:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \tag{2.8}$$

Em que:

f_c – Resistência à compressão;

F – Carga máxima de rotura;

A_c – Área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada;

2.3.3 Resistência à tração e à tração por flexão

Está definido em [6] que a resistência à tração se refere à tensão mais elevada atingida sob esforços de tração simples f_{ct} , que pode ser determinada pela equação (2.9), como sendo 0.9 da tensão de rotura de provetes cilíndricos por compressão diametral $f_{ct,sp}$, obtido de acordo com a norma NP EN 12390-6:2011 [15].

A norma NP EN 1992-1-1:2010/AC [6] relaciona a tensão média de rotura à tração simples com a resistência à compressão característica, para classes inferior a C50/60, pela equação (2.10).

Pela equação (2.11) obtém-se a resistência à tração por aplicação do momento fletor no provete prismático com uma carga entre dois pontos ou a meio vão, de acordo com a norma NP EN 12390-5-2009 [16].

A relação da resistência à tração axial simples com a resistência à tração em flexão, $f_{ctm,fl}$ é obtida pela equação (2.12) como sendo a tensão média de rotura à tração por flexão, em função da tensão média de rotura à tração simples e da altura da secção transversal h [6].

$$f_{ct} = 0.9f_{ct,sp} \quad (2.9)$$

$$f_{ctm} = 0.30f_{ck}^{(2/3)} \quad (2.10)$$

$$f_{ct,fl} = \frac{6M}{bh^2} \quad (2.11)$$

$$f_{ctm,fl} = \max \left\{ \left(1.6 - \frac{h}{1000} \right) f_{ctm}; f_{ctm} \right\} \quad (2.12)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ – Tensão de rotura à tração por compressão diametral;

f_{ct} - Tensão de rotura à tração simples;

f_{ctm} – Tensão média de rotura à tração simples;

$f_{ct,fl}$ – Tensão de rotura à tração por flexão;

$f_{ctm,fl}$ – Tensão média de rotura à tração por flexão simples;

M – Momento Flector; $M = \frac{F}{2} * a$;

F – Carga máxima;

a – Distância do ponto de aplicação da carga no prisma ao apoio mais próximo;

O valor da resistência à tração por compressão diametral é geralmente superior à resistência à tração axial simples e inferior à resistência à tração na flexão, sendo esta superior a ambas.

Numa primeira aproximação poderá admitir-se que a tensão de rotura do betão à tração em várias idades $f_{ctm}(t)$ é obtida com aplicação da equação:

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^\alpha * f_{ctm} \quad (2.13)$$

Em que :

$\alpha = 1$ para $t < 28$ dias

$\alpha = 2/3$ para $t \geq 28$ dias

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DOS PROVETES CILÍNDRICOS DE BETÃO ENDURECIDO

O método de referência para medição da resistência à tração, consiste em submeter um provete cilíndrico a uma força de compressão, aplicada numa zona estreita ao longo do seu comprimento, do que resultam tensões ortogonais que provocam a rotura do provete, por tração.

Este tipo de carregamento induz tensões de tração no plano onde se encontra a carga aplicada e de compressão na área imediatamente ao lado, como representada na Figura 2.6.

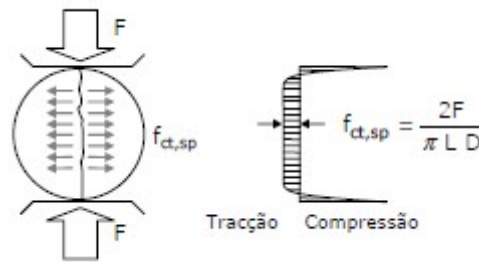


Figura 2.6 - Mecanismo de rotura [7].

PROCEDIMENTO

Deve assegurar-se a colocação do provete em posição central na máquina de ensaio (ver Figura 2.7), com definição de forma clara do plano de carregamento, marcando duas linhas opostas ao longo das quais a carga é aplicada com o auxílio de equipamento próprio, como demonstrado na Figura 2.8, ou usando um posicionador centrado ou suportes temporários Figura 2.9.

É considerada boa prática incluir a medição da massa volúmica antes da determinação da resistência à tração, como uma confirmação da compactação do betão [15].



Figura 2.7 - Prensa SATÉC, durante a realização do ensaio determinação da resistência à tração por compressão (LABEST).

Devem ser utilizadas faixas de cartão prensado entre as peças de aço para aplicação da carga e o provete, com largura de $a = (10 \pm 1)$ mm; espessura $t = (4 \pm 1)$ mm e comprimento superior ao comprimento da linha de contacto do provete, como demonstrado na Figura 2.9.

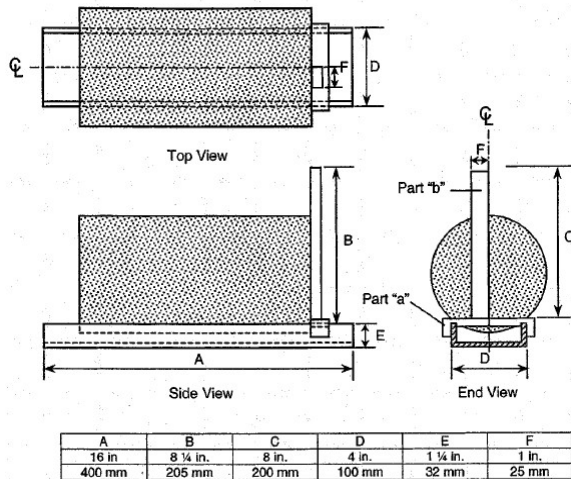


Figura 2.8 - Equipamento de auxílio para marcação das linhas.



Figura 2.9 - Equipamento com suportes temporário e posicionador.

A aplicação da carga deve ser sem choques e aumentada de forma contínua, a uma velocidade de aplicação da tensão dentro do intervalo de 0.04 MPa/s a 0.06 MPa/s.

A resistência à tração por compressão é dada pela equação:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F}{\pi * L * d} \quad (2.14)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ – Resistência à tração por compressão;

F – Carga máxima;

L – Comprimento da linha de contacto do provete;

d – Dimensão vertical da secção transversal do provete;

2.3.4 Resistência à flexão

No ensaio de flexão, é definido como resistência à flexão a máxima tensão resistente atingida nas fibras inferiores da viga de ensaio, relevante para dimensionamento de pavimentos de autoestradas e de aeroportos. O valor da resistência à flexão depende da dimensão da viga e do arranjo dos pontos de aplicação da carga [17].

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE PROVETES

O método para determinar a resistência à flexão de provetes de betão endurecido, é definido pela norma NP EN 12390-5:2009 [16], que incorpora dois métodos de carga (ver Figura 2.10) para a sua

obtenção: em dois pontos (método de referência) e o método de carga a meio vão, que se obtém resultados 13% mais altos que os obtidos pelo método de carga em dois pontos.

Os provetes devem ser prismas que satisfaçam os requisitos da NP EN 12390-1, submetidos a um momento fletor, aplicando uma carga através de roletes colocados superior e inferiormente.

PROCEDIMENTO

Colocar o provete na máquina, corretamente centrado com o eixo longitudinal do provete, perpendicular ao eixo longitudinal dos roletes superior e inferior, como exemplificado na Figura 2.10, assegurando que a direção de referência da aplicação de carga é perpendicular à direção de moldagem do provete.

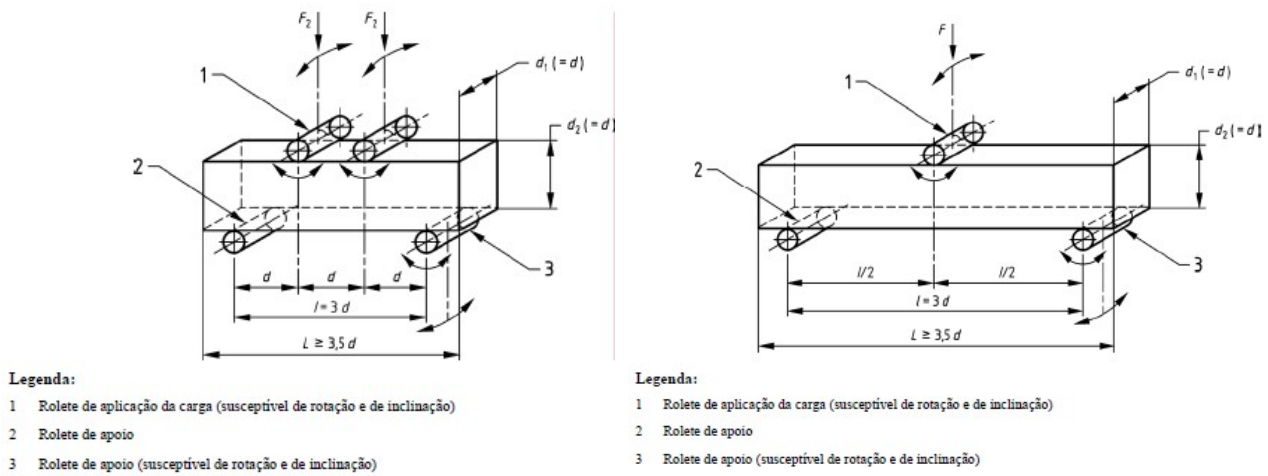


Figura 2.10 - Aplicação da carga nos provetes: carga em dois pontos e carga a meio vão [16].

A distância *l*, entre roletes exteriores deve ser igual a 3 * *d*, onde *d* é a largura do provete. A distância entre os roletes interiores deve ser igual a *d*. Os roletes interiores devem estar equidistantes dos roletes exteriores, como indicado na Figura 2.10.

Selecionar a velocidade de aplicação da tensão dentro do intervalo 0.04 MPa/s e 0.06 MPa/s, sem choques aumentando-a de forma contínua, a uma taxa constante de ± 10%.

O cálculo da resistência à flexão, com aplicação da carga em 2 pontos, é dada pela equação:

$$f_{cf} = \frac{F * l}{d_1 * d_2^2} \tag{2.15}$$

A resistência à flexão, com aplicação da carga a meio vão, é dada pela equação:

$$f_{cf} = \frac{3 * F * l}{2 * d_1 * d_2^2} \tag{2.16}$$

Onde:

f_{cf} – Resistência à flexão;

F – Carga máxima;

l – Distância entre os roletes inferiores de apoio;

d_1 e d_2 – Dimensões laterais do provete;

2.3.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do betão é controlado pelo módulo de elasticidade dos seus componentes, como a pasta de cimento hidratada e agregados. O comportamento do betão pode ser descrito como não linear e não elástico.

Este é um parâmetro que interessa, fundamentalmente nas verificações de segurança em relação aos estados limites de utilização.

A NP EN 1992-1-1:2010 [6] define o módulo de elasticidade secante do betão, E_{cm} , para um valor aproximado de tensão igual a $0.4 * f_{cm}$, obtido da curva de relação entre tensões-extensões (Figura 2.11) de um carregamento uniaxial de curta duração, sendo os indicados na Tabela 2.3 para betão com agregados de quartzito. Para agregados de calcário e de grés estes valores devem ser reduzido em 10% e em 30% e para agregados de basalto, o valor deverá ser aumentado em 20%.

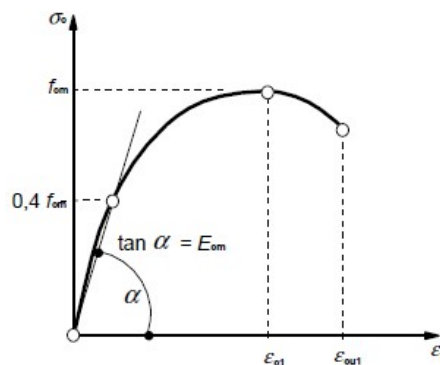


Figura 2.11 - Representação esquemática da relação tensões-extensões para análise estrutural [6].

A variação do módulo de elasticidade com o tempo pode ser estimada pela equação.

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0.3} * E_{cm} \quad (2.17)$$

Onde:

$E_{cm}(t)$ – Módulo de elasticidade à idade de t dias;

E_{cm} – Módulo de elasticidade aos 28 dias de idade;

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE À COMPRESSÃO

O módulo de elasticidade pode ser obtido experimentalmente de acordo com o especificado na DIN 1048-1991 part 5, [18], ensaiando um provete à compressão uniaxial, registrando as tensões e extensões, recorrendo à utilização de três transdutores de deslocamento (LVDT) para medição da distância relativa de dois anéis afastados entre si. a uma distância de L_0 a 1/3 da altura do provete (ver Figura 2.12), de forma que a base de medida esteja a igual distância das faces de topo, e determina-se a inclinação da secante à curva tensões-extensões, no primeiro ou após um conjunto de ciclos de carga/descarga.

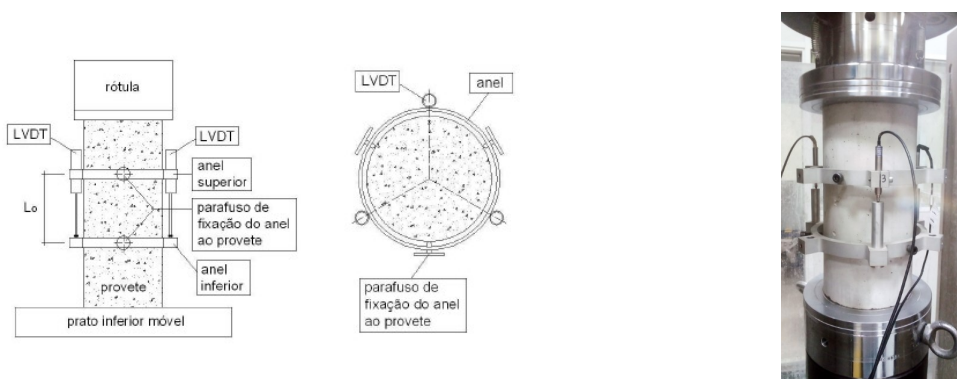


Figura 2.12 - Dispositivo de ensaio para obtenção do módulo de elasticidade [7].

PROCEDIMENTO

O provete de ensaio recomendado é o cilindro de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Os níveis de tensão do ciclo de carga de ensaio, na determinação do módulo elástico secante, devem ser definidos em função dos valores da tensão superior nominal (σ_o) que corresponde a $\frac{1}{3} * f_c$ da resistência à compressão obtida do ensaio do provete de acompanhamento, e tensão de pré-carga nominal inferior (σ_u) igual a 0.5 MPa.

A aplicação da carga deve ser contínua, a uma taxa de $(0.5 \pm 0.2)MPa/s$, de acordo com o diagrama da Figura 2.13.

Normativamente é recomendado que os ciclos de carga sejam repetidos, até que a diferença da extensão ϵ_a - ϵ_b entre dois ciclos consecutivos seja inferior a 10×10^{-6} m/m.

Após efetuadas as medições, os provetes devem ser carregados até à rotura e se a resistência à compressão diferir 20% do valor médio, deve ser reportado no relatório.

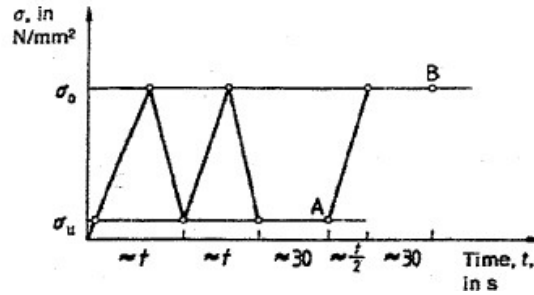


Figura 2.13 - Diagrama tensão/tempo para determinação do módulo de elasticidade [18].

A - É o ponto de leitura da tensão inferior σ_u e correspondente extensão ε_u antes do início do terceiro ciclo;

B - É o ponto de leitura da tensão superior σ_o e correspondente extensão ε_o ;

t - É o tempo da duração do ciclo carga/descarga resultante da taxa de carga e descarga;

O módulo de elasticidade estático à compressão E_c é obtido pela equação:

$$E_{c(i)} = \frac{\Delta\sigma_{(i)}}{\Delta\varepsilon_{(i)}} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (2.18)$$

Onde:

$\Delta\sigma_{(i)}$ - Variação da tensão no ciclo i ;

$\Delta\varepsilon_{(i)}$ - Variação da extensão;

σ_o - Tensão superior durante o terceiro ciclo de carga;

σ_u - Tensão inferior antes do início do terceiro ciclo de carga;

ε_o - Extensão média correspondente ao ciclo de carga superior, no ponto B da Figura 2.13;

ε_u - Extensão média correspondente ao ciclo de carga inferior, no ponto A da Figura 2.13;

2.4 ENSAIOS DO BETÃO *IN SITU*

2.4.1 Introdução

A principal aplicação dos ensaios *in situ* é estimar a resistência à compressão do betão, sendo possível também, em função do ensaio utilizado, caracterizar outras propriedades mecânicas e sua integridade.

Os métodos indiretos são, por natureza, não destrutivos ou semi-destrutivos, medindo uma propriedade que não a resistência e utilizados para avaliação da resistência *in situ* após calibração com ensaios em carotes ou provetes.

A metodologia para o estabelecimento de correlação com a resistência reside na elaboração de ensaios *in situ* e ensaios em laboratório de provete normalizados, para correlações de estruturas recentes de betão novo ou carotes extraídas de estruturas existentes, para vários níveis de resistência, procedendo à utilização de métodos estatísticos para estabelecer a correlação com a resistência.

SELEÇÃO DO MÉTODO DE ENSAIO

A seleção dos métodos de ensaio, para uma situação em particular, será baseada na combinação de fatores como acesso, danos, custo, velocidade e fiabilidade.

Limitações práticas podem inviabilizar, em algumas situações, o uso de métodos apropriados, enquanto em outros casos pode ser apropriado ou necessário considerar o uso de métodos para além dos recomendados [19].

O equipamento necessário para elaborar os ensaios é, na maioria dos casos, facilmente transportável e de rápida execução.

Algumas das considerações que afetam a escolha do método de ensaio são as seguintes:

- 1) Local de ensaio:
 - a) A posição em que o ensaio vai ser efetuado;
 - b) Variação das propriedades do betão em profundidade e extensão do elemento;
 - c) Posição da armadura;
 - d) Presença e influência dos defeitos (superfície carbonatada);
 - e) Dimensões do elemento, incumprimento das espessuras e distâncias máximas e mínimas aos bordos, para aplicação do método apropriado;
- 2) Efeito dos danos provocados:

- a) Efeito visual e danos estruturais provocados nos elementos ensaiados devido ao método utilizado.
- 3) Nível da precisão dos resultados requerida no propósito da investigação, é influenciada pelos seguintes fatores:
- a) Método de ensaio;
 - b) Número e local de ensaio;
 - c) Fiabilidade e precisão das calibrações disponíveis;

AValiação da Resistência à Compressão *in situ*

A norma NP EN 13791 2008 [1] indica os princípios e orientações para o estabelecimento de relações para avaliar a resistência à compressão do betão *in situ* nas estruturas e em elementos prefabricados, diretamente a partir de ensaios em carotes, mas também pode ser feita indiretamente por outros métodos ou combinação de métodos diretos (carotes e provetes normalizados) com métodos indiretos.

Para estruturas recentes, a metodologia preferível envolve preparar provetes com o mesmo betão utilizado em obra onde, em intervalos regulares, são efetuadas leituras utilizando os métodos de ensaio *in situ* e ensaios em laboratório.

Para algumas técnicas pode ser efetuado o ensaio em provetes sem os danificar, tornando possível o seu ensaio à compressão. Usualmente os ensaios *in situ* que provoquem danos são efetuados em provetes de acompanhamento, separadamente dos provetes a ensaiar em laboratório. É extremamente importante que os ensaios *in situ* sejam efetuados em provetes de acompanhamento de igual maturidade, consolidação e condições de cura, semelhantes aos provetes normalizados ensaiados em laboratório

Os dados do ensaio podem ser utilizados para estimar a resistência à compressão *in situ* característica e a classe de resistência de acordo com a NP EN 206:2013+A1-2017 [4].

NÚMERO DE ENSAIOS

O número de leituras individuais varia em alguns organismos de normalização, sendo representadas na Tabela 2.4 as definidas nas normas americanas e europeias e os valores de C.V. que se encontram associados a bom controlo de qualidade e boas práticas construtivas.

Para a determinação do número necessário de leituras deve ter-se em conta que um resultado individual está apenas relacionado com o local de ensaio, não refletindo as propriedades do betão no geral. É necessário um número mínimo de leituras para representar, com um determinado grau de certeza, a propriedade avaliada em determinada zona de ensaio.

Quando possível, a gama de amostragem e localização de ensaio deve incluir:

- Diferentes tipos de elementos estruturais (pilares, vigas, lajes);
- Áreas típicas para cada tipo de deterioração;
- Áreas em boas condições;
- Áreas com diferentes condições de exposição:
- Quando apropriado, áreas que tenham sido previamente reparadas;
- Presença de defeitos que possam influenciar os resultados obtidos.

Tabela 2.4 - Nº mínimo de leituras e coeficiente de variação associado a construção de boa qualidade.

Método de Ensaio	Nº leituras validas	C.V (%)
Ultra-sons	≥ 3	2.5
Esclerométrico	≥ 9	4
Força de arranque (Pull-out)	≥ 4	8
Tração direta (Pull-off)	≥ 3	10
Direto (Provetes)	≥ 3	10
Direto(Carotes)+indireto	≥ 9	10

2.4.2 Ensaio de carotes e provetes normalizados

O exame e ensaio à compressão de carotes extraídas duma estrutura existente permitem a inspeção visual do interior dos elementos e ter maior certeza nas estimativas da resistência à compressão.

Em NP EN 13791 2008 [1] são mencionados os conceitos respeitantes à relação entre resistência *in situ*, resistência de provetes normalizados e fatores que os influenciam.

A resistência à compressão de carotes é geralmente menor do que a de provetes normalizados, amostrados da mesma amassadura de betão. Devido à história da conservação da estrutura e pela idade do betão quando da extração da carote

PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO DAS CAROTES

De acordo com a norma NP EN 12504-2-2012 [20] os carotes devem ser obtidos perpendicularmente à superfície, extraídos com uma caroteadora (ver Figura 2.14), tendo em consideração as implicações estruturais resultantes da extração, sendo preferencialmente retiradas em pontos afastados das juntas ou arestas do elemento de betão e onde haja pouca ou nenhuma armadura, assegurando que as carotes para a determinação da resistência à compressão não contêm qualquer varão orientado longitudinalmente ou próximo desta orientação.

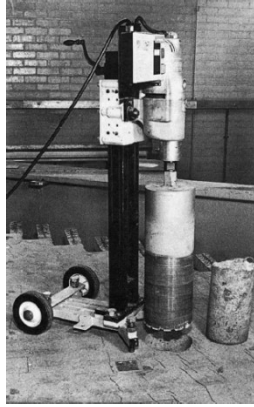


Figura 2.14 - Equipamento de extração de carotes [3].

Após carotagem deve ser marcado cada carote, registando a sua localização e orientação dentro do elemento de onde foi retirada e as condições de armazenamento da carote. Se for necessário ensaiar a carote saturada deve-se mantê-la em água no mínimo durante 40h antes do ensaio, a uma temperatura de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

As carotes devem ser expostas ao ambiente do laboratório três dias antes do ensaio. Nos casos onde a estrutura ou elemento de betão está húmido, as carotes deverão ser ensaiadas saturadas. Se o betão está seco, as carotes deverão ser ensaiadas secas.

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A determinação da resistência à compressão de cada carote é obtida dividindo a carga máxima, obtida em ensaio, pela área da secção transversal NP EN 12390-3-2011 [13]. A relação entre a dimensão máxima do agregado do betão e o diâmetro da carote influencia significativamente a resistência medida, em que, $D_{carote} \geq 3 * d_g$ ou 100mm , onde:

- Carotes com agregados de 20 mm e 100 mm de diâmetro foram aproximadamente 7% mais resistentes que carotes de 50 mm de diâmetro, que por sua vez carotes de 50 mm foram aproximadamente 20% mais resistentes que as carotes de 25 mm de diâmetro.
- Carotes com agregados de 40 mm e carotes e 100 mm de diâmetro foram aproximadamente 17% mais resistentes que carotes de 50 mm de diâmetro, que por sua vez carotes de 50 mm foram aproximadamente 19% mais resistentes que as carotes de 25 mm de diâmetro.

As relações comprimento/diâmetro preferenciais são;

- 2.0, se o resultado for para comparar com a resistência do cilindro;
- 1.0, se o resultado for para comparar com a resistência do cubo;

Os fatores que influenciam a resistência das carotes são classificados em categorias, conforme a sua influência está ligada a uma propriedade específica do betão:

- Teor de água: a resistência de carote saturada, é cerca de 10% a 15% inferior à duma carote cujo teor de água é geralmente compreendido entre 8% e 12%,
- Porosidade: onde a presença de 1% de vazios decresce a resistência cerca de 5% a 8%,
- Direção relativa da betonagem: onde uma carote cortada verticalmente na direção da betonagem a resistência é 0% a 8% superior comparativamente a carote cortada horizontalmente,
- Diâmetro e altura da carote.

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *IN SITU* POR ENSAIO DE CAROTES E PROVETES NORMALIZADOS

A NP EN 13791 [1] estabelece duas abordagens, A e B, para avaliação da resistência *in situ*.

Aplica-se a abordagem A para um número de carotes $n \geq 15$ e a abordagem B quando $3 \geq n \leq 14$.

- ABORDAGEM A

A estimativa da resistência à compressão *in situ* característica, $f_{ck, is}$, da zona de ensaio, segundo abordagem A, é o menor valor da equação:

$$f_{ck, is} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{m(n), is} - k_2 * s \\ f_{is, menor} + 4 \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Onde:

$f_{m(n), is}$ – Média dos resultados $f_{is, i}$ da resistência à compressão de n carotes;

$f_{is, menor}$ – Menor valor da resistência à compressão das carotes ensaiadas;

k_2 – É dado em disposições nacionais ou se não for dado é igual a 1.48;

s – Desvio padrão dos resultados dos ensaios tomando-se o máximo da equação;

$$\max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{n-1} * \Sigma (f_{m(n), is} - f_{is, i})^2} \\ 2.0 \text{ N/mm}^2 \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Onde:

$f_{is, i}$ – Valor individual da resistência à compressão de carote;

• ABORDAGEM B

A estimativa da resistência à compressão *in situ* característica, $f_{ck, is}$, da zona de ensaio, segundo abordagem B, é o menor valor dado pela equação:

$$f_{ck, is} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{m(n), is} - k \\ f_{is, menor} + 4 \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Onde:

k – Margem que depende do número n de resultados de ensaio, selecionado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Margem k associada a pequeno número de resultados de ensaio.

n	k
10 a 14	5
7 a 9	6
3 a 6	7

A classe de resistência é obtida estabelecendo a relação da resistência à compressão *in situ* característica com a classe de resistência à compressão da norma [4], apresentada na Tabela 2.6.

Selecionando a classe que apresente resistência característica $f_{ck, is, cyl}$ e $f_{ck, is, cube}$ inferior ao valor de $f_{ck, is}$ se a relação $l/d \cong 2$ e $l/d \cong 1$, respetivamente.

Tabela 2.6 - Mínima resistência à compressão *in situ* característica [1].

Classes de resistência à compressão da EN 206-1*	Relação entre a resistência <i>in situ</i> característica e a resistência característica de provetes normalizados	Mínima resistência <i>in situ</i> característica N/mm ²	
		$f_{ck, is, cyl}$	$f_{ck, is, cube}$
C8/10	0,85	7	9
C12/15	0,85	10	13
C16/20	0,85	14	17
C20/25	0,85	17	21
C25/30	0,85	21	26
C30/37	0,85	26	31
C35/45	0,85	30	38
C40/50	0,85	34	43
C45/55	0,85	38	47
C50/60	0,85	43	51
C55/67	0,85	47	57
C60/75	0,85	51	64
C70/85	0,85	60	72
C80/95	0,85	68	81
C90/105	0,85	77	89
C100/115	0,85	85	98

NOTA 1: A resistência à compressão *in situ* pode ser inferior à que é medida sobre provetes normalizados extraídos do mesmo betão.

NOTA 2: A relação 0,85 está incluída no coeficiente γ_c da EN 1992-1-1:2004.

A abordagem equivalente para obtenção do valor de $f_{ck, is, cyl}$ ou $f_{ck, is, cube}$, para seleção da classe, é feita pela verificação da equação (2.22).

$$\frac{f_{ck, is}}{0.85} > f_{ck, is, cyl} \text{ ou } f_{ck, is, cube} \quad (2.22)$$

2.4.3 Determinação do índice esclerométrico

Um dos métodos disponíveis para avaliação *in situ* da uniformidade, é o ensaio de determinação do índice esclerométrico [21].

Este ensaio tem como principais vantagens a rapidez e o baixo custo na sua utilização.

O esclerómetro poderá ser utilizado para ensaios comparativos, tendo como referência um betão com resistência conhecida ou um betão que se verificou provir de um definido volume, com uma população verificada conforme a sua classe de resistência.

As principais aplicações do ensaio de determinação do índice esclerométrico são as seguintes:

- Determinar a uniformidade do betão e definir áreas de diferente qualidade, antes do uso de métodos de ensaio diferentes.
- Comparação dos requisitos de um tipo de betão com um de referência.
- Determinar as propriedades da superfície do betão que tem influência direta no seu desempenho.
- Estimativa da resistência à compressão do betão estrutural.

A determinação do índice esclerométrico é baseado no princípio de uma massa impelida por uma mola que embate num percutor em contacto com a superfície e o resultado do ensaio é expresso em termos da distância repercutida pela massa.

A distância de repercussão depende da energia cinética no martelo antes do impacto com a base do pistão, e quanta dessa energia é absorvida durante o impacto e devido a fricção interna do aparelho.

A energia absorvida pelo betão depende da relação tensão-extensão, sendo assim efetuada a relação da energia absorvida com a tensão e dureza do betão.

Um betão de baixa resistência terá dureza reduzida e vai absorver mais energia que um betão mais resistente e de dureza mais elevada, resultando num valor de repercussão menor para o betão de baixa dureza. [22]

MODO DE FUNCIONAMENTO DO APARELHO

O martelo esclerométrico é constituído pelos seguintes elementos principais 1) corpo do aparelho 2) percutor, 3) massa do martelo e 4) mola de impacto, como ilustrado na Figura 2.15.

Ao executar o ensaio, o pistão é estendido do corpo do instrumento e colocado em contacto com a superfície de betão, quando o percutor se encontra estendido um mecanismo de travamento engata o martelo na extremidade superior do percutor, o corpo do aparelho é então empurrado na direção da

superfície (A). Esta ação provoca a extensão da mola de ligação do corpo do instrumento com o martelo (b). Quando o corpo é empurrado ao seu limite o mecanismo de travamento liberta o martelo, permitindo a mola puxar o martelo na direção da superfície do elemento a ensaiar (c). O martelo embate na zona de batente localizada na base inferior do pistão provocando o seu ressalto (d). O ressalto do martelo provoca o deslizamento do indicador que regista a distância de repercussão, registada no mostrador numa escala de 10 a 100 [22].

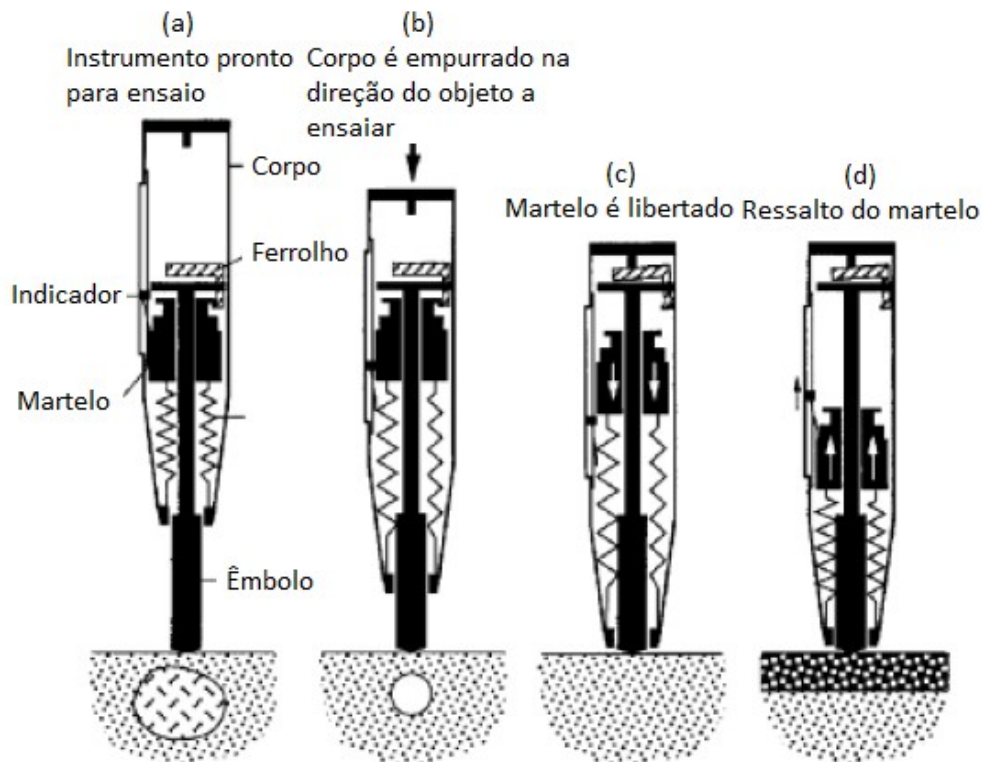


Figura 2.15 - Esquema para ilustração da operação do martelo de ressalto [22].

FATORES QUE INFLUENCIAM O RESULTADO DA DUREZA SUPERFICIAL DO BETÃO

A dureza superficial é condicionada por diversos fatores de entre os quais se salienta:

- i. Composição do betão
 - Tipo de cimento, a diferença entre os cimentos Portland de diferente finura é relativamente pequena não excedendo os 10% na correlação de resistência à compressão [23].
 - Betões produzidos com cimento de concentração alta em alumina podem fornecer resistências 100% superiores à calibração de referência [23].

Betão de cimento super sulfatado pode fornecer uma resistência 50% inferior à resistência do betão de referência [23].

- Quantidade de cimento - betão com conteúdo de cimento superior resultará num valor de ressalto mais baixo que um betão da mesma resistência mas com conteúdo de cimento inferior. No entanto o erro na estimativa da resistência à compressão não excederá os 10% [23].
- Tipo de agregado - embora os agregados de densidades normais forneçam correlações similares entre a resistência e a dureza, não se deve assumir essa correlação a não ser que esteja disponível evidencia que suporte essa hipótese. Agregado de baixa densidade e agregados com propriedades especiais exigem uma calibração especial [23].
- Tipo de cura e idade do betão - a relação entre resistência e dureza varia em função do tempo. Diferentes curvas de calibração são necessárias para os respetivos tipos de regimes de cura, sendo o efeito da idade geralmente ignorado para betões com idades compreendidas entre os 3 dias e 3 meses [23].
- Compactação - os martelos esclerométricos não são apropriados para detetar variações da resistência causadas por diferentes graus de compactação. Se o betão não se encontrar completamente compactado o valor da estimativa da resistência não é fiável [23].

i. Tipo de superfície

- Apenas superfícies lisas devem ser testadas. Superfícies sujeitas a alisamento na altura da betonagem são geralmente mais duras que as obtidas por cofragem e podem fornecer resultados variáveis, sendo necessário nestes casos efetuar calibrações independentes [23].

ii. Tipo de betão

- Os ensaios de determinação do índice esclerométrico são próprios para betões de baixa porosidade, não sendo apropriados para betões de alta porosidade típicos de blocos de cimento ou betão alveolar [23].

iii. Humidade superficial

- Superfícies molhadas fornecem valores reduzidos de repercussão relativamente a uma superfície seca. Este efeito pode ser considerável, sendo usual uma redução de 20 % para betão estrutural e para os outros tipos de betão essa diferença pode ser maior [23].

iv. Carbonatação

- A carbonatação do betão tem como consequência o aumento da sua dureza superficial. O seu efeito não é considerado para betão com idade inferior a três meses [23].

A presença de carbonatação superficial pode resultar em números superiores de ressalto que não são indicativos do interior do betão. [22]. Desta forma, pode ser necessário fazer redução nos valores de ressalto.

É necessário calcular um coeficiente de tempo, Z_f , para a sua redução, e é obtido a partir da equação (2.23), em função dos resultados obtidos do ensaio efetuado na superfície carbonatada ($R_{m,Carb.}$) e dos resultados obtidos na mesma superfície após remoção do betão carbonatado ($R_{m,n,Carb.}$), ou pela leitura direta do gráfico da Figura 2.16, podendo-se obter reduções até 40% do índice esclerométrico para profundidade de carbonatação inferior e igual a 6 mm [24].

$$Z_f = \frac{R_{m,Carb.}}{R_{m,n,Carb.}} \quad (2.23)$$

Onde:

$R_{m,Carb.}$ – Valor médio do índice esclerométrico R, medido em betão carbonatado

$R_{m,n,Carb.}$ – Valor médio do índice esclerométrico R, medido em betão não carbonatado

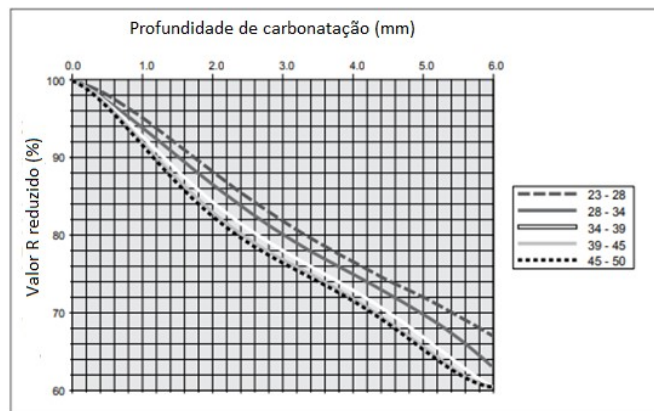


Figura 2.16 - Redução do valor de ressalto devido à carbonatação [24].

v. *Movimento do betão durante o ensaio*

- O impacto do martelo esclerométrico não deve provocar vibrações ou movimentos notórios do betão a ser testado. Consequentemente, elementos pequenos devem ser fixados de forma firme como por exemplo em máquinas de teste. Para alguns elementos a sua esbelteza e massa pode ser tal que este critério não é cumprido, sendo difícil estimar a sua resistência [23].

vi. *Posição e direção do ensaio*

- As direções usuais de realização do ensaio são horizontais ou verticais, ainda que outras direções de ensaio sejam possíveis. Usualmente são fornecidas com o equipamento expressões de correção dos resultados em função da direção em que o ensaio é realizado [23].

vii. *Outros fatores*

- Outros fatores conhecidos que influenciam os resultados são: a proximidade a descontinuidades, o estado de tensão do betão e temperatura do aparelho e do betão.
- Diferentes martelos esclerométricos de características semelhantes podem fornecer diferentes valores de repercussão, sendo que todos os testes devem ser efetuados com o mesmo aparelho. Se não for possível evitar o uso de diferentes aparelhos, torna-se necessário efetuar um número suficiente de ensaios por forma a determinar a magnitude da diferença esperada entre eles. O valor do número de resalto convertido em valor de resistência por correlação deve ser efetuado para cada aparelho utilizado no ensaio. [23].

ÁREA DE ENSAIO

A NP EN 12504-2:2012 [21] define que os elementos de betão para ensaio devem ter no mínimo 100 mm de espessura e estar fixados à estrutura. Podem ser ensaiados provetes pequenos desde que se garanta que estão fixos rigidamente, sendo estabelecido na norma [23] uma tensão de compressão entre 7 e 10 N/mm^2 com uso de uma prensa, se a energia de impacto do equipamento for de 2.20 N/m .

A NP EN 12504-2:2012 [21] especifica que a área de ensaio deve ter aproximadamente 300 mm x 300 mm devendo evitar-se áreas com buracos e com textura rugosa ou com elevada porosidade. As superfícies brandas, rugosas ou com argamassa solta devem ser desgastadas, usando uma pedra abrasiva, até que estas se apresentem lisas. Podem ser ensaiadas sem retificação superfícies lisas, moldadas ou de enchimento.

Não se deve proceder ao ensaio diretamente sobre armadura com recobrimento inferior a 20mm. Como não deve ser efetuado sobre superfícies com gelo [25].

PROCEDIMENTO

Para a operação do esclerómetro de acordo com a norma [21] deve-se efetuar uma preparação preliminar que inclui:

- Utilizar o esclerómetro em conformidade com as instruções do fabricante;
- O esclerómetro deve trabalhar a temperaturas dentro da gama de 0°C a 35 °C.

Para a sua operação *in situ* devem seguir-se os seguintes procedimentos:

1. Manter firme o esclerómetro numa posição que permita ao percutor embater perpendicularmente na superfície que está a ser ensaiada.

2. Após o impacto, registar o índice esclerométrico. Tendo em conta os fatores que influenciam os resultados está previsto usar no mínimo 9 leituras para obter um valor fiável da área de ensaio.

A norma portuguesa especifica que deve ser registada a posição e orientação do esclerómetro para cada conjunto de leituras.

Os pontos de impacto devem estar afastados de pelo menos 25mm e nenhum deles deve estar a menos de 25 mm do bordo. Sugere-se que seja desenhada uma grelha regular de linhas de 25 mm a 50 mm, assumindo as interseções das linhas como pontos de ensaio. Deve ser examinada cada impressão efetuada na superfície após o impacto, e se o impacto esmagar ou partir em vazios perto da superfície, deve eliminar-se o resultado.

O resultado deve ser tomado como a mediana de todas as leituras efetuadas, com ajustamento, para ter em conta a orientação do esclerómetro de acordo com as instruções do fabricante. Se mais de 20% das leituras diferirem da mediana em mais de 30%, todo o conjunto de leituras deve ser eliminado.

O coeficiente de variação das leituras individuais obtidas de um ensaio é usualmente na ordem dos 10%, mas pode ser mais baixo, na ordem dos 2%, ou alto, na ordem dos 15%, sendo que o coeficiente de variação diminui com o aumento da resistência do betão e aumenta com o aumento do tamanho e quantidade de agregado grosso [23].

No relatório [22] deve ser demonstrado que os valores standard de desvio padrão estão compreendidos entre 2.5 R e 3.75 R, para números de resalto a variar entre $20 R \leq R \leq 40 R$ e o coeficiente de variação no intervalo entre $10.2\% \leq C.V. \leq 11.9\%$.

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *IN SITU* POR CORRELAÇÃO

A NP EN 13791 [1] estabelece a metodologia para avaliar a resistência à compressão *in situ* utilizando uma curva de base e deslocando-a para um nível apropriado, determinado a partir do ensaio de carotes.

Para determinação da relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão *in situ* devem ser utilizados pelo menos nove pares de resultados de ensaios, resultados de carotes e de ensaio esclerométrico, para se obter o deslocamento a impor à curva base (ver Figura 2.17), a fim de estabelecer a relação entre índice esclerométrico e a resistência à compressão *in situ*.

Inscrever os pontos da resistência à compressão *in situ* das carotes (eixo y) versus ensaios indiretos (eixo x) sobre a, Figura 2.17, determinando para cada área de ensaio a diferença em resistências *in situ* entre o valor medido sobre a carote e o valor dado pela curva de base, obtido pela equação (2.24).

$$\delta_f = f_{is} - f_R \quad (2.24)$$

Onde:

δ_f – Diferença entre a resistência de cada carote e a resistência dada pela relação base;

f_R – Valor inicial da resistência *in situ*, obtido a partir da curva base do esclerómetro;

1. Calcular a média $\delta_{fm(n)}$, para os n pares de resultados e o desvio padrão da amostra s .
2. Calcular o deslocamento da curva base, Δf a partir da equação (2.25). em que k_1 é dado pela Tabela 2.7 em função do número de pares de resultados.

$$\Delta f = \delta_{fm(n)} - k_1 * s \tag{2.25}$$

Tabela 2.7 - Coeficiente k_1 Função do número de pares de resultados.

Numero de pares de resultados n	Coeficiente K1
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,5
≥ 15	1,48

3. Deslocar a curva de base do valor Δf a fim de obter $f_{is,R}$ e $f_{is,v}$ a relação entre o método de ensaio indireto e a resistência *in situ* para o betão considerado.

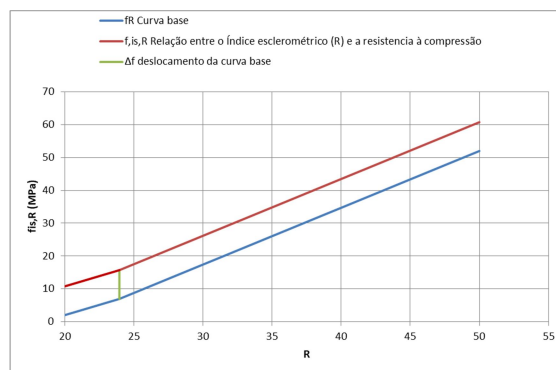


Figura 2.17 - Curva de base para o ensaio com o esclerómetro.

Para a o cálculo numérico, são aplicadas as funções das curvas de base, pelas equações:

$$f_R = 1.25 * R - 23; 20 \leq R \leq 24 \tag{2.26}$$

$$f_R = 1.73 * R - 34.5; 24 \leq R \leq 50 \tag{2.27}$$

Onde:

f_R – Valor inicial da resistência *in situ*, obtida a partir da curva de base do esclerómetro;

R – Índice esclerométrico utilizado na determinação do valor do deslocamento da curva base;

$f_{is,R}$ – Resultado do ensaio da resistência à compressão *in situ*, estimada com base em ensaios com esclerómetro calibrado com ensaio de carotes;

A avaliação da resistência à compressão *in situ* característica, baseada nas curvas de relação entre método indireto e direto, é obtida pela aplicação das seguintes condições e procedimentos:

Para a avaliação da resistência *in situ* característica aplicam-se as seguintes condições;

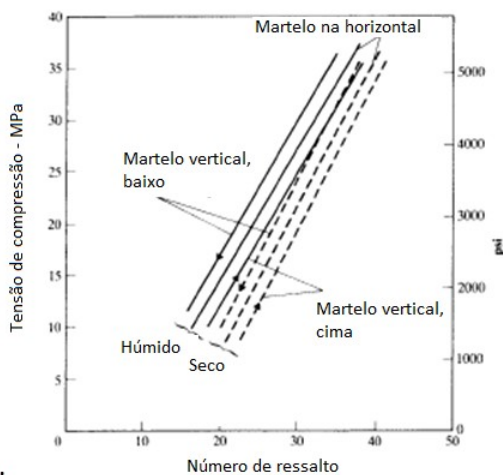
- A avaliação para cada zona de ensaio deve ser baseada em pelo menos 15 áreas de ensaio
- O desvio padrão toma o maior valor do cálculo a partir dos resultados de ensaio ou a 3.0 N/mm^2 .

O valor da resistência à compressão *in situ* característica é igual ao mínimo da equação:

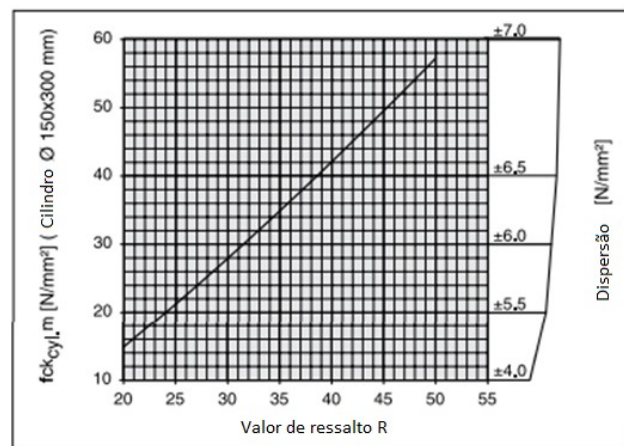
$$f_{ck,is} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{m(n),is,F \text{ ou } R \text{ ou } v} - 1.48 * s \\ f_{is,menor,F \text{ ou } R \text{ ou } v} + 4 \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Após ter calculado a resistência característica, a resistência equivalente da NP EN 206:2013+A1-2017 pode ser obtida na Tabela 2.6.

No entanto os fabricantes do equipamento Proceq Concrete Test Hammer DIGI-SHMIDT 2000 Modell ND / LD [24], assim como outros autores A.M. Neville & J.J. Brook [17], fornecem correlações generalizadas (ver Figura 2.18) entre o índice R e a resistência, conforme a posição do martelo, a humidade da superfície, entre outras condicionantes.



a) Correlação obtida em [17].



b) Aparelho do tipo ND/LD [24].

Figura 2.18 - Correlação entre a resistência à compressão e o índice R .

De ter em conta que é possível que duas misturas de betão diferentes possuam a mesma tensão de compressão mas diferentes valores de dureza. Por sua vez, é possível que em dois betões com diferentes tensões apresentem resultados do número de ressalto iguais se a dureza superficial do betão de baixa tensão for superior à dureza do betão de maior tensão à compressão [22].

2.4.4 Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons

O método da determinação da velocidade de propagação dos ultrassons permite determinar e avaliar a uniformidade do betão, presença de vazios ou fendas, variação das propriedades com o tempo, módulo de elasticidade dinâmico e estático, e sua resistência à compressão.

Tem como principal vantagem ser um ensaio totalmente não destrutivo, de rápida utilização, que reflete as propriedades interiores dos elemento de betão e com possível aplicação em laboratório e *in situ* [19].

O princípio fundamental na base do ensaio é a produção de impulsos longitudinais por um transdutor eletroacústico emissor, em contacto com a superfície do betão a ensaiar. Depois de atravessar um percurso de comprimento conhecido no betão, esse impulso de vibrações é convertido em sinal elétrico por um segundo transdutor recetor, sendo então medido com um relógio eletrónico o tempo de percurso do impulso vibratório [26].

As velocidades das ondas estão dependentes das propriedades do meio que percorre. Conhecendo-se a massa e a velocidade da propagação da onda é possível avaliar as propriedades elásticas do meio. [3]

De acordo com a ASTM C 597:02 [27], a velocidade de propagação das ondas longitudinais ultrassónicas é relacionada com as propriedades elásticas e densidade do betão endurecido pela relação:

$$V = \sqrt{\frac{E_d * (1 - \nu)}{\rho * (1 + \nu) * (1 - 2 * \nu)}} \quad (2.29)$$

Onde:

V – Velocidade dos ultrassons;

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico;

ν – Coeficiente de Poisson dinâmico;

ρ – Densidade;

A frequência e o comprimento de onda estão relacionados com a velocidade de propagação através da seguinte expressão:

$$V = f * \lambda \quad (2.30)$$

Onde:

f – Frequência da onda;

λ – Comprimento de onda;

Num dado meio, um aumento na frequência de onda, origina uma diminuição no comprimento de onda e vice-versa. Quando uma onda de impulso percorre a interface de um meio com materiais de propriedades distintas, uma porção da energia da onda é desviada do percurso original, sendo esse desvio intenso, se o comprimento de onda é do mesmo tamanho ou menor que o elemento que provocou esse desvio.

EQUIPAMENTO PARA DETERMINAR O TEMPO DE CHEGADA DO IMPULSO

De acordo com a NP EN 1250-4:2007 [28] a aparelhagem tem que ser constituída por um gerador de impulsos elétricos, um par de transdutores, um amplificador e um dispositivo eletrónico de medição de tempo. O equipamento assim constituído deverá permitir medir a duração entre a frente do impulso gerado pelo transdutor-transmissor e a sua chegada ao transdutor recetor. Para ter uma referência para a medição da velocidade é fornecida uma barra de calibração.

PROCEDIMENTO

- Ajuste do tempo de referência do equipamento

Antes de iniciar o ensaio deve ser efetuado o ajuste do tempo de atraso do equipamento. Deve ser efetuado enquanto os transdutores estão acoplados, com o mínimo possível de produto de ligação, e firmemente fixadas as extremidades da barra de referência, como demonstrado na Figura 2.19 [26].



Figura 2.19 - Calibração do aparelho com a barra de referência.

- Escolha do transdutor

Os transdutores de uso comum são de frequência natural igual a 54 Hz, com uma superfície plana, com 50 mm de diâmetro. Geralmente transdutores de baixa frequência (20 Hz) são utilizados em betão

maciço e os de alta frequência (> 100 Hz) em elementos de baixa espessura, onde é necessária uma elevada precisão na medição do tempo de percurso [29].

- Posicionamento dos transdutores

Para transmitir ou receber os impulsos, os transdutores devem ter um contacto em toda a sua superfície com o elemento a ensaiar. De forma a evitar a introdução de bolhas de ar entre transdutor e elemento a ensaiar, a superfície do betão deve ter um acabamento suficientemente liso, possível através da introdução de um produto de ligação como vaselina, massa lubrificante, sabão líquido ou pasta de calino/glicerol.

Se a superfície do betão é muito rugosa ou irregular, deverá ser retificada mecanicamente ou utilizada resina epóxi de presa rápida [28].

É importante que só uma fina camada do produto de ligação separe a superfície de betão da superfície do transdutor, por essa razão devem ser efetuadas várias leituras do tempo de propagação, até se obter o mínimo valor, para permitir o espalhamento e diminuição da espessura do produto de ligação. [26]

Existem três modos de transmissão possíveis para a determinação da velocidade de propagação, de acordo com posicionamento dos transdutores, como representado na Figura 2.20.

- Transmissão direta, colocando os transdutores em faces opostas;
- Transmissão semidirecta, colocando os transdutores em face adjacentes, ou em faces opostas mas não diretamente opostas um à outra;
- Transmissão indireta, colocando os transdutores na mesma face;

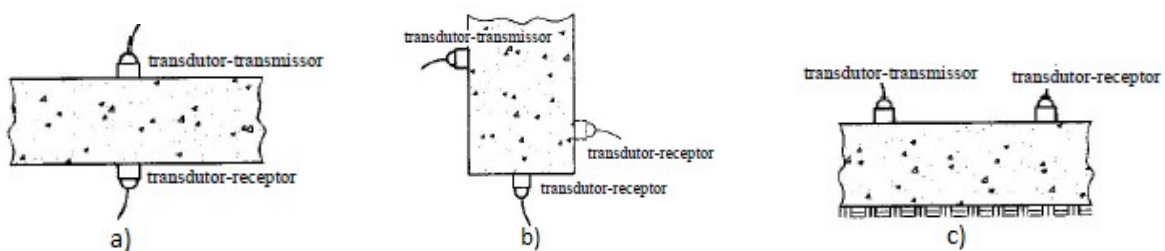


Figura 2.20 - Posicionamento dos transdutores.

- Transmissão direta.

Como o valor máximo da energia do impulso transmitida é obtido a um ângulo de 90° à face dos emissores, este método deve ser utilizado, sempre que possível, para avaliação da qualidade do betão, sendo o método de maior fiabilidade para medição do tempo de percurso do impulso, em que o percurso se encontra bem definido e pode ser medido [3].

A velocidade de propagação dos ultrassons é calculada pela aplicação da equação (2.31):

$$V = \frac{L}{T} \tag{2.31}$$

Onde:

V – Velocidade de propagação dos ultrassons;

L – Comprimento de percurso;

T – Tempo que os ultrassons levam a atravessar o comprimento de percurso;

b) Transmissão semidirecta.

É possível obter resultados satisfatórios se o ângulo e a distância entre os transdutores não for muito elevado; se estes requisitos não forem cumpridos é possível a receção de sinal fraco devido a atenuação do sinal [3].

O percurso é a distância entre os centros das faces dos transdutores, a exatidão do percurso depende da dimensão dos transdutores relativamente à distância entre centros [28].

A velocidade é calculada pela aplicação da equação (2.31) [28].

c) Transmissão indirecta.

É o método menos sensível devido a redução de amplitude do sinal em 2% a 3% no transdutor recetor, a velocidade é invariavelmente menor, variando entre os 5% a 20%, comparativamente ao método direto [26].

O percurso não é medido, mas faz-se uma série de medições com os transdutores a diferentes distância para minimizar a incerteza quanto ao exato comprimento do percurso da transmissão devido à dimensão significativa das áreas de contacto entre transdutores e o betão [28].

O transdutor-transmissor deve ficar em contacto com o betão num ponto fixo x e o transdutor-recetor deve ser colocado em pontos ao longo duma linha traçada na superfície do betão, distantes do ponto fixo de sucessivos incrementos $x_{n,i}$, e medidos os respetivos tempos de transmissão, com um mínimo de quatro medições. Deverá ser traçado um gráfico mostrando a relação entre os tempos de transmissão t e as distâncias x entre transdutores, como exemplificado na Figura 2.21 [28].

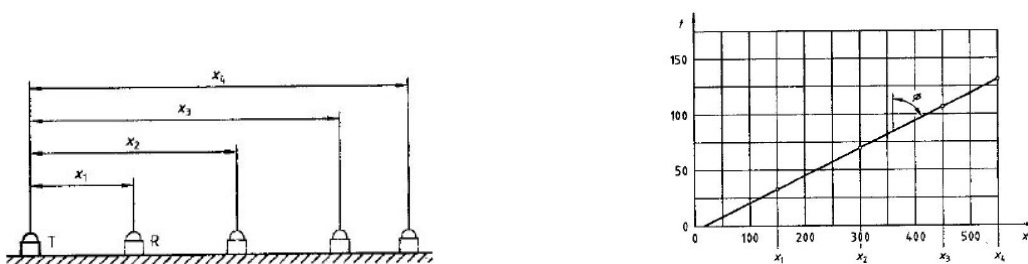


Figura 2.21 - Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons na transmissão indirecta [28].

Deve determinar-se a inclinação da reta de regressão dos pontos de x, t ($\tan \theta$) e tomá-la como a velocidade média de propagação dos ultrassons sobre a linha definida na superfície do betão. Sendo que a velocidade corresponde ao inverso do declive da reta, demonstrada pela equação (2.32). Se os pontos medidos indicarem uma descontinuidade, como representada nas Figura 2.29 e Figura 2.30, tal será provavelmente devido a uma fissura na superfície ou a uma camada superficial de qualidade inferior e nestas condições a medida da velocidade não é fiável [28].

$$V = \frac{1}{m} \quad (2.32)$$

Onde:

m – Declive da reta.

FATORES QUE INFLUENCIAM A MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DOS ULTRASSONS

Para que a medição do tempo de propagação sejam reprodutível e dependa apenas das propriedades do betão a ensaiar, é essencial examinar as condições de ensaio que possam transmitir tempos de propagação não respetivos das propriedades físico-químicas do betão a ensaiar.

- Teor de humidade

A velocidade de propagação dos ultrassons para betão saturado é superior à do betão seco. É de esperar um aumento de 4 a 5 % na velocidade em betão saturado relativamente ao mesmo betão seco [3].

- Propriedades do betão

Mantendo a composição do betão e com o aumento da razão A/C, a resistência à compressão e á flexão assim como a velocidade de propagação diminuem. Por outro lado a velocidade de propagação dos ultrassons (V.P.U.) aumenta com a idade do betão, estabilizando mais rapidamente que a sua resistência [3].

A velocidade é afetada pela densidade e quantidade dos agregados. Em geral, a velocidade de propagação dos ultrassons na pasta de cimento, é inferior à do agregado.

- Temperatura do betão

Variações da temperatura entre os 10°C e 30°C não introduzem alterações significativas. Para temperaturas fora desta gama torna-se necessário corrigir as medições da velocidade, sendo sugeridos os valores presentes na Tabela 2.8. Os valores são baseados em ensaios efetuados em betão normal de cimento Portland, cura ao ar e cura em água [30].

Tabela 2.8 - Correções na V.P.U. devido à temperatura [26].

Temperatura (°C)	Correção da velocidade obtida devido a temperatura (%)	
	Cura - ar	Cura - imersão
60	5	4
40	2	1.7
30	0	0
10	0	0
0	-0.5	-1
-4	-1.5	-7.5

- Comprimento do percurso

A NP EN 12504-4 recomenda um percurso mínimo de 100 mm quando a máxima dimensão do agregado do betão for menor ou igual a 20 mm e 150 mm quando esta dimensão estiver entre os 20 mm e 40 mm.

- Forma e dimensão do provete

A equação (2.29) é válida para meios com uma extensão infinita, sendo satisfeita para provetes com uma dimensão lateral superior ao comprimento de onda do impulso. Se a dimensão lateral for inferior então a relação proposta na equação (2.29) deixa de ser exata, sendo aconselhado pela norma NP EN 12504-4 respeitar as dimensões apresentadas na Tabela 2.9 em função da frequência de transdutores.

Tabela 2.9 - Incidência das dimensões do provete sobre a transmissão dos impulsos ultrassónicos [28].

Frequência do transdutor kHz	Velocidade de propagação dos ultra-sons no betão (km/s)		
	$V_c = 3,50$	$V_c = 4,00$	$V_c = 4,50$
	Dimensão lateral mínima recomendada do provete (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

- Influência das armaduras

A velocidade de propagação no aço é 1.2 até 1.9 vezes superior comparativamente ao betão. Em certas condições o primeiro impulso a chegar ao transdutor viaja parcialmente entre o betão e a armadura. O aumento da velocidade depende da proximidade da armadura, diâmetro e número de varões, bem como sua orientação em relação ao percurso de propagação [30].

Se a armadura se encontra no percurso de propagação deve ser utilizada fatores corretivos, disponíveis na norma Britânica BS 1881 Part 203 [26].

CORREÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS DEVIDO À INFLUÊNCIA DA ARMADURA

- Eixo do varão paralelo à direção do percurso da onda [26].

A correção da V.P.U. depende do diâmetro do varão, da velocidade de propagação no betão envolvente e das distâncias entre transdutores e armadura, como representado na Figura 2.22 onde:

a - Distância vertical do bordo da armadura até ao bordo do transdutor mais próximo do varão;

l - Distância horizontal entre transdutores;

b - Distância do bordo da armadura à superfície do betão;

L_s - Comprimento do varão;

Os valores obtidos da velocidade corrigida não representam o betão durante a linha formada entre os centros dos transdutores, mas do betão na vizinhança dos transdutores e da armadura.

É de considerar a influência da armadura na velocidade de propagação, no betão de alta qualidade quando o valor de, $a/l \leq 0.25$ e para betão de baixa qualidade com valor de, $a/l \leq 0.15$, podendo ser inferior para diâmetros inferiores ou igual a 12 mm. Podendo ser ignorado para diâmetros de 6 mm e inferiores.

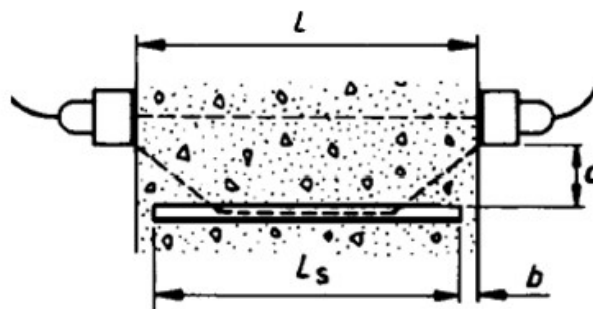


Figura 2.22 - Secção transversão com armadura lateral [26].

A velocidade de propagação corrigida é obtida aplicando a equação:

$$V_c = K * V_m \tag{2.33}$$

Onde:

V_m – é a velocidade de propagação de ultra sons obtida;

K – Fator corretivo;

O fator corretivo K para valores de $a > 2 * b$ pode ser obtido aplicando a seguinte equação:

$$k = \gamma + 2 * \left(\frac{a}{L}\right) * \sqrt{1 - \gamma^2} \quad (2.34)$$

Para valores $a \leq 2 * b$ onde é mais provável as ondas percorrerem o comprimento total do varão de armadura é obtido aplicando a seguinte equação:

$$k = \gamma + 2 * \left(\frac{\sqrt{a^2 - b^2} - b * \gamma}{L}\right) \quad (2.35)$$

Para valores de $a = 0$ em que o varão se encontra diretamente alinhado com os transdutores, o valor de K é fornecido aplicando a seguinte equação;

$$k = 1 - \left(\frac{L_s}{L}\right) * (1 - \gamma) \quad (2.36)$$

O valor de γ pode ser obtido aplicando a equação (2.37) ou pela consulta do gráfico na Figura 2.23 em função da velocidade no betão V_c , obtido da equação (2.33), e diâmetros para transdutores de frequência natural 54 Hz.

$$\gamma = \frac{V_c}{V_s} \quad (2.37)$$

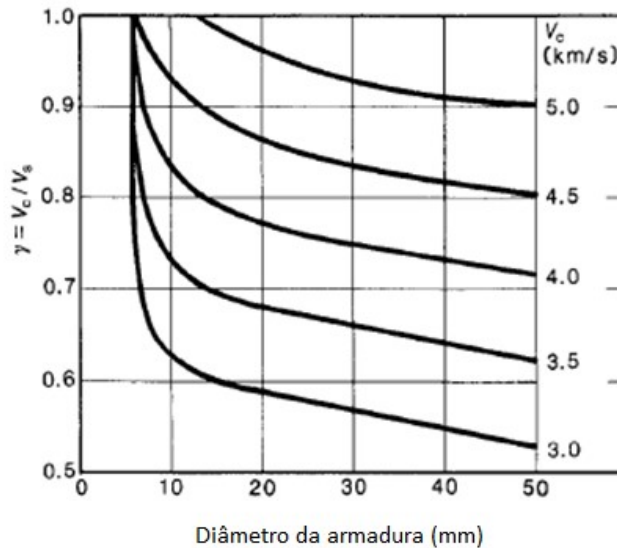


Figura 2.23 - Razão entre diâmetro do varão e V.P.U. paralela ao percurso [26].

A norma inglesa BS 1881:203 acrescenta que a estimativa de V_c é obtida com uma exatidão de $\pm 3\%$, desde que exista um contacto uniforme entre armadura e betão e não exista fissuras na zona de ensaio.

- Eixo do varão perpendicular à direção do percurso da onda [26].

Em teoria a máxima influência da presença de armadura pode ser calculada assumindo que a onda de ultrassons irá atravessar o diâmetro D de cada varão durante a sua passagem, como representada na Figura 2.24.

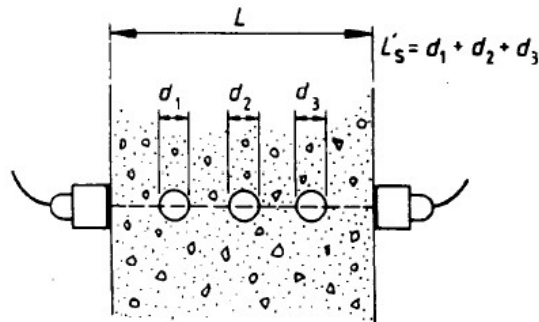


Figura 2.24 - Seção transversal com armadura perpendicular ao percurso [26].

Com a utilização de transdutores de frequência natural 54 Hz, os varões na direção transversal ao percurso de propagação com diâmetro inferior a 20mm podem ser ignorados. Uma estimativa da influência média pode ser obtida para varões bem unidos de diâmetros entre 20mm e 50mm considerando-as equivalente ao percurso de varões longitudinais, L_s .

Para o cálculo da velocidade corrigida, em varões posicionados diretamente no percurso entre transdutores, utiliza-se a equação (2.36) em conjunto com o gráfico representado na Figura 2.25, para obtenção do valor de γ .

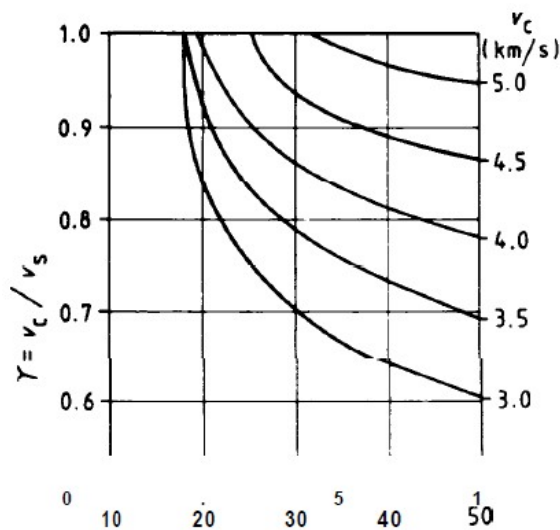


Figura 2.25 - Relação da razão entre diâmetro do varão e velocidade de propagação [26].

A influência do varão de aço transversal será reduzida devido às deficiências de ligação, e será difícil avaliar com exatidão se os varões se encontram diretamente no percurso entre transdutores.

APLICAÇÕES DO MÉTODO DE ENSAIO

Devido à vasta gama de aplicações do método é impossível mencionar todas. As principais aplicações são descritas posteriormente; o método de ensaio pode ser aplicado em laboratório e *in situ* com sucesso equiparáveis.

- Determinação das alterações nas propriedades no betão.

As alterações das propriedades do betão, que ocorrem com o tempo, causadas pelo processo de hidratação, condições ambientais ou carga excessiva, podem ser avaliadas por leituras repetidas da velocidade de propagação de ultrassons em diferentes alturas no tempo, com os mesmos transdutores e mesma localização. A medição das alterações na velocidade é usualmente indicativo de alteração na resistência, e tem a vantagem de poder ser efetuada em períodos progressivos de tempo no mesmo elemento a ensaiar durante a investigação [26].

- Determinação da uniformidade e qualidade do betão

A heterogeneidade do betão causará variações na velocidade do impulso que, por sua vez, pode estar relacionado com a variação da qualidade.

É de ter em conta que nos casos onde o comprimento de percurso é idêntico durante o ensaio, o tempo obtido pode ser utilizado para avaliar a uniformidade do betão [26].

Para avaliar a qualidade relativa do betão foi proposto pelo autor Whitehurst, para betão com densidade aproximada 2400 kg/m^3 , os seguintes valores de V.P.U. resumidos na Tabela 2.10 [11].

Tabela 2.10 - Classificação da qualidade do betão com base na V.P.U [11].

Velocidade de propagação longitudinal (Km/s)	Qualidade do betão
> 4500	Excelente
3500 - 4500	Bom
3000 - 3500	Duvidoso
2000 - 3000	Pobre
< 2000	Muito pobre

É possível expressar a uniformidade das leituras efetuadas em forma de parâmetros estatísticos como desvio padrão ou coeficiente de variação. No entanto tais parâmetros só podem ser devidamente utilizados para comparar variações em unidades de betão de dimensões similares [26].

O autor Tomsett [3] sugere que, para um elemento construído do mesmo lote de betão, o valor de coeficiente de variação igual a 1.5% representa boas práticas de construção, elevando para 2.5% se envolver betonagem em várias cargas ou elementos de pequenas dimensões e valor médio de 6-9% para betão de resistência similar para toda a estrutura [3].

- Detecção de defeitos

Para a identificação de cavidades ou vazios pelo método direto, efetuam-se as medições nos pontos de interceção duma grelha quadriculada sobre a estrutura de betão, detetando-se a sua presença ao medir os tempos de percurso entre transdutores colocados de tal maneira que o defeito se encontre sobre o trajeto que os separa. É possível estimar a sua dimensão quando o betão que a envolve é uniforme, supondo que os impulsos tomam o caminho mais curto entre transdutores em redor do defeito [28].

De acordo com R. and I. F. Jones [30] é possível a identificação de vazios e cavidades quando ocorre a mínima alteração no tempo de propagação, que surge para um vazio de área projetada igual à dos transdutores e se encontra no ponto médio entre os mesmos, obtido pelas equações (2.38) e (2.39).

$$T_d = T_h \text{ Para } a \leq d \quad (2.38)$$

$$\frac{T_d}{T_h} = \sqrt{1 + \frac{(a-d)^2}{L^2}} \text{ para } a > d \quad (2.39)$$

Onde:

a – Dimensão transversal mínima da área projetada do defeito;

d – Diâmetro do transdutor;

T_d – Tempo de propagação pelo centro do defeito;

T_h - Tempo de propagação em betão homogéneo;

- Estimar profundidade de fissuras superficiais.

Método R.Jones-Facaoaru [30] e J.H.Bungey [3], s.g.Millard, M.G. Grantham [5].

A estimativa da profundidade de fissuração pode ser obtida através de transmissão indireta. Para estimar a profundidade de uma fenda visível e perpendicular à superfície do betão, os autores R.Jones-Facaoaru e J.H.Bungey, s.g.Millard, M.G. Grantham, estimam-na, pela comparação do tempo de propagação através da fenda e do tempo de propagação através da periferia do betão homogéneo, com transdutores afastados entre si a uma distância equidistante. Se a fenda se encontra espaçada a meia distância entre os transdutores, como representada na Figura 2.26, a profundidade da fissura (h) pode ser obtida pela equação (2.40).

$$h = x * \sqrt{\left(\frac{T_1^2}{T_2^2} - 1\right)} \Leftrightarrow h = \frac{x}{T_2} * \sqrt{(T_1^2 - T_2^2)} \quad (2.40)$$

Onde:

T_1^2 – Tempo de propagação com fenda;

T_2^2 – Tempo de propagação pela superfície de betão do mesmo tipo sem defeitos;

h - Profundidade da fenda;

x – Distância entre o ponto mais próximo da zona ativa do transdutor e a fenda;

Em que:

$$T_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{x^2 + h^2}}{v};$$

$$T_2 = \frac{2x}{v};$$

Comprimento de percurso a volta da fenda:

$$2 \cdot \sqrt{x^2 + h^2};$$

Comprimento de percurso sem fenda:

$$2 \cdot x;$$

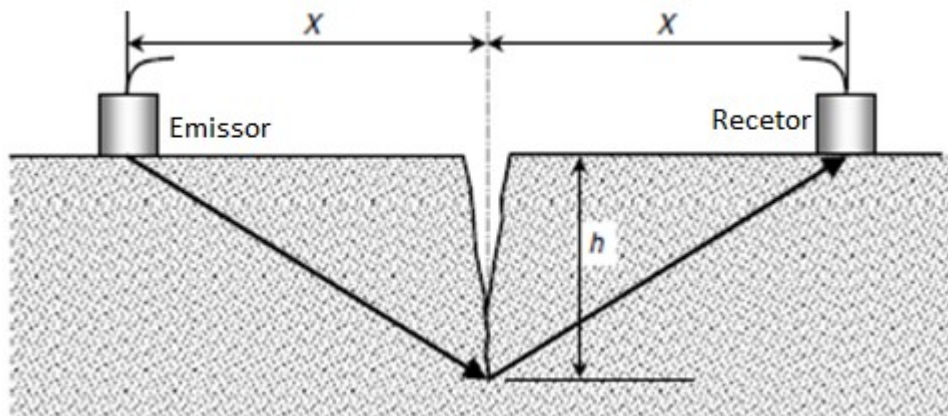


Figura 2.26 - Medição de profundidade de fissura. [5]

Método BS 1881:203 (Alternativa 1)

De acordo com o especificado na BS 1881 Part 203 [26], o procedimento de medição é idêntico ao anterior, mas para dois ou mais posicionamentos dos transdutores, colocados a uma distância equidistante da fenda com espaçamento entre posições duas vezes da distância inicial, como representado na Figura 2.27, com estimativa da profundidade da fenda, obtida da aplicação da equação (2.41) com distâncias múltiplos de 2 da distância inicial, baseada na premissa que o plano da fenda é perpendicular à superfície e que o betão na periferia é de qualidade e uniforme.

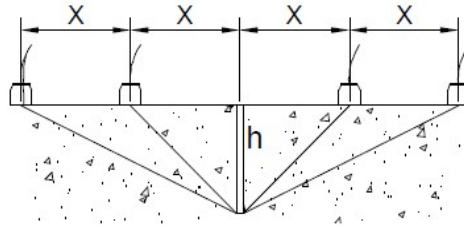


Figura 2.27 - Disposição dos transdutores pelo método descrito na [26].

$$h = x * \sqrt{\frac{4 * T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (2.41)$$

Onde:

x – Distância inicial, com transdutores colocados a uma distância equidistante da fenda;

T_1 – Tempo de propagação obtido na leitura inicial;

T_2 - Tempo de propagação obtido na segunda leitura, com transdutor colocados a uma distância do dobro da inicial;

Em que:

$$x_1 = x$$

$$x_2 = 2 * x$$

$$L_1^2 = x^2 + h^2$$

$$L_2^2 = (2 * x)^2 + h^2$$

$$T_1 = \frac{2 * L_1}{V}$$

$$T_2 = \frac{2 * L_2}{V}$$

A norma BS 1881:203 especifica os valores convenientes para " x_1 " igual a 150 mm e " x_2 " igual a 300 mm, onde se esses valores forem utilizados, a profundidade h pode ser determinada pela aplicação direta da equação (2.42).

$$h = 150 * \sqrt{\left(\frac{4 * T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}\right)} \quad (2.42)$$

Pode ser efetuada a verificação para avaliar se a fenda se encontra no plano perpendicular à superfície, colocando os transdutores próximos da fenda como demonstrado na Figura 2.28, afastando cada um da

fenda. Se ocorrer uma diminuição no tempo de propagação, quando um transdutor é afastado, indica que a inclinação da fenda é no sentido do transdutor.

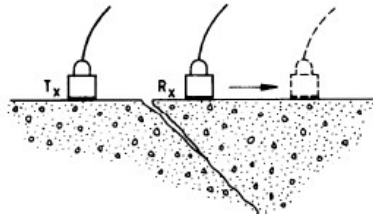


Figura 2.28 - Avaliação de fenda oblíqua [26].

Método BS 1881:203 (Alternativa 2)

Em alternativa ao método descrito, a norma BS 1881:203 descreve uma metodologia gráfica para a determinação de fenda visível da superfície. O transdutor emissor é colocado a uma distância $2.5 * y$ do centro da fenda, e são efetuadas três leituras dos tempos de propagação com o transdutor recetor nas distâncias de y , $2 * y$ e $3 * y$ da fenda, como representado na Figura 2.29. Os tempos de propagação serão representados graficamente em função da distância como na Figura 2.29 em que y é 150 mm . Se a projeção da reta nos pontos (y, T_1) e $(2 * y, T_2)$, passar em zero não existem fendas escondidas. A profundidade da fenda pode ser estimada pela equação (2.43).

$$h = \frac{y}{2} \sqrt{\left[\left(\frac{3 * T_2^2 + 2 * T_3^2}{T_2 * T_3} \right)^2 - 25 \right]} \quad (2.43)$$

Onde:

T_2 – Tempo de propagação para o transdutor recetor na posição $2 * y$;

T_3 – Tempo de propagação para o transdutor recetor na posição $3 * y$;

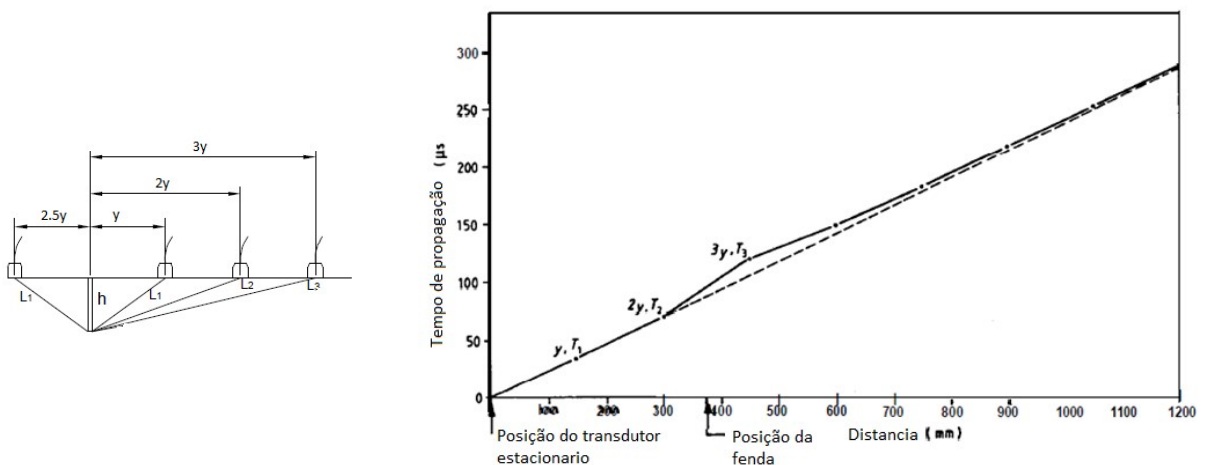
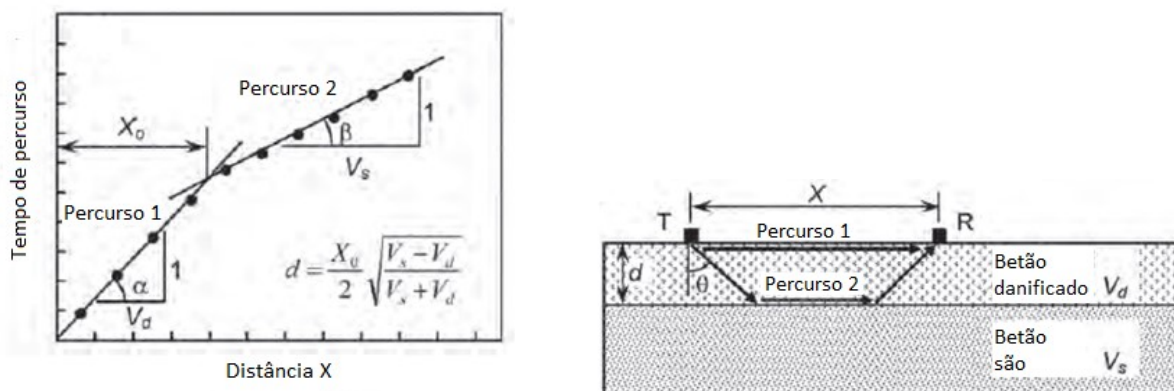


Figura 2.29 - Disposição dos transdutores e respetiva representação gráfica para determinação da profundidade da fenda [26].

- Estimar a espessura da camada de betão de qualidade inferior.

O transdutor emissor é colocado em posição fixa e o recetor deslocado com incrementos fixos ao longo da superfície. Quando os transdutores estão próximos um do outro os ultrassons propagam-se através da camada danificada e o declive da linha experimental, que relaciona a distância de separação entre transdutores (abcissa) e tempo de propagação (ordenada), fornece a velocidade de propagação na superfície da camada. Para além de uma certa distância de separação, o primeiro impulso a chegar é refratado ao longo da superfície da camada inferior não danificada ou de propriedades diferentes, e subsequentemente os pontos experimentais obtidos estendem-se numa linha em que o declive fornece a velocidade de propagação da camada de betão são, como representada na Figura 2.30 a) b).



a) Representação gráfica do tempo de propagação

b) Percurso de onda na superfície de betão danificada

Figura 2.30 - Estimar a espessura da camada de betão de qualidade inferior [29].

A espessura da camada danificada pode ser estimada através da equação (2.44), sabendo que a distância x_0 representa a mudança em conjunto de declive e de velocidade entre camada danificada e não danificada, como representado na Figura 2.30.

$$t = \frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_d + V_s}} \tag{2.44}$$

Onde:

V_d – Velocidade de propagação na camada danificada;

V_s – Velocidades de propagação na camada inferior de betão são;

x_0 – Distância do transdutor emissor para qual o declive altera;

O método é aplicável para superfícies extensas em que o betão inferior forma uma camada distinta, de espessura uniforme, quando a velocidade V_d é consideravelmente inferior a V_s [26].

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

As propriedades físicas dos materiais que influenciam a velocidade de ultrassons (V) são: o módulo de elasticidade dinâmico (E_d), a massa volúmica (ρ) e o coeficiente de poisson dinâmico (ν) relacionados pela equação (2.45). No betão estas propriedades estão relacionadas com o tipo de agregado, propriedades da pasta de cimento e maturidade do betão.

$$E_d = V^2 * \rho * \frac{(1 + \nu) * (1 - 2 * \nu)}{(1 - \nu)} \quad (2.45)$$

A equação anterior é aplicável quando os valores de ρ e ν são conhecidos, sendo os valores de coeficiente de poisson dinâmico obtidos através da determinação do valor da frequência de ressonância.

A norma inglesa BS 1881 203, apresenta os valores para determinação do coeficiente de poisson dinâmico na Tabela 2.11, em função do rácio de poisson, calculado pela expressão (2.46).

$$\left(\frac{V}{2 * n * L}\right)^2 = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) * (1 - 2 * \nu)} \quad (2.46)$$

Onde:

L – Comprimento do elemento a ensaiar;

n – Frequência de ressonância do elemento;

Tabela 2.11 - Valores do coeficiente de poisson dinâmico [26].

$\frac{nL}{\nu}$	ν
0.257	0.45
0.342	0.40
0.395	0.35
0.431	0.30
0.456	0.25
0.474	0.20
0.487	0.15
0.494	0.10
0.499	0.05

Não sendo possível proceder ao ensaio de ressonância, a norma [26] fornece o uso de relações empíricas para estimar os valores dos módulos de elasticidade estático e dinâmico através dos valores obtidos da velocidade de propagação dos ultrassons fornecidos na Tabela 2.12 com tipo de

desenvolvimento representado na Figura 2.31. A estimativa obtida para o módulo de elasticidade da seguinte tabela tem uma precisão de ± 10%.

Tabela 2.12 - Relação V.P.U. e os módulos de elasticidade dinâmico e estático [26].

Velocidade de Ultrassons (Km/s)	Modulo de elasticidade Dinâmico (MN/m ²)	Modulo de elasticidade Estático (MN/m ²)
3.6	24000	13000
3.8	26000	15000
4	29000	18000
4.2	32000	22000
4.4	36000	27000
4.6	42000	34000
4.8	49000	43000
5	58000	52000

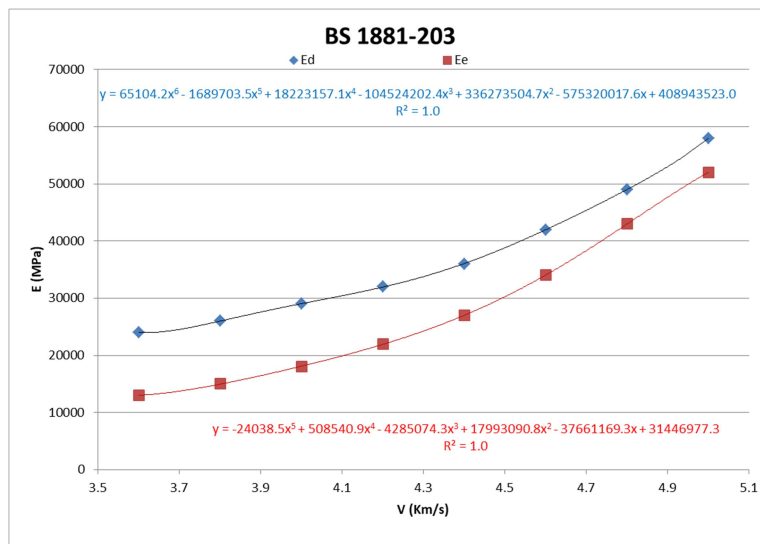


Figura 2.31 - Módulo de elasticidade dinâmico e estático em função da V.P.U. (Adaptado[26]).

De acordo com a norma BS-8110-2:1985 [31], é possível estimar o valor do módulo de elasticidade estático para betão de agregado natural, em função do módulo de elasticidade dinâmico, aplicando a equação (2.47), sendo inapropriada a sua aplicação em betão com agregados leves ou uma quantidade de cimento superior a 500 kg/m³ [17].

$$E_c = 1.25 * E_d - 19 \text{ (GPa)} \tag{2.47}$$

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *IN SITU* POR CORRELAÇÃO

As correlações entre a velocidade de propagação do som e a resistência do betão são fisicamente indiretas e devem ser estabelecidas para cada betão, não sendo fiável a estimativa da resistência com

base unicamente na velocidade de propagação do som para um betão desconhecido [28]. Estando a resistência à compressão relacionada com os seguintes elementos da composição do betão: razão água/cimento, com o tipo de agregado e as proporções de agregado e da pasta

A norma NP EN 12504-4 especifica, para correlações usando provetes moldados, que é essencial utilizar apenas um método de variação da resistência para uma dada correlação. Para a monitorização do desenvolvimento da resistência, a correlação apropriada é a que se obtém variando a idade do betão, quando se tem por finalidade o controlo de qualidade, é preferível variar a razão água/cimento.

Devido a impossibilidade de variar deliberadamente a resistência do betão para desenvolver correlações usando carotes, recorre-se a ensaios da velocidade de ultrassons para localizar áreas de diferentes qualidades, extraíndo carotes destas áreas que fornecerão uma variada gama de resistências.

De acordo com o mencionado no relatório ACI 228.1R-03 [22] é sugerido o seguinte procedimento;

- Selecionar áreas na estrutura que representem diferentes velocidades de propagação.
- Para cada medição, os transdutores devem ser removidos da superfície e recolocados para evitar erros sistemáticos devido ao pobre contacto.
- De seguida são obtidos dois carotes do mesmo local para efetuar o ensaio de resistência à compressão.

As medições de ultrassons efetuadas nos carotes após remoção não são representativas da velocidade na estrutura.

O método da determinação e avaliação da resistência característica à compressão *in situ* segue os mesmos procedimentos referenciados no capítulo 2.4.3, em avaliar a resistência à compressão *in situ* utilizando uma curva de base e deslocando-a Δf no gráfico da Figura 2.32 para um nível apropriado, determinado pelo ensaio à compressão de carotes.

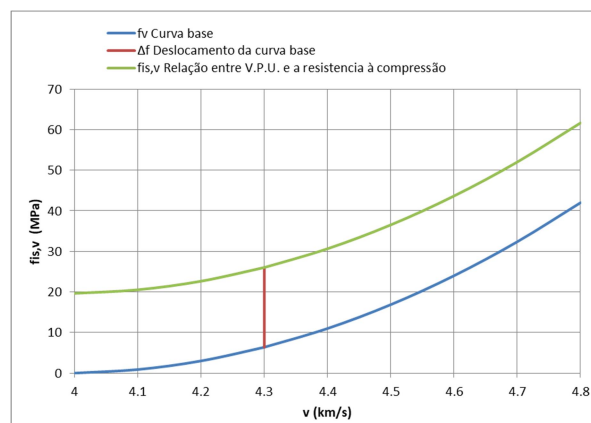


Figura 2.32 - Curva de base para o ensaio da V.P.U. pelo método de transmissão direto.

A resistência à compressão *in situ* é estimada em função da V.P.U. compreendidas no intervalo $4.0\text{km/s} \leq v \leq 4.8 \text{ km/s}$, somando o valor do deslocamento obtido aos da equação (2.48).

$$f_v = 62.5 * v^2 - 497.5 * v + 990; 4.0\text{km/s} \leq v \leq 4.8 \text{ km/s} \quad (2.48)$$

Onde:

f_v - Valor inicial da resistência *in situ*, obtida a partir da curva de base da velocidade de propagação do som;

v - Velocidade de propagação dos ultrassons. Utilizado na determinação do valor do deslocamento da curva base;

$f_{is,v}$ - Resultado do ensaio da resistência à compressão *in situ* estimada com base em ensaios ultrassônicos calibrados com ensaios de carotes;

A correlação representada na Figura 2.33 foi efetuada com dados obtidos de estudos efetuados por vários autores, em laboratório, de betões com composições diferentes, obtendo-se a curva de correlação da equação (2.49), onde foram utilizados carotes com dimensões 100*200 mm, extraídos de elementos estruturais como pilares ou paredes de contenção.

$$S_{Lab} = 0.0872 * e^{1.29*v_{lab}} \quad (2.49)$$

Onde:

S_{Lab} – Resistência à compressão obtida em laboratório;

v_{lab} – Velocidade obtida em laboratório;

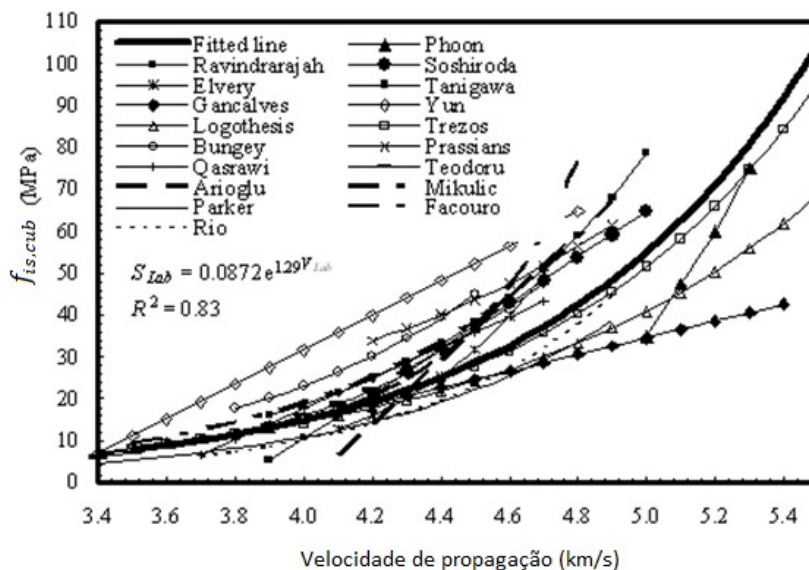


Figura 2.33 - Correlação entre V.P.U. e resistência à compressão do betão (P.Turgut. [32]).

Um exemplo de correlação de curva de tendência mais ajustada, é dada pela equação (2.50) obtida, do ensaio de provetes cúbicos 150*150 mm, de betão de resistência normal, cimento CEM II 32.5, com dimensão máxima de agregado de 25 mm [33].

$$f_{is,v} = 0.00013 * \exp(2.89 * v) \quad (2.50)$$

2.4.5 Ensaio de tração direta

De acordo com as normas EN-1542:1999 [34] e ASTM 1583/C1583M:13 [35], o ensaio de tração direta é executado na superfície do elemento, com aplicação na determinação e avaliação da resistência à tração do betão (substrato) antes da aplicação do material de reparação ou de sobreposição, como indicador da adequação do substrato, e avaliação da força adesiva e resistência à tração da adesão do material de reparação ao substrato. A norma BS 1881: Part 207:1992 [36] especifica o método para obtenção da resistência à compressão dos substratos por correlação do resultado da tensão de rotura por tração direta.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O ensaio de tração direta baseia-se no conceito da força necessária aplicada por um equipamento que se apoia na zona adjacente ao local de ensaio, do tipo “Limpet”, Figura 2.34, ou apoiado na área adjacente por meio de um tripé, Figura 2.35, sendo operado mecânica ou hidraulicamente. Providenciados com mostrador de medição que demonstre a força máxima aplicada de forma analógica ou digital. Impondo um aumento lento e constante da força de tração no disco, de 50mm de diâmetro e 20mm de espessura se for de aço, ou com 30mm de espessura se este for de alumínio, é colado por meio de uma resina epoxy [34].



Figura 2.34 - Equipamento “Limpet”. [3]



Figura 2.35 - Equipamento “Tripod”.

Como demonstrado na Figura 2.36, o disco é aplicado diretamente na superfície, e o volume de betão a ser tracionado será o que se encontra próximo do disco. Como alternativa, o teste pode ser efetuado com prévia carotagem parcial, permitindo obter valores da resistência à tração a diferentes

profundidades do elemento, bem como evitar os efeitos da superfície carbonatada e efeitos de casca [36].

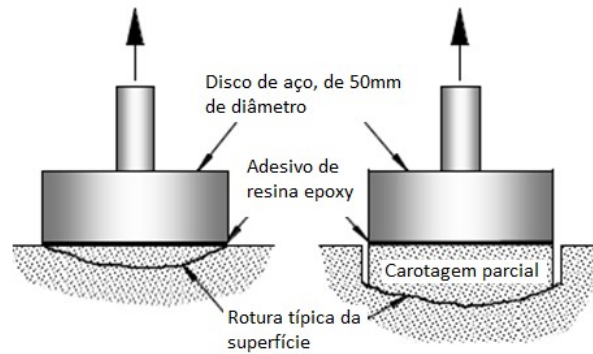


Figura 2.36 - Esquema do ensaio “pull-off” [5].

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Os provetes de betão, para elaboração do ensaio em laboratório de acordo com a EN-1542-1999 [34], devem cumprir os seguintes requisitos: dimensões de 300x300x100 mm, com agregados de dimensões máximas entre os 8 e 10 mm.

Para cada área de ensaio é necessária a elaboração de cinco ensaios seguindo o arranjo e sequência demonstrada na Figura 2.37, onde 1 define a área anelar provocada pela carotagem e 2 representam os discos de aço ou alumínio com 50 mm de diâmetro. A rotura é válida quando se dá pelo substrato (Figura 2.38 d)), as restantes tipologias de rotura na Figura 2.38 a), b), c) são inválidas, não sendo considerados os respetivos valores de tensão. O número mínimo de roturas aceitável é três.

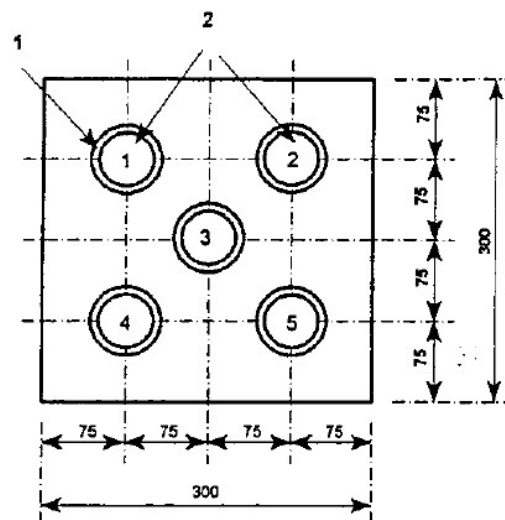


Figura 2.37 - Plano de localização dos discos no provete [34].

A carotagem deve ser efetuada com broca diamantada com eixo a $(90\pm 1)^\circ$ com a superfície, perfurando através do material de reparação mais (15 ± 5) mm para o interior do substrato de betão, sendo aconselhável profundidades superiores ou iguais a 20 mm.

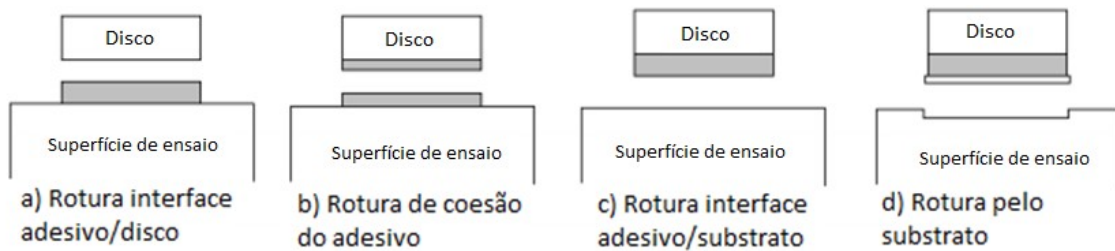


Figura 2.38 - Modos possíveis de rotura [37].

Antes da aplicação do disco, a superfície em que vai ser aplicado o adesivo deve ser limpo, utilizando equipamento abrasivo, desengordurado e limpo, de seguida deve aplicar-se uma camada fina e uniforme de adesivo entre o substrato e o disco, aplicando pressão suficiente para expelir o ar e permitir o tempo suficiente para a sua cura, de acordo com o fabricante. Não deve ser permitida a penetração do adesivo na abertura formada pela broca caroteadora.

O equipamento deve ser aplicado concentricamente sobre o disco a $(90\pm 1)^\circ$, e firme, de forma que não altere a sua posição durante o ensaio. A aplicação da carga deve ser contínua a uma taxa de $(0.05 \pm 0.01)MPa/s$ até que ocorra a rotura, registando a carga associada [34].

RESULTADOS

Para cada área de ensaio que demonstre uma rotura normal, o cálculo da tensão de rotura é obtida aplicando a fórmula (2.51):

$$f_h = \frac{4 * F_h}{\pi * D^2} \quad (2.51)$$

Onde:

f_h - Resistência à tração direta;

F_h - Carga de rotura;

D - Diâmetro do disco;

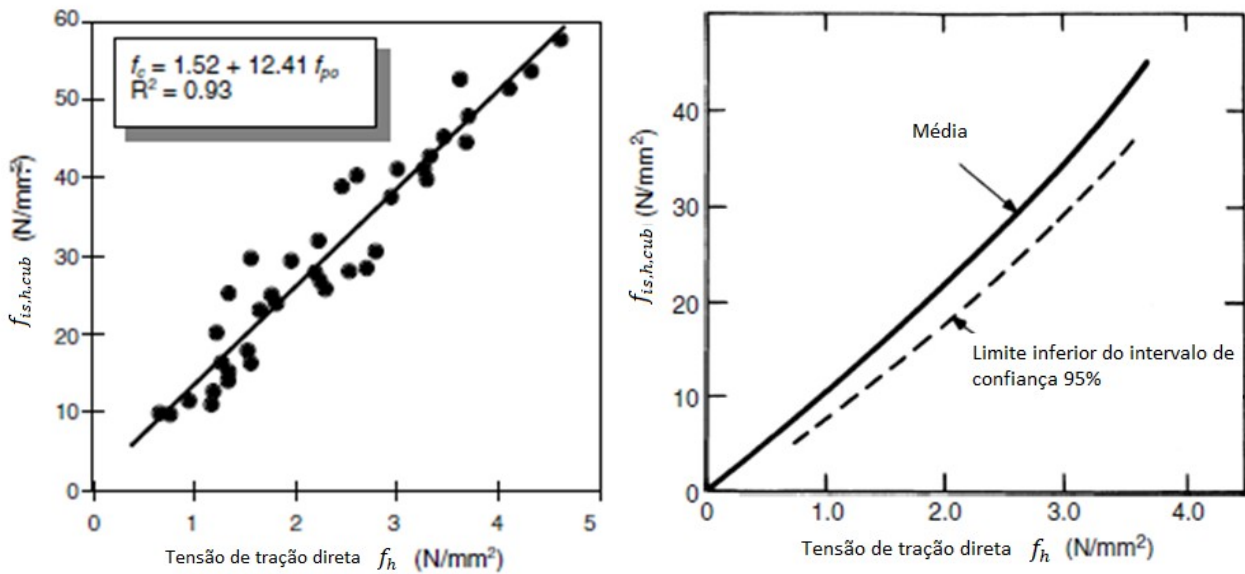
O valor da resistência à tração direta é o valor médio dos resultados obtidos [34].

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *IN SITU* POR CORRELAÇÃO

A BS 1881: Part 207:1992 [36] refere que a correlação entre o resultado de tração que provocou a rotura do betão e a resistência à compressão é dependente e deve ser estabelecida para o tipo de betão em estudo, aparelho de ensaio em questão e com ou sem carotagem parcial.

A BS 1881: Part 207:1992 [36] refere que a tensão de rotura à tração direta não pode ser diretamente comparável com a tensão de rotura à tração por compressão, sendo necessário estabelecer correlações para a sua avaliação.

A norma menciona que é improvável obter, para o limite de confiança de 95%, uma melhor estimativa da resistência à compressão de $\pm 15\%$ da média de seis resultados válidos [36], na Figura 2.39 é exemplificada uma típica correlação do ensaio de tração direta com resistência à compressão em que o coeficiente de variação de um conjunto de medições em condições de ensaio *in situ* é de 10%.



- a) Correlação para ensaio *pull off* (Murray, A.McC) [5].
- b) Correlação *pull-off*/resistência à compressão [3].

Figura 2.39 - Típica correlação do ensaio de tração direta com resistência à compressão típica.

É desenvolvida a correlação para estimar a resistência à compressão pela análise de regressão em função dos valores médios dos pares de resultados obtidos da realização em paralelo dos ensaios *in situ* e em laboratório, esboçando um gráfico onde os valores das abcissas correspondem aos valores dos ensaios *in situ* e nas ordenadas os valores obtidos do ensaio em laboratório.

Os parâmetros da reta de regressão b e m podem ser estimados pelo método dos mínimos quadrados.

É estabelecida uma relação linear do tipo de regressão pela equação:

$$f_{c/t} = b + m * f \tag{2.52}$$

Onde:

$f_{c/t}$ – Valor do parâmetro direto;

f – Valor do parâmetro indireto;

b – Ordenada na origem;

m – Declive;

A obtenção dos intervalos de confiança é desenvolvida em função dos parâmetros da regressão simples, aplicando as funções, (2.53), (2.54), (2.55), que têm em conta o erro de estimativa do desvio padrão do erro E , erro da estimativa de b e do erro de estimativa de m [38].

$$Se_y = \sqrt{\frac{\Sigma(R_i)^2}{n-2}} \quad (2.53)$$

$$\hat{y}_{(x_0)} \pm t_{n-2} * Se_y * \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\Sigma(x_i - \bar{x})^2}} \quad (2.54)$$

$$R_i = (y_i - (a + b * x_i)) \quad (2.55)$$

Onde:

R_i – Desvio de cada ponto de ensaio da reta de melhor ajuste;

x_0 – Coordenada da abcissa da reta $\hat{y}_{(x_0)}$;

$\hat{y}_{(x_0)}$ – Coordenada do eixo das ordenadas da reta de melhor ajuste;

x_i – Valor da abcissa do ponto utilizado para criar a reta de correlação, correspondente ao parâmetro obtido pelo método indireto *in situ*;

y_i - Valor da abcissa do ponto utilizado para criar a reta de correlação, corresponde ao valor da resistência à compressão obtida em laboratório;

t_{n-2} – Valor t student;

Se_y – Desvio padrão do resíduo aleatório;

n – Tamanho da amostra;

CAPÍTULO 3

MODELOS EXPERIMENTAIS

3.1 INTRODUÇÃO

Para estabelecer a correta metodologia conducente a uma caracterização fiável das propriedades do betão foi estabelecido um número mínimo de provetes cilíndricos para caracterização das propriedades do betão e provetes de acompanhamento para a realização dos ensaios *in situ*. Para o efeito foram produzidos modelos de ensaio de quatro amassaduras diferentes na central de betão pronto na Maia, pertencente ao Grupo ABB, duas das quais são de composição prescrita, e obtiveram-se as outras duas alterando a razão A/C.

No presente capítulo será efetuada a descrição dos procedimentos seguidos para o dimensionamento, composição do betão e elaboração dos modelos experimentais e respetiva caracterização, através do ensaio dos provetes normalizados, efetuados em laboratório.

Foram selecionados os seguintes métodos de ensaio para a elaboração da campanha experimental: “Determinação da resistência à compressão de provetes de betão endurecido”, “Determinação da resistência à tração por compressão dos provetes cilíndricos de betão endurecido”, “Resistência à flexão” e “Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão”, “Determinação do índice esclerométrico”, “Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons” e “Ensaio de tração direta”.

3.1.1 Definição da amostra

Para correta caracterização da resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, foi considerado o número mínimo de provetes por amassadura, representados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Número de modelos experimentais a elaborar.

		Nº total de Amassadura	Nº provetes/Amassadura
Cilindrico	Ensaio	4	6
	Acompanhamento		1
Prisma	C/Armadura Ø6mm		1
	S/Armadura		1
Total		4	9

A dependência entre os provetes a utilizar para cada ensaio a efetuar é a representada nos organogramas apresentados na Figura 3.1.

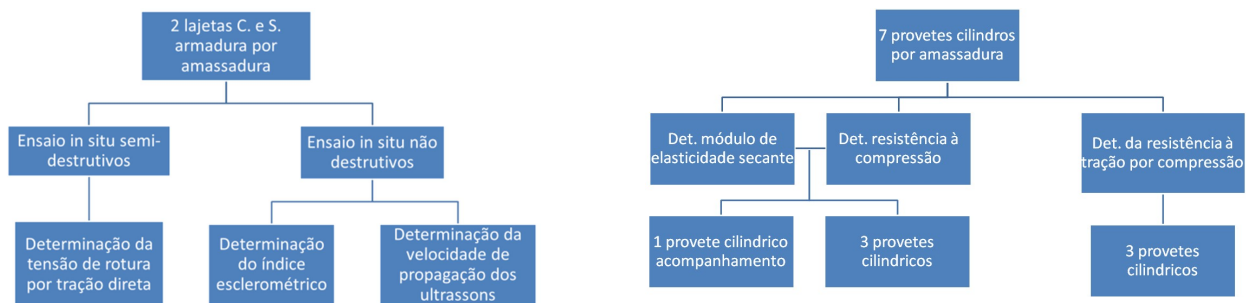


Figura 3.1 - Organogramas da distribuição e dependência dos provetes e ensaios a efetuar.

3.1.2 Dimensões

A escolha da forma e dimensões dos provetes foi efetuada com base no especificado nas normas em vigor adaptadas às necessidades do programa de ensaios.

Para atribuição das dimensões dos provetes, Iniciou-se por identificar os fatores determinantes normativos para definição das dimensões dos provetes para a realização dos ensaios *in situ* e em laboratório, representados na Tabela 3.2 e resumidos em seguida, tendo-se adotado as dimensões resumidas na Tabela 3.3

- Devido à dimensão máxima do agregado de 22 mm é necessário para o método de transmissão direto e indireto, uma distância de percurso mínima entre o transdutor emissor e recetor de 150 mm, com um incremento de 100 mm para as restantes três posições dos transdutores para a realização do ensaio de V.P.U. pelo método indireto;
- Frequência natural dos transdutores de 54 Hz e velocidade de propagação no betão de (4.50 km/s) pela consulta da Tabela 2.9 verifica-se ser necessário uma dimensão lateral mínima de 83 mm;
- Dimensões mínimas da área de ensaio de 300*300*100 mm para efetuar as leituras esclerométricas e para obtenção da tensão à tração direta;

- Definição da tipologia e dimensões dos provetes normalizados, em função dos ensaios a elaborar para a caracterização da resistência à compressão, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade por compressão, tendo-se adotado provetes cilíndricos com dimensões 150*300 mm por ser requisito comum para a caracterização destas propriedades.

Tabela 3.2 - Resumo das dimensões e respetivos requisitos normativos para os provetes a elaborar.

Tipologia de provetes		Dimensões e requisitos mínimos para provetes de ensaio (mm)							
		Cúbico		Cilíndrico		Prismas			
		Base	Altura	Dímetro	Altura (2*d)	Altura (espessura)	Base	Comprimento (l>=3,5*d)	
Ensaio do betão endurecido	NP EN 12390-3 Resistência à Compressão	100/150/200/250/300	100/150/200/250/300	100/113/150/200/250/300	200/226/300/400/500/600	-	-	-	
	NP EN 12390-6 Tração diametral por compressão	-	-	100/113/150/200/250/300	200/226/300/400/500/600	-	-	-	
	NP EN 12390-13 Módulo de elasticidade secante à compressão (Deve satisfazer seguintes condições, $d \geq 3,5 D, \max; 2 \leq L/d \leq 4$)	-	-	100/113/150/200/250/300	200/226/300/400/500/600	100/150/200/250/300	100/150/200/250/300	350/525/700/1050	
Ensaio do betão em estruturas	EN 1542 Pull off (tração directa)	-	-	-	-	100	300	300	
	NP EN 12504-2 Determinação do índice esclerométrico	-	-	-	-	100	300	300	
	NP EN 12504-4 Velocidade de propagação dos Ultrasons	Dimensão max. do agregado 20mm<Dg<40mm	Comprimento mínimo de percurso (mm)						
			Cúbico		Cilíndrico		Prismas		
			Base	Altura	Dímetro	Altura (2*d)	Altura (espessura)	Base	Comprimento
			Met. Direto e Semi-direto		Met. Direto e Semi-direto		Met. Direto e Semi-direto	Met. Direto e Semi-direto	Met. indireto
150			150	-	150	150	150	150*3*Xn	
54 kHz	Frequência do transdutor Hz	Dimensões laterais mínimas (mm)							
		Vc=4,50 (Km/s)	Vc=4,50 (Km/s)	Vc=4,50 (Km/s)	Vc=4,50 (Km/s)	Vc=4,50 (Km/s)	Vc=4,50 (Km/s)	Vc=4,50 (Km/s)	
		83	83	83	83	83	83	83+3*Xn	

Tabela 3.3 – Características dos provetes para ensaio.

Tipologia de provete	d (mm)	L (mm)	h (mm)
Cilindrico	150	300	-
Lajeta	300	600	100

A disposição da grelha de ensaio e dos pontos de ensaio nos provetes de acompanhamento é a representada na Figura 3.2, condicionada pelos seguintes fatores para o seu dimensionamento:

- Dimensão máxima do agregado de 22mm torna necessária uma distância de percurso mínima entre o transdutor emissor e recetor de 150 mm para o método direto e indireto, sendo para o indireto o espaçamento adotado para as restantes posições dos transdutores de 100 em 100 mm.
- Necessidade de 3 áreas de ensaio, cada uma contendo 9 pontos de leitura do índice esclerométrico, espaçados entre si 25 mm e 25mm dos bordos para as diferentes idades do betão, incluindo possíveis áreas que possam vir a ser eliminadas.
- Influência da armadura na proximidade e paralelismo relativamente à direção de propagação dos ultrasons.

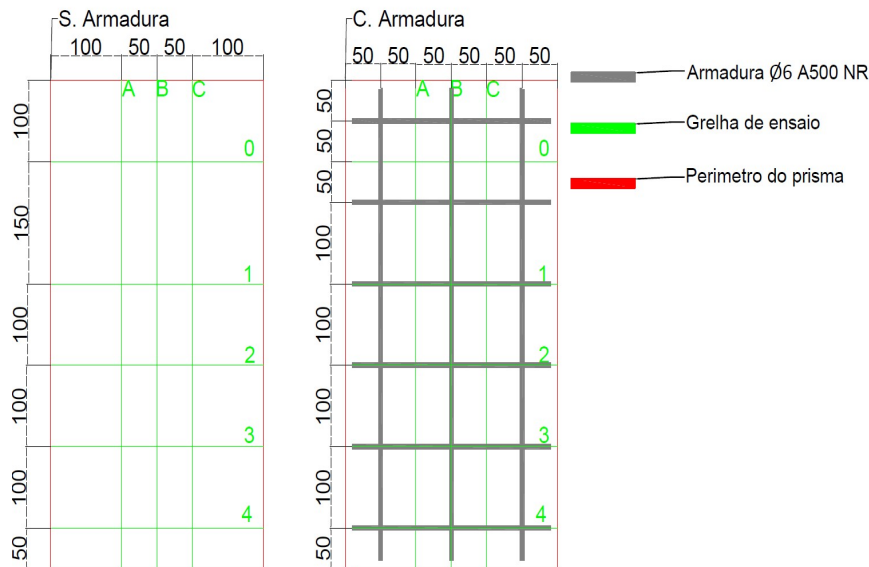


Figura 3.2 - Disposição da grelha de ensaio.

3.1.3 Composição do betão

As amassaduras foram produzidas e obtidas do mesmo lote, na central de betão pronto localizado na Maia do Grupo ABB, das quais as amassaduras 1 e 2 são de composição prescrita, cujo controlo de conformidade é efetuado em laboratório ABB, por forma a dar cumprimento ao definido em NP EN206-1:2007 com respetivo estudo das composições em anexo.

Para a obtenção das amassaduras 3 e 4 variou-se a razão água/cimento, com o intuito de diminuir a sua resistência, com a adição de 0.33l de água por cada 13l de betão.

As composições das amassaduras estão discriminadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Composição das amassaduras.

Designação		Classe e composição das amassaduras			
		Amass. 1 (C25/30 S3 D22 XC2 (P) C10,2)	Amass. 2 (C30/37 S3 D22 XC4 (P) C10,2)	Amass.3 (C25/30 S3 D22 XC2 (P) C10,2)(*)	Amass.4 (C30/37 S3 D22 XC4 (P) C10,2)(*)
Composição	Tipo	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade
Ligante	CEM II/A-L 42,5 R	270 kg/m ³	320 kg/m ³	270 kg/m ³	320 kg/m ³
Agregados	Brita 8/16	1920 kg/m ³	1837 kg/m ³	1920 kg/m ³	1837 kg/m ³
	Brita 11/22				
	Meia areia 0/4				
	Areia Fina 0/2				
Razão A/C	-----	0,57	0,51	0,66	0,59
Plastificante	Pozzolith 476N	2,7 kg/m ³	3,2 kg/m ³	2,7 kg/m ³	3,2 kg/m ³
Superplastificante	Master Ease 3529	1,1 kg/m ³	1,2 kg/m ³	1,1 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Plastificante Hidrofugo	RHEOBUILD 2200HI	1,35 kg/m ³	1,6 kg/m ³	1,35 kg/m ³	1,6 kg/m ³

(*) Classe onde foi aumentado a quantidade de água

O betão disponibilizado são amassaduras de classe C25/30 S3 D22 XC2 (P) C10,2 e C30/37 S3 D22 XC4 (P) C10,2. Composto por cimento com notação CEMII/A-L (Cimento Portland de calcário sem cinza pozolana) da classe de resistência 42.5 R (elevada resistência inicial [39]). Os agregados utilizados foram britas

(agregado grosso) 8/16 e 11/22 de granito, agregados finos 0/4 (meia areia) e 0/2 (areia fina) com dimensão de agregado máximo de 22 mm, de acordo com a NP EN 12620 2004 [40].

Os adjuvantes utilizados nas amassaduras foram Pozzolith 476 N com função principal plastificante/reductor de água e função secundária de retardar a presa, desenvolvido para trabalhar em sinergia com adjuvante superplastificante/forte reductor de água de elevada atividade, Master Ease 3530 que aumenta o abaixamento ou o espalhamento ou produz os dois efeitos em simultâneo e o plastificante hidrófugo Rheobuild 2200HI que reduz a absorção capilar do betão endurecido.

É recomendada a sua aplicação em centrais de betão pronto ou centrais de obra, em conformidade com a NP EN 934-2 [41].

A classe de consistência é S3, expressa pelo abaixamento de 100 a 150 (mm), determinada de acordo com a NP EN 12350-2 [42].

Tem classes de exposição para o risco de corrosão induzida por carbonatação XC2 e XC4 e classe do teor de cloretos Cl_{0.20} com máximo teor de Cl⁻ 0.20% [4].

3.1.4 Elaboração e cura de provetes

A armadura seleccionada é de classe A500 NR SD, com 3 varões longitudinais Ø6 com 580 mm de comprimento e 6 varões transversais Ø6 com comprimento de 280 mm, espaçados entre si 10 cm e 4 cm do bordo, com a disposição descrita na Figura 3.3. e recobrimento de 27 mm.

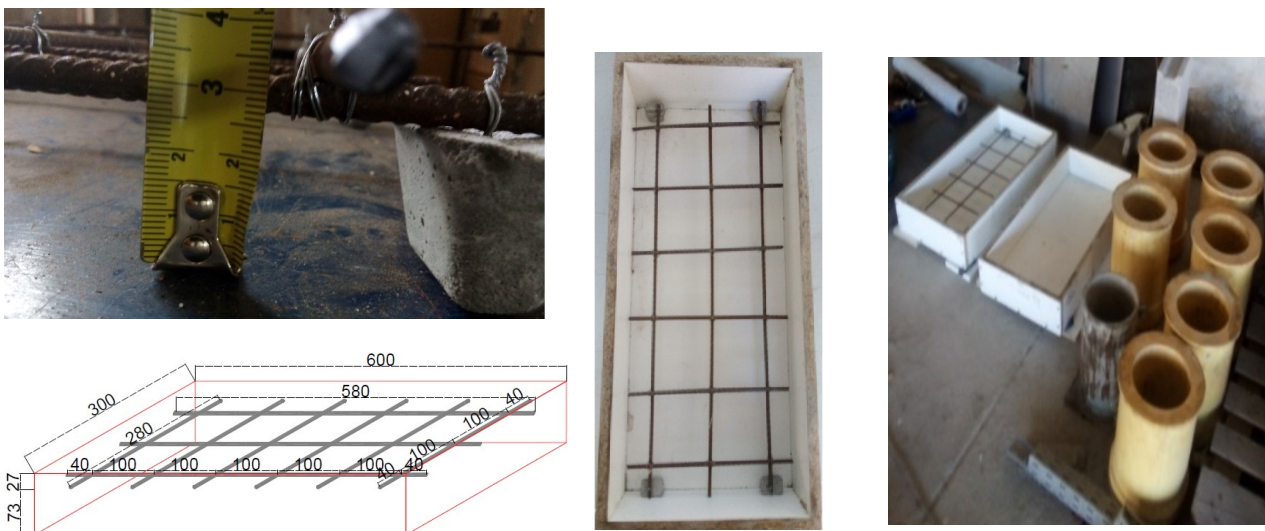


Figura 3.3 - Disposição da armadura dos moldes prismáticos e cilíndricos utilizados para elaboração dos provetes.

O betão foi obtido diretamente do camião betoneira após o fornecimento do mesmo pela misturadora, como demonstrado na Figura 3.4. Antes de preencher os provetes foi necessário proceder ao nivelamento dos moldes com recurso a um nível.

A adição da água nas amassaduras foi efetuada com adição do betão no balde, vibrado por camadas até preencher os 13 litros, tendo sido a água adicionada na gamela com capacidade de 15 litros.



Figura 3.4 - Processo de obtenção das amassaduras.

O procedimento de execução dos provetes foi efetuado de acordo com os requisitos da NP EN 12390-2 2009 [12], tendo sido aplicado material desmoldante para evitar a aderência do betão ao molde, de seguida foi efetuado o enchimento por camadas e a compactação do betão com uso de vibrador. Após o seu enchimento foi colocado filme plástico isolante transparente para proteção contra vento e para evitar a sua desidratação, como demonstrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Enchimento dos moldes.

O tempo de cura em imersão dos provetes foi de 26 e 21 dias para as amassaduras 1 e 2 respetivamente (com recolocação das lajetas das amassadura 1 e 2 no tanque de imersão durante 1 e 2 dias respetivamente, para a elaboração da quarta leitura dos ensaios) e 28 dias para amassaduras 3 e 4, como descrito na Tabela 3.5 e na Figura 3.6.

Tabela 3.5 - Temperatura da água de imersão e duração de cura.

Amass.	Elaboração de provetes		Temperatura da água no tanque (°C)				Remoção do tanque de imersão		Recolocação no tanque das lajetas (Amass. 1 e 2)		Segunda remoção do tanque de imersão das lajetas (Amass 1 e 2)	
	Betonagem	Descofragem	Nº leituras	Max.	Min.	Média	Data	Idade	Data	Idade	Data	Idade
	Data											
1	03-04-2019	05-04-2019	8	18	9	15.31	29-04-2019	26	06-05-2019	33	08-05-2019	35
2	08-04-2019	10-04-2019	6	18	10	15.75	29-04-2019	21	06-05-2019	28	07-05-2019	29
3	24-04-2019	26-04-2019	8	20	9	17.75	22-05-2019	28	-	-	-	-
4	29-04-2019	30-04-2019	9	21	15	18.78	27-05-2019	28	-	-	-	-



Figura 3.6 - Desmoldagem, colocação em tanque e posterior remoção do tanque de imersão.

3.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS MODELOS EXPERIMENTAIS

3.2.1 Introdução

Para a obtenção dos valores de referência das propriedades mecânicas, resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade do betão em estudo, procedeu-se ao ensaio em laboratório dos provetes cilíndricos de 150*300 mm.

Os resultados obtidos dos ensaios em laboratório serão utilizados para estabelecer os valores de referência da caracterização das propriedades mecânicas do betão em estudo, para posterior análise dos desvios dos resultados obtidos na caracterização *in situ* e para elaboração das relações entre os parâmetros de caracterização diretos e indiretos.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS PROVETES DE ENSAIO

Antes do ensaio em laboratório procedeu-se à pesagem e medição das dimensões dos provetes normalizados para se obter a sua massa volúmica, resumidas na Tabela 3.6, como uma confirmação da compactação do betão e para se proceder ao cálculo do módulo de elasticidade em função da V.P.U..

Para a referenciação dos provetes, foi escolhida a simbologia que permita identificar a que amassadura pertence e sua diferenciação dos restantes provetes. Onde o primeiro número corresponde à amassadura, o “P” é respetivo à tipologia ao provete e o ultimo número é a sua identificação dos restantes provetes da mesma amassadura.

Tabela 3.6 - Características físicas dos provetes de ensaio.

Amassadura	Ref:	L (mm)	Ø (mm)	Massa (g)	ρ (kg/m ³)	ρ , médio (kg/m ³)
1	1P0	296	149.59	11915.00	2290.38	2300.84
	1P1	299	149.75	12139.00	2305.09	
	1P2	295	149.30	11839.00	2292.36	
	1P3	299	149.50	11954.00	2277.56	
	1P4	295	149.39	11959.00	2312.81	
	1P5	297	149.84	12124.00	2314.96	
	1P6	295	149.60	11992.00	2312.69	
2	2P0	300	149.73	12172.00	2304.27	2320.79
	2P1	299	149.66	12188.00	2317.18	
	2P2	297	149.62	12132.00	2323.31	
	2P3	296	149.45	12109.00	2332.03	
	2P4	300	149.52	12279.00	2331.06	
	2P5	300	149.45	12177.00	2313.86	
	2P6	297	149.45	12107.00	2323.80	
3	3P0	297	149.25	12218.00	2351.39	2340.30
	3P1	296	149.43	12209.00	2351.92	
	3P2	301	149.81	12449.00	2346.37	
	3P3	297	149.45	12224.00	2346.25	
	3P4	298	149.42	12149.00	2324.97	
	3P5	301	149.63	12342.00	2331.80	
	3P6	300	149.62	12349.00	2329.37	
4	4P0	292	149.79	11967.00	2325.66	2312.10
	4P1	291	149.60	11932.00	2332.74	
	4P2	295	150.20	11990.00	2293.86	
	4P3	302	149.71	12148.00	2285.11	
	4P4	302	149.24	12254.00	2319.59	
	4P5	299	149.86	12187.00	2310.81	
	4P6	294	149.68	11986.00	2316.91	

3.2.2 Determinação da resistência à compressão

Os ensaios para avaliação da resistência à compressão foram realizados numa prensa universal servo comandada, ver Figura 2.2, com capacidade máxima de 2700 kN. Nos ensaios realizados adotou-se o controlo por imposição de deslocamento, tendo-se fixado uma velocidade constante até à rotura de 0.02 mm/s. A resistência à compressão é obtida pela equação (2.8).

Os ensaios à compressão de 3 dos 4 provetes cilíndricos por amassadura foram efetuados após a realização do ensaio para determinação do módulo de elasticidade secante à compressão. Os provetes cilíndricos, assinalados na Tabela 3.7 com (*) foram ensaiados para determinação da tensão de pré carga, tensão superior nominal, para a determinação do módulo de elasticidade.

Todos os provetes ensaiados tiveram rotura satisfatória, estando exemplificadas algumas das roturas obtidas na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Exemplos tipo das roturas satisfatórias obtidas.

RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados da elaboração dos ensaios estão resumidos na Tabela 3.7.

O valor médio da resistência à compressão das 4 amassaduras é de $f_{cm,cil}(77) = 41.97 MPa$, a amassadura 2 é a que apresenta valor de resistência à compressão superior às restantes igual a $f_{cm,cil}(77) = 46.84 MPa$, seguida da amassadura 1 com $f_{cm,cil}(77) = 46.02 MPa$, amassadura 3 $f_{cm,cil}(77) = 46.84 MPa$ e a de menor valor amassadura 4 com $f_{cm,cil}(77) = 29.42 MPa$

Foram obtidos valores do coeficiente de variação compreendidos no intervalo $1.31\% \leq C.V. \leq 3.56\%$ para as 4 amassaduras, representativo de condições de execução muito boas C.V.= 10% a 15%.

Tabela 3.7 - Resultados obtidos do ensaio de provetes à compressão.

Ref:	F (kN)	A (mm ²)	fc,cil.(t) (MPa)	fcm,cil. (t) (MPa)	S (MPa)	C.V.(%)
1P2	789.30	17506.91	45.09	46.02	1.30	2.83
1P4*	792.70	17528.02	45.22			
1P5	844.80	17633.78	47.91			
1P6	806.30	17577.34	45.87			
2P1	833.70	17591.44	47.39	46.84	0.83	1.77
2P2	834.50	17582.04	47.46			
2P3*	801.10	17542.11	45.67			
2P6	821.80	17542.11	46.85			
3P0	784.40	17495.19	44.84	45.60	0.60	1.31
3P1*	809.40	17537.41	46.15			
3P3	806.80	17542.11	45.99			
3P4	796.40	17535.06	45.42			
4P0*	514.10	17622.00	29.17	29.42	1.05	3.56
4P1	501.40	17577.30	28.53			
4P2	514.70	17718.60	29.05			
4P6	544.30	17596.14	30.93			

* provete de acompanhamento

RELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *IN SITU* CARACTERÍSTICA COM A CLASSE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Com os valores obtidos da resistência à compressão dos provetes cilíndricos das 4 amassaduras procedeu-se ao cálculo da resistência à compressão característica *in situ*, para a sua posterior comparação entre metodologias de estimativa desenvolvidas pela [1] e com o “real”.

Com uma amostra de 16 provetes de 4 amassaduras diferentes foi obtida a resistência *in situ*, de acordo com a [1], pela abordagem A obtendo-se uma resistência característica *in situ*, dos provetes cilíndricos normalizados igual a $f_{ck, is, cil}(77) = 32.53 \text{ MPa}$, pela consulta da Tabela 2.6, obtém-se classe de resistência C35/45. As variáveis utilizadas para seu cálculo estão resumidas na Tabela 3.8.

Verifica-se que o resultado obtido da resistência característica *in situ*, dos provetes cilíndricos normalizados, igual a $f_{ck, is, cil}(77) = 32.53 \text{ MPa}$ é $\Delta = 22.49\%$ inferior à média da resistência à compressão obtida do ensaio dos provetes na prensa, que é igual a $f_{cm, cil}(77) = 41.97 \text{ MPa}$.

Tabela 3.8 - Resistência *in situ* característica.

"n" Carote	D (mm)	L (mm)	A (mm ²)	Fmax (N)	f, is (MPa)	f, m(n), is (MPa)	f, is, menor (MPa)	S(MPa)	f, ck, is (MPa)
1P2	149.30	295.00	17506.91	789300.00	45.09	41.97	28.53	2.00	32.53
1P4*	149.39	295.00	17528.02	792700.00	45.22				
1P5	149.84	297.00	17633.78	844800.00	47.91				
1P6	149.60	295.00	17577.34	806300.00	45.87				
2P1	149.66	299.00	17591.44	833700.00	47.39				
2P2	149.62	297.00	17582.04	834500.00	47.46				
2P3*	149.45	296.00	17542.11	801100.00	45.67				
2P6	149.45	297.00	17542.11	821800.00	46.85				
3P0	149.25	297.00	17495.19	784400.00	44.84				
3P1*	149.43	296.00	17537.41	809400.00	46.15				
3P3	149.45	297.00	17542.11	806800.00	45.99				
3P4	149.42	298.00	17535.06	796400.00	45.42				
4P0*	149.79	292.00	17622.01	514100.00	29.17				
4P1	149.60	291.00	17577.34	501400.00	28.53				
4P2	150.20	295.00	17718.61	514700.00	29.05				
4P6	149.68	294.00	17596.14	544300.00	30.93				

3.2.3 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios para avaliação da resistência à tração por compressão diametral foram conduzidos segundo a norma Portuguesa NP EN 12390-6: 2011, realizados numa prensa universal servo comandada, com capacidade máxima de 300 kN, para as séries: amassadura 1 e 2, ver Figura 2.7. Para a amassadura 3 e 4, os ensaios foram realizados numa prensa universal com capacidade máxima de 2700 kN, a uma velocidade constante até à rotura de 0.02 mm/s.

Dos ensaios efetuados apenas se obteve uma rotura insatisfatória, correspondente à amassadura 3, as restantes são satisfatórias, como demonstrado na Figura 3.8.



a) Rotura satisfatória

b) Rotura insatisfatória

Figura 3.8 - Exemplo tipo de rotura satisfatória à esquerda; Rotura insatisfatória à direita.

RESULTADOS OBTIDOS

Foram utilizados 3 provetes cilíndricos 150*300 mm para a obtenção dos valores médios da resistência à tração de cada amassadura, resumidos na Tabela 3.9.

A resistência média das 4 amassaduras à tração por compressão aos 77 dias, é de $f_{ctm,sp,cil}(77) = 3.60 MPa$. das quatro amassaduras é a amassadura 2 que apresenta valor de resistência à tração por compressão superior às restantes, igual a $f_{ctm,sp,cil}(77) = 3.92 MPa$, seguida da amassadura 3, com $f_{ctm,sp,cil}(77) = 3.82 MPa$, amassadura 1 com $f_{ctm,sp,cil}(77) = 3.82 MPa$, e a de menor valor amassadura 4 com $f_{ctm,sp,cil}(77) = 3.00 MPa$

Foram obtidos valores do coeficiente de variação compreendidos no intervalo $1.92\% \leq C.V. \leq 10.42\%$ para as 4 amassaduras, representativo de condições de execução muito boas.

Tabela 3.9 - Resultados obtidos do ensaio de provetes à tração por compressão.

Ref:	F (kN)	fct,sp,cil (t) (MPa)	fct,spm,cil.(t) (MPa)	S (MPa)	C.V.(%)
1P0	261.90	3.77	3.67	0.38	10.42
1P1	280.40	3.99			
1P3	227.70	3.24			
2P0	278.80	3.95	3.92	0.17	4.43
2P4	287.30	4.08			
2P5	263.00	3.73			
3P2	173.10	INVALIDO	3.82	0.07	1.92
3P5	266.80	3.77			
3P6	273.20	3.87			
4P3	219.50	3.09	3.00	0.14	4.80
4P4	200.70	2.83			
4P5	216.60	3.08			

3.2.4 Determinação do módulo de elasticidade por compressão

Os provetes cilíndricos foram instrumentados com transdutores indutivos de deslocamento com um curso de ± 2.5 mm com 0,5 % de linearidade, colocados no eixo de aplicação da carga, ou seja na direção longitudinal. Os transdutores são colocados num dispositivo construído em duralumínio, ilustrado na Figura 2.12, devidamente solidarizados ao provete cilíndrico, através de parafusos. Este dispositivo de ensaio tem um comprimento de referência L_0 igual a 100 mm.

Os níveis de carga aplicados variaram entre 1/3 da força máxima de rotura dos provetes assinalados a (*) na Tabela 3.7 e valor mínimo de 0.5 MPa. Os provetes ensaiados foram submetidos a 2 ciclos de carga/descarga, seguido de dois patamares com um compasso de espera de 30s, correspondendo à tensão mínima e máxima, respetivamente. Os ciclos foram realizados a uma velocidade constante de 0.5 ± 0.2 MPa/s.

A aplicação da carga axial origina uma variação de comprimento Δl , sendo o comprimento de referência l , para cada ciclo de carga - descarga, ou seja, para cada nível de tensão aplicada obtém-se um valor da extensão. Admite-se que o betão tem um comportamento elástico nos intervalos de carga aplicada, sendo possível determinar o valor do módulo de elasticidade através da inclinação da reta $\sigma - \varepsilon$ equação (2.18).

RESULTADOS OBTIDOS

Para a determinação do valor do módulo de elasticidade por compressão foram utilizados por amassadura 4 provetes. 3 para determinar o valor médio do módulo de elasticidade, resumidos na Tabela 3.10 e 1 de acompanhamento ensaiado à compressão, para definir o nível de tensão superior do ciclo de carga do ensaio, identificados com (*) na Tabela 3.7.

O valor médio do módulo de elasticidade das 4 amassadura aos 77 dias, é $E_{cm}(77) = 29.71$ GPa. A amassadura 1 é a que apresenta valor de módulo de elasticidade médio superior, igual a $E_{cm}(77) = 30.80$ GPa, seguida da amassadura 2 com $E_{cm}(77) = 30.63$ GPa, amassadura 4 $E_{cm}(77) = 29.36$ GPa e a de menor valor, amassadura 3, igual a $E_{cm}(77) = 28.05$ GPa.

Foram obtidos valores do coeficiente de variação compreendidos no intervalo $1.05\% \leq C.V. \leq 2.70\%$ para as 4 amassaduras.

Tabela 3.10 - Resultados de módulo de elasticidade obtidos do ensaio de provetes à compressão.

Ref:	Ec,cil. (t) (GPa)	Ecm,cil.(t) (GPa)	S (GPa)	C.V.(%)
1P2	30.40	30.80	0.38	1.22
1P5	31.15			
1P6	30.84			
2P1	31.18	30.63	0.78	2.56
2P2	30.97			
2P6	29.73			
3P0	27.84	28.05	0.30	1.05
3P3	28.39			
3P4	27.93			
4P1	29.99	29.36	0.79	2.70
4P2	28.47			
4P6	29.62			

3.2.5 Determinação da resistência à flexão

Procedeu-se ao ensaio à flexão da lajeta com armadura da amassadura 1, com 176 dias de idade, até a sua fendilhação, para posterior ensaio de ultrassons na avaliação e deteção de fendas.

A configuração utilizada para o ensaio à flexão da lajeta com armadura é a descrita na Figura 2.10, com aplicação da carga a meio vão e posição dos roletes a 25 cm do ponto de aplicação da carga, como representada na Figura 3.9. Anteriormente ao ensaio da lajeta procedeu-se à elaboração de 2 cortes de 10 cm de comprimento e 2 cm de profundidade nas laterais, a meio vão, com uso de rebarbadora para controlar a posição da fenda.



Figura 3.9 - Ensaio à flexão de lajeta com armadura.

CAPÍTULO 4

CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo será apresentada uma campanha experimental para avaliação das potencialidades e limitações dos ensaios semi destrutivos e não destrutivos efetuados nas lajetas de betão com e sem armadura das quatro amassaduras.

A campanha experimental consistiu em desenvolver relações dos pares de resultados obtidos nos ensaios em laboratório e *in situ* realizados em paralelo, para a caracterização da resistência à compressão, à tração simples e módulo de elasticidade das amassaduras e sua análise através da comparação com outras relações encontradas na bibliografia da especialidade e confronto dos resultados obtidos com os de referência obtidos do ensaio dos provetes cilíndricos em laboratório. E avaliar os fatores que influenciam o índice esclerométrico, V.P.U. e tensão de tração direta “*pull-off*”, como a maturidade, humidade, composição, armadura e presença de defeitos nos elementos de betão.

Para o desenvolvimento das relações, os ensaios *in situ* são efetuados, em lajetas de betão de igual maturidade, consolidação e condições de cura semelhante dos provetes cilíndricos a ensaiar em laboratório.

4.2 PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa de ensaios definido envolveu três campanhas experimentais: uma primeira campanha experimental em que se efetuaram os ensaios de determinação da V.P.U. e determinação do índice esclerométrico nas lajetas de acompanhamento, nas idades resumidas na Tabela 4.1, de forma a criar a relação dos parâmetros indiretos com as características do betão nas primeiras idades e avaliar a influência da armadura. Não foi efetuado o ensaio de tração direta devido ao seu caráter destrutivo.

Tabela 4.1 - Ensaios efetuados e respetiva idade do betão da 1ª campanha experimental.

Amassadura	Ensaios			
	V.P.U. + índice esclerométrico			
	Idade betão (dias)			
1	7	14	21	35
2	7	15	21	29
3	7	14	21	28
4	7	14	21	28

Uma segunda campanha experimental que corresponde à realização do ensaio em laboratório, dos provetes cilíndricos normalizados, em paralelo com os ensaio in situ, nas lajetas de acompanhamento, nas idades representadas na Tabela 4.2, para a elaboração de relações com os pares de resultados obtidos e posterior análise dos desvios.

Será efetuada a análise da aplicabilidade e desvios dos valores de caracterização do betão obtidos com utilização de outras relações especificadas em normas e desenvolvidas em estudos semelhantes, para betões de características diferentes.

Tabela 4.2 - Ensaios efetuados e respetiva idade do betão da 2ª campanha experimental.

Amassadura	Ensaio					
	Resist. Compressão	Resist. Tração por compressão	Módulo de elasticidade à compressão	V.P.U.	Índice Esclerométrico	Pull-off
	Idade betão (Dias)					
1	77	77	77	76	76	79
2	79	79	79	78	78	81
3	77	77	77	76	76	79
4	77	77	77	77	77	80

Na terceira campanha experimental foi elaborado o ensaio de determinação de V.P.U. para deteção e avaliação da profundidade da fenda obtida do ensaio à flexão da lajeta com armadura da amassadura 1 e ensaio de determinação de V.P.U na lajeta sem armadura, com fenda superficial criada pelo uso de rebarbadora.

Inclui também a análise da influência da humidade nos valores da velocidade de propagação dos ultrassons pelo método de transmissão direto.

4.3 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO

4.3.1 Procedimento

O ensaio da determinação do índice esclerométrico, foi realizado sempre com o mesmo equipamento “Digi-Schmidt 2000 modelo ND” com 2.207 Nm de energia de impacto. Na altura da sua realização as lajetas não foram fixas na prensa, dando origem a movimentos do mesmo aquando do impacto do martelo esclerométrico, resultando em de áreas de ensaio eliminadas por se obter grande variabilidade de valores de ressalto.

Foram realizadas 3 áreas de ensaio para cada idade do betão com 9 pontos numerados, para facilitar a associação do ponto com o resultado obtido, separados 25 mm entre si e dos bordos, como representado na Figura 4.3, onde estão todas as áreas de ensaio efetuadas nas lajetas, com e sem armadura, (1ª leitura em amarelo, 2ª leitura em azul, 3ª leitura em azul claro “cyan” e 4ª leitura em verde), bem como as áreas de ensaio eliminadas devido ao aparecimento de vazios após o impacto do martelo com a superfície, ou devido a mais de 20% das leituras diferirem da mediana em mais de seis unidades, o que é reportado pelo equipamento, como demonstrado na Figura 4.2.

Todas as leituras foram obtidas com o aparelho na posição vertical, realizado no sentido de cima para baixo, como representado na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Posição e direção do martelo esclerométrico.

Em ambas as lajetas da amassadura 1 foram realizadas o total de 9 áreas de ensaio válidas, 3 áreas de ensaio por leitura. Não foi efetuada a 3ª leitura, correspondente ao 21 dia de idade, devido ao não funcionamento do equipamento. No prisma com armadura na 4ª leitura, a uma idade de 35 dias, foram eliminadas 2 áreas de ensaio em B e C2 (marcadas a magenta) devido a 20% das leituras diferirem da mediana em mais de seis unidades.

Nas lajetas da amassadura 2 foram realizadas um total de 11 áreas de ensaio válidas na lajeta com armadura e 12 na lajeta sem armadura, não foi efetuada uma área de ensaio na 2ª leitura correspondente a 15º dia na lajeta com armadura, devido ao não funcionamento do equipamento. Na

lajeta sem armadura, na 1ª leitura à idade de 7 dias, foi eliminada uma área de ensaio devido ao vazio criado na superfície depois do impacto no ponto 8, representado na Figura 4.2 a), bem como na 2ª leitura, à idade de 15 dias, foi eliminada uma área de ensaio na lajeta com armadura devido a 20% das leituras diferirem da mediana em mais de seis unidades.



a) Vazio criado no ponto 8 na área de ensaio da lajeta sem armadura da amassadura 2



b) Equipamento a reportar a invalidade do ensaio.

Figura 4.2 - Causas para eliminação de leituras.

Em ambas as lajetas da amassadura 3, foram realizadas um total de 12 áreas de ensaio. Na lajeta sem armadura, na 2ª leitura a uma idade de 14 dias, foi eliminada uma área de ensaio na lajeta com armadura, devido a 20% das leituras diferirem da mediana em mais de seis unidades.

Nas lajetas da amassadura 4, foram realizadas um total de 12 áreas de ensaio, sem necessidade de eliminar nenhuma.

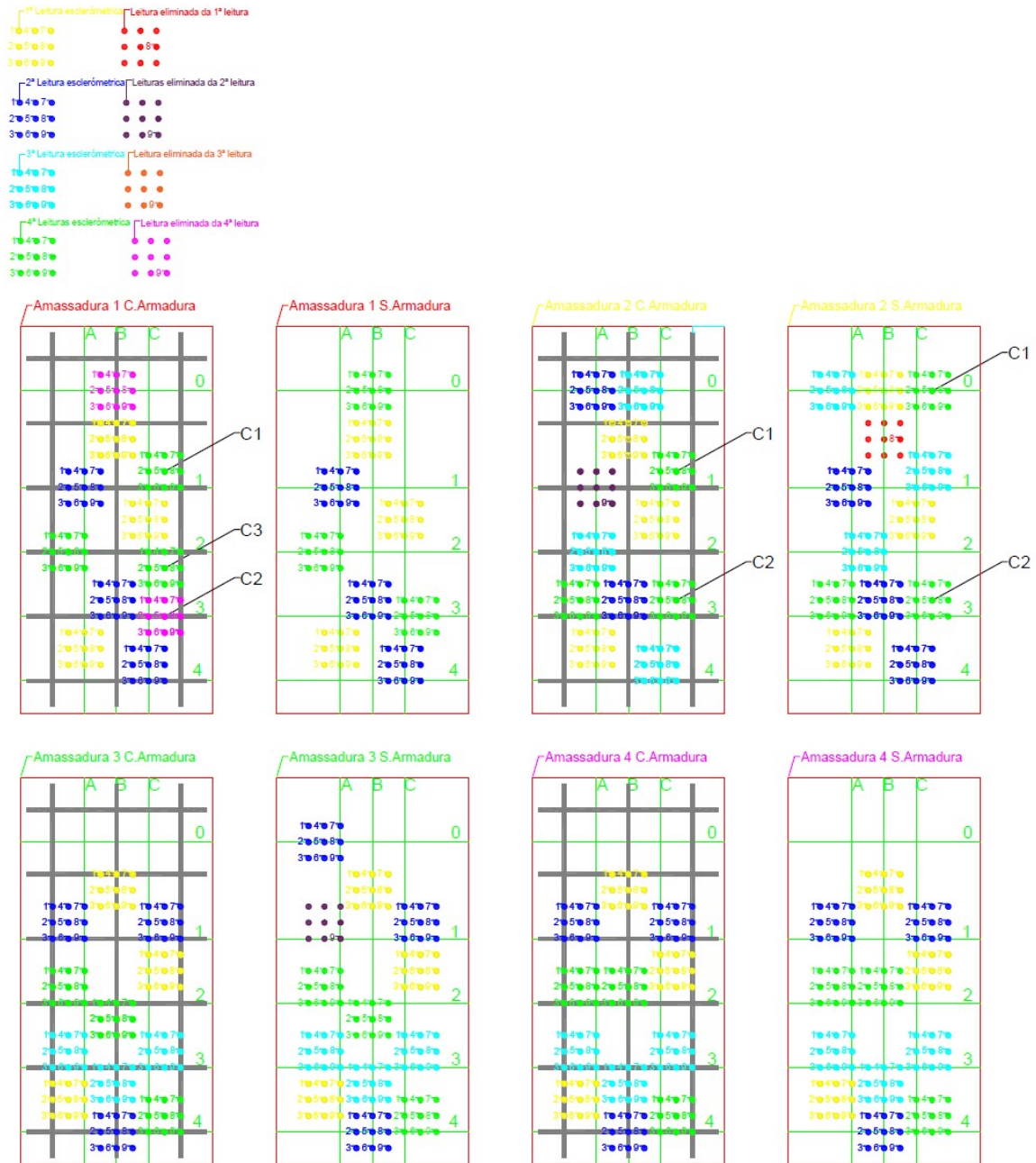
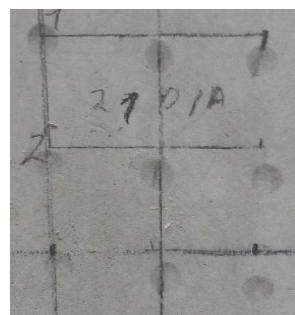
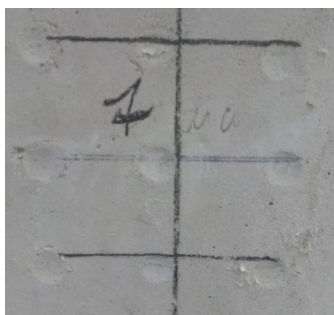


Figura 4.3 - Áreas de leituras efetuadas e eliminadas em diferentes idades do betão.

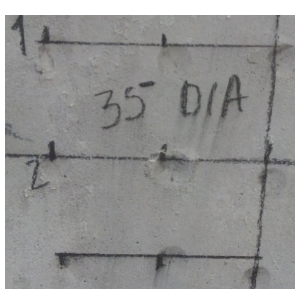
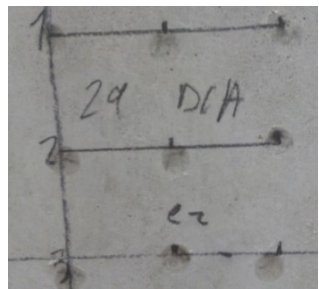
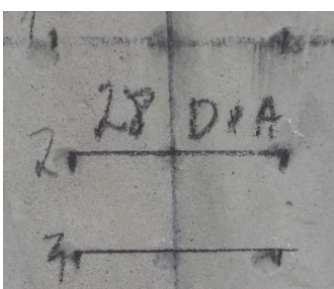
Observou-se com o aumento da idade do betão e as mesmas condições de humidade superficial, que deixou de ser notório o esmagamento do betão provocado pelo esclerómetro, que coincide com o aumento da dureza superficial ao longo do tempo, como demonstrado na Figura 4.4.



a) Área de ensaio ao 7º dia

b) Área de ensaio ao 14º dia

c) Área de ensaio ao 21º dia



d) Área de ensaio ao 28º dia

e) Área de ensaio ao 29º dia

f) Área de ensaio ao 35º dia

Figura 4.4 - Comparação do esmagamento em diferentes idades do betão.

Na 2ª campanha experimental realizou-se em cada lajeta, para cada amassadura, 3 áreas de ensaio divididas em 9 pontos de leituras, separados 25mm entre si e dos bordos. A seleção das áreas de ensaio, esquematizadas na Figura 4.5, encontravam-se condicionadas devido aos ensaios previamente efetuados.

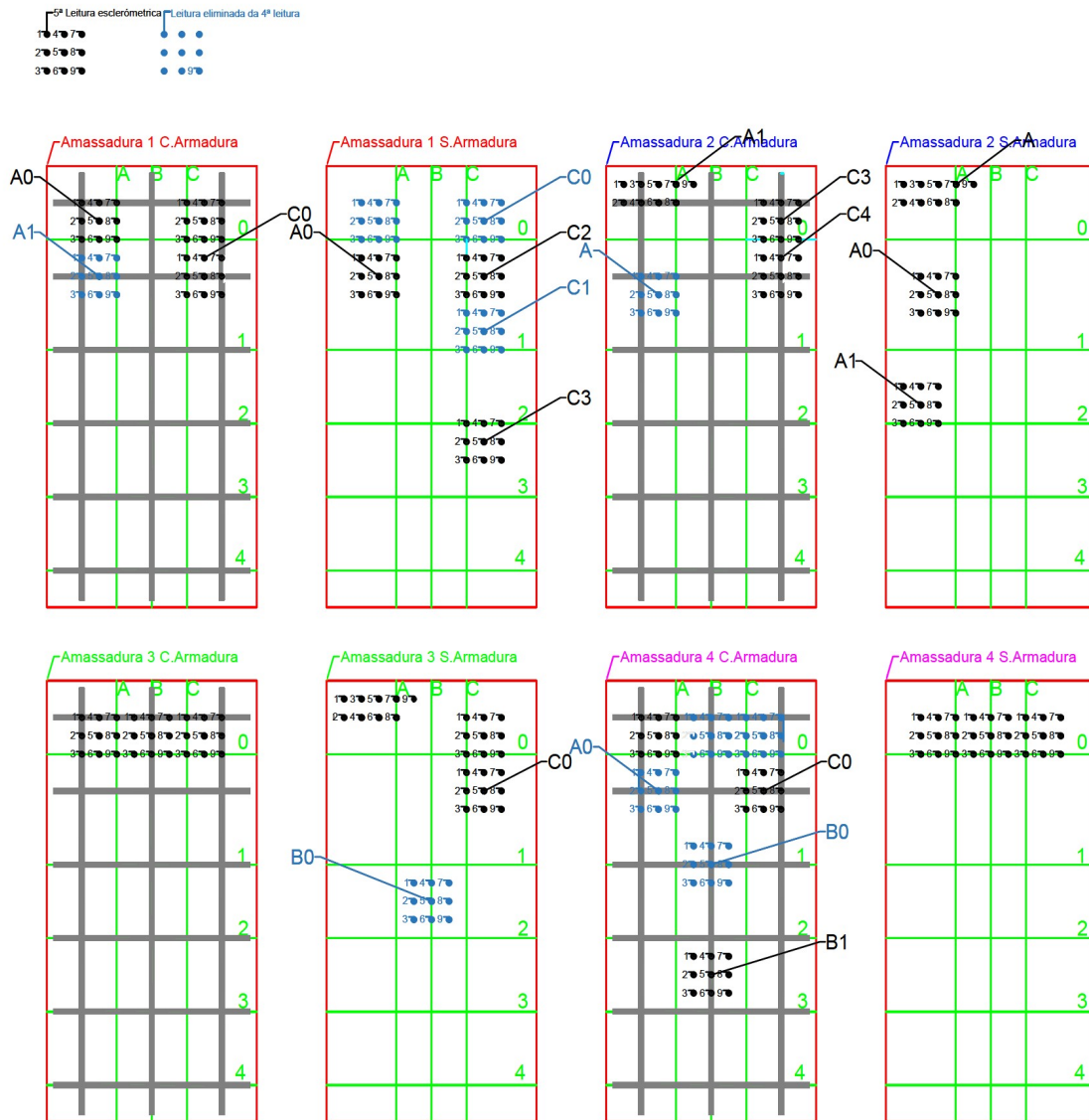


Figura 4.5 - Áreas de leituras esclerométricas válidas (Preto) e Inválidas (Azul).

Nas lajetas da amassadura 1 foram efetuadas, a uma idade de betão de 76 dias, o total de 10 áreas de ensaio nas lajeta onde foi eliminada 1 área na lajeta com armadura e3 na sem armadura.

Nas lajetas da amassadura 2 foram efetuadas a uma idade de betão de 78 dias o total de 7 áreas de ensaio, por lajeta, tendo sido eliminada 1 área de ensaio na lajeta com armadura. Verificou-se que os valores obtidos da mediana do índice esclerométrico para ambas as lajetas da amassadura 2 decresceram de forma drástica, possivelmente devido à proximidade das zonas de ensaio ao bordo.

Nas lajetas da amassadura 3, foram efetuadas a uma idade de betão de 76 dias o total de 7 áreas de ensaio, foi eliminada 1 área de ensaio na lajeta sem armadura.

Nas lajetas da amassadura 4, foram efetuadas a uma idade de betão de 77 dias o total de 10 áreas de ensaio, com total de 4 áreas de ensaio eliminadas na lajeta com armadura.

Para todas as áreas de ensaio eliminadas verificou-se que 20% das leituras diferiram da mediana em mais de seis unidades. Provavelmente devido ao contacto não uniforme da base da lajeta com o pavimento, o que possibilitou que o impacto do martelo esclerométrico provocasse vibrações ou movimentos notórios.

4.3.2 Conclusão do ensaio

EVOLUÇÃO DOS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO INDIRETA PARA DIFERENTES IDADES DO BETÃO

Pretende-se monitorizar e avaliar a variabilidade dos resultados do número de ressalto em função das alterações das propriedades do betão que ocorrem com o tempo, causadas pelo processo de hidratação do cimento nas lajetas, com e sem armadura, das 4 amassaduras.

O coeficiente de variação das leituras individuais obtidas de um ensaio efetuado em elementos de boa qualidade é usualmente na ordem dos 10%, mas pode ser baixo na ordem dos 2%, ou alto, na ordem dos 15%. Dos valores obtidos, resumidos na Tabela 4.3, os coeficientes de variação obtidos das 4 amassaduras, nas diferentes idades, estão compreendidos entre $3.23\% \leq C.V. \leq 13.99\%$, com números de ressalto compreendidos entre $29 R \leq R \leq 42 R$, e desvio padrão entre os $1.05 R \leq S(R) \leq 4.35 R$.

A BS-1881-Part-202-86 [23] menciona que o coeficiente de variação diminui com o aumento da resistência do betão, o que pela consulta da Tabela 4.3 não é perceptível nas quatro amassaduras.

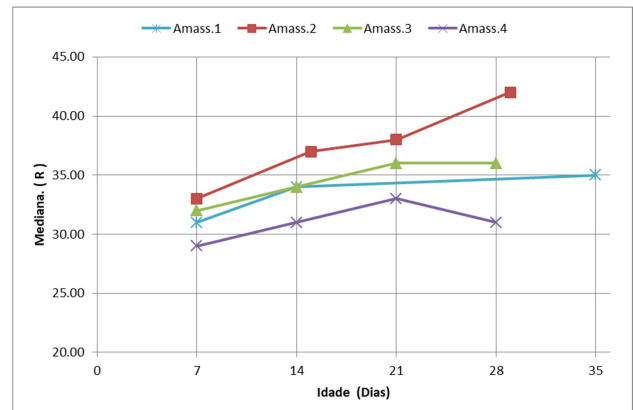
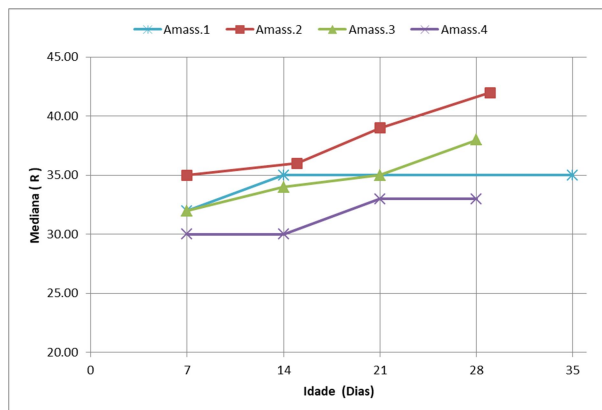
Na consulta dos gráficos constantes da Figura 4.6, verifica-se um aumento aproximadamente linear da mediana do índice esclerométrico em função do aumento da dureza superficial do betão.

Pela comparação da ordem das amassaduras que fornecem valores da mediana do índice esclerométrico superior com os da resistência à compressão de cada amassadura obtidos em 3.2.2 verifica-se que, o ensaio da determinação do índice esclerométrico é o que melhor se ajusta as amassaduras de composição que influencia a resistência à compressão, em que a amassadura 2 apresenta uma resistência à compressão superior às amassaduras 1 e 3, que são aproximadamente semelhantes e a de menor valor amassadura 4.

Os valores de ressalto são superiores nas amassaduras com maior quantidade de cimento, menor razão A/C e agregado.

Tabela 4.3 - Resultados da evolução do índice esclerométrico com o tempo.

Amassadura	Elemento	Idade	Nº leituras	Maximo (R)	Mínimo (R)	Mediana (R)	S (R)	Média (R)	C.V. (%)	
1	C.Armadura	7	27.00	37.00	24.00	32.00	2.82	31.11	9.06	
		14	27.00	49.00	29.00	35.00	3.27	34.74	9.40	
		21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		35	27.00	44.00	33.00	35.00	3.14	36.44	8.62	
	S.Armadura	7	27.00	34.00	29.00	31.00	1.44	30.67	4.70	
		14	27.00	38.00	28.00	34.00	2.44	34.15	7.16	
		21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		35	27.00	41.00	22.00	35.00	3.56	35.22	10.09	
	2	C.Armadura	7	27.00	43.00	28.00	35.00	3.76	34.70	10.84
			15	18.00	42.00	32.00	36.00	2.30	36.39	6.33
			21	27.00	45.00	30.00	39.00	3.97	38.33	10.36
			29	27.00	48.00	33.00	42.00	4.07	41.19	9.88
S.Armadura		7	27.00	41.00	27.00	33.00	3.41	33.78	10.10	
		15	27.00	45.00	30.00	37.00	3.96	37.26	10.62	
		21	27.00	47.00	32.00	38.00	3.80	38.04	9.98	
		29	27.00	46.00	32.00	42.00	3.88	40.33	9.63	
3		C.Armadura	7	27.00	46.00	29.00	32.00	3.26	32.93	9.89
			14	27.00	38.00	26.00	34.00	2.60	33.30	7.81
			21	27.00	40.00	32.00	35.00	2.24	35.56	6.31
			28	27.00	44.00	30.00	38.00	3.52	37.30	9.43
	S.Armadura	7	27.00	36.00	28.00	32.00	1.88	32.30	5.81	
		14	27.00	40.00	29.00	34.00	3.08	33.52	9.19	
		21	27.00	40.00	32.00	36.00	2.20	35.85	6.13	
		28	27.00	44.00	31.00	36.00	3.24	36.85	8.80	
	4	C.Armadura	7	27.00	49.00	26.00	30.00	4.35	31.11	13.99
			14	27.00	39.00	27.00	30.00	3.09	30.59	10.11
			21	27.00	39.00	29.00	33.00	2.41	32.74	7.37
			28	27.00	35.00	28.00	33.00	2.14	32.15	6.67
S.Armadura		7	27.00	35.00	23.00	29.00	3.18	28.74	11.07	
		14	27.00	39.00	27.00	31.00	2.93	31.89	9.18	
		21	27.00	35.00	30.00	33.00	1.05	32.52	3.23	
		28	27.00	33.00	27.00	31.00	1.72	30.48	5.64	



a) Lajeta sem armadura

b) Lajeta com armadura

Figura 4.6 - Comparação da evolução do índice esclerométrico entre amassaduras.

INFLUÊNCIA DA ARMADURA

Na tentativa de perceber a influência da armadura no valor da mediana do índice esclerométrico analisou-se os desvios, tomando os valores da lajeta com armadura como referência, das medianas do índice esclerométricos, obtidos nas lajetas com e sem armadura das diferentes amassaduras ao longo do tempo, com respetivos valores representados na Tabela 4.4 e nos gráficos da Figura 4.7.

Verifica-se que o índice esclerométrico obtido nas lajes com armadura está compreendido entre $30 R \leq R \leq 42 R$ e o índice esclerométrico nas lajes sem armadura, compreendido entre $29 R \leq R \leq 42 R$.

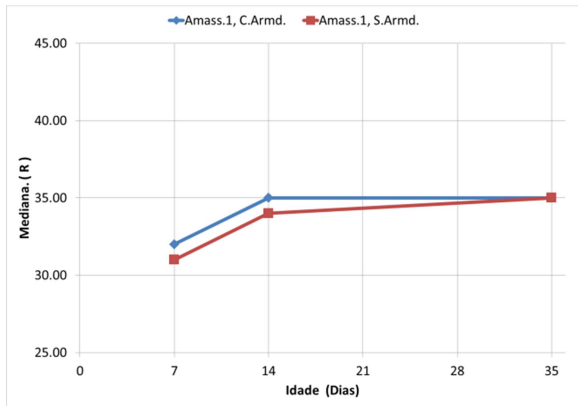
O índice esclerométrico das lajes sem armadura nas amassaduras 2, 3 e 4 é superior ao valor obtido na lajeta com armadura, com diferenças de $\Delta R = 1 R$ em termos percentuais, $2.78\% \leq \Delta \leq 3.33\%$.

O índice esclerométrico das lajes com armadura nas amassaduras 1, 2, 3 e 4 é superior ao valor obtido na lajeta sem armadura, com diferenças de $1 R \leq \Delta R \leq 2 R$ em termos percentuais, $2.56\% \leq \Delta \leq 6.06\%$.

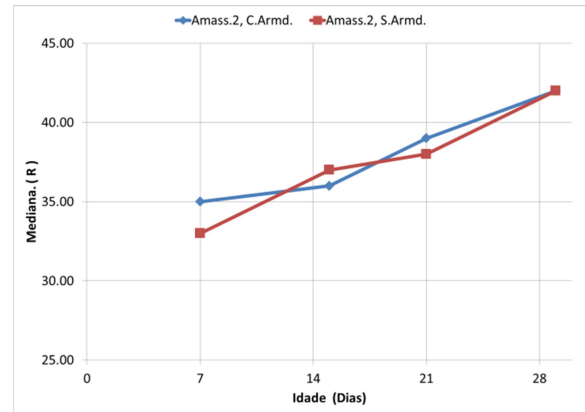
É possível concluir da falta de evidências de uma tendência clara nos resultados obtidos, que a armadura de 6 mm de diâmetro não tem influência perceptível no resultado do índice esclerométrico, devido à possibilidade de este método permitir avaliação do betão *in situ* até uma profundidade de 30 mm, sendo esta profundidade próxima dos 27 mm de recobrimento das lajetas de ensaio.

Tabela 4.4 - Variação da mediana do índice esclerométrico entre lajes com e sem armadura.

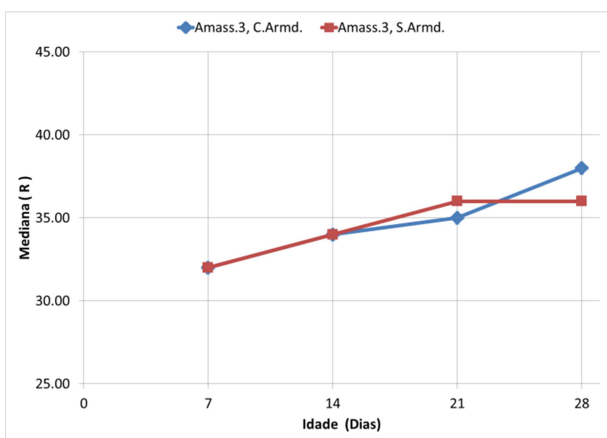
Amass.	Idade (Dias)	Mediana (R)		Δ(%)
		C.Armad.	S.Armad.	
1	7	32	31	3.13
	14	34	34	0.00
	21	-	-	-
	35	35	35	0.00
2	7	35	33	5.71
	15	36	37	-2.78
	21	39	38	2.56
	29	42	42	0.00
3	7	32	32	0.00
	14	34	34	0.00
	21	35	36	-2.86
	28	38	36	5.26
4	7	30	29	3.33
	14	30	31	-3.33
	21	33	33	0.00
	28	33	31	6.06



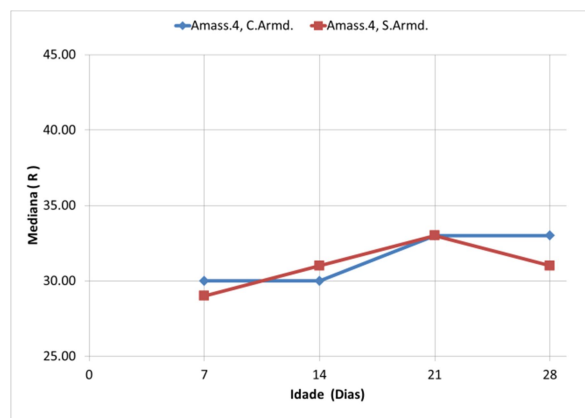
a) Amassadura 1



b) Amassadura 2



c) Amassadura 3



d) Amassadura 4

Figura 4.7 - Evolução do índice esclerométrico entre lajetas das diferentes amassaduras.

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA

Para a estimativa da resistência à compressão do betão em estudo, foi efetuada a calibração dos parâmetros indiretos com os resultados obtidos do ensaio de provetes cilíndricos em laboratório, elaborado em condições de cura e idades semelhantes.

Os resultados do índice de ressalto obtidos para elaboração da correlação com a resistência à compressão encontram-se resumidos na Tabela 4.5, obtendo-se um desvio padrão de $3.71 \leq S(R) \leq 5.06 R$, mediana do índice esclerométrico entre $30 R \leq R \leq 40 R$ e coeficiente de variação $10.87\% \leq C.V. \leq 14.52\%$.

Tabela 4.5 - Resultados obtidos do ensaio esclerométrico nas lajes para elaboração das correlações.

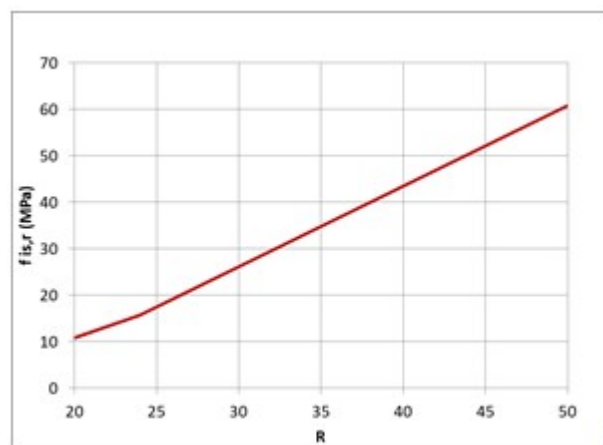
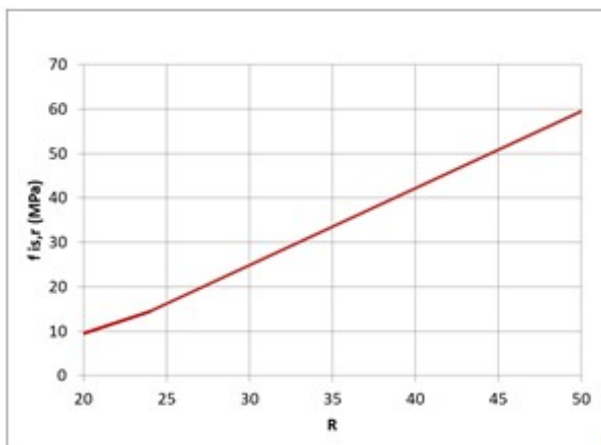
Amassadura	Elemento	Idade	Nº leituras	Maximo (R)	Mínimo (R)	Mediana (R)	S (R)	Média (R)	C.V. (%)
1	C.Armadura	76	27.00	45.00	30.00	36.00	4.07	36.26	11.23
	S.Armadura	76	27.00	49.00	33.00	40.00	4.22	38.85	10.87
2	C.Armadura	78	27.00	45.00	27.00	36.00	5.22	35.93	14.52
	S.Armadura	78	27.00	48.00	28.00	36.00	5.06	36.89	13.73
3	C.Armadura	76	27.00	43.00	26.00	33.00	4.67	33.81	13.80
	S.Armadura	76	27.00	44.00	28.00	33.00	4.45	34.04	13.08
4	C.Armadura	77	27.00	45.00	27.00	33.00	4.72	34.37	13.72
	S.Armadura	77	27.00	40.00	23.00	30.00	3.71	30.48	12.19

• **RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO**

Dos resultados obtidos anteriormente desenvolveram-se as correlações de caracterização da resistência à compressão *in situ* das lajetas, com e sem armadura, pelo procedimento (alternativa 2), especificado na norma NP EN 13791, com aplicação do deslocamento (Δf) determinado dos valores resumidos na Tabela 4.6, à curva base, representadas na Figura 4.8 e pelas equações (4.1) e (4.2) para a laje com armadura e pelas equações (4.3) e (4.4) para a laje sem armadura.

Tabela 4.6 - Cálculo do deslocamento da curva base do ensaio determinação do índice esclerométrico.

Amass.	Rmed, Lajetas	Ref:	fc,cil. (MPa)	fr (MPa)	δf (MPa)	$\delta f, m(n)$ (MPa)	s (MPa)	k1	Δf (MPa)
1	36	1P2	45.09	27.78	17.31	16.79	6.28	1.48	7.49
		1P4*	45.22	27.78	17.44				
		1P5	47.91	27.78	20.13				
		1P6	45.87	27.78	18.09				
		2P1	47.39	27.78	19.61				
2	36	2P2	47.46	27.78	19.68				
		2P3*	45.67	27.78	17.89				
		2P6	46.85	27.78	19.07				
3	33	3P0	44.84	22.59	22.25				
		3P1*	46.15	22.59	23.56				
		3P3	45.99	22.59	23.40				
		3P4	45.42	22.59	22.83				
4	33	4P0*	29.17	22.59	6.58				
		4P1	28.53	22.59	5.94				
		4P2	29.05	22.59	6.46				
		4P6	30.93	22.59	8.34				
		1	40	1P2	45.09	34.70	10.39		
				1P4*	45.22	34.70	10.52		
1P5	47.91			34.70	13.21				
1P6	45.87			34.70	11.17				
2P1	47.39			27.78	19.61				
2	36			2P2	47.46	27.78	19.68		
		2P3*	45.67	27.78	17.89				
		2P6	46.85	27.78	19.07				
3	33	3P0	44.84	22.59	22.25				
		3P1*	46.15	22.59	23.56				
		3P3	45.99	22.59	23.40				
		3P4	45.42	22.59	22.83				
4	30	4P0*	29.17	17.40	11.77				
		4P1	28.53	17.40	11.13				
		4P2	29.05	17.40	11.65				
		4P6	30.93	17.40	13.53				



a) Lajetas com armadura

b) Lajetas sem armadura

Figura 4.8 - Curva de relação entre a resistência à compressão e índice esclerométrico.

$$f_{is,R} = 1.25 * R - 15.513; 20 \leq R \leq 24 \quad (4.1)$$

$$f_{is,R} = 1.73 * R - 27.013; 24 \leq R \leq 50 \quad (4.2)$$

$$f_{is,R} = 1.25 * R - 14.236; 20 \leq R \leq 24 \quad (4.3)$$

$$f_{is,R} = 1.73 * R - 25.736; 24 \leq R \leq 50 \quad (4.4)$$

RELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO IN SITU CARACTERÍSTICA COM A CLASSE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.

Os valores resumidos na Tabela 4.7 correspondem aos resultados da relação da resistência à compressão característica *in situ* com a classe de resistência à compressão em função dos valores da resistência à compressão *in situ* e da mediana do índice esclerométrico obtidos, do ensaio realizados nas lajetas das quatro amassaduras nas diferentes idades perfazendo um total de 12 valores da resistência à compressão *in situ* para o calculo da resistência à compressão *in situ* em cada idade do betão.

Foram admitidos os resultados de ambas as lajetas na mesma análise por não se verificarem tendências que permitam estabelecer diferenças de resultados entre as lajetas com e sem armadura.

Constata-se que é, nas primeiras idades, quando as lajetas se encontravam em imersão, que se obtêm as resistências características *in situ* superiores, compreendidas entre os $21.27MPa \leq f_{ck,is,r} \leq 28.82MPa$.

E aos 77 dias, quando se encontravam secos, obtêm-se valores de resistência à compressão *in situ* inferiores, compreendidos entre, $23.77MPa \leq f_{ck,is,r}(77) \leq 25.62MPa$ o que da consulta da Tabela 2.6 corresponde à classe de betão C25/30, inferior à obtida pela avaliação da resistência característica à compressão *in situ* por métodos diretos, $f_{ck,is,cil}(77) = 32.53 Mpa$, classe de resistência C35/45.

É possível concluir pela dispersão e falta de tendência dos resultados, que não se verificou a influência da humidade na mediana do índice esclerométrico. E a justificação para a dispersão dos resultados pode ser pelo número da amostra ser inferior aos 15 resultados como especificado na norma [1].

Tabela 4.7 - Avaliação da resistência à compressão *in situ* pelo Índice esclerométrico.

Idade	fm(n),is (MPa)	fis,menor (MPa)	S(MPa)	fck,is (MPa)
7	28.78	24.89	3.84	23.09
14	30.55	19.70	5.58	22.28
21	34.50	28.35	5.34	26.60
28	36.28	23.16	7.09	25.78
77	33.68	26.62	5.44	25.62

a) Lajetas com armadura

Idade	fm(n),is (MPa)	fis,menor (MPa)	S(MPa)	fck,is,r (MPa)
7	28.04	19.24	4.57	21.27
14	33.08	26.16	4.72	26.09
21	35.58	29.62	4.50	28.92
28	35.68	24.43	6.90	25.47
77	33.80	24.43	6.78	23.77

b) Lajetas sem armadura

ANÁLISE COMPARATIVA DAS CORRELAÇÕES COM RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Pretende-se, no presente capítulo, avaliar a adequabilidade da utilização de outras correlações desenvolvidas, na caracterização de betão com composição e características semelhantes, na caracterização das propriedades do betão em estudo, com análise dos desvios obtidos pela comparação com o real.

São apresentados na Tabela 4.8, com respetiva dispersão dos mesmos representados no gráfico da Figura 4.9, os desvios entre os valores da resistência à compressão estimada da utilização das correlações estabelecidas, desenvolvidas por A.M. Neville & J.J. Brooks [17] e Proceq [24] e a desenvolvida como preconizada na norma [1], com os valores individuais da resistência à compressão de cada provete cilíndrico, ($f_{c,cil}$).

Foram admitidos os resultados de ambas as lajetas na mesma análise por não se verificaram tendências que permitam estabelecer diferenças de resultados entre as lajetas com e sem armadura.

A resistência à compressão *in situ* obtida da correlação definida pela metodologia descrita na norma [1] apresenta uma variação com o “real” compreendida entre $-16.07 MPa \leq \Delta f_{is,r} \leq 1.55 MPa$ em termos percentuais $-34.60\% (inf.) \leq \Delta \leq 5.33\% (sup.)$, a resistência à compressão fornecida pelo equipamento [24] varia entre $-16.08 MPa \leq \Delta f_{is,r} \leq 1.54 MPa$, em termos percentuais $-34.85\% \leq \Delta \leq 5.42\%$, e a correlação desenvolvida por [17] para elementos secos, a resistência à compressão varia entre $-12.06 MPa \leq \Delta f_{is,r} \leq 5.56 MPa$, em termos percentuais $-26.13\% \leq \Delta \leq 19.51\%$.

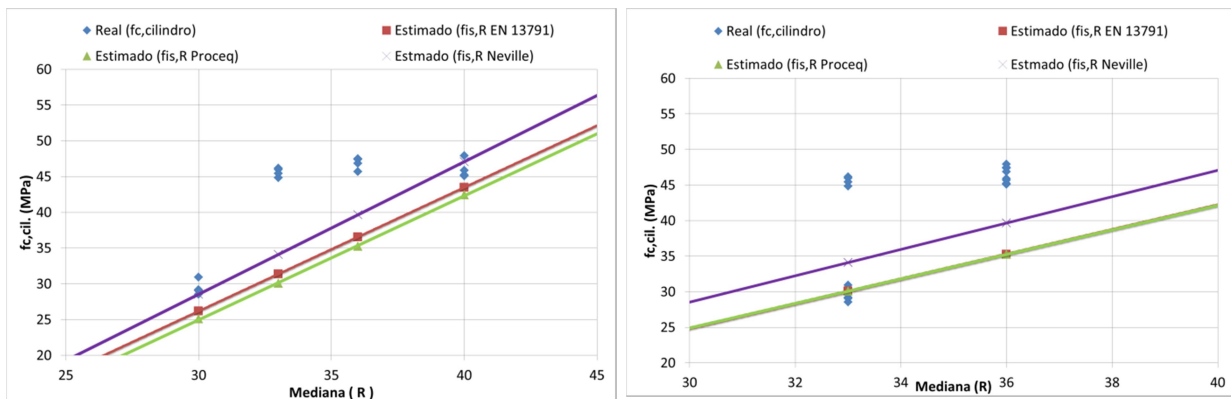
É possível concluir, dos desvios dos valores da resistência à compressão *in situ*, que as correlações definida pela metodologia descrita na norma [1] e equipamento Proceq [24] são semelhantes e próximas dos resultados de referência.

Tabela 4.8 - Valores de resistência à compressão *in situ* estimada por diferentes autores.

Amass:	Rmed, Lajetas	Real (Lab.)		(EN 13791)		(Proceq)		Neville(Seco)	
		Ref:	fc,cil. (MPa)	fis,R (MPa)	Δ (%)	fis,R,cyl. (MPa)	Δ (%)	fis,R (MPa)	Δ (%)
1	40.00	1P2	45.09	43.46	3.60	42.44	5.87	47.07	-4.39
		1P4*	45.22		3.89		6.16		-4.07
		1P5	47.91		9.28		11.42		1.76
		1P6	45.87		5.25		7.48		-2.60
2	36.00	2P1	47.39	36.54	22.89	35.24	25.64	39.65	16.33
		2P2	47.46		23.01		25.75		16.46
		2P3*	45.67		19.98		22.83		13.17
		2P6	46.85		21.99		24.78		15.36
3	33.00	3P0	44.84	31.35	30.07	30.07	32.93	34.09	23.96
		3P1*	46.15		32.06		34.85		26.13
		3P3	45.99		31.83		34.62		25.87
		3P4	45.42		30.96		33.79		24.94
4	30.00	4P0*	29.17	26.16	10.32	25.10	13.96	28.53	2.20
		4P1	28.53		8.28		12.01		-0.02
		4P2	29.05		9.93		13.59		1.78
		4P6	30.93		15.42		18.86		7.76

a) Lajetas sem armadura

b) Lajetas com armadura



a) Lajetas sem armadura

b) Lajetas com armadura

Figura 4.9 - Dispersão dos valores de resistência à compressão estimada com diferentes correlações.

EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

No presente capítulo é efetuada a comparação da estimativa da resistência à compressão em diferentes idades obtidas dos ensaios em laboratório e *in situ*, pela análise dos desvios, entre as curvas da evolução da resistência á compressão ao longo do tempo como estimado na NP EN 1992, em função dos valores de referência da resistência à compressão média aos 77 dias de idade, (f_{cmvcil}) e da resistência característica *in situ* equivalente dum cilindro ($f_{ck, is, cil}$), das 4 amassaduras, com a resistência à compressão *in situ* ($f_{is,R}$), apresentados na Tabela 4.10, e com a avaliação da resistência característica *in situ* ($f_{ck, is, R}$), apresentada na Tabela 4.9, obtidas das leituras efetuadas nas diferentes idades do betão, como representada na Figura 4.10.

Obteve-se a curva de previsão do desenvolvimento da resistência aplicando a equação (2.7) para cálculo do coeficiente que depende da idade do betão t , a uma temperatura média de cura 20 °C, igual a, $\beta_{cc}(77) = 1.083$ e a resistência correspondente aos 28 dias do valor médio da resistência das 4 amassadura igual a $f_{cm,cil}(28) = 38.77 MPa$, e da resistência característica *in situ* $f_{ck,is,cil}(28) = 30.04 MPa$ aplicando à equação (2.5).

Foram admitidos os resultados de ambas as lajetas na mesma análise por não se verificaram tendências que permitam estabelecer diferenças de resultados entre as lajetas com e sem armadura.

Verifica-se na Tabela 4.9, que os valores obtidos de $f_{ck,is,r}$ são inferiores aos de referência f_{cmrc} , com uma diferença de tensões compreendida no intervalo $8.07MPa \leq \Delta f_{ck,is,r} \leq 18.2 MPa$ que se traduz em termos percentuais em $23.06\% \leq \Delta \leq 43.36\%$.

Em relação a $f_{ck,is,cil}$ a tensão é inferior com diferença compreendida entre $0.21MPa \leq \Delta f_{ck,is,r} \leq 9.44 MPa$, que em termos percentuais corresponde a $0.72\% \leq \Delta \leq 26.91\%$.

Tabela 4.9 - Evolução da resistência característica à compressão *in situ* obtido pelo ensaio índice esclerométrico.

Idade (Dias)	fck,is,r (MPa)	fcm,cil. (t) (MPa)	Δ (%)	fck,is,cil. (t) (MPa)	Δ (%)
7	21.27	31.74	32.99	24.60	13.54
14	26.09	35.69	26.88	27.65	5.64
21	28.92	37.59	23.06	29.13	0.72
28	25.47	38.77	34.31	30.04	15.23
77	23.77	41.97	43.36	32.53	26.91

a) Lajetas sem armadura

Idade (Dias)	fck,is,r (MPa)	fcm,cil. (t) (MPa)	Δ (%)	fck,is,cil. (t) (MPa)	Δ (%)
7	23.09	31.74	27.24	24.60	6.11
14	22.28	35.69	37.55	27.65	19.42
21	26.60	37.59	29.24	29.13	8.69
28	25.78	38.77	33.50	30.04	14.19
77	25.62	41.97	38.95	32.53	21.22

b) Lajetas com armadura

Analisando a variação da tensão de $f_{is,r}$ nos resultados da Tabela 4.10, tomando como referência os valores de f_{cmrc} , verifica-se nas primeiras quatro idades, que estas situam-se no intervalo entre $-5.37MPa \leq \Delta f_{is,r} \leq 8.02MPa$, em termos percentuais $-30.26\% (inf.) \leq \Delta \leq 20.62\% (sup.)$, na quinta idade, correspondente as condições ausentes de humidade, a diferença de tensão está compreendida entre $-15.81MPa \leq \Delta f_{is,r} \leq 1.52MPa$, em termos percentuais, $-37.66\% \leq \Delta \leq 3.64\%$.

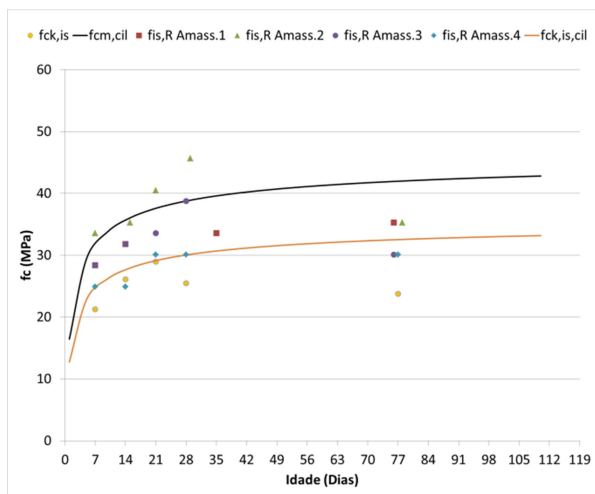
Tomando como referência os valores de $f_{ck,is,cil}$. Verifica-se nas primeiras quatro idades, que estas situam-se no intervalo entre $-2.76MPa \leq \Delta f_{is,r} \leq 16.77MPa$, em termos percentuais, $-10.01\% \leq \Delta \leq 55.65\%$, na quinta idade, correspondente a condições ausentes de humidade, a diferença de tensão está compreendida entre $-6.37MPa \leq \Delta f_{is,r} \leq 10.96MPa$, em termos percentuais, $-19.56\% \leq \Delta \leq 33.74\%$.

É possível concluir que a evolução da resistência à compressão *in situ* ($f_{is,r}$), ao longo do tempo é semelhante ao previsto na norma NP EN 1992, com valores de $f_{ck,is,r}$ inferiores aos valores de referência $f_{ck,is,cil}$ e os valores de $f_{is,r}$ correspondem, aproximadamente aos valores individuais das 4 amassaduras, próximos dos valores de referência $f_{cm,cil}$ de cada amassadura.

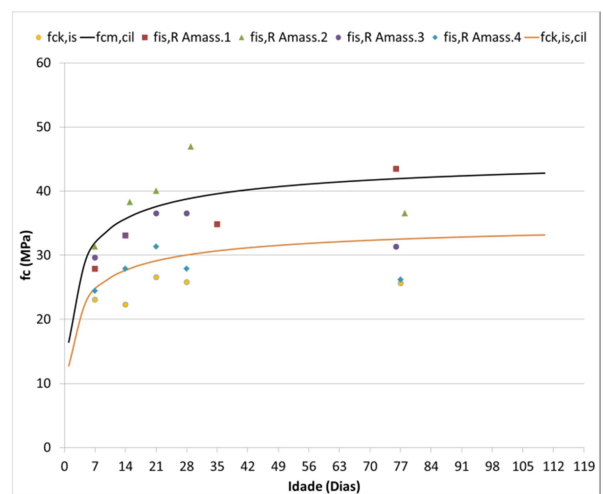
Tabela 4.10 - Evolução da resistência à compressão *in situ* nas lajetas pelo ensaio de determinação do índice esclerométrico.

Amass:	Idade (Dias)	Mediana (R)	$f_{is,r}$ (MPa) (NP 13791)	$f_{cm,cil}$ (t) (MPa)	Δ (%)	$f_{ck,is,cil}$ (t) (MPa)	Δ (%)
1	7	31.00	27.89	31.74	12.12	24.60	-13.40
	14	34.00	33.08	35.69	7.29	27.65	-19.63
	21	-	-	-	-	-	-
	35	35.00	34.81	39.59	12.07	30.68	-13.46
	76	40.00	43.46	41.94	-3.64	32.50	-33.74
2	7	33.00	31.35	31.74	1.22	24.60	-27.47
	15	37.00	38.27	36.03	-6.23	27.92	-37.08
	21	38.00	40.00	37.59	-6.43	29.13	-37.34
	29	42.00	46.92	38.90	-20.62	30.15	-55.65
	78	36.00	36.54	42.00	13.00	32.55	-12.27
3	7	32.00	29.62	31.74	6.67	24.60	-20.44
	14	34.00	33.08	35.69	7.29	27.65	-19.63
	21	36.00	36.54	37.59	2.77	29.13	-25.46
	28	36.00	36.54	38.77	5.74	30.04	-21.64
	76	33.00	31.35	41.94	25.24	32.50	3.52
4	7	29.00	24.43	31.74	23.02	24.60	0.66
	14	31.00	27.89	35.69	21.83	27.65	-0.87
	21	33.00	31.35	37.59	16.58	29.13	-7.64
	28	31.00	27.89	38.77	28.05	30.04	7.15
	77	30.00	26.16	41.97	37.66	32.53	19.56

Amass:	Idade (Dias)	Mediana (R)	$f_{is,r}$ (MPa) (NP 13791)	$f_{cm,cil}$ (t) (MPa)	Δ (%)	$f_{ck,is,cil}$ (t) (MPa)	Δ (%)
1	7	32.00	28.35	31.74	10.69	24.60	-15.25
	14	34.00	31.81	35.69	10.87	27.65	-15.02
	21	-	-	-	-	-	-
	35	35.00	33.54	39.59	15.30	30.68	-9.30
	76	36.00	35.27	41.94	15.91	32.50	-8.52
2	7	35.00	33.54	31.74	-5.66	24.60	-36.35
	15	36.00	35.27	36.03	2.12	27.92	-26.31
	21	39.00	40.46	37.59	-7.64	29.13	-38.90
	29	42.00	45.65	38.90	-17.34	30.15	-51.41
	78	36.00	35.27	42.00	16.04	32.55	-8.35
3	7	32.00	28.35	31.74	10.69	24.60	-15.25
	14	34.00	31.81	35.69	10.87	27.65	-15.02
	21	35.00	33.54	37.59	10.77	29.13	-15.14
	28	38.00	38.73	38.77	0.10	30.04	-28.91
	76	33.00	30.08	41.94	28.28	32.50	7.45
4	7	30.00	24.89	31.74	21.59	24.60	-1.18
	14	30.00	24.89	35.69	30.26	27.65	10.01
	21	33.00	30.08	37.59	19.98	29.13	-3.26
	28	33.00	30.08	38.77	22.42	30.04	-0.11
	77	33.00	30.08	41.97	28.34	32.53	7.53



a) Lajetas sem armadura



b) Lajetas com armadura

Figura 4.10 - Representação gráfica da evolução da resistência à compressão em função do índice esclerométrico.

4.4 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS

4.4.1 Procedimento

Os ensaios foram realizados entre as temperaturas 10°C e 30°C, não sendo necessário corrigir as medições da velocidade.

Em cada utilização do aparelho, foi efetuada a sua calibração com a barra de referência de 20.6 μ s, indicada na Figura 2.19.

Foi efetuada a determinação da velocidade de propagação dos ultrassons pelo método de transmissão direto nas faces laterais do provete, com transdutores de frequência de 54 Hz e 50 mm de diâmetro, posicionados nos alinhamentos A,B e C, com um comprimento de percurso de 600 mm e nos alinhamentos 0, 1 e 2, com um comprimento de percurso de 300 mm, como representado na Figura 4.11. Foi garantida a mesma distância dos transdutores da base, com utilização de calços de 2.2 cm de espessura para apoiar os transdutores.

Foram efetuadas 3 leituras por posição, perfazendo um total de 18 leituras do tempo de propagação por lajeta.

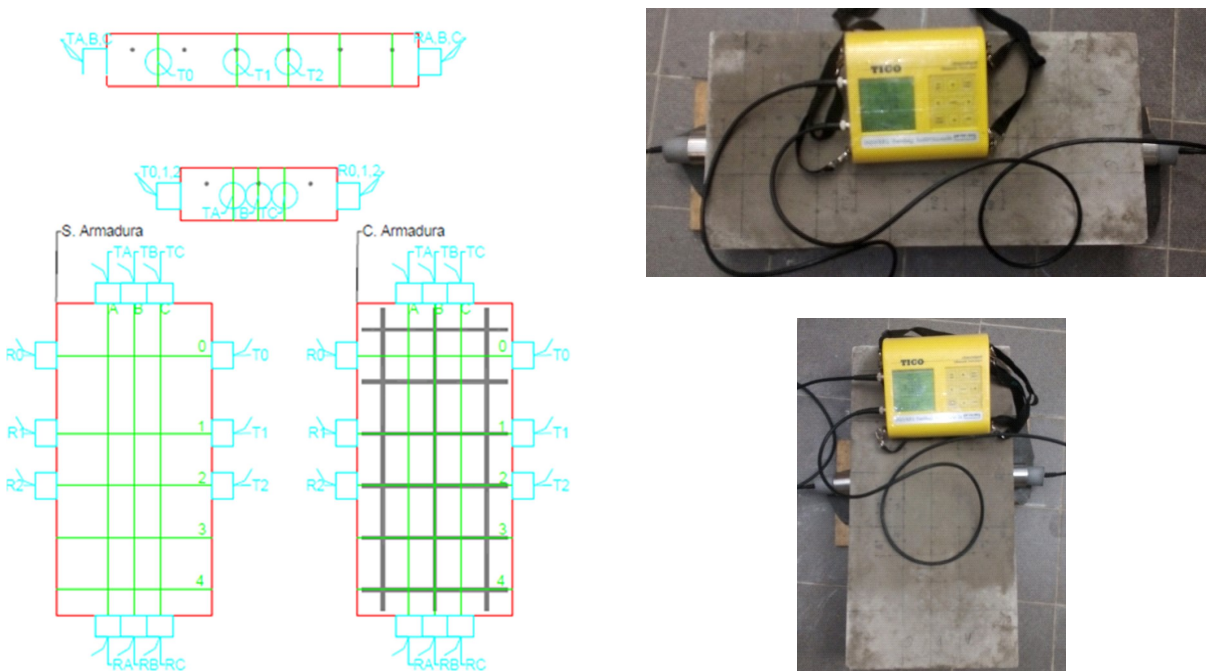


Figura 4.11 – Disposição dos transdutores pelo método direto.

O método de transmissão indireto foi efetuado nos alinhamentos A, B e C, com o transdutor emissor fixo no alinhamento 0, deslocando o transdutor recetor nos alinhamentos 1, 2, 3 e 4, com distâncias entre alinhamentos de 150 mm, 250mm, 350mm e 450mm respetivamente, como representado na

Figura 4.12. Foram efetuadas 3 leituras por posição, perfazendo um total de 36 leituras do tempo de propagação.

A velocidade é corresponde ao inverso do declive da reta obtida, através da equação (2.32)

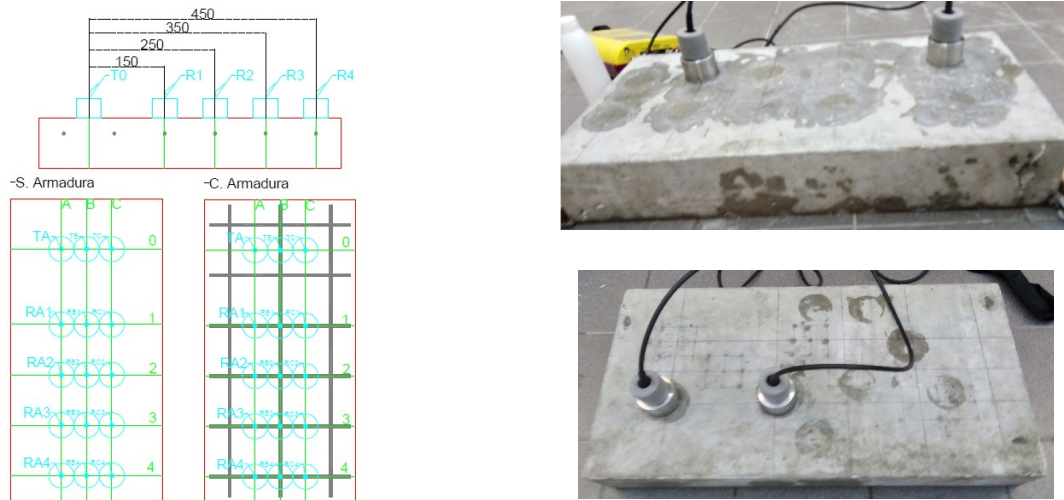


Figura 4.12 – Disposição dos transdutores pelo método indireto.

Para a deteção de defeitos e estimativa da profundidade de fendas, devido aos danos provocados na superfície pelo ensaio de tração direta, foi necessária a elaboração de nova grelha para o posicionamento dos transdutores, representada na Figura 4.13.

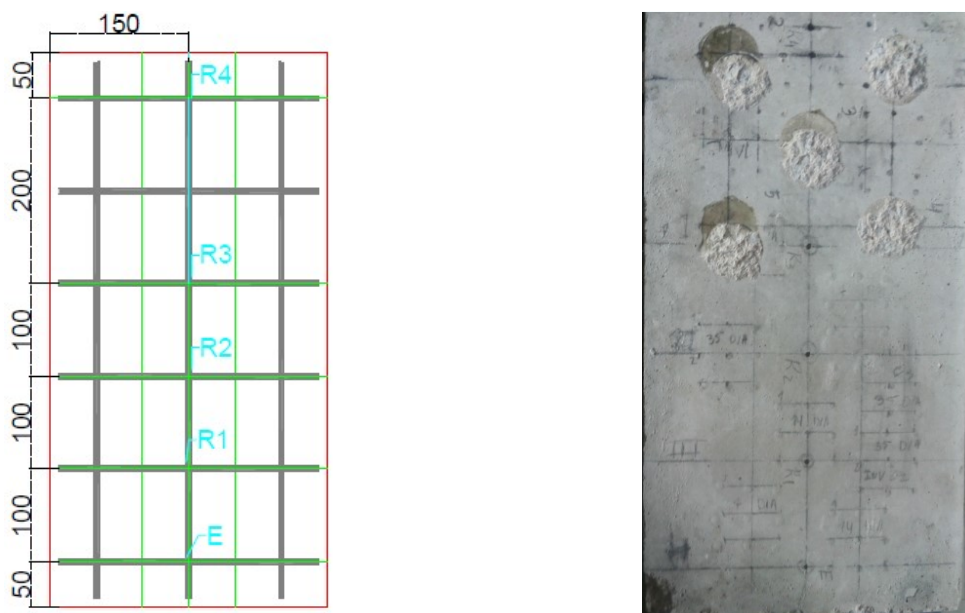


Figura 4.13 – Disposição de transdutores para avaliação de defeitos e profundidade de fendas pelo método indireto.

Verificou-se que a experiência do operador tem influência nos resultados obtidos, sendo necessário o controlo da quantidade de gel a colocar, referenciado na Figura 4.14 e na pressão exercida nos

transdutores, sendo só a necessária para expelir o ar, que se verifica quando se obtêm valores de leitura menores e constantes. No evento de as leituras se tornarem muito díspares, será necessário remover ambos os transdutores e voltar a colocar no sítio.



Figura 4.14 - Gel acoplante (<https://biologik.pt/shop/gel-contacto-incolor/>).

4.4.2 Conclusão do ensaio

EVOLUÇÃO DOS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO INDIRETA PARA DIFERENTES IDADES DO BETÃO

- **Método de transmissão direto**

Na Tabela 4.11 estão resumidos os valores das V.P.U. obtidas pelo método direto nas lajetas, ao longo do tempo.

Para distâncias de 300 mm, os tempos de propagação média variaram entre os 65.32 μs e 69.30 μs para as várias amassaduras. Para a distância de 600 mm, os tempos de propagação média variaram entre os 132.02 μs e 138.41 μs , com velocidades nas lajetas das diferentes amassaduras compreendidas entre os $4.33 \text{ Km/s} \leq V \leq 4.57 \text{ Km/s}$

Com um valores de coeficiente de variação compreendido entre $0.11\% \leq C.V \leq 2.47\%$ para um desvio padrão $0.01 \text{ Km/s} \leq S \leq 0.11 \text{ Km/s}$, conclui-se que este resultado é representativo de uma boa uniformidade onde, para um elemento construído do mesmo lote de betão o valor de coeficiente de variação igual a 1.5% representa boas práticas de construção, elevando-se para 2.5% se envolver betonagem de várias cargas ou elementos de pequenas dimensões.

Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de determinação da V.P.U. pelo método direto.

Amassadura	Elemento	Idade	Nº leituras	300 (mm)	600 (mm)	V, média (Km/s)	S (Km/s)	C.V. (%)
				Média(µs)	Média(µs)			
1	C.Amadura	7	18.00	66.93	136.07	4.45	0.05	1.11
		14	18.00	65.33	132.49	4.56	0.04	0.96
		21	18.00	65.36	132.18	4.57	0.06	1.26
	S.Amadura	35	18.00	65.41	133.09	4.55	0.05	1.01
		7	18.00	67.93	137.13	4.40	0.03	0.69
		14	18.00	66.79	133.67	4.49	0.01	0.11
2	C.Amadura	21	18.00	66.07	132.21	4.54	0.01	0.26
		35	18.00	65.70	133.38	4.53	0.04	0.86
		7	18.00	68.43	137.06	4.38	0.01	0.25
		15	18.00	66.74	134.44	4.48	0.02	0.44
	S.Amadura	21	18.00	66.41	133.72	4.50	0.02	0.47
		29	18.00	65.94	135.26	4.49	0.07	1.51
3	C.Amadura	7	18.00	68.02	136.40	4.40	0.01	0.19
		15	18.00	66.53	133.42	4.50	0.01	0.22
		21	18.00	66.38	133.69	4.50	0.02	0.41
	S.Amadura	29	18.00	66.30	133.73	4.51	0.02	0.53
		7	18.00	67.72	138.27	4.38	0.06	1.36
		14	18.00	66.96	135.62	4.45	0.04	0.90
4	C.Amadura	21	18.00	65.69	135.82	4.49	0.11	2.47
		28	18.00	65.72	132.62	4.54	0.03	0.63
		7	18.00	69.30	138.41	4.33	0.01	0.29
		14	18.00	67.52	135.62	4.43	0.01	0.28
	S.Amadura	21	18.00	66.71	133.69	4.49	0.01	0.22
		28	18.00	66.23	132.78	4.52	0.01	0.26
5	C.Amadura	7	18.00	68.50	138.01	4.36	0.03	0.61
		14	18.00	67.31	135.60	4.44	0.02	0.41
		21	18.00	66.64	133.86	4.49	0.02	0.45
		28	18.00	66.10	133.22	4.52	0.03	0.62
	S.Amadura	7	18.00	68.44	137.23	4.38	0.02	0.56
		14	18.00	67.47	135.23	4.44	0.01	0.17
6	S.Amadura	21	18.00	66.90	133.71	4.49	0.01	0.11
		28	18.00	65.84	132.02	4.55	0.02	0.45

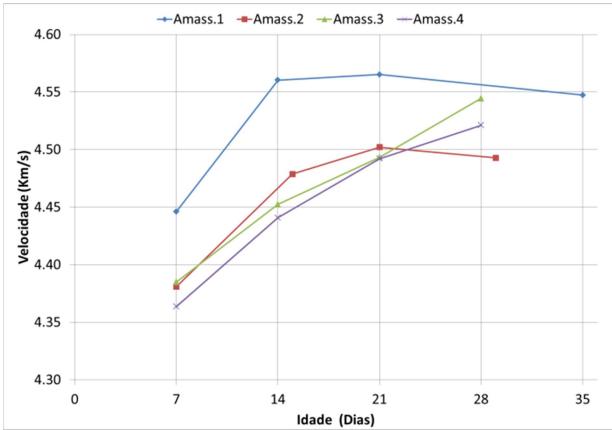
Pela consulta dos gráficos representados na Figura 4.15, verifica-se o aumento da velocidade de propagação de ultrassons em função da idade do betão.

A diferença nas V.P.U. entre amassaduras de composição prescrita deve-se à superior quantidade de agregado presente na amassadura 1, que é de classe de resistência inferior comparativamente à amassadura 2.

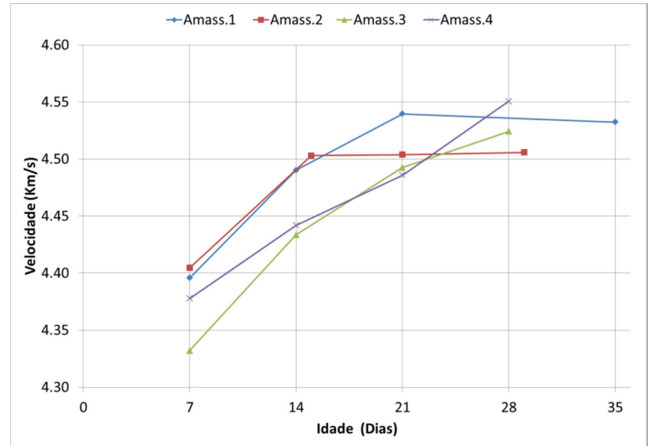
A remoção prematura do tanque de imersão dos provetes da amassadura 1 e 2 teve influência nos resultados obtidos pelo método indireto e direto, provavelmente devido à quantidade de água presente no betão, tendo-se verificado uma diminuição da velocidade na última leitura efetuada, comparativamente com as amassaduras 3 e 4, que continuaram a aumentar.

Pela ordem das amassaduras que fornecem V.P.U. superiores verifica-se que, o ensaio de determinação das V.P.U. é o que melhor se ajusta as amassaduras de composição que influencia o módulo de elasticidade, em que a amassadura 1 é a que apresenta um módulo de elasticidade superior, seguida da amassadura 2, posteriormente a amassadura 4 e por último a amassadura 3.

A velocidade de propagação é superior nas amassaduras com menor quantidade de cimento, superior quantidade de agregado e razão A/C.



a) Lajetas com armadura



b) Lajetas sem armadura

Figura 4.15 – Evolução da V.P.U. ao longo do tempo, pelo método direto.

- **Método de transmissão indireto**

Na Tabela 4.12 estão resumidos os valores obtidos pelo método indireto nas lajetas ao longo do tempo.

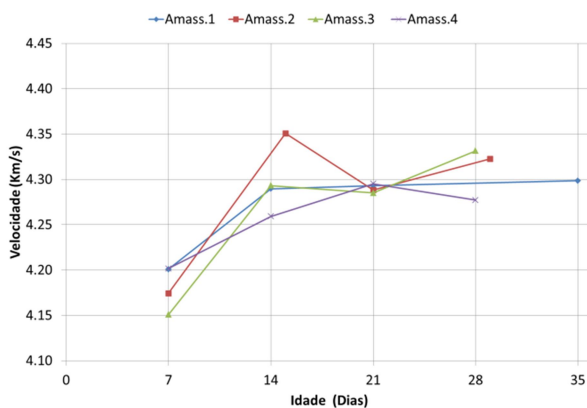
A velocidade média do elemento é obtida da média da velocidade dos três alinhamentos. As V.P.U. das lajetas das quatro amassaduras estão compreendidas entre $4.15 \text{ Km/s} \leq V \leq 4.41 \text{ Km/s}$

Os valores obtidos do desvio padrão da amostra são $0.01 \text{ Km/s} \leq S \leq 0.14 \text{ Km/s}$, com coeficiente de variação compreendidos entre $0.01\% \leq C.V \leq 3.43\%$.

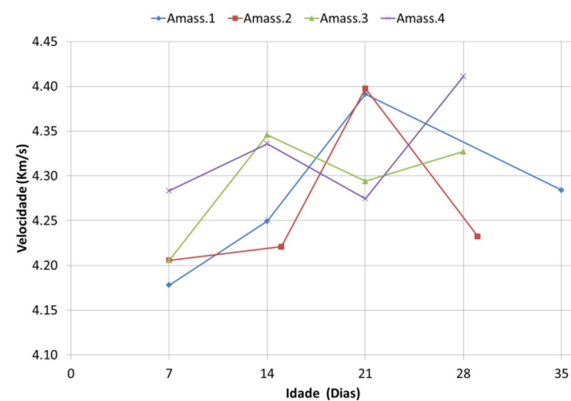
Na análise dos gráficos verifica-se uma maior variabilidade das velocidades obtidas ao longo do tempo, possivelmente devido às diferenças nas condições de humidade à superfície dos elementos, quando foram efetuadas as leituras.

Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de determinação da velocidade de ultrassons pelo método indireto.

Amassadura	Elemento	Idade	Nº leituras	150 (mm)	250 (mm)	350 (mm)	450 (mm)	V _m média (Km/s)	S (Km/s)	C.V. (%)
				Média(µs)	Média(µs)	Média(µs)	Média(µs)			
1	C.Armadura	7	36.00	31.54	54.24	78.20	102.91	4.20	0.04	0.94
		14	36.00	29.98	52.51	76.08	99.86	4.29	0.09	2.21
		21	36.00	30.62	51.77	76.58	100.00	4.29	0.03	0.79
	S.Armadura	35	36.00	31.06	52.67	74.99	101.18	4.30	0.08	1.76
		7	36.00	33.20	56.51	80.62	102.68	4.18	0.14	3.43
		14	36.00	30.53	54.63	77.91	101.22	4.25	0.04	0.94
2	C.Armadura	21	36.00	30.71	51.81	75.61	98.69	4.39	0.03	0.77
		35	36.00	31.32	51.78	75.82	101.12	4.28	0.05	1.18
		7	36.00	31.60	54.96	78.62	103.57	4.17	0.03	0.63
	S.Armadura	15	36.00	30.49	53.24	76.48	99.37	4.35	0.05	1.24
		21	36.00	28.14	51.52	75.56	97.87	4.29	0.02	0.43
		29	36.00	29.94	52.86	76.41	99.21	4.32	0.04	0.94
3	C.Armadura	7	36.00	30.88	54.99	78.90	99.82	4.21	0.01	0.34
		15	36.00	29.90	52.90	77.91	100.54	4.22	0.05	1.19
		21	36.00	29.60	52.41	75.97	97.56	4.40	0.06	1.33
	S.Armadura	29	36.00	31.68	54.11	76.82	102.90	4.23	0.11	2.64
		7	36.00	31.77	54.44	79.10	103.87	4.15	0.07	1.65
		14	36.00	31.22	52.39	76.77	100.74	4.29	0.05	1.05
4	C.Armadura	21	36.00	30.36	52.03	75.43	100.34	4.29	0.01	0.32
		28	36.00	29.60	52.28	75.28	98.90	4.33	0.07	1.50
		7	36.00	31.41	55.53	79.17	102.07	4.21	0.05	1.10
	S.Armadura	14	36.00	31.31	53.70	78.22	99.86	4.35	0.07	1.71
		21	36.00	30.69	52.03	74.84	100.72	4.29	0.06	1.30
		28	36.00	29.76	52.34	76.16	98.86	4.33	0.04	1.03
5	C.Armadura	7	36.00	30.59	55.30	77.40	102.56	4.20	0.01	0.23
		14	36.00	29.61	52.78	75.81	100.20	4.26	0.05	1.09
		21	36.00	30.56	52.46	75.64	100.43	4.30	0.01	0.34
	S.Armadura	28	36.00	28.59	52.19	75.70	98.70	4.28	0.07	1.65
		7	36.00	32.54	54.91	77.73	100.31	4.28	0.05	1.09
		14	36.00	31.52	53.70	77.12	101.12	4.34	0.03	0.65
6	S.Armadura	21	36.00	30.80	53.38	76.46	101.09	4.27	0.02	0.36
		28	36.00	30.36	52.51	75.08	98.40	4.41	0.01	0.25



a) Lajetas com armadura



b) Lajetas sem armadura

Figura 4.16 - Representação da Evolução da V.P.U. entre as diferentes amassaduras pelo método Indireto.

INFLUÊNCIA DA ARMADURA

- **Método de transmissão direto**

É efetuada a comparação das velocidades obtidas, tomando como referência os resultados obtidos nas lajetas sem armadura, nas diferentes idades do betão das lajetas, com e sem armadura, e uma posterior análise dos desvios da velocidade máxima entre os alinhamentos com e sem armadura, das lajetas com armadura.

CAPÍTULO 4

Na Tabela 4.13 estão representadas as velocidades médias obtidas nas lajetas com e sem armadura para as diferentes amassaduras ao longo do tempo e os respectivos valores representados nos gráficos da Figura 4.17.

As velocidades obtidas nas lajes com armadura estão compreendidas entre $4.36 \text{ km/s} \leq V_{\text{média}} \leq 4.57 \text{ km/s}$ e as velocidades nas lajes sem armadura, compreendidas entre $4.33 \text{ km/s} \leq V_{\text{média}} \leq 4.55 \text{ km/s}$.

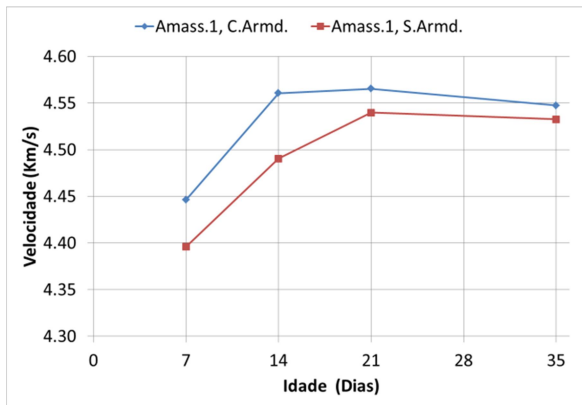
As velocidades das lajes sem armadura nas amassaduras 2 e 4 são superiores ao valor obtido na lajeta com armadura, com diferenças compreendidas entre os $0 \text{ km/s} \leq \Delta V_{\text{média}} \leq 0.02 \text{ km/s}$, em termos percentuais $0.02\% \leq \Delta \leq 0.54\%$.

As velocidades nas lajes com armadura são superiores ao valor obtido na lajeta sem armadura, com diferenças compreendidas entre os $0 \text{ km/s} \leq \Delta V_{\text{média}} \leq 0.07 \text{ km/s}$, em termos percentuais entre $0.02\% \leq \Delta \leq 1.56\%$ para as amassaduras 1, 3 e amassadura 4.

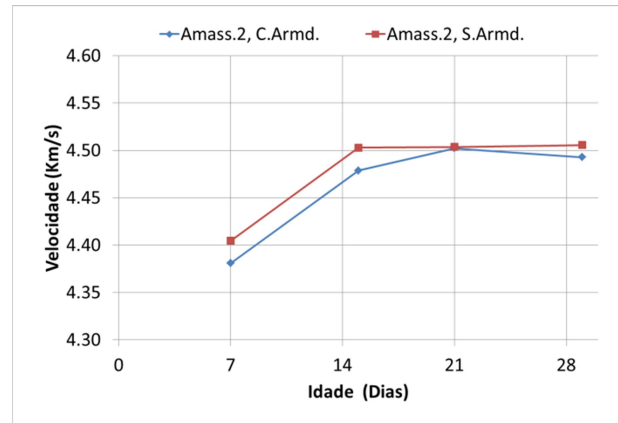
Não se verificou uma tendência clara da influência da armadura nas V.P.U. médias nas lajetas com e sem armadura.

Tabela 4.13 - Variação da V.P.U. médias entre lajes com e sem armadura pelo método direto.

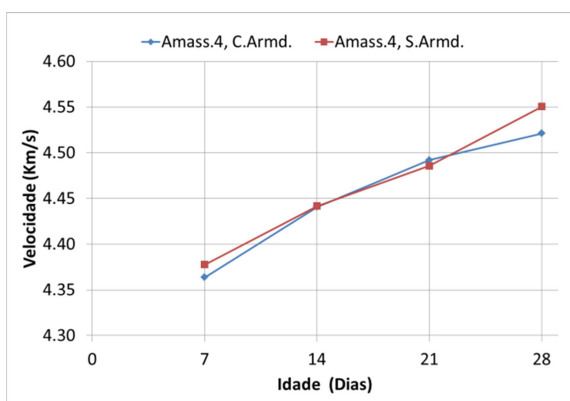
Amassadura	Idade (Dias)	V _{média} (km/s)		Δ(%)
		C.Armad.	S.Armad.	
1	7	4.45	4.40	1.14%
	14	4.56	4.49	1.56%
	21	4.57	4.54	0.57%
	35	4.55	4.53	0.33%
2	7	4.38	4.40	-0.54%
	15	4.48	4.50	-0.54%
	21	4.50	4.50	-0.04%
	29	4.49	4.51	-0.29%
3	7	4.38	4.33	1.22%
	14	4.45	4.43	0.43%
	21	4.49	4.49	0.02%
	28	4.54	4.52	0.45%
4	7	4.36	4.38	-0.34%
	14	4.44	4.44	-0.02%
	21	4.49	4.49	0.14%
	28	4.52	4.55	-0.64%



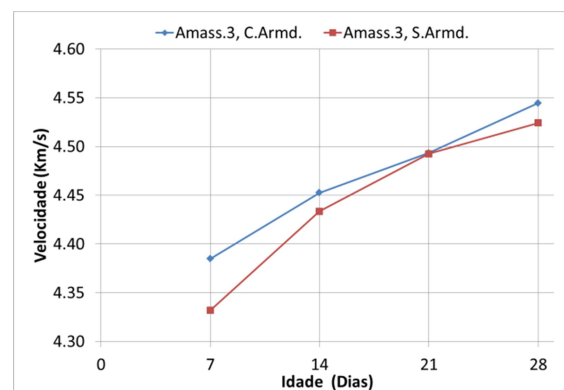
a) Amassadura 1



b) Amassadura 2



c) Amassadura 4



d) Amassadura 3

Figura 4.17 - Média das V.P.U. entre lajetas com e sem armadura pelo método direto.

Com o intuito de verificar a influência da armadura no tempo de propagação, procedeu-se à análise das V.P.U. nos alinhamentos com armadura e sem armadura, nas lajetas com armadura.

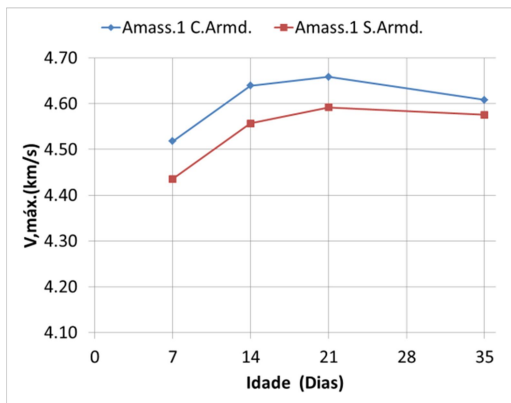
Na Tabela 4.14 estão representados os valores máximos das velocidades nos alinhamentos com armadura e sem armadura, na direção paralela ao percurso de propagação dos ultrassons nas lajetas com armadura das quatro amassaduras.

As velocidades dos alinhamentos com armadura estão compreendidas entre $4.39 \text{ km/s} \leq V_{m\acute{a}x.} \leq 4.66 \text{ km/s}$, sendo, em termos percentuais, $0.07\% \leq \Delta \leq 2.08\%$ superiores as velocidades dos alinhamentos sem armadura, que estão compreendidas entre $4.36 \text{ km/s} \leq V_{m\acute{a}x.} \leq 4.59 \text{ km/s}$.

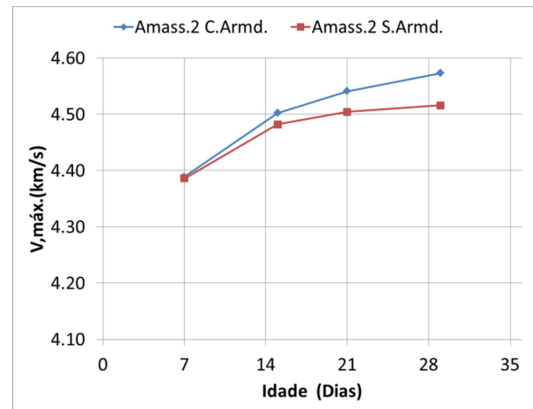
É perceptível da análise dos gráficos da Figura 4.18 que os valores máximos da V.P.U. obtidos nas diferentes idades, é sempre superior nos alinhamentos com armadura.

Tabela 4.14 - Máximas V.P.U. nos alinhamentos com e sem armadura das lajes com armadura pelo método direto.

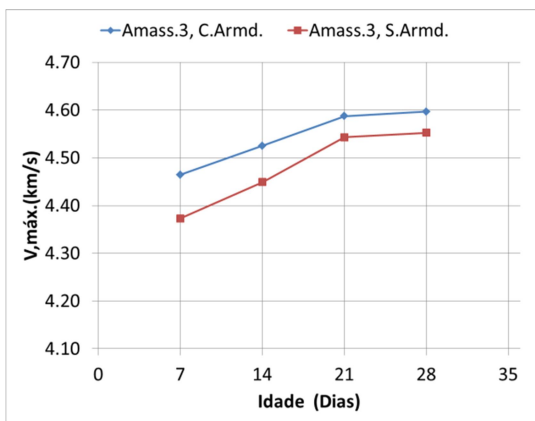
Amassadura	Idade (Dias)	V _i Máxima (km/s)		Δ(%)
		Alinhamento		
		C.Armadura.	S.Armadura.	
1	7	4.52	4.44	1.86%
	14	4.64	4.56	1.80%
	21	4.66	4.59	1.45%
	35	4.61	4.58	0.72%
2	7	4.39	4.39	0.07%
	15	4.50	4.48	0.45%
	21	4.54	4.50	0.81%
	29	4.57	4.52	1.27%
3	7	4.46	4.37	2.08%
	14	4.52	4.45	1.71%
	21	4.59	4.54	0.97%
	28	4.60	4.55	0.97%
4	7	4.41	4.36	1.18%
	14	4.46	4.45	0.20%
	21	4.51	4.50	0.13%
	28	4.56	4.52	0.91%



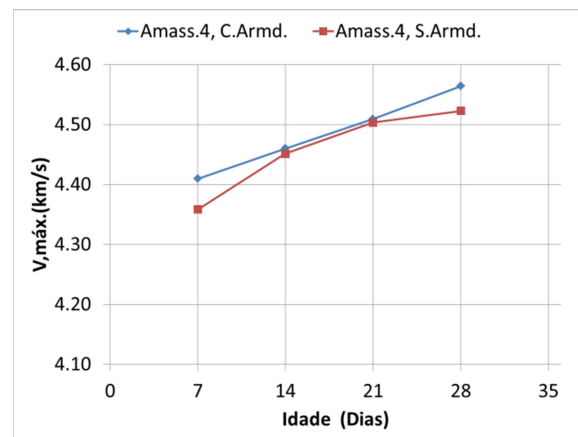
a) Amassadura 1



b) Amassadura 2



c) Amassadura 3



d) Amassadura 4

Figura 4.18 - V.P.U. Máximas obtidas nos alinhamentos com e sem armadura nas lajetas com armadura pelo método direto.

Verificada a falta de evidência da influência da armadura na V.P.U. entre as lajes com e sem armadura, é na comparação das V.P.U. obtidas nos alinhamentos com e sem armadura das lajetas com armadura, que se faz notar a sua influência.

- **Método de transmissão indireto**

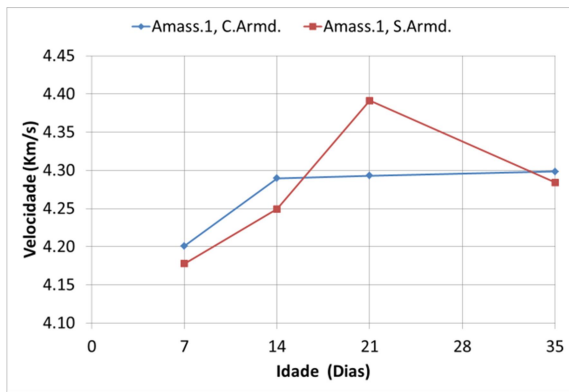
Na Tabela 4.15 estão representadas as velocidades obtidas nas diferentes lajetas, com e sem armadura, para as diferentes amassaduras durante o tempo, com os respectivos valores representados pelos gráficos da Figura 4.19.

As velocidades obtidas nas lajes com armadura, estão compreendidas entre $4.15 \text{ km/s} \leq V_{\text{média}} \leq 4.35 \text{ km/s}$ e as velocidades nas lajes sem armadura, compreendidas entre $4.11 \text{ km/s} \leq V_{\text{média}} \leq 4.41 \text{ km/s}$.

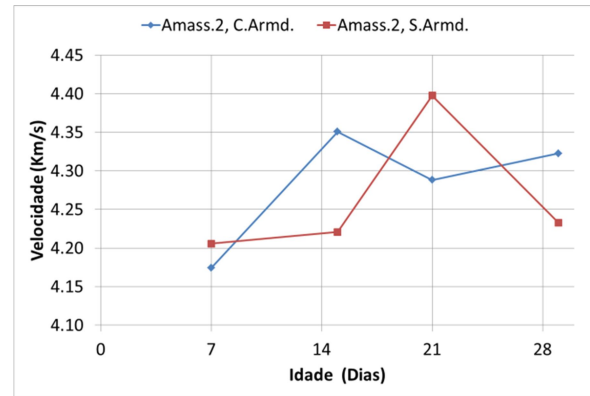
Da análise dos gráficos da V.P.U. em função da idade do betão representados na Figura 4.19 verifica-se que as velocidades das lajetas sem armadura das amassaduras 1, 2, 3 e 4 são superiores, com diferenças compreendidas entre os $0.01 \text{ km/s} \leq \Delta V_{\text{média}} \leq 0.13 \text{ km/s}$, em termos percentuais $0.21\% \leq \Delta \leq 3.04\%$. e as velocidades nas lajetas com armadura das amassaduras 1, 2, 3 e 4 são superiores com diferenças compreendidas entre os $0 \text{ km/s} \leq \Delta V_{\text{média}} \leq 0.13 \text{ km/s}$ $0.10\% \leq \Delta \leq 3.08\%$.

Tabela 4.15 - Variação da V.P.U. média entre lajes com e sem armadura pelo método indireto.

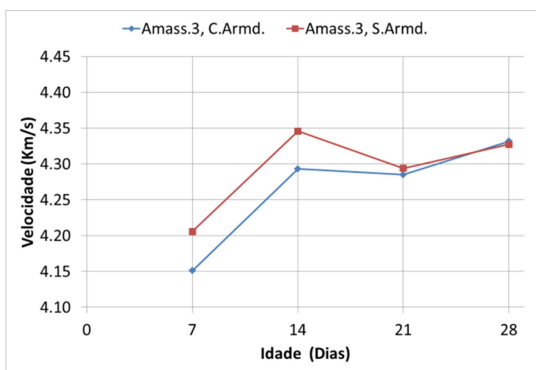
Amassadura	Idade (Dias)	V, média (km/s)		Δ(%)
		C.Armad.	S.Armad.	
1	7	4.20	4.18	0.55%
	14	4.29	4.25	0.95%
	21	4.29	4.39	-2.24%
	35	4.30	4.28	0.34%
2	7	4.17	4.21	-0.74%
	15	4.35	4.22	3.08%
	21	4.29	4.40	-2.49%
	29	4.32	4.23	2.13%
3	7	4.15	4.11	0.90%
	14	4.29	4.35	-1.21%
	21	4.29	4.29	-0.21%
	28	4.33	4.33	0.10%
4	7	4.20	4.28	-1.90%
	14	4.26	4.34	-1.76%
	21	4.30	4.27	0.48%
	28	4.28	4.41	-3.04%



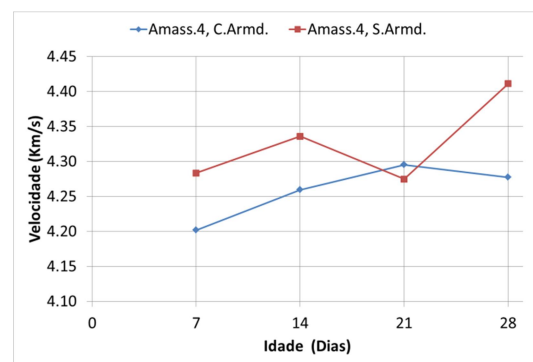
a) Amassadura 1



b) Amassadura 2



c) Amassadura 3



d) Amassadura 4

Figura 4.19 - Média das V.P.U. entre lajetas com e sem armadura pelo método indireto.

Da análise dos valores máximos das V.P.U. nos alinhamentos com e sem armadura nas lajes com armadura, nas diferentes idades, representados na Tabela 4.16 verificou-se uma variação das velocidades obtidas nos alinhamentos com armadura, compreendidas entre $4.16 \text{ km/s} \leq V_{m\acute{a}x.} \leq 4.36 \text{ km/s}$, superior ao alinhamento sem armadura das amassaduras 2 e 4, com diferenças compreendidas entre os $0.01 \text{ km/s} \leq \Delta V_{m\acute{a}x.} \leq 0.03 \text{ km/s}$ em termos percentuais $0.14\% \leq \Delta \leq 0.64\%$.

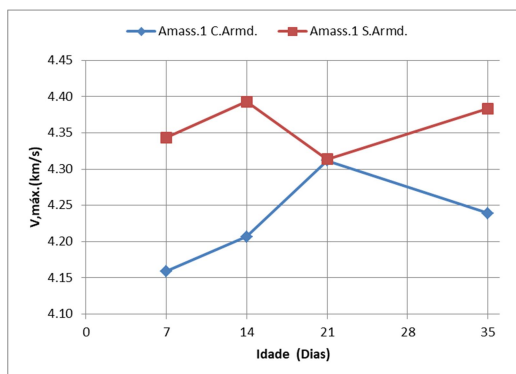
E velocidades nos alinhamentos sem armadura, compreendidas entre $4.19 \text{ km/s} \leq V_{m\acute{a}x.} \leq 4.40 \text{ km/s}$, superiores as V.P.U. nos alinhamentos com armadura para as lajetas das quatro amassaduras, com diferenças compreendidas entre os $0 \text{ km/s} \leq \Delta V_{m\acute{a}x.} \leq 0.18 \text{ km/s}$, em termos percentuais entre $0.04\% \leq \Delta \leq 4.24\%$.

É perceptível nos gráficos na Figura 4.16, que é nos alinhamentos sem armadura que a V.P.U é maioritariamente superior, nas diferentes idades do betão possivelmente devido à influência da humidade ou diferenças nas propriedades do betão à superfície.

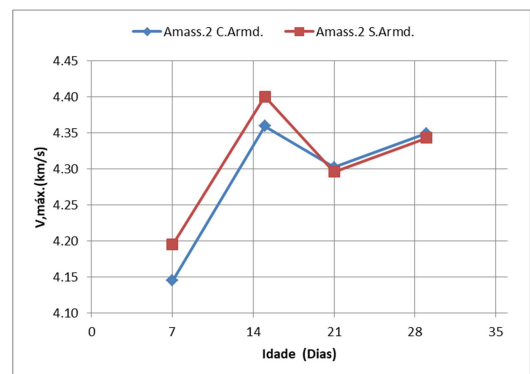
Na análise efetuada não é perceptível, como no método de transmissão direta, a influência da armadura na V.P.U. no método de transmissão indireto, devido a sensibilidade do método indireto as propriedades físicas e químicas do betão à superfície.

Tabela 4.16 - Máximas V.P.U. nos alinhamentos com e sem armadura das lajes com armadura pelo método indireto.

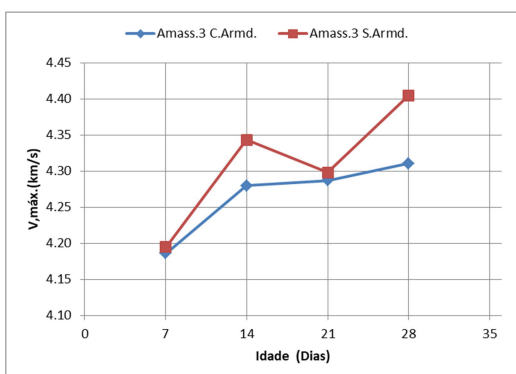
Amassadura	Idade (Dias)	V, Máxima (km/s)		Δ(%)
		Alinhamento		
		C.Armad.	S.Armad.	
1	7	4.16	4.34	-4.24%
	14	4.21	4.39	-4.24%
	21	4.31	4.31	-0.04%
	35	4.24	4.38	-3.29%
2	7	4.14	4.19	-1.19%
	15	4.36	4.40	-0.93%
	21	4.30	4.30	0.14%
	29	4.35	4.34	0.14%
3	7	4.19	4.19	-0.21%
	14	4.28	4.34	-1.47%
	21	4.29	4.30	-0.26%
	28	4.31	4.40	-2.14%
4	7	4.20	4.21	-0.14%
	14	4.30	4.27	0.64%
	21	4.29	4.31	-0.44%
	28	4.30	4.33	-0.60%



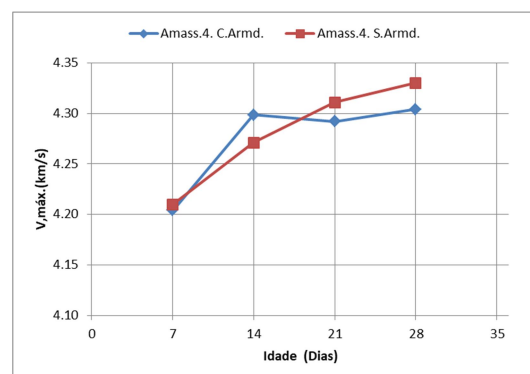
a) Amassadura 1



b) Amassadura 2



c) Amassadura 3



d) Amassadura 4

Figura 4.20 - Máximas V.P.U. obtidas nos alinhamentos com e sem armadura nas lajetas com armadura pelo método indireto.

DIFERENÇA ENTRE MÉTODOS DE TRANSMISSÃO

Na consulta dos valores da Tabela 4.17, representados na Figura 4.21, verificam-se, pela comparação de 32 pontos, as diferenças de V.P.U. obtidas nas diferentes idades nas lajetas, com e sem armadura, das 4 amassaduras.

O método direto fornece leituras de velocidades entre os $0.15 \text{ km/s} \leq \Delta V_{\text{média}} \leq 0.22 \text{ km/s}$, em termos percentuais $1.98\% \leq \Delta \leq 7.01\%$ superior ao método indireto.

Tabela 4.17 - Variação da V.P.U. entre o método direto e indireto.

Amass.	Ref:	Idade (Dias)	Met. Directo	Met. Indirecto	$\Delta(\%)$
			$V_{\text{media}}(\text{Km/s})$	$V_{\text{media}}(\text{Km/s})$	
1	C.Arm.	7	4.45	4.20	5.51%
		14	4.56	4.29	5.94%
		21	4.57	4.29	5.96%
		35	4.55	4.30	5.47%
		76	4.53	4.26	5.81%
	S.Arm.	7	4.40	4.18	4.96%
		14	4.49	4.25	5.37%
		21	4.54	4.39	3.27%
		35	4.53	4.28	5.48%
		76	4.48	4.16	7.01%
2	C.Arm.	7	4.38	4.17	4.71%
		15	4.48	4.35	2.86%
		21	4.50	4.29	4.75%
		29	4.49	4.32	3.79%
		78	4.44	4.19	5.59%
	S.Arm.	7	4.40	4.21	4.52%
		15	4.50	4.22	6.27%
		21	4.50	4.40	2.36%
		29	4.51	4.23	6.06%
		78	4.49	4.21	6.14%
3	C.Arm.	7	4.38	4.15	5.34%
		14	4.45	4.29	3.58%
		21	4.49	4.29	4.63%
		28	4.54	4.33	4.69%
		76	4.39	4.15	5.29%
	S.Arm.	7	4.33	4.11	5.03%
		14	4.43	4.35	1.98%
		21	4.49	4.29	4.42%
		28	4.52	4.33	4.35%
		76	4.39	4.12	6.11%
4	C.Arm.	7	4.36	4.20	3.69%
		14	4.44	4.26	4.09%
		21	4.49	4.30	4.38%
		28	4.52	4.28	5.40%
		77	4.37	4.12	5.66%
	S.Arm.	7	4.38	4.28	2.16%
		14	4.44	4.34	2.38%
		21	4.49	4.27	4.71%
		28	4.55	4.41	3.06%
		77	4.37	4.16	4.72%

A VPU é invariavelmente inferior no método indireto, quando comparada com a obtida pelo método direto. A norma Britânica [26] refere que podem ser encontradas variações da velocidade de 5% a 20% entre estes dois métodos. Isto pode ficar a dever-se a um conjunto de fatores. Desde logo devido à redução de amplitude do sinal que, no método indireto, para um dado comprimento de onda, pode ser de apenas 2% a 3% no transdutor recetor, quando comparado com o método direto. Por outro lado, o método indireto é usualmente influenciado pelas propriedades do betão da superfície. A estes aspetos acresce a incerteza quanto ao exato comprimento do percurso da transmissão em resultado da

dimensão relativa das áreas de contacto entre os transdutores e o betão, face à distância entre emissor e recetor.

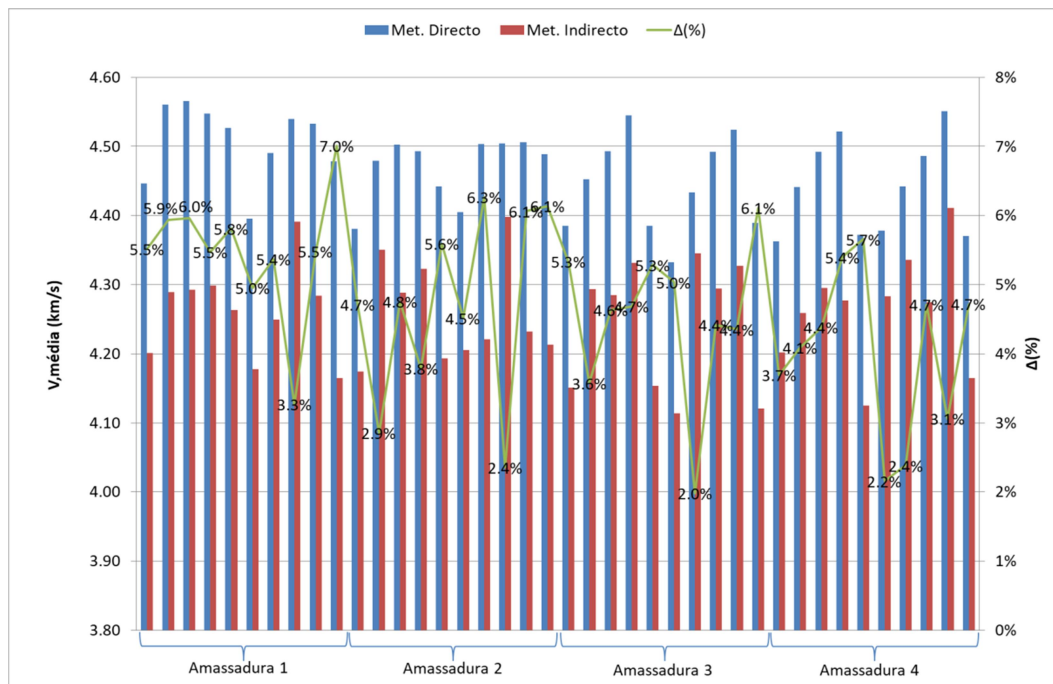


Figura 4.21 - Variação percentual da V.P.U. entre os métodos de transmissão.

INFLUÊNCIA DE HUMIDADE NA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DOS ULTRASSONS

Antes da colocação das lajes no tanque de imersão, procedeu-se ao ensaio de ultrassons pelo método de transmissão direto, de forma a obter os tempos de referência base. Após os 7 dias de imersão, logo após se retirar as lajes do tanque, efetuou-se a leitura das velocidades de propagação dos ultrassons nas lajes saturadas. Repetiram-se as leituras nas lajes após 7 dias de secagem.

Estão resumidos na Tabela 4.18, com respetiva representação gráfica dos resultados na Figura 4.22, as velocidades obtidas e respetivas variações entre as diferentes condições de humidade.

Na presente análise, para o betão em estudo, verificou-se um aumento da velocidade nos provetes saturados de $1.06\% \leq \Delta \leq 2.17\%$, com diferenças de velocidade $0.05 \text{ km/s} \leq \Delta V_{\text{média}} \leq 0.09 \text{ km/s}$, comparativamente com os tempos de referência.

A diferença das velocidades nas lajetas após 7 dias de secagem e antes de colocar em imersão foi de $-0.04 \text{ km/s} \leq \Delta V_{\text{média}} \leq 0.02 \text{ km/s}$, em termos percentuais $-0.51\% \leq \Delta \leq 0.57\%$, podendo concluir-se, baseado neste valores, que passados os 7 dias de secagem as condições são semelhantes às condições das lajetas antes de as colocar em imersão.

Tabela 4.18 - Resultados da V.P.U. para as diferentes condições de humidade.

Amass.	Cond. Humd.	Ref:	nº leituras:	Idade (Dias)	Vmédia (Km/s)	Δ(%)
1	PRÉ-IMERSÃO	S.Armd.	36	112	4.43	-
		C.Armd.			4.47	-
	SATURADO	S.Armd.	36	119	4.51	-1.84%
		C.Armd.			4.57	-2.16%
	APÓS SECAGEM	S.Armd.	36	126	4.43	0.03%
		C.Armd.			4.46	0.34%
2	PRÉ-IMERSÃO	S.Armd.	36	107	4.47	-
		C.Armd.			4.44	-
	SATURADO	S.Armd.	36	114	4.52	-1.11%
		C.Armd.			4.52	-1.76%
	APÓS SECAGEM	S.Armd.	36	121	4.45	0.43%
		C.Armd.			4.42	0.43%
3	PRÉ-IMERSÃO	S.Armd.	36	90	4.34	-
		C.Armd.			4.38	-
	SATURADO	S.Armd.	36	97	4.39	-1.06%
		C.Armd.			4.44	-1.52%
	APÓS SECAGEM	S.Armd.	36	104	4.33	0.24%
		C.Armd.			4.35	0.51%
4	PRÉ-IMERSÃO	S.Armd.	36	85	4.32	-
		C.Armd.			4.32	-
	SATURADO	S.Armd.	36	92	4.41	-1.87%
		C.Armd.			4.41	-2.17%
	APÓS SECAGEM	S.Armd.	36	99	4.34	-0.34%
		C.Armd.			4.34	-0.57%

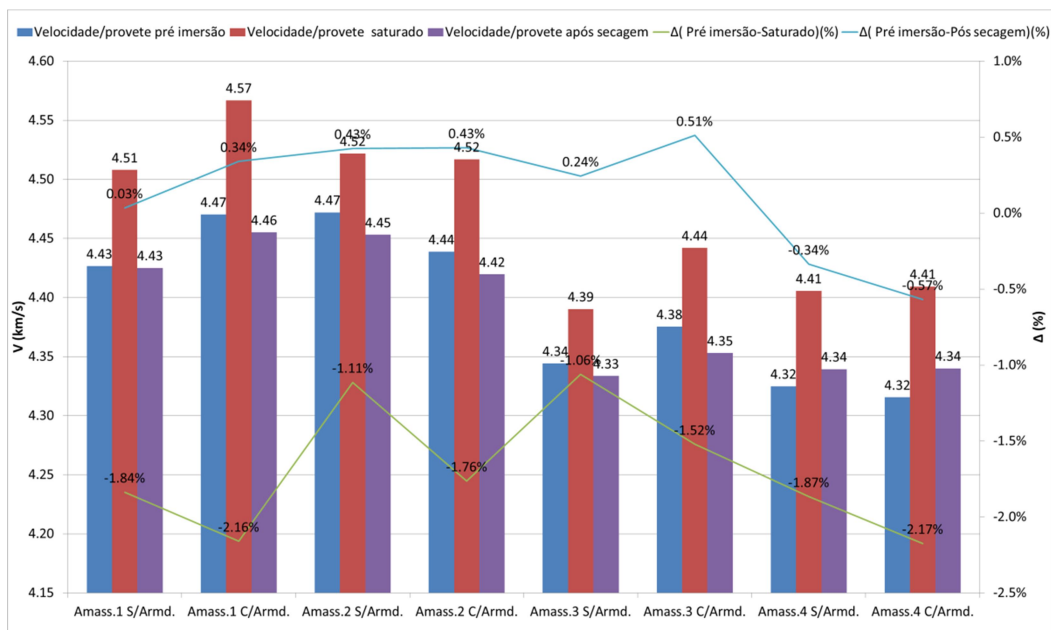


Figura 4.22 - Comparação dos resultados obtidos das V.P.U. em diferentes condições de humidade.

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA

Foi efetuado o ensaio de determinação da velocidade de propagação dos ultrassons nas lajetas, com e sem armadura, das quatro amassaduras, nas idades apresentadas na Tabela 4.19, pelo método de transmissão direto, para o desenvolvimento das relações com a resistência à compressão e estimativa do módulo de elasticidade. Os resultados obtidos apresentam um coeficiente de variação de $0.12 \% \leq C.V. \leq 1.27\%$.

Tabela 4.19 - Resultados obtidos do ensaio V.P.U pelo método direto nas lajes para elaboração das correlações.

Amassadura	Elemento	Idade	Nº leituras	300 (mm)	600 (mm)	V, média (Km/s)	S (Km/s)	C.V. (%)
				Média(µs)	Média(µs)			
1	C.Armadura	76	18.00	66.17	132.78	4.53	0.02	0.49
	S.Armadura	76	18.00	67.16	133.64	4.48	0.02	0.47
2	C.Armadura	78	18.00	66.82	136.53	4.44	0.06	1.27
	S.Armadura	78	18.00	66.86	133.61	4.49	0.01	0.12
3	C.Armadura	76	18.00	68.50	136.63	4.39	0.01	0.24
	S.Armadura	76	18.00	68.56	136.29	4.39	0.02	0.45
4	C.Armadura	77	18.00	68.24	138.00	4.37	0.04	0.85
	S.Armadura	77	18.00	68.51	137.53	4.37	0.01	0.26

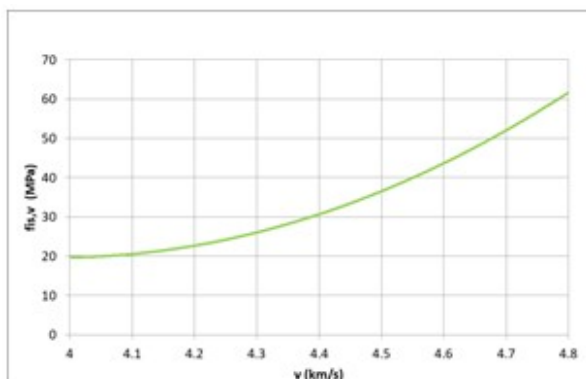
• **RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DOS ULTRASSONS**

A metodologia para a obtenção de correlações de caracterização da resistência à compressão das lajetas com e sem armadura é o descrito na norma [1], com respetivo deslocamento das curvas base representado na Figura 4.23, tendo-se obtido as equação (4.5) e (4.6) dos valores resumidos na Tabela 4.20, pelo método de transmissão direto.

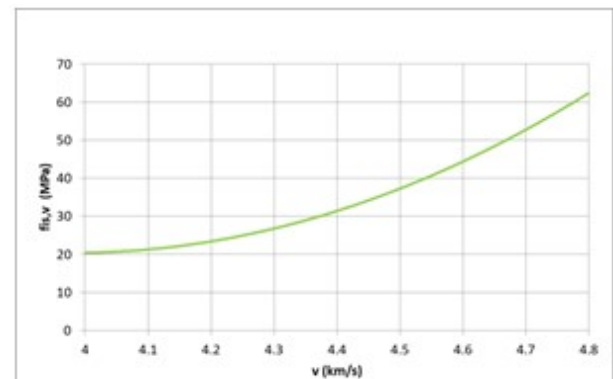
Tabela 4.20 - Cálculo do deslocamento da curva base, obtidos do ensaio V.P.U. pelo método direto.

Amass.	Vm,lajetas (km/s)	Ref:	fc,cil (MPa)	fv (MPa)	δf (MPa)	δf,m(n) (MPa)	s (MPa)	k1	Δf (MPa)
1	4.53	1P2	45.09	18.64	26.44	29.02	6.33	1.48	19.66
		1P4*	45.22	18.64	26.58				
		1P5	47.91	18.64	29.27				
		1P6	45.87	18.64	27.23				
2	4.44	2P1	47.39	13.32	34.07				
		2P2	47.46	13.32	34.14				
		2P3*	45.67	13.32	32.35				
		2P6	46.85	13.32	33.53				
3	4.39	3P0	44.84	10.25	34.59				
		3P1*	46.15	10.25	35.90				
		3P3	45.99	10.25	35.74				
		3P4	45.42	10.25	35.17				
4	4.37	4P0*	29.17	9.58	19.59				
		4P1	28.53	9.58	18.95				
		4P2	29.05	9.58	19.47				
		4P6	30.93	9.58	21.35				

Amass.	Vm,lajetas (km/s)	Ref:	fc,cil (MPa)	fv (MPa)	δf (MPa)	δf,m(n) (MPa)	s (MPa)	k1	Δf (MPa)
1	4.48	1P2	45.09	15.50	29.58	29.06	5.86	1.48	20.40
		1P4*	45.22	15.50	29.72				
		1P5	47.91	15.50	32.41				
		1P6	45.87	15.50	30.37				
2	4.49	2P1	47.39	16.17	31.23				
		2P2	47.46	16.17	31.30				
		2P3*	45.67	16.17	29.50				
		2P6	46.85	16.17	30.68				
3	4.39	3P0	44.84	10.44	34.39				
		3P1*	46.15	10.44	35.71				
		3P3	45.99	10.44	35.55				
		3P4	45.42	10.44	34.97				
4	4.37	4P0*	29.17	9.52	19.66				
		4P1	28.53	9.52	19.01				
		4P2	29.05	9.52	19.53				
		4P6	30.93	9.52	21.42				



a) Lajeta com armadura



b) Lajeta sem armadura

Figura 4.23 - Curva de relação entre a resistência à compressão e V.P.U.

$$f_{is,v} = 62.5 * v^2 - 497.5 * v + 1009.7; 4 \leq v \leq 4.8 \tag{4.5}$$

$$f_{is,v} = 62.5 * v^2 - 497.5 * v + 1010.4; 4 \leq v \leq 4.8 \tag{4.6}$$

RELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *IN SITU* CARACTERÍSTICA COM A CLASSE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Dos 24 resultados da resistência à compressão *in situ* obtidos para cada idade do ensaio nas lajetas das quatro amassaduras, procedeu-se ao cálculo da resistência à compressão *in situ*, representados na Tabela 4.21.

Foram admitidos os resultados de ambas as lajetas na mesma análise, por não se verificaram tendências que permitam estabelecer diferenças de resultados entre as lajetas com e sem armadura.

É possível concluir dos valores da resistência à compressão *in situ* nas diferentes idades, que é nas primeiras idades, quando as lajetas se encontravam em imersão, que se obtêm as resistências características *in situ* superiores, compreendidas entre os $25.88MPa \leq f_{ck,is,v} \leq 32.56MPa$, devido as lajetas se encontrarem saturadas de água.

O valor da resistência característica *in situ* aos 77 dias, é inferior, com valor $f_{ck,is,v}(77) = 29.46MPa$ que da consulta da Tabela2.6 corresponde à classe de betão C30/37, inferior à obtida pela avaliação da resistência característica à compressão *in situ*, por métodos diretos, $f_{ck,is,cil}(77) = 32.53 Mpa$, classe de resistência C35/45.

Tabela 4.21 - Avaliação da resistência à compressão *in situ* pelo V.P.U.

Idade	f,m(n),is (MPa)	f,is,menor (MPa)	S (MPa)	f,ck,is (MPa)
7	30.48	27.06	3.00	26.04
14	35.45	27.06	4.08	29.40
21	36.72	31.76	3.77	31.15
28	36.00	30.65	3.00	31.56
77	32.67	27.02	4.11	26.59

Idade	f,m(n),is (MPa)	f,is,menor (MPa)	S (MPa)	f,ck,is (MPa)
7	30.32	27.63	3.00	25.88
14	35.17	30.35	3.00	30.73
21	36.89	33.16	3.00	32.45
28	37.00	32.49	3.00	32.56
77	34.09	29.32	3.13	29.46

a) Lajetas com armadura

b) Lajetas sem armadura

ANÁLISE COMPARATIVA DAS CORRELAÇÕES COM RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

No presente capítulo efetuou-se a análise dos desvios entre as correlações em função das V.P.U. obtidas pelo método de transmissão direto, desenvolvidas por P. Turgut [32] e M. C. S. Nepomuceno [33] e a aqui desenvolvida como preconizada na [1] com os resultados de referencia da resistência à compressão de cada provete cilíndrico, ($f_{c,cil}$), obtido laboratorialmente, como intuito de verificar a sua aplicabilidade na caraterização de amassaduras com composição semelhante.

Os valores da resistência *in situ*, obtidos da relação desenvolvida por [33], foram multiplicadas por 0.8 para converter a resistência à compressão equivalente a um cilindro.

Foram admitidos os resultados de ambas as lajetas na mesma análise por não se verificarem tendências que permitam estabelecer diferenças de resultados entre as lajetas com e sem armadura.

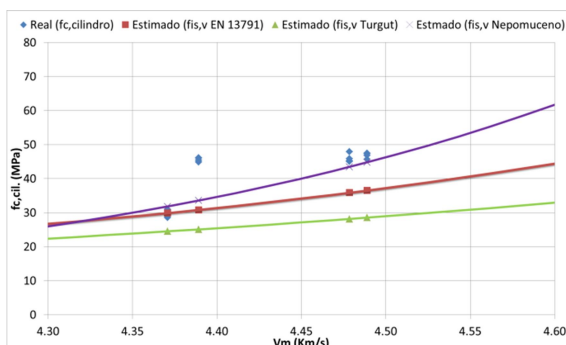
Dos desvios representados na Tabela 4.22 com sua dispersão representada nos gráficos da Figura 4.24, verificou-se que a resistência à compressão *in situ*, obtida da correlação definida pela metodologia descrita na norma [1], apresenta uma variação com a resistência à compressão “real” compreendida entre $-14.31MPa (Inf.) \leq \Delta f_{is,v} \leq 1.38MPa (sup.)$, em termos percentuais $-33.18% (inf.) \leq \Delta \leq 4.86% (sup.)$. A correlação desenvolvida pelo autor [32] varia entre $-3.99MPa \leq \Delta f_{is,v} \leq -21.18MPa$, em termos percentuais $-13.97% \leq \Delta \leq -45.90%$, inferior ao “real” e a correlação desenvolvida por [33] varia entre $-13.3MPa (Inf.) \leq \Delta f_{is,v} \leq 3.42MPa (sup.)$, em termos percentuais $-28.04% (inf.) \leq \Delta \leq 11.99% (sup.)$.

Pode concluir-se que é a correlação desenvolvida de acordo com a [1] em ambas as lajetas a que mais se aproxima do real.

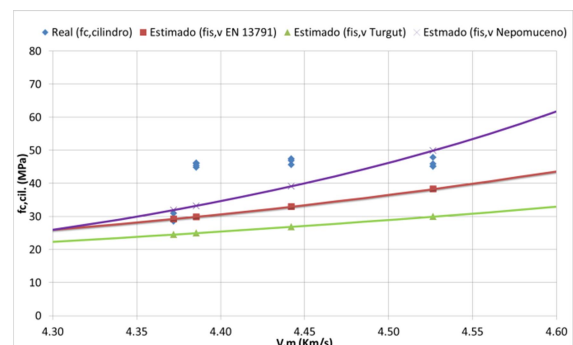
Tabela 4.22 - Valores de resistência à compressão estimada por diferentes autores em função da V.P.U..

Amass:	Ref:	Vm,lajetas (km/s)	Real (Lab.)			(EN 13791)		(P.Turgut)		(Nepomuceno)			
			fc,cil. (MPa)	fis,v (MPa)	Δ (%)	fis,v (MPa)	Δ (%)	fis,v (MPa)	Δ (%)				
1	1P2	4.48	45.09	35.90	20.38	28.15	37.56	43.45	3.63	1P4*	45.22		
	1P4*		20.62								37.75	3.93	
	1P5		47.91								25.07	41.24	9.31
	1P6		45.87								21.74	38.63	5.28
	2P1		47.39								22.85	39.78	5.49
2	2P2	4.49	47.46	36.56	22.97	28.54	39.87	44.79	5.63	2P3*	45.67		
	2P3*		19.94							37.51	1.92		
	2P6		46.85							21.96	39.08	4.39	
	3P0		44.84							31.22	44.03	25.11	
3	3P1*	4.39	46.15	30.84	33.18	25.09	45.63	33.58	27.25	3P3	45.99		
	3P3		32.95							45.44	27.00		
	3P4		45.42							32.10	44.75	26.07	
	4P0*		29.17							-2.53	16.02	-9.09	
4	4P1	4.37	28.53	29.91	-4.86	24.50	14.11	31.83	-11.57	4P2	29.05		
	4P2		29.05							-2.97	15.66	-9.56	
	4P6		30.93							3.30	20.80	-2.89	

Amass:	Ref:	Vm,lajetas (km/s)	Real (Lab.)			(EN 13791)		(P.Turgut)		(Nepomuceno)		
			fc,cil. (MPa)	fis,v (MPa)	Δ (%)	fis,v (MPa)	Δ (%)	fis,v (MPa)	Δ (%)			
1	1P2	4.53	45.09	38.30	15.05	29.95	33.56	49.92	-10.73	1P4*	45.22	
	1P4*		15.32							33.77	-10.38	
	1P5		47.91							20.06	37.48	-4.20
	1P6		45.87							16.51	34.70	-8.83
	2P1		47.39							30.41	43.32	17.46
2	2P2	4.44	47.46	32.98	30.52	26.86	43.40	39.12	17.58	2P3*	45.67	
	2P3*		27.78							41.17	14.34	
	2P6		46.85							29.60	42.66	16.50
	3P0		44.84							33.30	44.31	25.93
3	3P1*	4.39	46.15	29.91	35.20	24.97	45.90	33.21	28.04	3P3	45.99	
	3P3		34.97							45.71	27.79	
	3P4		45.42							34.15	45.02	26.88
	4P0*		29.17							-0.22	15.88	-9.50
4	4P1	4.37	28.53	29.24	-2.50	24.54	13.97	31.95	-11.99	4P2	29.05	
	4P2		29.05							-0.65	15.52	-9.97
	4P6		30.93							5.48	20.66	-3.27



a) Lajeta sem armadura



b) Lajeta com armadura

Figura 4.24 - Comparação dos valores da resistência à compressão obtidos em função da V.P.U..

ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

No presente capítulo pretende elaborar-se a análise comparativa das duas metodologias, para estimativa do módulo de elasticidade dinâmico, especificadas na norma britânica [26], pela teoria de propagação das ondas sonoras em meio elástico e método empírico, com intuito de verificar qual é a que se aproxima do “real”.

O módulo de elasticidade dinâmico é estimado de acordo com a teoria de propagação das ondas sonoras em meio elástico, aplicando a equação (2.45) em função do coeficiente de poisson dinâmico, assumido 0.25, por ser o que mais se aproxima do real, como demonstrado no gráfico da Figura 4.25, onde se encontram cotados os módulos de elasticidade obtidos para coeficiente de poisson dinâmico de 0.15, 0.25 e 0.35, obtidos da Tabela 2.11, e pelo método empírico, que relaciona os valores de V.P.U. com o módulo de elasticidade dinâmico, consultando os valores da Tabela 2.12.

Foi considerado o valor médio da massa volúmica dos provetes ensaiados, resumidos na Tabela 3.6 e considerada a velocidade de propagação dos ultrassons obtidos do ensaio das lajes, resumidos na Tabela 4.19, para o cálculo dos valores resumidos na Tabela 4.23 para a lajeta sem armadura e na Tabela 4.24 os da lajeta com armadura.

A conversão do módulo de elasticidade dinâmico para estático foi efetuada aplicando a equação (2.47).

Na presente análise foram admitidos os resultados de ambas as lajetas na mesma análise por não se verificaram tendências que permitam estabelecer diferenças de resultados entre as lajetas com e sem armadura.

Sendo os valores de referência do módulo de elasticidade os obtidos em laboratório, a variação do módulo de elasticidade estático obtido em função de $E_{d,(v,\rho,vd)}$, está compreendido entre $-2.93\text{GPa (inf.)} \leq \Delta E_{c,(E_{d,(v,\rho,vd)})} \leq 0.26\text{ GPa (sup.)}$, em termos percentuais $-8.57\% \leq \Delta \leq 1.25\%$.

Pelo método empírico obteve-se uma variação de $-4.79\text{GPa (inf.)} \leq \Delta E_{c,(Bs\ 1881-203)} \leq 0.15\text{ GPa (sup.)}$, em termos percentuais $-15.98\% \leq \Delta \leq 0.49\%$.

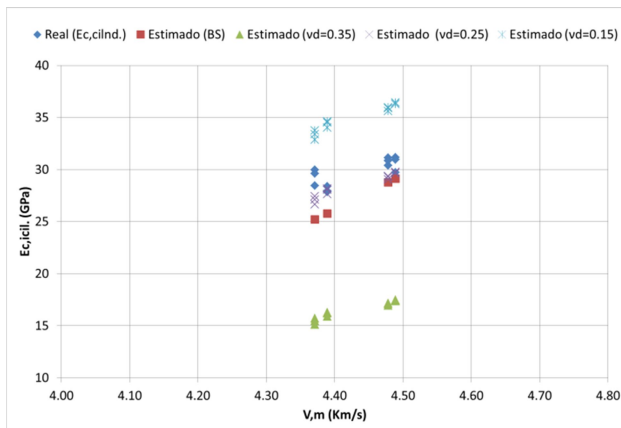
Sendo os valores de referência do módulo de elasticidade os obtidos em laboratório, é possível concluir que a metodologia que mais se aproximam dos valores de referencia é o módulo de elasticidade dinâmico obtido da teoria de propagação de ondas em meio elástico $E_{d,(v,\rho,vd)}$, em função do coeficiente de poisson dinâmico igual a 0.25.

Tabela 4.23 - Resumo de valores da deformabilidade da lajeta sem armadura.

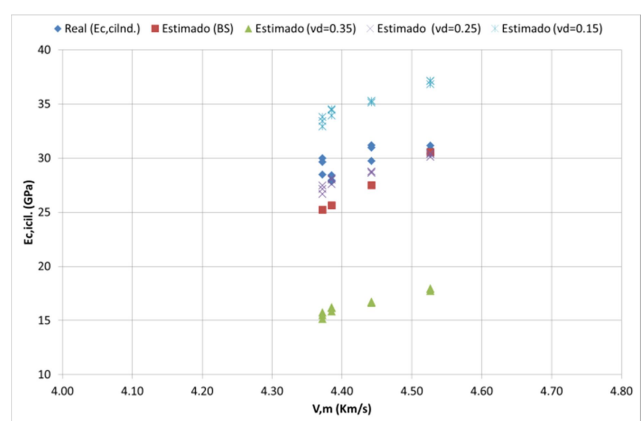
Amass:	Vm,Lajeta (km/s)	Real (Lab.)			(Ed(v,p,vd))				British Standards (Ed(v))			
		Ref:	ρ (kg/m3)	Ec,cil. (GPa)	vd	Ed,v (GPa)	Ec (BS 8110-2) (GPa)	Ecm (BS 8110-2) (GPa)	Δ (%)	Ed (BS 1881-203) (GPa)	Ec (BS 8110-2) (GPa)	Δ (%)
1	4.48	1P2	2300.84	30.40	0.25	38.46	29.07	29.25	-4.38	38.21	28.76	-5.40
		1P5	2314.96	31.15		38.69	29.36		-5.73			-7.68
		1P6	2312.69	30.84		38.65	29.32		-4.94			-6.75
2	4.49	2P1	2317.18	31.18		38.91	29.64	29.73	-4.94	38.51	29.14	-6.54
		2P2	2323.31	30.97		39.01	29.77		-3.88			-5.91
		2P6	2323.80	29.73		39.02	29.78		0.16			-1.98
3	4.39	3P0	2351.39	27.84		37.75	28.19	27.98	1.25	35.81	25.76	-7.46
		3P3	2346.25	28.39		37.67	28.09		-1.07			-9.26
		3P4	2324.97	27.93		37.33	27.66		-0.97			-7.76
4	4.37	4P1	2332.74	29.99		37.14	27.42	27.06	-8.57	35.36	25.20	-15.98
		4P2	2293.86	28.47		36.52	26.65		-6.41			-11.49
		4P6	2316.91	29.62		36.88	27.10		-8.49			-14.93

Tabela 4.24 - Resumo de valores da deformabilidade da lajeta com armadura.

Amass:	Vm,Lajeta (km/s)	Real (Lab.)			(Ed(v,p,vd))				British Standards (Ed(v))			
		Ref:	ρ (kg/m3)	Ec,cil. (GPa)	vd	Ed,v (GPa)	Ec (BS 8110-2) (GPa)	Ecm (BS 8110-2) (GPa)	Δ (%)	Ed (BS 1881-203) (GPa)	Ec (BS 8110-2) (GPa)	Δ (%)
1	4.53	1P2	2300.84	30.40	0.25	39.29	30.11	30.29	-0.97	39.64	30.55	0.49
		1P5	2314.96	31.15		39.53	30.41		-2.38			-1.93
		1P6	2312.69	30.84		39.49	30.36		-1.56			-0.94
2	4.44	2P1	2317.18	31.18		38.10	28.63	28.72	-8.18	37.19	27.48	-11.86
		2P2	2323.31	30.97		38.20	28.75		-7.15			-11.26
		2P6	2323.80	29.73		38.21	28.76		-3.25			-7.56
3	4.39	3P0	2351.39	27.84		37.69	28.11	27.90	0.96	35.72	25.65	-7.88
		3P3	2346.25	28.39		37.60	28.00		-1.36			-9.67
		3P4	2324.97	27.93		37.26	27.58		-1.26			-8.18
4	4.37	4P1	2332.74	29.99		37.16	27.45	27.08	-8.48	35.39	25.24	-15.85
		4P2	2293.86	28.47		36.54	26.67		-6.31			-11.35
		4P6	2316.91	29.62		36.91	27.13		-8.40			-14.80



a) Lajetas sem armadura.



b) Lajetas com armadura.

Figura 4.25 - Estudo comparativo da estimativa do módulo de elasticidade estático.

EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Tabela 4.25 estão resumidas as variações entre as resistências características *in situ*, ($f_{ck, is, v}$), os valores de referência da resistência à compressão obtidos em laboratório (f_{cmc}) e resistência característica *in situ* ($f_{ck, is, cil}$) aos 77 dias, para as quatro amassaduras, tendo sido aplicada a equação

(2.5) para obtenção das resistências correspondentes às idades 7, 14, 21, 28 dias, com respectivas dispersões representadas na Figura 4.26.

Foram admitidos os resultados de ambas as lajetas na mesma análise, por não se verificaram tendências que permitam estabelecer diferenças de resultados entre as lajetas com e sem armadura.

Conclui-se que os valores obtidos de $f_{ck, is, v}$ são inferiores aos da resistência à compressão do ensaio laboratorial $f_{cm, cil}$, com uma diferença compreendida no intervalo $-5.14MPa \leq \Delta f_{ck, is, v} \leq -5.86 MPa$, que se traduz em termos percentuais em $-13.68\% \leq \Delta \leq -18.47\%$, em condições húmidas. Em condições ausentes de humidade, essa diferença aumenta para $\Delta f_{ck, is, v} = -15.38 MPa$, em termos percentuais $\Delta = -36.65\%$.

Tomando como referência os valores de $f_{ck, is, cil}$, verificam-se, nas primeiras 4 idades, diferenças de tensão compreendidas no intervalo $1.52MPa \leq \Delta f_{ck, is, v} \leq 4.53 MPa$, em termos percentuais $5.05\% \leq \Delta \leq 16.21\%$ superior à tensão de referência. Para a idade 77 dias a resistência diminuiu, $\Delta f_{ck, is, v} = -5.94 MPa$, $\Delta = -18.26\%$, tornando-se inferior à tensão de referência.

Tabela 4.25 - Resistência característica à compressão obtida pelo ensaio V.P.U. transmissão direta.

Idade	$f_{m(n), is}$ (MPa)	$f_{is, menor}$ (MPa)	S (MPa)	$f_{ck, is, v}$ (MPa)	Idade	$f_{m(n), is}$ (MPa)	$f_{is, menor}$ (MPa)	S (MPa)	$f_{ck, is, v}$ (MPa)
7	30.32	27.63	3.00	25.88	7	30.48	27.06	3.00	26.04
14	35.17	30.35	3.00	30.73	14	35.45	27.06	4.08	29.40
21	36.89	33.16	3.00	32.45	21	36.72	31.76	3.77	31.15
28	37.00	32.49	3.00	32.56	28	36.00	30.65	3.00	31.56
77	34.09	29.32	3.13	29.46	77	32.67	27.02	4.11	26.59

a) Lajetas sem armadura

b) Lajetas com armadura

Analisando a variação da tensão de $f_{is, v}$, nos resultados da Tabela 4.26, tomando como referência os valores de $f_{cm, cil}$, nas primeiras quatro idades, estas situam-se no intervalo $-3.63MPa \leq \Delta f_{is, v} \leq 5 MPa$ e em termos percentuais $-11.42\% (inf.) \leq \Delta \leq 14.01\% (sup.)$. Nas idades compreendidas entre o 70 e 110 dias, com condições ausente de humidade, essa diferença aumenta para $-3.64MPa \leq \Delta f_{is, v} \leq -15.55 MPa$, em termos percentuais $-8.68\% \leq \Delta \leq -36.83\%$ inferior à de referência.

Tomando como referência os valores de $f_{ck, is, cil}$, verifica-se nas primeiras 4 idades diferenças de tensão compreendidas no intervalo $3.51MPa \leq \Delta f_{is, v} \leq 8.04 MPa$, em termos percentuais $14.30\% \leq \Delta \leq 47.12\%$ superior à tensão de referência, $f_{ck, is, cil}$, nas idade compreendidas entre o 70 e 110 dias, a resistência $f_{is, v}$ diminui para $-6.05MPa \leq \Delta f_{is, v} \leq 5.8 MPa$, em termos percentuais $-18.48\% \leq \Delta \leq 17.84\%$.

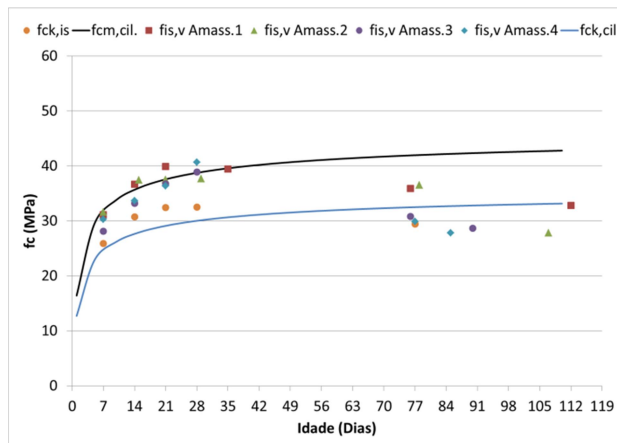
Conclui-se que os valores de $f_{ck, is, v}$ nas primeiras idades, são superiores a $f_{ck, is, cil}$ e nas idades em que o betão se apresenta seco, torna-se mais próximo ao resultado de referência.

Os valores de $f_{is,v}$ correspondente aos valores individuais das 4 amassaduras são dispares dos valores de referência $f_{cm/c}$ de cada amassadura.

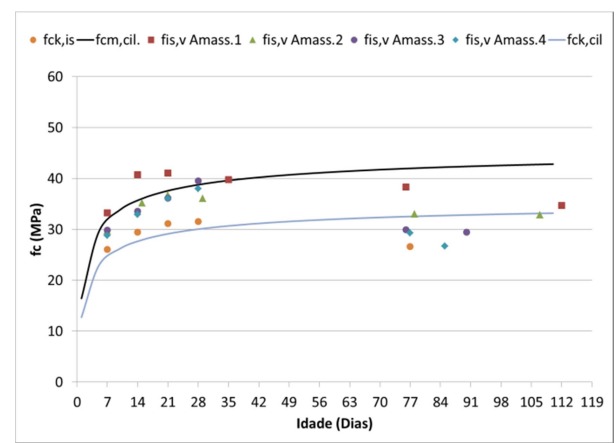
Tabela 4.26 - Resistência à compressão obtidas nas lajes pelo ensaio V.P.U. transmissão direta.

Amass:	Idade (Dias)	Vmedia(Km/s)	fis,v (MPa) (NP 13791)	fcm,cil. (t) (MPa)	Δ (%)	fck,is,cil.(t) (MPa)	Δ (%)
1	7	4.40	31.18	31.74	1.78	24.60	-26.75
	14	4.49	36.64	35.69	-2.69	27.65	-32.51
	21	4.54	39.94	37.59	-6.26	27.92	-43.05
	35	4.53	39.44	39.59	0.39	30.68	-28.54
	76	4.48	35.90	41.94	14.40	32.50	-10.46
112	4.43	32.84	42.84	23.36	33.20	1.10	
2	7	4.40	31.64	31.74	0.32	24.60	-28.62
	15	4.50	37.47	36.03	-3.99	27.92	-34.19
	21	4.50	37.52	37.59	0.18	27.92	-34.38
	29	4.51	37.65	38.90	3.23	30.15	-24.87
	78	4.49	36.56	42.00	12.96	32.55	-12.32
107	4.32	27.80	42.75	34.95	33.13	16.06	
3	7	4.33	28.11	31.74	11.42	24.60	-14.30
	14	4.43	33.23	35.69	6.89	27.65	-20.15
	21	4.49	36.79	37.59	2.12	27.92	-31.76
	28	4.52	38.88	38.77	-0.28	30.04	-29.41
	76	4.39	30.84	41.94	26.47	32.50	5.11
90	4.34	28.66	42.35	32.33	32.82	12.68	
4	7	4.38	30.26	31.74	4.67	24.60	-23.01
	14	4.44	33.69	35.69	5.58	27.65	-21.84
	21	4.49	36.36	37.59	3.26	27.92	-30.23
	28	4.55	40.71	38.77	-5.02	30.04	-35.52
	77	4.37	29.91	41.97	28.73	32.53	8.03
85	4.32	27.80	42.22	34.14	32.72	15.01	

Amass:	Idade (Dias)	Vmedia(Km/s)	fis,v (MPa) (NP 13791)	fcm,cil. (t) (MPa)	Δ (%)	fck,is,cil.(t) (MPa)	Δ (%)
1	7	4.45	33.20	31.74	-4.61	24.60	-34.99
	14	4.56	40.69	35.69	-14.01	27.65	-47.12
	21	4.57	41.04	37.59	-9.19	27.92	-46.99
	35	4.55	39.75	39.59	-0.40	30.68	-29.55
	76	4.53	38.30	41.94	8.68	32.50	-17.84
	112	4.47	34.66	42.84	19.11	33.20	-4.38
2	7	4.38	29.67	31.74	6.51	24.60	-20.64
	15	4.48	35.18	36.03	2.35	27.92	-26.01
	21	4.50	36.67	37.59	2.43	27.92	-31.34
	29	4.49	36.07	38.90	7.29	30.15	-19.64
	78	4.44	32.98	42.00	21.48	32.55	-1.32
	107	4.44	32.78	42.75	23.31	33.13	1.03
3	7	4.38	29.88	31.74	5.87	24.60	-21.47
	14	4.45	33.58	35.69	5.89	27.65	-21.44
	21	4.49	36.10	37.59	3.94	27.92	-29.31
	28	4.54	39.55	38.77	-2.01	30.04	-31.63
	76	4.39	29.91	41.94	28.69	32.50	7.98
	90	4.38	29.40	42.35	30.58	32.82	10.42
4	7	4.36	28.80	31.74	9.28	24.60	-17.07
	14	4.44	32.91	35.69	7.79	27.65	-18.99
	21	4.49	36.02	37.59	4.17	27.92	-29.00
	28	4.52	37.94	38.77	2.13	30.04	-26.29
	77	4.37	29.24	41.97	30.34	32.53	10.11
	85	4.32	26.67	42.22	36.83	32.72	18.48



a) Lajetas sem armadura



b) Lajetas com armadura

Figura 4.26 - Representação gráfica da evolução da resistência à compressão.

EVOLUÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Encontra-se nas Tabela 4.27 e Tabela 4.28, com respectivas dispersões dos valores representados nos gráficos das Figura 4.27 e Figura 4.28, a evolução das estimativas dos módulos de elasticidade estático, pelos métodos descritos na norma Britânica [26], $E_{c,(E_{d,(v,p,vd)})}$.

Para a obtenção do valor médio do módulo de elasticidade aos 28 dias aplicou-se a equação (2.17), em função do valor médio do módulo de elasticidade das quatro amassaduras, $E_{cm}(77) = 29.71 GPa$, e respetivos valores da resistência média à compressão $f_{cm,cil}(28)$ e $f_{cm,cil}(t)$, tendo-se obtido $E_{cm}(28) = 29.19 GPa$.

Foram admitidos os resultados de ambas as lajetas na mesma análise, por não se verificaram tendências que permitam estabelecer diferenças de resultados entre as lajetas com e sem armadura.

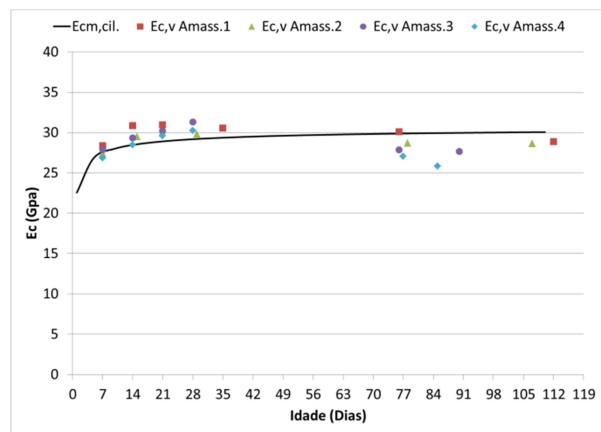
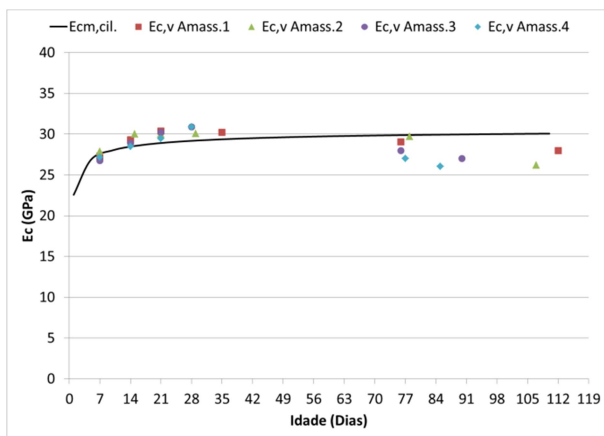
- **Método de transmissão direto**

Tomando como referência os valores E_{cm} , verifica-se que nas primeiras 4 idades a diferença do módulo de elasticidade obtido das quatro amassaduras está compreendida no intervalo $-0.74GPa \leq \Delta E_{c,(E_{d,(v,\rho,vd)})} \leq 2.37GPa$, em termos percentuais $-2.70\% (inf.) \leq \Delta \leq 8.33\% (sup.)$. Nas idades 70 e 110 dias, essa diferença aumenta para valores inferiores ao de referencia, para $-4.09GPa \leq \Delta E_{c,(E_{d,(v,\rho,vd)})} \leq 0.22GPa$. em termos percentuais $-13.66\% \leq \Delta \leq 0.74\%$.

Tabela 4.27 - Módulo de elasticidade obtido nas lajes pelo ensaio V.P.U. transmissão Método direto.

Amass:	pm (kg/m3)	Idade (Dias)	Vmedia (Km/s)	Ec,(Ed(v,ρ,vd=0.25)) (Gpa)	Ecm,cil.(t) (GPa)	Δ (%)
1	2300.84	7	4.40	27.31	27.49	-0.65%
		14	4.49	29.32	28.47	2.99%
		21	4.54	30.39	28.92	5.09%
		35	4.53	30.23	29.37	2.93%
		76	4.48	29.07	29.89	-2.73%
		112	4.43	27.96	30.08	-7.03%
2	2320.79	7	4.40	27.90	27.49	1.49%
		15	4.50	30.02	28.55	5.13%
		21	4.50	30.04	28.92	3.87%
		29	4.51	30.08	29.22	2.94%
		78	4.49	29.71	29.90	-0.62%
3	2340.30	107	4.32	26.22	30.06	-12.77%
		7	4.33	26.75	27.49	-2.70%
		14	4.43	28.92	28.47	1.56%
		21	4.49	30.20	28.92	4.43%
		28	4.52	30.90	29.19	5.85%
4	2312.10	76	4.39	27.97	29.89	-6.42%
		90	4.34	27.01	29.97	-9.90%
		7	4.38	27.16	27.49	-1.21%
		14	4.44	28.52	28.47	0.15%
		21	4.49	29.46	28.92	1.88%
		28	4.55	30.87	29.19	5.77%
4	2312.10	77	4.37	27.01	29.89	-9.65%
		85	4.32	26.05	29.94	-13.01%

Amass:	pm (kg/m3)	Idade (Dias)	Vmedia (Km/s)	Ec,(Ed(v,ρ,vd=0.25)) (Gpa)	Ecm,cil.(t) (GPa)	Δ (%)
1	2300.84	7	4.45	28.38	27.49	3.22%
		14	4.56	30.84	28.47	8.33%
		21	4.57	30.95	28.92	7.03%
		35	4.55	30.56	29.37	4.04%
		76	4.53	30.11	29.89	0.74%
		112	4.47	28.89	30.08	-3.93%
2	2320.79	7	4.38	27.40	27.49	-0.34%
		15	4.48	29.49	28.55	3.29%
		21	4.50	30.00	28.92	3.74%
		29	4.49	29.80	29.22	1.98%
		78	4.44	28.70	29.90	-4.00%
3	2340.30	107	4.44	28.63	30.06	-4.75%
		7	4.38	27.87	27.49	1.39%
		14	4.45	29.33	28.47	3.00%
		21	4.49	30.22	28.92	4.50%
		28	4.54	31.35	29.19	7.39%
4	2312.10	76	4.39	27.88	29.89	-6.70%
		90	4.38	27.67	29.97	-7.69%
		7	4.36	26.84	27.49	-2.35%
		14	4.44	28.50	28.47	0.09%
		21	4.49	29.60	28.92	2.35%
		28	4.52	30.23	29.19	3.57%
4	2312.10	77	4.37	27.04	29.89	-9.56%
		85	4.32	25.85	29.94	-13.66%



a) Lajeta sem armadura

b) Lajeta com armadura

Figura 4.27 - Representação gráfica da evolução do módulo de elasticidade.

• **Método de transmissão indireto**

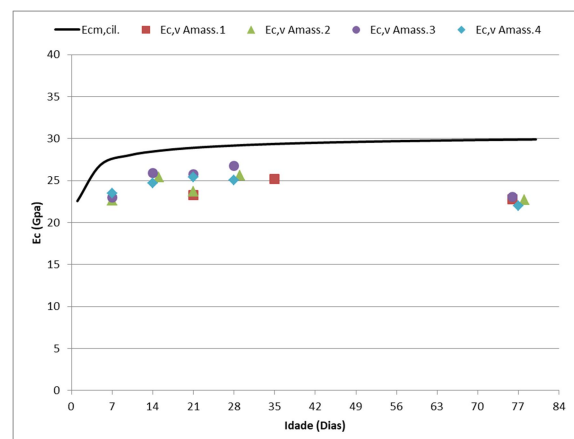
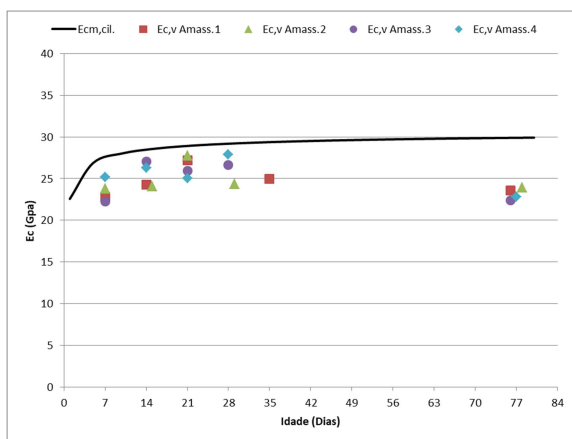
No método indireto, tanto para a lajeta sem armadura como com armadura, as leituras efetuadas encontram-se abaixo da previsão, segundo a NP EN 1992.

Verifica-se que nas primeiras 4 idades, a diferença do módulo de elasticidade obtida das 4 amassaduras está compreendida no intervalo $-6.16GPa \leq \Delta E_{c,(E_{d,(v,\rho,vd)})} \leq -1.17GPa$ e em termos percentuais $-21.29\% \leq \Delta \leq -4.04\%$ inferior ao de referência. Na idade 70 dias, essa diferença aumenta para $-7.92GPa \leq \Delta E_{c,(E_{d,(v,\rho,vd)})} \leq -1.33GPa$, em termos percentuais $-26.49\% \leq \Delta \leq -4.54\%$ inferior à de referência.

Tabela 4.28 - Módulo de elasticidade obtida nas lajes pelo ensaio V.P.U. transmissão método indireto.

Amass:	pm (kg/m3)	Idade (Dias)	Vmedia (Km/s)	Ec,(Ed(v,p,vd=0.25)) (Gpa)	Ecm,cil.(t) (GPa)	Δ (%)
1	2300.84	7	4.18	22.83	27.49	-16.93%
		14	4.25	24.28	28.47	-14.74%
		21	4.39	27.22	28.92	-5.89%
		35	4.28	24.99	29.37	-14.94%
		76	4.21	23.56	29.89	-21.18%
		112	-	-	-	-
2	2320.79	7	4.21	23.76	27.49	-13.57%
		15	4.22	24.07	28.55	-15.71%
		21	4.40	27.75	28.92	-4.04%
		29	4.23	24.31	29.22	-16.81%
		78	4.21	23.92	29.90	-20.01%
		107	-	-	-	-
3	2340.30	7	4.11	22.26	27.49	-19.03%
		14	4.35	27.04	28.47	-5.04%
		21	4.29	25.95	28.92	-10.27%
		28	4.33	26.65	29.19	-8.71%
		76	4.12	22.40	29.89	-25.05%
		90	-	-	-	-
4	2312.10	7	4.28	25.18	27.49	-8.38%
		14	4.34	26.28	28.47	-7.71%
		21	4.27	25.01	28.92	-13.53%
		28	4.41	27.86	29.19	-4.54%
		77	4.16	22.77	29.89	-23.83%
		85	-	-	-	-

Amass:	pm (kg/m3)	Idade (Dias)	Vmedia (Km/s)	Ec,(Ed(v,p,vd=0.25)) (Gpa)	Ecm,cil.(t) (GPa)	Δ (%)
1	2300.84	7.00	4.20	23.30	27.49	-15.25%
		14.00	4.29	25.17	28.47	-11.59%
		21.00	4.17	22.76	28.92	-21.29%
		35.00	4.29	25.07	29.37	-14.65%
		76.00	4.26	24.56	29.89	-17.81%
		112.00	-	-	-	-
2	2320.79	7.00	4.15	22.65	27.49	-17.59%
		15.00	4.29	25.39	28.55	-11.08%
		21.00	4.20	23.68	28.92	-18.12%
		29.00	4.30	25.60	29.22	-12.39%
		78.00	4.15	22.71	29.90	-24.05%
		107.00	-	-	-	-
3	2340.30	7.00	4.15	23.00	27.49	-16.32%
		14.00	4.29	25.93	28.47	-8.92%
		21.00	4.29	25.76	28.92	-10.91%
		28.00	4.33	26.74	29.19	-8.40%
		76.00	4.15	23.06	29.89	-22.84%
		90.00	-	-	-	-
4	2312.10	7.00	4.20	23.52	27.49	-14.44%
		14.00	4.26	24.69	28.47	-13.28%
		21.00	4.30	25.43	28.92	-12.06%
		28.00	4.28	25.06	29.19	-14.15%
		77.00	4.12	21.97	29.89	-26.49%
		85.00	-	-	-	-



a) Lajeta sem armadura

b) Lajeta com armadura

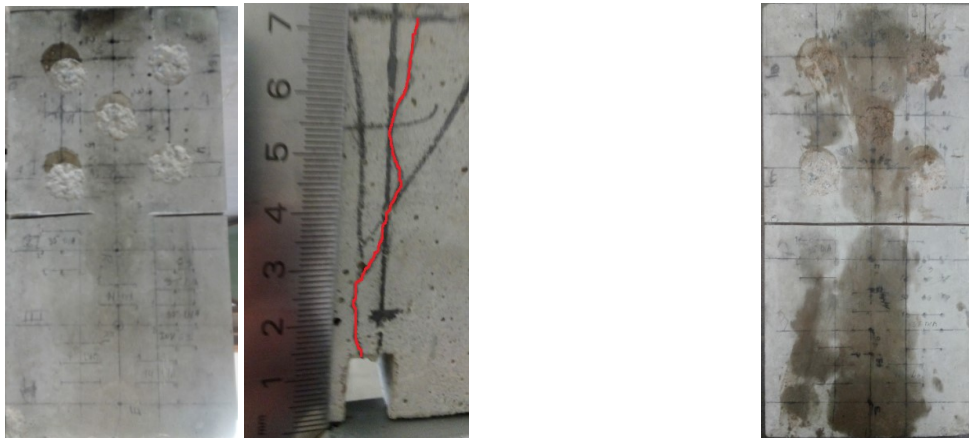
Figura 4.28 - Representação gráfica da evolução do módulo de elasticidade.

DETEÇÃO DE DEFEITOS E ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE FISSURAS

- Detecção de defeitos

Para a avaliação da presença de defeitos, procedeu-se ao ensaio da determinação de V.P.U. pelo método de transmissão indireto da lajeta com armadura da amassadura 1, antes e após o ensaio da lajeta com armadura à flexão, no estado fendilhado e da lajeta sem amassadura, antes e após corte pelo uso de uma rebarbadora.

Para obtenção da fenda a meio vão, procedeu-se à elaboração de dois cortes de 10 cm de comprimento e 2 cm de profundidade nas laterais da lajeta com armadura, obtendo-se uma fenda com 7,2 cm de profundidade média, após descarga a fenda deixou de ser visível, não sendo a sua largura mensurável. Para a lajeta sem armadura, após corte com rebarbadora obteve-se uma fenda com 1.7 cm de profundidade e 0.5 cm de largura, como representadas na Figura 4.29.



a) Fenda na lajeta com armadura

b) Fenda na lajeta sem armadura

Figura 4.29 - Lajetas fissuradas.

- Lajeta com armadura

As leituras obtidas do ensaio de determinação da V.P.U. na lajeta com armadura estão representadas na Tabela 4.29, com respetiva representação gráfica na Figura 4.30.

Foram efetuadas as leituras de V.P.U. com a disposição da grelha de ensaio representada na Figura 4.13, com o transdutor emissor na posição E e o transdutor recetor na posição R1, R2, R3 e R4, correspondendo à distância de percurso entre os 100 mm e 500 mm.

Tabela 4.29 - Resultados de V.P.U. antes e após fendilhação da lajeta com armadura.

Amass.	Idade (Dias)	Ref.	Dist. Emissor-Fenda	Tempo médio de percurso (μs)				V(Km/s)
				Distancia entre transdutores (mm)				
				100	200	300	500	
1	175	Pré-fend.	0	30.10	46.40	70.70	153.50	3.18
	176	Pós-fend.	250	22.37	44.60	74.57	120.47	4.03
	$\Delta(\%)$			25.69	3.88	-5.47	21.52	-26.93

Pela consulta dos valores obtidos na Tabela 4.29, com respetiva representação no gráfico da Figura 4.30, verifica-se que a velocidade aumenta 0.85 km/s após fendilhação, que em termos percentuais se traduz em 26.93 %, em R2 posição anterior à secção fendilhada com l=200mm, os tempos de propagação são $3.88 \% \leq \Delta \leq 25.69\%$ inferiores ao “pré-fenda.”, em R3 após sua propagação pela secção fendilhada aumenta 3.87 μs , em termos percentuais 5.47 %, no entanto o tempo de propagação com transdutor recetor na posição R4 diminui 33.03 μs , em termos percentuais, 21.52%. É possível justificar estas variações do tempo de propagação, considerando a trajetória das ondas sonoras pelo betão comprimido, plastificado que, quando solicitado à flexão, melhorou as condições para a propagação das ondas de ultrassons.

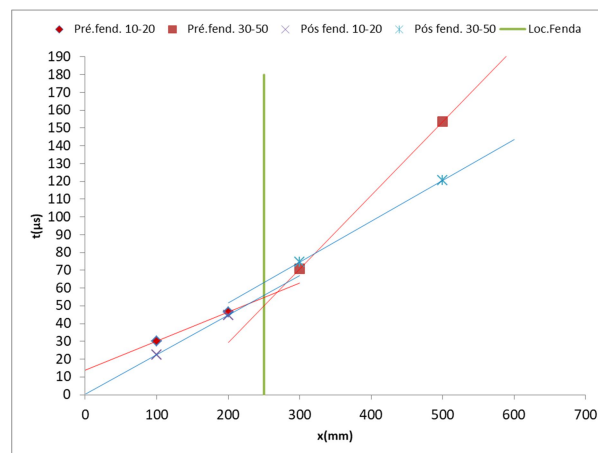


Figura 4.30 - V.P.U da lajeta com armadura Pré e após fendilhação.

- Lajeta sem armadura.

Pela consulta dos valores obtidos na Tabela 4.30 e respetiva representação gráfica na Figura 4.31, verifica-se que as velocidades e os tempos de propagação obtidos antes e após corte são semelhantes, o tempo de propagação obtido em R3 após secção seccionada, aumenta 9.27 μs , em termos percentuais 11.24 %, verificando que este método de ensaio é influenciado pela presença de fendas de baixa profundidade. No entanto, ao contrário do verificado na lajeta com armadura, o tempo de propagação obtido na posição R4 é semelhante ao obtido antes de se efetuar o corte, verificando que devido ao ensaio à flexão, a matriz do betão da lajeta com armadura foi alterada.

Tabela 4.30 - Resultados de V.P.U. antes e após corte com rebarbadora na lajeta sem armadura.

Amass.	Idade (Dias)	Ref.	Dist. Emissor-Fenda	Tempo médio de percurso (μ s)				V(Km/s)
				Distancia entre transdutores (mm)				
				100	200	300	500	
1	177	Pré-fend.	0	22.60	62.57	82.43	152.47	3.16
	177	Pós-fend.	250	26.47	66.60	91.70	154.93	3.18
	$\Delta(\%)$			-17.11	-6.45	-11.24	-1.62	-0.70

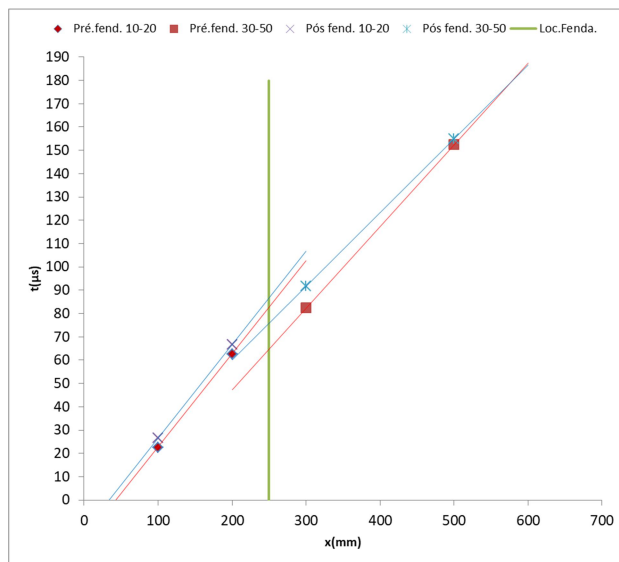


Figura 4.31 - V.P.U da lajeta sem armadura antes e após corte com rebarbadora.

Comparando os tempos de propagação obtidos em ambas as lajetas, é possível assumir que este método de ensaio consegue detetar defeitos superficiais nos elementos de betão.

- Estimativa da profundidade de fissuras

No presente capítulo é avaliado o valor da estimativa da profundidade da fenda na lajeta sem armadura, pelo método definido por R.Jones-Facaoaru [30], J.H.Bungey [3]ⁱ, com respetiva estimativa representada na Tabela 4.31 e pelo método BS 1881 203 (Alternativa 1), com respetiva estimativa representada na Tabela 4.32.

Para o cálculo da estimativa da profundidade da fenda, para ambos os métodos, foi adotado o espaçamento equidistante da fenda de 9 cm e para a segunda leitura um espaçamento de 18 cm.

Pelo método definido por R.Jones-Facaoaru [30], J.H.Bungey [3] obteve-se uma estimativa de 4.70 cm, sendo 3cm superior ao real e que corresponde a um desvio de 38.9 % do valor real.

Tabela 4.31 - Estimativa da profundidade da fenda obtida pelo método [30] e [3].

Ref.	Dist. Emissor-Fenda (m)	Tempo médio de percurso (s)	h (cm)
		Distancia entre transdutores (m)	
		0.18	
Pré-fend.	0	3.95E-08	4.70
Pós-fend.	0.09	4.45333E-08	

Pelo método BS 1881 203 (Alternativa 1) obteve-se uma estimativa de 1.25 cm, 0.45 cm inferior ao real e que corresponde a um desvio de 26.47 % do valor de profundidade da fenda real.

Tabela 4.32 - Estimativa da profundidade da fenda obtida pelo método BS 1881 203 (alternativa 1).

x1 (Dist. Emissor-Fenda (m))	Tempo médio de percurso (s)	x2 (Dist. Emissor-Fenda (m))	Tempo médio de percurso (s)	h (cm)
	Distancia entre transdutores (m)		Distancia entre transdutores (mm)	
	0.18		0.36	
0.09	4.45333E-08	0.18	8.84E-08	1.25

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o método que mais se aproxima do real é o especificado na norma BS 1881 203, com desvio de 26.47% do real.

4.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA

4.5.1 Procedimento

Na elaboração do ensaio *pull-off*, foram colados cinco discos de aço por lajeta, com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, sem pré carotagem, na disposição descrita na Figura 2.37, permitindo o apoio do equipamento dentro da área da lajeta a ensaiar. O equipamento utilizado é o MATÉST E142 (Tripod) exibido na Figura 2.35, com as características descritas na Tabela 4.33, tendo sido utilizado um adesivo epóxi, com tempo de cura de 7 dias.

Foi aplicada carga a uma taxa descrita na Tabela 4.34, em cada ensaio, até que ocorra a rotura.

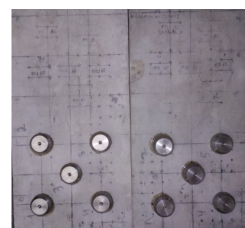
Após rotura, é verificada a validade da rotura, e aplicada a equação (2.51) de forma a obter a tensão de rotura à tração, sendo o valor do ensaio a média dos resultados, com um mínimo de três leituras válidas.

Tabela 4.33 - Descrição das características do equipamento de ensaio Pull-off.

Marca:	MATEST
Tipo:	E142 (Tripod)
Capacidade de carga (KN):	16
Alcance de leitura (KN):	0,25-16
Resolução (N) :	10
Nº Discos utilizados/Provete :	5
Tipo de material do disco:	Aço
Diametro Disco (mm) :	50
Espessura Disco (mm)	20
Tipo de adesivo	Ceys Araldite Standard

O procedimento para a colagem dos discos foi o descrito em baixo, e está esquematizado na Figura 4.32.

1. Limpeza da área de contacto do disco com acetona para a desengordurar;
2. Preparação da superfície de betão com a utilização de lixa para metal P40 e posterior remoção do pó de cimento;
3. Proceder à mistura dos dois componentes da cola e sua aplicação nos discos;
4. Colocação de pesos sobre os disco de forma a diminuir a espessura de cola e obter pressão suficiente para expelir o ar e permitir a sua cura.



- a) Limpeza de discos b) Preparação da superfície c) Colocação de pesos sobre os discos d) Disposição da área de ensaio

Figura 4.32 - Procedimento de colagem dos discos.

Na Figura 4.33 são demonstradas as áreas de ensaio realizados, em que, os resultados a vermelho foram válidos e a cinzento inválido:

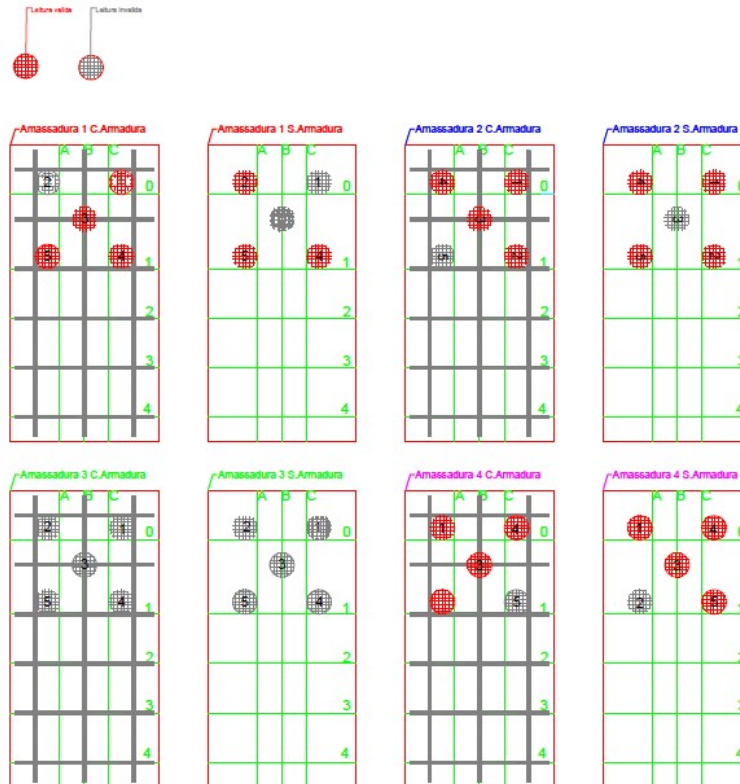


Figura 4.33 - Áreas de leituras Pull-off válidas (vermelho) e Inválidas (cinzento).

Nas lajetas da amassadura 1 foram efetuadas a colagem de 10 discos de aço, 5 em cada lajeta. O ensaio foi efetuado 2 dias após os ensaios em laboratório, com a idade do betão de 79 dias.

Na lajeta com armadura, quatro das leituras são válidas, com rotura pelo substrato e uma leitura inválida, como representado na Figura 4.36, rotura parcial pelo adesivo/disco como representado na Figura 4.34. Foi efetuada a colagem do disco na posição 1 um dia após o ensaio dos 4 discos e efetuado o seu ensaio 3 dias após a sua colagem.

Na lajeta sem armadura, duas das leituras são inválidas, com rotura parcial, adesivo/substrato e 3 leituras válidas.

Nos prismas da amassadura 2, o ensaio foi efetuado 2 dias após os ensaio em laboratório, com a idade do betão de 81 dias. Na lajeta com armadura, um ensaio é inválido devido a rotura parcial adesivo/disco, tendo acontecido o mesmo tipo de rotura invalida na lajeta sem armadura.



a) Rotura parcial adesivo/disco b) Rotura parcial adesivo/substrato c) Rotura adesivo/substrato

Figura 4.34 - Exemplo de roturas inválidas mais comuns.

Nos prismas da amassadura 3, o ensaio foi efetuado 2 dias após os ensaios em laboratório, com a idade do betão de 79 dias. Todas as leituras obtidas, em ambas as lajetas, são inválidas devido à má mistura dos componentes da cola, com rotura pelo adesivo/substrato, demonstrado na Figura 4.35.

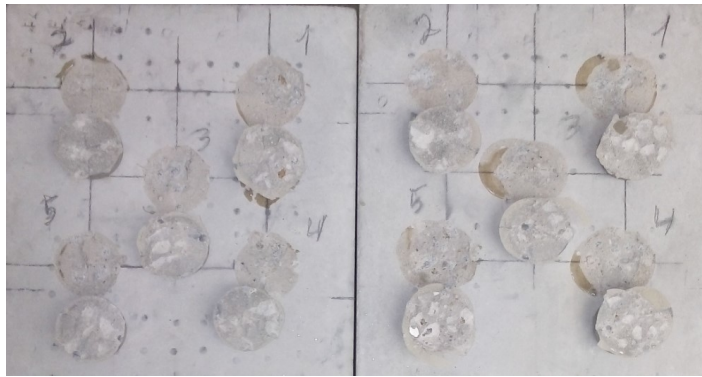


Figura 4.35 - Roturas obtidas nas lajetas da amassadura 3.

Nos prismas da amassadura 4, o ensaio foi efetuado 3 dias após o ensaio em laboratório, com a idade do betão de 80 dias. Na lajeta com armadura, um ensaio é inválido devido a rotura parcial adesivo/disco, tendo sido obtido o mesmo tipo de rotura inválida na lajeta sem armadura.



a) Vista superior b) Vista lateral c) Pormenor da área danificada

Figura 4.36 - Exemplo de roturas válidas (rotura pelo substrato).

4.5.2 Conclusão do ensaio

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO

Os resultados finais de ensaio “pull-off” para o desenvolvimento da correlação encontram-se resumidos na Tabela 4.34. Foram obtidos valores do coeficiente de variação compreendidos no intervalo $6.84 \% \leq C.V. \leq 19.39\%$, superior aos 10 %, como mencionado na norma britânica BS 1881 207:1992, no entanto este valor de C.V. é para ensaio com pré carotagem.

As tensões de tração direta obtidas entre as quatro amassaduras estão compreendidas entre $2.09 MPa \leq f_h \leq 4.50 MPa$.

Tabela 4.34 - Resultados obtidos do ensaio de tração direta.

Amassadura	Elemento	Idade	Nº leituras (Validas)	Taxa de aplicação de carga (MPa/s)	Maximo (f h (MPa))	Mínimo (f h (MPa))	Média (f h (MPa))	s (f h (MPa))	C.V. (%)
1	C.Armadura	79	4.00	0.00	3.82	3.19	3.38	0.30	8.79
	S.Armadura	79	3.00	0.00	4.01	2.81	3.28	0.64	19.39
2	C.Armadura	81	4.00	0.04	4.49	3.12	3.98	0.60	14.95
	S.Armadura	81	4.00	0.14	4.50	3.86	4.17	0.29	6.84
3	C.Armadura	79	0.00	0.00	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO
	S.Armadura	79	0.00	0.00	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO
4	C.Armadura	80	4.00	0.06	2.81	1.86	2.43	0.41	16.67
	S.Armadura	80	4.00	0.06	3.13	2.09	2.74	0.46	16.70

INFLUÊNCIA DA ARMADURA

Pretende-se, através da comparação da variação entre as tensões médias de tração direta, obtidas das lajetas com e sem armadura das amassaduras 1, 2 e 4, resumidas na Tabela 4.35, com respetiva dispersão dos valores representada no gráfico na Figura 4.37, quantificar e perceber a influência da armadura nos resultados obtidos.

Obtida a reta melhor ajustada, determinada por análise de regressão linear simples sobre os dados da Tabela 4.35, verifica-se, através do declive, que este é igual a $m = 0.89$, próximo de 1, concluindo que não há influência da armadura nos resultados obtidos em ambas as lajes, tomando as tensões obtidas na lajeta com armadura como referência. A variação de tensão entre lajetas está compreendida no intervalo $-0.1 MPa \leq \Delta f_h \leq 0.31 MPa$, em termos percentuais, $-2.85 \% \leq \Delta \leq 12.92 \%$.

Tabela 4.35 - Variação das tensões nas lajetas com e sem armadura das diferentes amassaduras.

Amass.	f _{h,m} (MPa)		Δ (%)
	C.Armd.	S.Armd.	
1	3.38	3.28	2.85
2	3.98	4.17	-4.69
4	2.43	2.74	-12.92

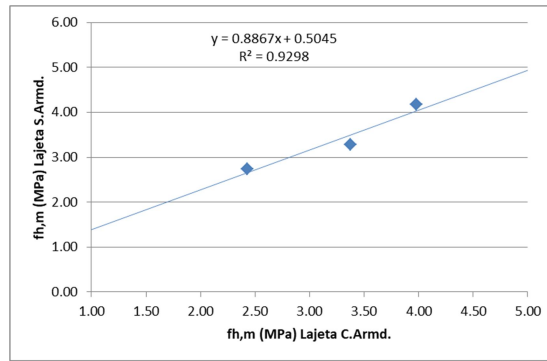


Figura 4.37 - Representação da dispersão das tensões médias de tração direta.

RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TENSÃO DE TRAÇÃO DIRETA

Com a falta de evidência da influência da armadura nos resultados obtidos, foi elaborada a correlação de caracterização da resistência à compressão in situ, por análise de regressão linear simples, representada no gráfico da Figura 4.38 e equação (4.7), fornecida de forma automática pelo programa excell, em função dos valores resumidos na Tabela 4.36, com valor da ordenada na origem $b = 0$, e doze pares de resultados da tensão de tração direta obtidos nas lajetas, com e sem armadura, das diferentes amassaduras nas abcissas e do valor da tensão de rotura à compressão obtida dos diferentes provetes cilíndricos nas ordenadas.

Tabela 4.36 - Resultados utilizados para obtenção da reta de correlação da resistência à compressão.

Amass.	nº Leituras validas	fh,m (MPa)	Ref:	fc,cil (MPa)
1	8	3.34	1P2	45.09
			1P4*	45.22
			1P5	47.91
			1P6	45.87
2	8	4.07	2P1	47.39
			2P2	47.46
			2P3*	45.67
			2P6	46.85
3	0	INVALIDO	3P0	44.84
			3P1*	46.15
			3P3	45.99
			3P4	45.42
4	8	2.59	4P0*	29.17
			4P1	28.53
			4P2	29.05
			4P6	30.93

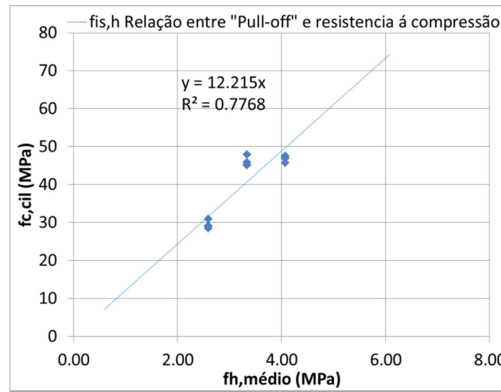


Figura 4.38 - Retas de correlação com resistência à compressão em função das tensões médias de tração direta de ambas as lajetas.

$$f_{is,h,cub} = 12.215 * f_h \tag{4.7}$$

Obtiveram-se os limites de confiança de 95%, representados nos gráficos da Figura 4.39, por aplicação das equações (2.53), (2.54) e (2.55), para os parâmetros de regressão linear simples, resumidos na Tabela 4.37. Obteve-se um intervalo de confiança de $\Delta y(f_{is,h}) = \pm 2.69 MPa$, para o valor médio de tensão de ruptura por tração direta de $f_{h,m} = 3.33 MPa$.

Tabela 4.37 - Parâmetros de regressão linear da correlação com a resistência à compressão.

m	12.21
b	0.00
r ²	0.78
n	12.00
G.L.	10.00
Sey	4.18
Xm	3.33
tn-2	2.23

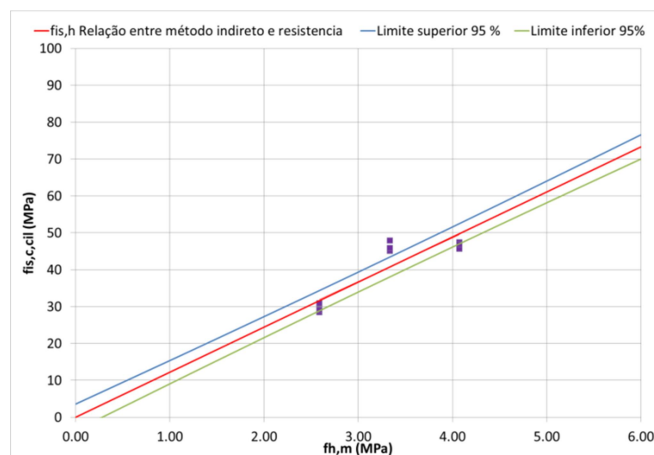


Figura 4.39 - Retas de correlação e intervalos de confiança de 95% dos parâmetros de regressão

RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SIMPLES E TENSÃO DE TRAÇÃO DIRETA

O procedimento de estabelecer a relação entre a resistência à tração direta e resistência à tração simples, é idêntico ao efetuado no capítulo anterior. A equação da reta de correlação é a (4.8), obtida em função dos resultados resumidos na Tabela 4.38, com respetiva dispersão dos valores representados no gráfico da Figura 4.40, com valor da ordenada na origem $b = 0$, e nove pares de resultados da tensão de tração direta obtidos nas lajetas, com e sem armadura, das diferentes amassaduras nas abcissas e do valor da tensão de rotura por tração simples obtida dos diferentes provetes cilíndricos nas ordenadas

Para conversão dos valores da tensão de rotura à tração por compressão diametral $f_{ct,sp}$ em tensão de rotura à tração simples f_{ct} , aplicou-se a equação (2.9).

Tabela 4.38 - Resultados utilizados para obtenção da reta de correlação com resistência à tração simples.

Amass.	nº Leituras validas	fh,m (MPa)	Ref:	fct,sp,cil (MPa)	fct,cil (MPa)
1	8	3.34	1P0	3.77	3.39
			1P1	3.99	3.59
			1P3	3.24	2.92
2	8	4.07	2P0	3.95	3.56
			2P4	4.08	3.67
			2P5	3.73	3.36
3	0	INVALIDO	3P2	-	-
			3P5	-	-
			3P6	-	-
4	8	2.59	4P3	3.09	2.78
			4P4	2.83	2.55
			4P5	3.08	2.77

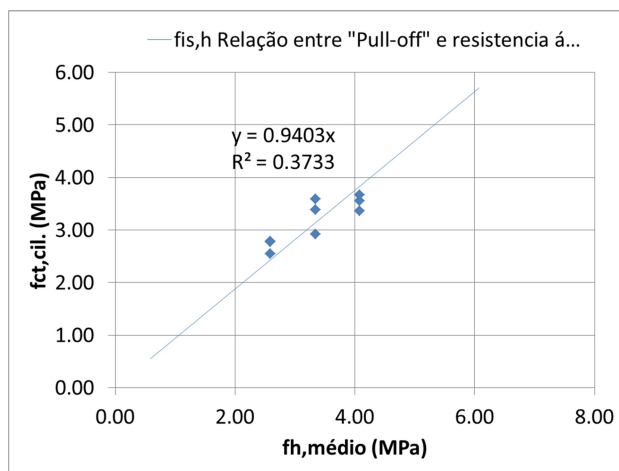


Figura 4.40 - Retas de correlação com resistência à tração em função dos ensaios "Pull-off".

$$f_{is,h,t} = 0.9403 * f_h \tag{4.8}$$

Definiram-se os limites de confiança de 95%, representados nos gráficos da Figura 4.41 em função dos parâmetros de regressão linear simples, resumidos na Tabela 4.39. Obteve-se um intervalo de

$\Delta y(f_{is,h,t}) = \pm 0.28 \text{ MPa}$, para o valor médio da tensão de ruptura por tração direta de $f_{h,m} = 3.33 \text{ MPa}$.

Tabela 4.39 - Parâmetros de regressão linear da correlação com a resistência à tração.

m	0.94
b	0.00
r ²	0.37
n	9.00
G.L.	7.00
Sey	0.36
Xm	3.33
tn-2	2.36

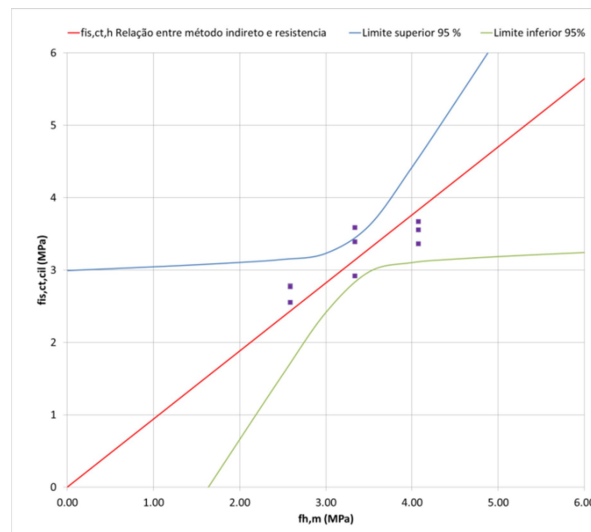


Figura 4.41 - Retas de correlação e respectivos intervalos de confiança de 95% dos parâmetros de regressão.

ANÁLISE COMPARATIVA DAS CORRELAÇÕES COM RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Encontra-se na Tabela 4.8, com respectiva dispersão dos mesmos representados no gráfico da Figura 4.42, a comparação dos valores da resistência à compressão estimada por Murray,A.McC, [5] e a obtida pela reta de correlação (4.7), com valores de referência da resistência à compressão obtidos laboratorialmente “real”.

Os valores da resistência *in situ* obtidos da relação desenvolvida por Murray,A.McC, [5], foram multiplicadas por 0.8, para a converter à resistência à compressão de um cilindro.

A resistência à compressão *in situ* obtida da reta de correlação (4.7), apresenta uma variação com o “real” compreendida entre $-7.16 \text{ MPa} \leq \Delta f_{h,is} \leq 3.07 \text{ MPa}$, em termos percentuais $-14.94 \% (inf.) \leq \Delta \leq 10.79 \% (sup.)$. A correlação desenvolvida por Murray,A.McC varia do “real” $-1.63 \text{ MPa} \leq \Delta f_{h,is} \leq -13.57 \text{ MPa}$, em termos percentuais $-5.68 \% \leq \Delta \leq -28.32 \%$.

Verifica-se para ambas as correlações utilizadas, que a desenvolvida por análise de regressão linear simples é a que mais se aproxima do real. A correlação desenvolvida por Murray,A.McC é a mais conservadora.

Tabela 4.40 - Resistência à compressão estimada de diferentes autores em função da resistência à tração direta.

Amass:	f _{h,m,Lajeta} (MPa)	Real (Lab.)		Regressão linear simples		(Murray,A.McC)	
		Ref:	f _{c,cil.} (MPa)	f _{is,h} (MPa)	Δ (%)	f _{is,h} (MPa)	Δ (%)
1	3.34	1P2	45.09	40.75	9.61	34.34	23.83
		1P4*	45.22		9.89		24.07
		1P5	47.91		14.94		28.32
		1P6	45.87		11.16		25.14
2	4.07	2P1	47.39	49.77	-5.02	41.67	12.08
		2P2	47.46		-4.86		12.21
		2P3*	45.67		-8.99		8.75
		2P6	46.85		-6.24		11.05
3	INVALIDO	3P0	-	-	-	-	-
		3P1*	-	-	-	-	-
		3P3	-	-	-	-	-
		3P4	-	-	-	-	-
4	2.59	4P0*	29.17	31.60	-8.33	26.90	7.78
		4P1	28.53		-10.79		5.68
		4P2	29.05		-8.80		7.38
		4P6	30.93		-2.17		13.03

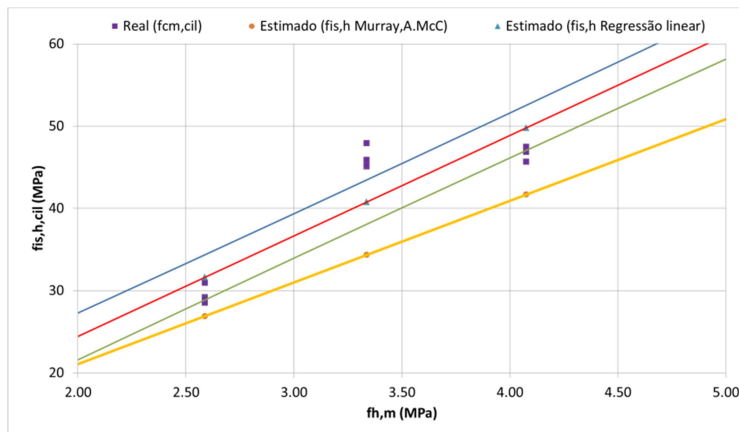


Figura 4.42 - Dispersão da resistência à compressão estimada por diferentes autores.

ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Pretende-se efetuar a análise do desvio entre a resistência à tração simples (f_{ct,cil}), obtida do ensaio de provetes cilíndricos e das tensões de tração simples *in situ* (f_{is,ct,h}), obtidas através da equação (4.8).

Analisar o desvio entre a resistência à tração simples “real” (f_{ct,cil}), e a tração direta obtida do ensaio “pull-off” (f_{h,m,Lajeta}), para a consideração da associação direta dos resultados.

Da análise dos desvios entre resistências, resumidos na Tabela 4.41 e representados nos gráficos da Figura 4.43, verifica-se, na resistência à tração *in situ*, f_{is,ct,h} um desvio compreendido no intervalo $-0.45 MPa(inf.) \leq \Delta f_{is,ct,h} \leq 0.47 MPa(sup.)$, em termos percentuais $-12.57 \% \leq \Delta \leq 14.00\%$.

Tabela 4.41 - Variação de valores de tração simples equivalente a cilindros e da relação estabelecida.

Amass:	fh,m,Lajeta (MPa)	Real (Lab.)		Regressão linear	
		Ref:	fct,cil (MPa)	fis,ct,h (MPa)	Δ (%)
1	3.34	1P0	3.39	3.14	7.43%
		1P1	3.59		12.57%
		1P3	2.92		-7.49%
2	4.07	2P0	3.56	3.83	-7.74%
		2P4	3.67		-4.41%
		2P5	3.36		-14.00%
3	INVALIDO	3P2	-	-	-
		3P5	-		
		3P6	-		
4	2.59	4P3	2.78	2.43	12.54%
		4P4	2.55		4.64%
		4P5	2.77		12.16%

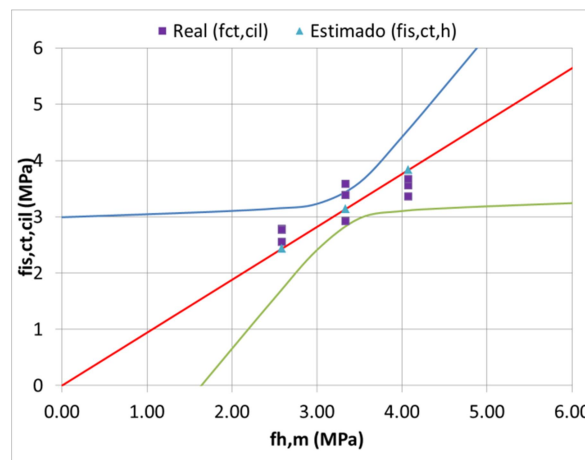


Figura 4.43 - Comparação dos resultados obtidos da resistência à tração.

Da análise da variação entre resistências, resumidos na Tabela 4.42, representadas nos gráficos da Figura 4.44, verifica-se, na resistência à tração direta f_h , um desvio da tensão do “real” compreendida no intervalo $-0.31 MPa \leq \Delta f_h \leq 0.81 MPa$, em termos percentuais $-8.5 \% \leq \Delta \leq 24.0 \%$.

Tabela 4.42 - Variação entre valores de tração simples equivalente a cilindros e tração direta.

Amass:	Real (Lab.)		Pull-off	
	Ref:	fct,cil (MPa)	fh,m (MPa)	Δ (%)
1	1P0	3.39	3.28	-3.2%
	1P1	3.59	3.28	-8.5%
	1P3	2.92	3.28	12.4%
2	2P0	3.56	4.17	17.2%
	2P4	3.67	4.17	13.6%
	2P5	3.36	4.17	24.0%
3	3P2	-	-	-
	3P5	-	-	-
	3P6	-	-	-
4	4P3	2.78	2.74	-1.3%
	4P4	2.55	2.74	7.6%
	4P5	2.77	2.74	-0.9%

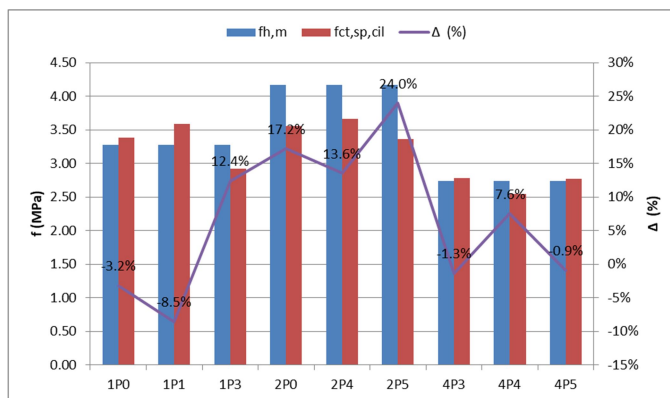


Figura 4.44 - Representação da variação entre valores de tração simples equivalente a cilindros e tração direta.

É possível concluir que dos dois métodos de estimativa da resistência à tração simples, o que mais se aproxima do real, é o obtido pela análise de regressão linear simples da resistência à tração *in situ* $f_{is,ct,h}$.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Na presente dissertação explorou-se um conjunto de técnicas de avaliação *in situ* das propriedades resistentes e de deformabilidade do betão. No decorrer de uma campanha experimental foram avaliadas as potencialidades e as limitações de diferentes tipos de ensaios não-destrutivos, ou semi-destrutivos. Foram conduzidos ensaios sobre provetes de betão em diferentes idades, com ou sem a presença de armadura e com diferentes condições de humidade. As grandezas caracterizadas foram sobretudo o módulo de elasticidade, a resistência à compressão e à tração do betão.

Verificou-se que foi com base em ensaios de ultrassons que se obteve a melhor estimativa *in situ* da resistência à compressão, com desvios do valor de referência de $-14.31\text{MPa} \leq \Delta f_{is,v} \leq 1.38\text{MPa}$, sendo por isso de considerar que, dos métodos utilizados, o ensaio de ultrassons seja o mais adequado para este efeito.

Relativamente aos resultados da resistência à compressão *in situ* característica foi também com base em ensaios de ultrassons que se obteve a estimativa mais próxima do valor de referência $f_{ck,is,cil}$ com desvios compreendidos entre $-5.94\text{MPa} \leq \Delta f_{ck,is,v} \leq 4.53\text{MPa}$ e classe de resistência C30/37 e a mais conservador pelo método de ensaio índice esclerométrico de valor, sempre inferior ao de referência com desvios de $-0.21\text{MPa} \leq \Delta f_{ck,is,r} \leq -9.44\text{MPa}$ e classe de resistência C25/30. Conclui-se dos desvios obtidos e com valor de referência de classe de resistência C35/45 obtida do ensaio de provetes cilíndricos em laboratório, que se obterá estimativas conservativas da utilização das relações desenvolvidas com o ensaio de provetes cilíndricos em laboratório

Da análise da estimativa da tensão de rotura à compressão em várias idades, de acordo com a NP EN 1992, e da evolução dos parâmetros de caracterização indireta ao longo do tempo, verifica-se que os valores do índice esclerométrico obtidos ao longo do tempo são os que melhor representam a resistência à compressão e os valores de V.P.U. são os que melhor representam o módulo de elasticidade, com desvio em relação ao real de $-2.93\text{GPa} (inf.) \leq \Delta E_{c,(E_{d,(v,\rho,vd)})} \leq 0.26\text{GPa} (sup.)$.

No entanto o método de determinação do índice esclerométrico, é o mais económico e de mais rápida e fácil execução. É de todos o que apresenta valores mais conservativos da resistência à compressão, com desvios do valor de referência de $-16.07 \text{ MPa} \leq \Delta f_{is,r} \leq 1.55 \text{ MPa}$.

O ensaio da determinação da velocidade de propagação de ultrassons é o que apresenta maior sensibilidade à experiência do operador na sua execução. Talvez por este facto foram encontrados, desvios entre métodos de transmissão de $1.98\% \leq \Delta \leq 7.01\%$. Apresenta também maior sensibilidade ao teor de humidade, em que, pelo método de transmissão direto se obtiveram desvios entre lajetas secas e saturadas de $1.06\% \leq \Delta \leq 2.17\%$ e à presença de armadura, com desvios entre alinhamentos, com armadura e sem armadura, de $0.07\% \leq \Delta \leq 2.08\%$.

O ensaio de determinação da tensão de tração direta é de todos os métodos de avaliação indireta aqui aplicados, o que provocou mais danos e de aplicação mais dispendiosa e morosa, devido ao tempo de espera para a cura do adesivo. Para estimar a resistência à tração simples apresenta valores próximos, com diferença entre tensões compreendidas entre $-0.45 \text{ MPa}(inf.) \leq \Delta f_{is,ct,h} \leq 0.47 \text{ MPa}(sup.)$. E é de todos o que apresentou desvios do valor estimado da resistência à compressão *in situ* superiores ao valor de referência $-7.16 \text{ MPa} \leq \Delta f_{h,is} \leq 3.07 \text{ MPa}$.

Nas circunstâncias em que não foram reproduzidas as mesmas condições e o mesmo tipo de betão para a utilização de correlações já estabelecidas, é possível concluir que é para os desvios da resistência à compressão *in situ* compreendidos entre $-1.63 \text{ MPa} \leq \Delta f_{h,is} \leq -13.57 \text{ MPa}$, obtidos pelo ensaio "pull-off", que são os mais conservadores e próximos, comparativamente as correlações estabelecidas utilizadas nos ensaios de determinação do índice esclerométrico e determinação da V.P.U. com desvios compreendidos entre, $-16.08 \text{ MPa} \leq \Delta f_{is,r} \leq 5.56 \text{ MPa}$ e $-21.18 \text{ MPa} \leq \Delta f_{is,v} \leq 3.42 \text{ MPa}$ respetivamente. Sendo aplicável a sua utilização para caracterização de betão com composição semelhante à aqui utilizada.

Devido ao grande intervalo dos desvios obtidos da utilização de correlações estabelecidas em função do índice esclerométrico e das V.P.U. que caracterizam o betão em análise, é aconselhável aquando da sua utilização a elaboração do ensaio de provetes ou carotes em laboratório, para verificar a sua fiabilidade.

No desenvolvimento da campanha experimental, foi possível adquirir uma vasta noção de como, através dos meios disponíveis, caracterizar as propriedades físicas e mecânicas do betão, bem como avaliar a sua integridade, pela combinação de ensaios em laboratório e *in situ*.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De forma a estudar a fiabilidade e aumentar a confiança nos métodos de avaliação indireta, é sugerida a elaboração de correlações entre os métodos indiretos e diretos, com um número de amassaduras superior a seis, com composição e proporções idênticas, variando a razão A/C para obtenção de um número mais elevado de pares de resultados dos ensaios efetuados nas lajetas e em provetes cilíndricos, em condições de igual maturidade, consolidação e condições de cura semelhantes.

Efetuar o ensaio esclerométrico em lajetas com superfícies retificadas, de forma a obter um contacto uniforme com a superfície onde esta apoiada, ou fixas pelo meio de uma prensa, com idêntica pré-carga aplicada nas lajetas das diferentes amassaduras.

Outro desenvolvimento poderá ser elaborar diferentes modelos de ensaio, para analisar o efeito de betão carbonatado e a influência da armadura, de diâmetro superior a 6 mm, nos métodos de caracterização indireta.

Finalmente, será relevante proceder à validação das relações entre métodos indiretos e diretos, através de uma campanha experimental conduzida em obra, de forma a aumentar a fiabilidade e confiança nos métodos de avaliação indiretos e nas correlações obtidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN 13791 2008, “Avaliação da resistência do betão nas estruturas e em produtos prefabricados,” *Lisboa IPQ*, p. 32, 2008.
- [2] ACI 437R-91, “Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings,” Farmington Hills, 1997.
- [3] J. H. Bungey et al., *Testing of Concrete in Structures: Fourth Edition*. Oxon: Tayler & Francis, 2006, ISBN: 0-415-26301-8. 2006.
- [4] NP EN 206:2013+A1-2017, “Betão Especificação, desempenho, produção e conformidade,” *Lisboa IPQ*, 2017.
- [5] V.M. Malhotra and N.J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete* 2^ª Edição. Florida: CRC Press LLC, 2004, ISBN 0-8031-2099-0. .
- [6] NP EN 1992-1-1:2010/AC, “Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios,” *Lisboa IPQ*, 2012.
- [7] Carlos Félix, *Materiais e suas Propriedades-Folhas de apoio às aulas de Estruturas de Betão: Instituto Superior de Engenharia do Porto*. 2010. .
- [8] ACI 214R-11, *Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [9] J. N. da Camara, “Estruturas de betão I-Folhas de apoio às aulas-Instituto superior Técnico,” 2015.
- [10] F. CEB-FIP, *Bulletin 51 Structural Concrete Vol.1, 2ª Edição International Federation for Structural Concrete*, 2009, ISBN: 978-2-88394-091-8. .
- [11] International Atomic Energy Agency, *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*, Vienna, 2002, no. 17. 2002.
- [12] NP EN 12390-2 2009, “Ensaio do betão endurecido Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica,” *Lisboa IPQ*, 2009.
- [13] NP EN 12390-3-2011, “Ensaio do betão endurecido Parte 3: Resistência à compressão de provetes,” *Lisboa IPQ*, vol. 2009, no. Ed 2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [14] NP EN 12390-1 2012, “Ensaio do betão endurecido Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes,” *Lisboa IPQ*, vol. 2012.
- [15] NP EN 12390-6-2011, “Ensaio do betão endurecido Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes,” *Lisboa IPQ*, vol. 2003.
- [16] NP EN 12390-5-2009, “Ensaio do betão endurecido Parte 5: Resistência à flexão de provetes,” *Lisboa IPQ*, vol. 2003.
- [17] A.M. Neville & J.J. Brooks, *Concrete Technology 2ª Edição*. London: Pearson, 2010, ISBN 978-0-273-73219-8. .
- [18] DIN 1048 - 1991 part 5, “Testing of hardened concrete.” .
- [19] BS 1881:Part 201:1986, “Testing Concrete Part 201. Guide to use of non-destructive methods of test for hardened concrete,” *BSI, London*, vol. 2, no. 2, pp. 1–14, 2010.
- [20] NP EN-12504-1-2003, “Ensaio do betão nas estruturas Parte 1: Carotes Extração, exame e ensaio à compressão,” *Lisboa IPQ*, p. 12.
- [21] NP EN 12504-2-2012, “Ensaio do betão nas estruturas Parte 2: Ensaio não destrutivo Determinação do índice esclerométrico,” *Lisboa IPQ*, p. 11.
- [22] ACI 228.1R-03, *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength Reported by ACI Committee 228*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2003.
- [23] BS-1881-Part-202-86, “Testing concrete part 202. Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer,” *BSI, London*, vol. 237, no. 2, pp. 150–159, 1986.
- [24] Operating Instructions, “Proceq Concrete Test Hammer DIGI-SHMIDT 2000 Modell ND / LD; Switzerland 2017.”
- [25] ASTM C805-02, “Rebound Number of Hardened Concrete,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 2–4, 2002.
- [26] BS 1881 Part 203, “Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete,” *BSI, London*, no. 1, 1986.
- [27] ASTM C 597-02, “Pulse Velocity Through Concrete,” *ASTM Stand.*, pp. 4–7, 1989.
- [28] NP EN 12504-4 2007, “Ensaio do betão nas estruturas Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons,” *Lisboa IPQ*, p. 18.
- [29] ACI 228.2R-13, “Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures,” Farmington Hills, 2013.
- [30] R. and I. F. Jones, “Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method.

- Matériaux et constructions Vol.2 N°10," 1969.
- [31] BS-8110-2:1985, "Structural use of concrete —Part 2: Code of practice for special circumstances," *BSI, London*, pp. 1–60, 1985.
- [32] P. Turgut, "Research into the correlation between concrete strength and UPV values" *NDT.net Dec 2004 Vol. 12 No.12 (Consult.20 Abr.2019)*.Disponível na *www*:.
<https://www.ndt.net/article/v09n12/turgut/turgut.htm>. .
- [33] M. C. S. NEPOMUCENO, *Ensaio não destrutivo em betão*. Covilhã Universidade da Beira Interior: Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, 1999.
- [34] EN-1542-1999, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off," *Brussels CEN*, p. 7.
- [35] 1583/C1583M-13 ASTM, "Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method) 1," *ASTM Stand.*, pp. 3–7, 2014.
- [36] BS 1881: Part 207:1992, "Testing Concrete Part 207. Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests," *Constr. Stand.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–14, 2010.
- [37] Oxford Brookes University, "On site pull-off method," pp. 1–2, 1999.
- [38] B. Almada-lobo, "Regressão Linear.Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Slides," pp. 1–80.
- [39] NP EN 197-1 2012, "Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes," *Lisboa IPQ*.
- [40] NP EN 12620 2004, "Agregados para betão," *Lisboa IPQ*, 2004.
- [41] NP EN 934-2, "Adjuvantes para betão," *Lisboa IPQ*, 2012.
- [42] NP EN 12350-2, "Ensaio de abaixamento," *Lisboa IPQ*, 2002.

ANEXO

Anexo 1:

- Resultados de ensaios efetuados em diferentes idade de cura, de determinação do índice esclerométrico e V.P.U..

Anexo 2:

- Resultados de ensaios determinação do índice esclerométrico, V.P.U. e tensão de rotura por tração direta “*pull-off*” para o estabelecimento das relações com resistência e deformabilidade.

Anexo 3:

- Resultados de ensaios de determinação da V.P.U da análise da influência da humidade.

Anexo 4:

- Estudo de composição de betão.

ANEXO 1:

Resultados de ensaios efetuados em diferentes idades de cura, de determinação do índice esclerométrico e V.P.U. por transmissão direta e indireta.

Metodo direto (Lajeta sem armadura)									
Amassadura	Idade (Dias)	Alinhamento	Compr. (mm)	Tempo médio de percurso (µs)	V(Km/s)	V _{media} (Km/s)	V _{media} (Km/s)	S (Km/s)	Cv (%)
1	7	0	300	67.40	4.45	4.42	4.40	0.03	0.69
		1		68.10	4.41				
		2		68.30	4.39				
		A	600	136.77	4.39	4.38			
		B		137.47	4.36				
		C		137.17	4.37				
	14	0	300	66.73	4.50	4.49	4.49	0.01	0.11
		1		66.73	4.50				
		2		66.90	4.48				
		A	600	133.70	4.49	4.49			
		B		133.53	4.49				
		C		133.77	4.49				
	21	0	300	65.87	4.55	4.54	4.54	0.01	0.26
		1		66.03	4.54				
		2		66.30	4.52				
		A	600	131.87	4.55	4.54			
		B		132.47	4.53				
		C		132.30	4.54				
	35	0	300	65.40	4.59	4.57	4.53	0.04	0.86
		1		65.80	4.56				
2		65.90		4.55					
A		600	133.40	4.50	4.50				
B			133.40	4.50					
C			133.33	4.50					
2	7	0	300	68.13	4.40	4.41	4.40	0.01	0.19
		1		67.87	4.42				
		2		68.07	4.41				
		A	600	136.47	4.40	4.40			
		B		136.37	4.40				
		C		136.37	4.40				
	15	0	300	66.50	4.51	4.51	4.50	0.01	0.22
		1		66.40	4.52				
		2		66.70	4.50				
		A	600	133.63	4.49	4.50			
		B		133.33	4.50				
		C		133.30	4.50				
	21	0	300	66.40	4.52	4.52	4.50	0.02	0.41
		1		66.47	4.51				
		2		66.27	4.53				
		A	600	133.90	4.48	4.49			
		B		133.77	4.49				
		C		133.40	4.50				
	29	0	300	66.60	4.50	4.52	4.51	0.02	0.53
		1		66.20	4.53				
2		66.10		4.54					
A		600	133.73	4.49	4.49				
B			133.70	4.49					
C			133.77	4.49					
3	7	0	300	69.30	4.33	4.33	4.33	0.01	0.29
		1		69.17	4.34				
		2		69.43	4.32				
		A	600	137.77	4.36	4.33			
		B		138.67	4.33				
		C		138.80	4.32				
	14	0	300	67.70	4.43	4.44	4.43	0.01	0.28
		1		67.43	4.45				
		2		67.43	4.45				
		A	600	135.60	4.42	4.42			
		B		135.53	4.43				
		C		135.73	4.42				
	21	0	300	66.50	4.51	4.50	4.49	0.01	0.22
		1		66.73	4.50				
		2		66.90	4.48				
		A	600	133.67	4.49	4.49			
		B		133.73	4.49				
		C		133.67	4.49				
	28	0	300	66.40	4.52	4.53	4.52	0.01	0.26
		1		66.00	4.55				
2		66.30		4.52					
A		600	132.50	4.53	4.52				
B			132.93	4.51					
C			132.90	4.51					
4	7	0	300	69.10	4.34	4.38	4.38	0.02	0.56
		1		68.23	4.40				
		2		68.00	4.41				
		A	600	137.30	4.37	4.37			
		B		137.40	4.37				
		C		137.00	4.38				
	14	0	300	67.60	4.44	4.45	4.44	0.01	0.17
		1		67.40	4.45				
		2		67.40	4.45				
		A	600	135.20	4.44	4.44			
		B		135.37	4.43				
		C		135.13	4.44				
	21	0	300	67.00	4.48	4.48	4.49	0.01	0.11
		1		66.90	4.48				
		2		66.80	4.49				
		A	600	133.83	4.48	4.49			
		B		133.67	4.49				
		C		133.63	4.49				
	28	0	300	66.30	4.52	4.56	4.55	0.02	0.45
		1		65.63	4.57				
2		65.60		4.57					
A		600	131.57	4.56	4.54				
B			132.10	4.54					
C			132.40	4.53					

Metodo direto (Lajeta Com armadura)									
Amassadura	Idade (Dias)	Alinhamento	Compr. (mm)	Tempo médio de percurso	V(Km/s)	V ₁ medial(Km/s)	V ₂ medial(Km/s)	S (Km/s)	Cv (%)
1	7	0	300	67.63	4.44	4.48	4.45	0.05	1.11
		1(C./Armd.)		66.77	4.49				
		2(C./Armd.)		66.40	4.52				
		A	136.57	4.39					
		B(C./Armd.)	136.17	4.41					
		C	135.47	4.43					
	14	0	300	65.83	4.56	4.59	4.56	0.04	0.96
		1(C./Armd.)		65.50	4.58				
		2(C./Armd.)		64.67	4.64				
		A	132.63	4.52					
		B(C./Armd.)	132.50	4.53					
		C	132.33	4.53					
	21	0	300	65.33	4.59	4.59	4.57	0.06	1.26
		1(C./Armd.)		66.33	4.52				
		2(C./Armd.)		64.40	4.66				
		A	133.57	4.49					
		B(C./Armd.)	131.40	4.57					
		C	131.57	4.56					
	35	0	300	65.57	4.58	4.59	4.55	0.05	1.01
		1(C./Armd.)		65.10	4.61				
		2(C./Armd.)		65.57	4.58				
		A	133.67	4.49					
		B(C./Armd.)	132.57	4.53					
		C	133.03	4.51					
2	7	0	300	68.40	4.39	4.38	4.38	0.01	0.25
		1(C./Armd.)		68.50	4.38				
		2(C./Armd.)		68.40	4.39				
		A	136.83	4.38					
		B(C./Armd.)	136.70	4.39					
		C	137.63	4.36					
	15	0	300	66.93	4.48	4.49	4.48	0.02	0.44
		1(C./Armd.)		66.67	4.50				
		2(C./Armd.)		66.63	4.50				
		A	134.73	4.45					
		B(C./Armd.)	134.23	4.47					
		C	134.37	4.47					
	21	0	300	66.60	4.50	4.52	4.50	0.02	0.47
		1(C./Armd.)		66.57	4.51				
		2(C./Armd.)		66.07	4.54				
		A	133.70	4.49					
		B(C./Armd.)	133.80	4.48					
		C	133.67	4.49					
29	0	300	66.43	4.52	4.55	4.49	0.07	1.51	
	1(C./Armd.)		65.60	4.57					
	2(C./Armd.)		65.80	4.56					
	A	136.37	4.40						
	B(C./Armd.)	134.80	4.45						
	C	134.60	4.46						
3	7	0	300	68.60	4.37	4.43	4.38	0.06	1.36
		1(C./Armd.)		67.20	4.46				
		2(C./Armd.)		67.37	4.45				
		A	137.70	4.36					
		B(C./Armd.)	138.37	4.34					
		C	138.73	4.32					
	14	0	300	67.43	4.45	4.48	4.45	0.04	0.90
		1(C./Armd.)		66.30	4.52				
		2(C./Armd.)		67.13	4.47				
		A	135.53	4.43					
		B(C./Armd.)	135.63	4.42					
		C	135.70	4.42					
	21	0	300	66.03	4.54	4.57	4.49	0.11	2.47
		1(C./Armd.)		65.40	4.59				
		2(C./Armd.)		65.63	4.57				
		A	133.63	4.49					
		B(C./Armd.)	133.73	4.49					
		C	140.10	4.28					
28	0	300	65.90	4.55	4.56	4.54	0.03	0.63	
	1(C./Armd.)		65.27	4.60					
	2(C./Armd.)		66.00	4.55					
	A	132.37	4.53						
	B(C./Armd.)	132.87	4.52						
	C	132.63	4.52						
4	7	0	300	68.87	4.36	4.38	4.36	0.03	0.64
		1(C./Armd.)		68.60	4.37				
		2(C./Armd.)		68.03	4.41				
		A	137.67	4.36					
		B(C./Armd.)	137.77	4.36					
		C	138.73	4.32					
	14	0	300	67.40	4.45	4.46	4.44	0.02	0.41
		1(C./Armd.)		67.27	4.46				
		2(C./Armd.)		67.27	4.46				
		A	135.37	4.43					
		B(C./Armd.)	135.70	4.42					
		C	135.73	4.42					
	21	0	300	66.70	4.50	4.50	4.49	0.02	0.45
		1(C./Armd.)		66.53	4.51				
		2(C./Armd.)		66.70	4.50				
		A	133.23	4.50					
		B(C./Armd.)	133.57	4.49					
		C	134.77	4.45					
28	0	300	66.33	4.52	4.54	4.52	0.03	0.62	
	1(C./Armd.)		66.23	4.53					
	2(C./Armd.)		65.73	4.56					
	A	132.77	4.52						
	B(C./Armd.)	132.87	4.52						
	C	134.03	4.48						

Metodo Indireto (Lajeta sem armadura)												
Amassadura	Idade (Dias)	Alinhamento	Tempo médio de percurso (μ s)				R^2	Declive	V(Km/s)	V,media(Km/s)	S (Km/s)	C.V.(%)
			Distancia entre transdutores (mm)									
			150	250	350	450						
1	7	A	34.43	55.67	81.73	103.60	0.9985	0.23	4.28	4.18	0.14	3.43
		B	31.47	55.27	80.07	106.23	0.9995	0.25	4.01			
		C	33.70	58.60	80.07	105.20	0.9991	0.24	4.24			
	14	A	30.73	54.60	78.50	101.53	0.9999	0.24	4.23	4.25	0.04	0.94
		B	30.60	53.70	76.63	100.57	0.9999	0.23	4.29			
		C	30.27	55.60	78.60	101.57	0.9994	0.24	4.22			
	21	A	30.73	52.70	75.50	98.70	0.9998	0.23	4.41	4.39	0.03	0.77
		B	30.23	51.17	75.53	98.70	0.9991	0.23	4.35			
		C	31.17	51.57	75.80	98.67	0.9989	0.23	4.41			
	35	A	31.37	51.33	76.43	101.40	0.9972	0.24	4.25	4.28	0.05	1.18
		B	31.37	51.50	75.53	101.63	0.9967	0.23	4.26			
		C	31.23	52.50	75.50	100.33	0.9988	0.23	4.34			
2	7	A	30.30	53.70	78.70	101.53	0.9997	0.24	4.19	4.21	0.01	0.34
		B	29.80	55.67	78.47	101.37	0.9990	0.24	4.21			
		C	32.53	55.60	79.53	103.60	0.9999	0.24	4.22			
	15	A	30.63	52.33	77.40	100.70	0.9993	0.24	4.25	4.22	0.05	1.19
		B	29.27	52.70	77.63	99.40	0.9994	0.24	4.25			
		C	29.80	53.67	78.70	101.53	0.9997	0.24	4.16			
	21	A	30.27	52.27	75.73	97.53	0.9998	0.23	4.44	4.40	0.06	1.33
		B	29.17	52.57	76.57	96.53	0.9984	0.23	4.42			
		C	29.37	52.40	75.60	98.60	1.0000	0.23	4.33			
	29	A	31.30	53.73	77.43	104.63	0.9980	0.24	4.10	4.23	0.11	2.64
		B	31.23	54.50	76.43	101.47	0.9993	0.23	4.30			
		C	32.50	54.10	76.60	102.60	0.9981	0.23	4.30			
3	7	A	32.00	56.53	79.70	105.63	0.9995	0.24	4.10	4.11	0.05	1.12
		B	31.63	54.60	79.23	103.43	0.9998	0.24	4.17			
		C	30.60	55.47	78.57	104.63	0.9995	0.25	4.08			
	14	A	31.17	53.17	78.17	100.50	0.9994	0.23	4.29	4.35	0.07	1.71
		B	31.60	53.43	78.40	100.53	0.9993	0.23	4.31			
		C	31.17	54.50	78.10	98.53	0.9989	0.23	4.43			
	21	A	30.47	52.27	75.00	99.70	0.9992	0.23	4.34	4.29	0.06	1.30
		B	31.40	51.70	74.30	101.20	0.9959	0.23	4.31			
		C	30.20	52.13	75.23	101.27	0.9984	0.24	4.23			
	28	A	29.60	53.37	76.50	99.50	0.9999	0.23	4.29	4.33	0.04	1.03
		B	30.33	52.37	76.47	99.67	0.9997	0.23	4.31			
		C	29.33	51.30	75.50	97.40	0.9996	0.23	4.38			
4	7	A	32.53	54.60	78.23	102.23	0.9996	0.23	4.30	4.28	0.05	1.09
		B	32.60	55.53	77.23	102.50	0.9991	0.23	4.32			
		C	32.50	54.60	77.73	103.57	0.9987	0.24	4.23			
	14	A	31.67	55.23	76.50	101.33	0.9992	0.23	4.34	4.34	0.03	0.65
		B	31.50	55.20	77.50	101.50	0.9998	0.23	4.30			
		C	31.40	55.40	77.37	100.53	0.9997	0.23	4.36			
	21	A	31.37	53.60	76.47	101.67	0.9991	0.23	4.28	4.27	0.02	0.36
		B	31.43	53.17	76.47	101.40	0.9991	0.23	4.29			
		C	29.60	53.37	76.43	100.20	1.0000	0.23	4.26			
	28	A	30.20	52.27	74.40	98.57	0.9995	0.23	4.40	4.41	0.01	0.25
		B	30.60	52.40	75.40	98.30	0.9998	0.23	4.42			
		C	30.27	52.87	75.43	98.33	1.0000	0.23	4.41			

Metodo Indireto (Lajeta Com armadura)												
Amassadura	Idade (Dias)	Alinhamento	Tempo médio de percurso (μ s)				R ²	Declive	V(Km/s)	V _{media} (Km/s)	S (Km/s)	C.V.(%)
			Distancia entre transdutores (mm)									
			150	250	350	450						
1	7	A (S/Armd.)	31.43	53.40	77.33	102.70	0.9990	0.24	4.21	4.20	0.04	0.94
		B (C/Armd.)	31.80	55.60	80.63	103.60	0.9998	0.24	4.16			
		C (S/Armd.)	31.40	53.73	76.63	102.43	0.9988	0.24	4.24			
	14	A (S/Armd.)	30.27	53.43	76.60	100.63	0.9999	0.23	4.27	4.29	0.09	2.21
		B (C/Armd.)	29.43	51.50	76.50	100.33	0.9994	0.24	4.21			
		C (S/Armd.)	30.23	52.60	75.13	98.60	0.9999	0.23	4.39			
	21	A (S/Armd.)	30.63	51.73	76.70	100.67	0.9988	0.24	4.25	4.29	0.03	0.79
		B (C/Armd.)	30.60	51.73	76.47	99.67	0.9991	0.23	4.31			
		C (S/Armd.)	30.63	51.83	76.57	99.67	0.9992	0.23	4.31			
35	A (S/Armd.)	31.23	52.50	75.43	101.60	0.9978	0.23	4.27	4.30	0.08	1.76	
	B (C/Armd.)	30.37	52.50	75.00	101.50	0.9981	0.24	4.24				
	C (S/Armd.)	31.57	53.00	74.53	100.43	0.9977	0.23	4.38				
2	7	A (S/Armd.)	32.70	54.70	77.60	104.53	0.9977	0.24	4.19	4.17	0.03	0.63
		B (C/Armd.)	31.50	55.70	80.67	103.60	0.9997	0.24	4.14			
		C (S/Armd.)	30.60	54.47	77.60	102.57	0.9998	0.24	4.18			
	15	A (S/Armd.)	30.63	53.63	76.37	100.70	0.9998	0.23	4.29	4.35	0.05	1.24
		B (C/Armd.)	30.20	52.70	76.70	98.67	0.9997	0.23	4.36			
		C (S/Armd.)	30.63	53.40	76.37	98.73	1.0000	0.23	4.40			
	21	A (S/Armd.)	28.70	52.30	75.70	98.50	0.9999	0.23	4.30	4.29	0.02	0.43
		B (C/Armd.)	27.37	50.60	75.47	96.57	0.9990	0.23	4.30			
		C (S/Armd.)	28.37	51.67	75.50	98.53	1.0000	0.23	4.27			
29	A (S/Armd.)	30.37	53.70	76.57	99.50	1.0000	0.23	4.34	4.32	0.04	0.94	
	B (C/Armd.)	30.87	52.60	76.53	99.53	0.9997	0.23	4.35				
	C (S/Armd.)	28.60	52.27	76.13	98.60	0.9998	0.23	4.28				
3	7	A (S/Armd.)	32.47	54.60	79.60	103.60	0.9994	0.24	4.19	4.15	0.07	1.65
		B (C/Armd.)	32.23	54.53	79.13	103.67	0.9995	0.24	4.19			
		C (S/Armd.)	30.60	54.20	78.57	104.33	0.9996	0.25	4.07			
	14	A (S/Armd.)	31.60	52.40	76.43	100.33	0.9989	0.23	4.34	4.29	0.05	1.05
		B (C/Armd.)	31.17	51.70	77.37	100.50	0.9983	0.23	4.28			
		C (S/Armd.)	30.90	53.07	76.50	101.40	0.9993	0.23	4.26			
	21	A (S/Armd.)	30.20	52.53	76.20	100.37	0.9997	0.23	4.27	4.29	0.01	0.32
		B (C/Armd.)	30.23	52.40	75.47	100.30	0.9993	0.23	4.29			
		C (S/Armd.)	30.63	51.17	74.63	100.37	0.9975	0.23	4.30			
28	A (S/Armd.)	30.40	52.50	75.13	98.53	0.9998	0.23	4.40	4.33	0.07	1.50	
	B (C/Armd.)	28.87	52.20	75.10	98.57	1.0000	0.23	4.31				
	C (S/Armd.)	29.53	52.13	75.60	99.60	0.9998	0.23	4.28				
4	7	A (S/Armd.)	30.83	54.60	78.10	102.53	0.9999	0.24	4.19	4.20	0.01	0.23
		B (C/Armd.)	30.60	55.63	77.50	102.60	0.9993	0.24	4.20			
		C (S/Armd.)	30.33	55.67	76.60	102.53	0.9984	0.24	4.21			
	14	A (S/Armd.)	29.40	52.17	76.50	100.50	0.9998	0.24	4.21	4.26	0.05	1.09
		B (C/Armd.)	29.67	52.63	75.27	99.67	0.9997	0.23	4.30			
		C (S/Armd.)	29.77	53.53	75.67	100.43	0.9996	0.23	4.27			
	21	A (S/Armd.)	31.03	52.50	76.07	100.50	0.9992	0.23	4.31	4.30	0.01	0.34
		B (C/Armd.)	30.50	51.47	75.07	100.30	0.9983	0.23	4.29			
		C (S/Armd.)	30.13	53.40	75.80	100.50	0.9996	0.23	4.28			
28	A (S/Armd.)	28.40	51.63	76.40	99.57	0.9998	0.24	4.20	4.28	0.07	1.65	
	B (C/Armd.)	28.37	51.47	74.40	98.17	0.9999	0.23	4.30				
	C (S/Armd.)	29.00	53.47	76.30	98.37	0.9994	0.23	4.33				

índice esclerométrico (Lajeta Com armadura)																
Amassadura	Idade (Dias)	Área de ensaio	índice esclerométrico (R)									Mediana (R)	Mediana (R)	Média (R)	S (R)	C.V.(%)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9					
1	7	A	29	24	27	30	32	30	32	30	28	30	32	31	2.82	9.06
		B	28	32	32	28	31	32	32	33	33	32				
		C	32	37	36	30	33	32	30	31	36	32				
	14	A	35	29	33	34	36	34	29	34	34	34	34	35	4.79	13.68
		B	43	35	37	39	41	34	49	42	33	39				
		C	41	33	32	32	34	31	32	29	30	32				
	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	35	A	35	38	34	33	36	34	35	34	35	35	35	36	3.14	8.62
		C1	40	44	42	37	34	41	34	41	33	40				
		C3	33	35	36	36	35	41	35	34	39	35				
2	7	A	30	31	28	30	34	28	33	38	30	30	35	35	3.76	10.84
		B	35	38	30	38	33	35	36	38	36	36				
		C	38	39	39	36	34	43	36	35	36	36				
	15	A	32	36	37	36	32	35	42	39	37	36	36	36	2.30	6.33
		B	38	36	36	38	36	36	35	36	38	36				
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	21	A	40	38	35	42	43	37	42	36	35	38	39	38	3.97	10.36
		B	45	39	42	39	43	40	35	42	43	42				
		C	42	40	33	38	36	32	35	33	30	35				
	29	A	47	42	35	33	37	41	41	36	43	41	42	41	4.07	9.88
		C1	44	45	48	43	46	43	42	48	43	44				
		C2	40	36	43	37	39	39	38	45	38	39				
3	7	A	31	30	29	31	31	29	32	32	32	31	32	33	3.26	9.89
		B	35	34	34	33	35	32	34	32	29	34				
		C	34	33	34	46	32	34	32	37	32	34				
	14	A	29	30	32	38	35	36	34	34	33	34	34	33	2.60	7.81
		B	35	34	35	32	34	26	32	31	30	32				
		C	35	32	36	34	34	32	34	35	37	34				
	21	A	34	35	36	33	33	35	32	37	37	35	35	36	2.24	6.31
		B	39	37	34	37	40	34	37	39	33	37				
		C	38	34	36	39	36	33	35	33	34	35				
	28	A	31	37	38	38	37	36	35	41	44	37	38	37	3.52	9.43
		B	38	39	37	38	38	44	39	38	34	38				
		C	39	33	39	44	33	35	35	37	30	35				
4	7	A	28	29	29	32	32	30	30	34	28	30	30	31	4.35	13.99
		B	34	29	49	28	34	31	31	28	30	31				
		C	32	31	34	29	36	28	31	26	27	31				
	14	A	30	32	31	36	30	39	32	34	31	32	30	31	3.09	10.11
		B	29	27	27	34	27	27	31	29	27	27				
		C	30	32	35	30	28	28	31	27	32	30				
	21	A	31	32	33	36	34	34	32	32	36	33	33	33	2.41	7.37
		B	33	34	31	30	39	33	29	37	33	33				
		C	35	33	30	30	29	32	33	32	31	32				
	28	A	32	35	33	35	33	34	32	33	32	33	33	32	2.14	6.67
		B	34	34	35	33	33	32	33	34	33	33				
		C	32	32	28	32	29	28	29	30	28	29				

índice esclerométrico (Lajeta Sem armadura)																
Amassadura	Idade (Dias)	Área de ensaio	índice esclerométrico (R)									Mediana (R)	Mediana (R)	Média (R)	S (R)	C.V.(%)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9					
1	7	A	32	29	29	29	31	30	31	31	29	30	31	31	1.44	4.70
		B	30	33	34	33	32	31	31	29	31	31				
		C	32	29	30	31	30	31	32	29	29	30				
	14	A	35	34	33	38	34	33	37	35	37	35	34	34	2.44	7.16
		B	35	38	33	38	33	34	34	33	34	34				
		C	34	38	33	32	35	32	30	32	28	32				
	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	35	A	34	37	35	38	36	35	39	35	36	36	35	35	3.56	10.09
		B	33	35	39	41	36	22	31	36	37	36				
		C	38	36	35	34	33	34	34	40	32	34				
2	7	A	31	28	33	34	31	27	31	38	28	31	33	34	3.41	10.10
		B	33	38	39	32	35	36	32	35	41	35				
		C	35	36	36	31	36	37	33	33	33	35				
	15	A	36	35	33	43	35	41	37	41	36	36	37	37	3.96	10.62
		B	39	45	41	43	38	42	42	40	37	41				
		C	34	33	33	33	35	33	37	34	30	33				
	21	A	38	34	36	33	41	40	47	41	37	38	38	38	3.80	9.98
		B	37	42	42	44	35	39	40	39	41	40				
		C	36	33	35	42	33	39	37	32	34	35				
	29	A	43	42	39	42	44	40	42	46	44	42	42	40	3.88	9.63
		C1	45	42	38	35	33	32	36	39	32	36				
		C2	44	43	39	39	40	42	42	43	43	42				
3	7	A	30	31	29	32	30	31	32	32	31	31	32	32	1.88	5.81
		B	33	34	33	34	34	35	34	33	33	34				
		C	34	33	28	36	32	32	30	32	34	32				
	14	A	32	36	37	35	34	34	31	35	29	34	34	34	3.08	9.19
		B	35	39	30	33	34	29	33	33	30	33				
		C	40	36	31	36	37	35	29	29	33	35				
	21	A	32	38	40	33	34	35	36	39	38	36	36	36	2.20	6.13
		B	38	37	34	38	39	36	34	37	34	37				
		C	35	35	36	36	35	38	36	32	33	35				
	28	A	38	34	33	35	40	39	43	36	37	37	36	37	3.24	8.80
		B	39	34	34	43	37	44	36	38	36	37				
		C	41	37	35	37	34	34	36	34	31	35				
4	7	A	25	26	23	24	29	29	26	28	24	26	29	29	3.18	11.07
		B	31	30	29	29	28	35	29	28	30	29				
		C	32	33	26	29	29	28	27	34	35	29				
	14	A	39	37	29	35	29	31	33	33	30	33	31	32	2.93	9.18
		B	31	30	30	32	30	27	32	31	29	30				
		C	30	35	32	32	32	39	31	32	30	32				
	21	A	32	32	30	33	33	33	32	33	33	33	33	33	1.05	3.23
		B	33	31	32	32	34	32	33	33	31	32				
		C	32	33	33	33	35	33	32	34	31	33				
	28	A	32	32	31	31	33	29	32	29	29	31	31	30	1.72	5.64
		B	33	33	33	31	31	29	32	31	29	31				
		C	29	32	29	30	27	29	30	29	28	29				

ANEXO 2:

Resultados de ensaios determinação do índice esclerométrico, V.P.U. e tensão de rotura por tração direta “*pull-off*” para o estabelecimento das relações com resistência e deformabilidade.

Metodo direto (Lajeta sem armadura)									
Amassadura	Idade (Dias)	Alinhamento	Compr. (mm)	Tempo médio de percurso (μ s)	V(Km/s)	V,media(Km/s)	V,media(Km/s)	S (Km/s)	Cv (%)
1	76	0	300	66.80	4.49	4.47	4.48	0.02	0.47
		1		67.07	4.47				
		2		67.60	4.44				
		A	600	133.73	4.49	4.49			
		B		133.60	4.49				
C	133.60	4.49							
2	78	0	300	66.77	4.49	4.49	4.49	0.01	0.12
		1		66.83	4.49				
		2		66.97	4.48				
		A	600	133.57	4.49	4.49			
		B		133.77	4.49				
		C		133.50	4.49				
3	76	0	300	68.53	4.38	4.38	4.39	0.02	0.45
		1		68.50	4.38				
		2		68.63	4.37				
		A	600	135.57	4.43	4.40			
		B		136.63	4.39				
C	136.67	4.39							
4	77	0	300	68.67	4.37	4.38	4.37	0.01	0.26
		1		68.33	4.39				
		2		68.53	4.38				
		A	600	137.50	4.36	4.36			
		B		137.43	4.37				
		C		137.67	4.36				

Metodo direto (Lajeta Com armadura)									
Amassadura	Idade (Dias)	Alinhamento	Compr. (mm)	Tempo médio de percurso	V(Km/s)	V,media(Km/s)	V,media(Km/s)	S (Km/s)	Cv (%)
1	76	0	300	66.50	4.51	4.53	4.53	0.02	0.49
		1 (C./Armd.)		66.37	4.52				
		2 (C./Armd.)		65.63	4.57				
		A	600	132.73	4.52	4.52			
		B (C./Armd.)		132.70	4.52				
C	132.90	4.51							
2	78	0	300	67.00	4.48	4.49	4.44	0.06	1.27
		1 (C./Armd.)		66.63	4.50				
		2 (C./Armd.)		66.83	4.49				
		A	600	137.57	4.36	4.39			
		B (C./Armd.)		136.50	4.40				
C	135.53	4.43							
3	76	0	300	68.30	4.39	4.38	4.39	0.01	0.24
		1 (C./Armd.)		68.70	4.37				
		2 (C./Armd.)		68.50	4.38				
		A	600	136.60	4.39	4.39			
		B (C./Armd.)		136.67	4.39				
C	136.63	4.39							
4	77	0	300	68.70	4.37	4.40	4.37	0.04	0.85
		1 (C./Armd.)		68.40	4.39				
		2 (C./Armd.)		67.63	4.44				
		A	600	137.63	4.36	4.35			
		B (C./Armd.)		137.60	4.36				
C	138.77	4.32							

Metodo Indireto (Lajeta sem armadura)												
Amassadura	Idade (Dias)	Alinhamento	Tempo médio de percurso (μ s)				R ²	Declive	V(Km/s)	V _{media} (Km/s)	S (Km/s)	C.V.(%)
			Distancia entre transdutores (mm)									
			150	250	350	450						
1	76	A	33.63	57.53	82.57	102.77	0.9981	0.23	4.30	4.21	0.08	1.82
		B	33.17	58.53	83.63	104.70	0.9981	0.24	4.17			
		C	32.97	57.70	82.57	104.67	0.9993	0.24	4.17			
2	78	A	33.43	57.33	81.30	105.53	1.0000	0.24	4.16	4.21	0.04	1.06
		B	33.63	57.63	80.43	104.63	0.9999	0.24	4.24			
		C	33.63	57.17	80.27	104.60	0.9999	0.24	4.24			
3	76	A	34.57	58.53	84.30	104.50	0.9977	0.24	4.25	4.12	0.12	2.96
		B	32.60	56.70	84.70	106.57	0.9980	0.25	4.00			
		C	32.73	55.57	82.70	104.67	0.9984	0.24	4.12			
4	77	A	32.37	57.73	82.80	104.43	0.9986	0.24	4.14	4.16	0.02	0.54
		B	34.40	56.50	81.63	105.60	0.9994	0.24	4.19			
		C	33.43	55.70	82.70	104.57	0.9983	0.24	4.16			

Metodo Indireto (Lajeta com armadura)												
Amassadura	Idade (Dias)	Alinhamento	Tempo médio de percurso (μ s)				R ²	Declive	V(Km/s)	V _{media} (Km/s)	S (Km/s)	C.V.(%)
			Distancia entre transdutores (mm)									
			150	250	350	450						
1	76	A (S/Armd.)	32.67	56.57	80.63	102.67	0.9996	0.23	4.27	4.26	0.05	1.20
		B (C/Armd.)	32.60	55.77	80.40	101.73	0.9993	0.23	4.31			
		C (S/Armd.)	31.40	56.63	80.67	102.60	0.9990	0.24	4.21			
2	78	A (S/Armd.)	34.23	58.33	83.70	106.63	0.9997	0.24	4.12	4.19	0.06	1.49
		B (C/Armd.)	34.33	58.57	83.63	104.60	0.9986	0.24	4.24			
		C (S/Armd.)	33.60	57.53	81.37	104.67	1.0000	0.24	4.22			
3	76	A (S/Armd.)	34.57	57.70	82.40	105.80	0.9998	0.24	4.19	4.15	0.04	0.93
		B (C/Armd.)	35.33	58.63	85.67	106.67	0.9979	0.24	4.15			
		C (S/Armd.)	33.57	56.60	83.37	105.60	0.9988	0.24	4.12			
4	77	A (S/Armd.)	32.27	56.70	81.73	104.67	0.9997	0.24	4.13	4.12	0.01	0.36
		B (C/Armd.)	31.83	56.60	81.60	104.63	0.9997	0.24	4.11			
		C (S/Armd.)	32.60	55.67	81.57	104.53	0.9994	0.24	4.14			

Tração direta; Pull-off. (Lajeta sem armadura)										
Amassadura	Idade (Dias)	Disco	Modo rotura	F,h (N)	f,h (MPa)	f,h,médio (MPa)	S (MPa)	C.V.(%)	t (s)	Taxa (MPa/s)
1	79	1	R.A.	7148.00	INVALIDO	3.28	0.64	19.39	-	-
		2	R.S.	5943.00	3.03				-	-
		3	R.A.	6140.00	INVALIDO				-	-
		4	R.S.	7865.00	4.01				-	-
		5	R.S.	5521.00	2.81				-	-
2	81	1	R.S.	8424.00	4.29	4.17	0.29	6.84	15	0.29
		2	R.S.	7895.00	4.02				25	0.16
		3	R.A.	7800.00	INVALIDO				45	-
		4	R.S.	8840.00	4.50				68	0.07
		5	R.S.	7577.00	3.86				64	0.06
3	79	1	R.A.	7710.00	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO	-	-
		2	R.A.	6768.00	INVALIDO				-	-
		3	R.A.	5544.00	INVALIDO				-	-
		4	R.A.	7597.00	INVALIDO				-	-
		5	R.A.	6669.00	INVALIDO				-	-
4	80	1	R.S.	5804.00	2.96	2.74	0.46	0.17	57	0.05
		2	R.A.	4550.00	INVALIDO				58	-
		3	R.S.	4094.00	2.09				34	0.06
		4	R.S.	6139.00	3.13				49	0.06
		5	R.S.	5518.00	2.81				40	0.07

ANEXO

Tração direta; Pull-off. (Lajeta com armadura)										
Amassadura	Idade (Dias)	Disco	Modo rotura	F,h (N)	f,h (MPa)	f,h,médio (MPa)	S (MPa)	C.V.(%)	t (s)	Taxa (MPa/s)
1	79	1	R.S.	7501.00	3.82	3.38	0.30	8.79	-	-
		2	R.A.	7358.00	INVALIDO				-	-
		3	R.S.	6421.00	3.27				-	-
		4	R.S.	6256.00	3.19				-	-
		5	R.S.	6350.00	3.23				-	-
2	81	1	R.S.	8179.00	4.17	3.98	0.60	14.95	-	-
		2	R.S.	8808.00	4.49				-	-
		3	R.S.	8159.00	4.16				-	-
		4	R.S.	6123.00	3.12				70	0.04
		5	R.A.	6115.00	INVALIDO				-	-
3	79	1	R.A.	5934.00	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO	INVALIDO	-	-
		2	R.A.	6396.00	INVALIDO				-	-
		3	R.A.	6986.00	INVALIDO				-	-
		4	R.A.	4762.00	INVALIDO				-	-
		5	R.A.	5789.00	INVALIDO				-	-
4	80	1	R.S.	5079.00	2.59	2.43	0.41	0.17	35	0.07
		2	R.S.	3656.00	1.86				34	0.05
		3	R.S.	4836.00	2.46				53	0.05
		4	R.S.	5517.00	2.81				43	0.07
		5	R.A.	4667.00	INVALIDO				30	-

índice esclerométrico (Lajeta Com armadura)																
Amassadura	Idade (Dias)	Área de ensaio	índice esclerométrico (R)									Mediana (R)	Mediana (R)	Média (R)	S (R)	C.V.(%)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9					
1	76	A	32	31	36	30	33	40	34	38	37	34	36	36	4.07	11.23
		C	37	38	35	40	36	38	30	33	32	36				
		C0	36	36	39	41	45	42	32	34	44	39				
2	78	A1	27	35	36	36	36	31	39	34	35	35	36	36	5.22	14.52
		C3	28	30	36	42	37	33	30	27	33	33				
		C4	44	40	42	41	45	39	32	38	44	41				
3	76	A	27	32	30	37	31	38	33	34	38	33	33	34	4.67	13.80
		B	34	34	43	31	37	38	31	39	43	37				
		C	29	35	31	32	32	41	26	29	28	31				
4	77	A	33	33	32	30	27	33	30	32	39	32	33	34	4.72	13.72
		C0	32	34	33	38	31	33	31	29	31	32				
		B1	34	33	43	42	44	36	38	45	32	38				

índice esclerométrico (Lajeta Sem armadura)																
Amassadura	Idade (Dias)	Área de ensaio	índice esclerométrico (R)									Mediana (R)	Mediana (R)	Média (R)	S (R)	C.V.(%)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9					
1	76	A0	40	41	37	42	35	35	33	38	34	37	40	39	4.22	10.87
		C2	44	37	44	40	40	45	34	40	44	40				
		C3	37	49	35	40	34	42	34	34	41	37				
2	78	A	28	34	29	36	30	37	36	33	48	34	36	37	5.06	13.73
		A0	33	35	36	40	41	38	39	48	41	39				
		A1	34	30	34	41	41	37	35	42	40	37				
3	76	A	28	30	31	32	37	29	30	34	30	30	33	34	4.45	13.08
		C	37	35	33	39	29	31	28	36	31	33				
		C0	42	35	35	32	37	40	33	41	44	37				
4	77	A	29	30	29	26	30	29	33	33	30	30	30	30	3.71	12.19
		B	28	30	34	28	29	36	30	30	36	30				
		C	35	40	34	26	29	28	23	26	32	29				

ANEXO 3:

Resultados de ensaios de determinação da V.P.U da análise da influência da humidade.

ANEXO

Metodo direto (Lajeta sem armadura)														
Amassa ura	Alinham ento	Compr. (mm)	Pré-Imersão				Saturado				Após secagem			
			Idade (Dias)	Tempo médio de percurso (µs)	V(Km/s)	V,media(Km/s)	Idade (Dias)	Tempo médio de percurso (µs)	V(Km/s)	V,media(Km/s)	Idade (Dias)	Tempo médio de percurso (µs)	V(Km/s)	V,media(Km/s)
1	0	300	112	67.73	4.43	4.43	119	66.63	4.50	4.51	126	68.70	4.37	4.43
	1			68.33	4.39			66.60	4.50			68.03	4.41	
	2			68.33	4.39			66.60	4.50			68.63	4.37	
	A	134.43		4.46	133.00			4.51	133.77			4.49		
	B	134.57		4.46	132.63			4.52	134.33			4.47		
	C	135.50		4.43	133.30			4.50	134.80			4.45		
2	0	300	107	67.23	4.46	4.47	114	66.53	4.51	4.52	121	67.80	4.42	4.45
	1			67.23	4.46			66.47	4.51			67.67	4.43	
	2			66.90	4.48			66.30	4.52			67.77	4.43	
	A	134.37		4.47	132.27			4.54	133.47			4.50		
	B	134.07		4.48	132.67			4.52	133.90			4.48		
	C	133.83		4.48	132.60			4.52	134.63			4.46		
3	0	300	90	69.23	4.33	4.34	97	68.50	4.38	4.39	104	69.30	4.33	4.33
	1			69.70	4.30			68.07	4.41			69.40	4.32	
	2			69.53	4.31			68.47	4.38			69.33	4.33	
	A	137.60		4.36	136.50			4.40	137.73			4.36		
	B	136.83		4.38	136.73			4.39	138.63			4.33		
	C	137.37		4.37	136.70			4.39	138.30			4.34		
4	0	300	85	70.07	4.28	4.32	92	68.60	4.37	4.41	99	69.70	4.30	4.34
	1			69.50	4.32			67.90	4.42			69.60	4.31	
	2			70.20	4.27			67.40	4.45			69.20	4.34	
	A	136.77		4.39	136.33			4.40	137.60			4.36		
	B	137.57		4.36	136.50			4.40	137.53			4.36		
	C	138.60		4.33	136.53			4.39	137.50			4.36		

Metodo direto (Lajeta Com armadura)														
Amassa ura	Alinham ento	Compr. (mm)	Pré-Imersão				Saturado				Após secagem			
			Idade (Dias)	Tempo médio de percurso (µs)	V(Km/s)	V,media(Km/s)	Idade (Dias)	Tempo médio de percurso (µs)	V(Km/s)	V,media(Km/s)	Idade (Dias)	Tempo médio de percurso (µs)	V(Km/s)	V,media(Km/s)
1	0	300	112	67.63	4.44	4.47	119	66.30	4.52	4.57	67	67.70	4.43	4.46
	1			67.43	4.45			64.93	4.62			67.33	4.46	
	2			66.70	4.50			64.30	4.67			67.20	4.46	
	A	134.03		4.48	132.70			4.52	134.40			4.46		
	B	133.50		4.49	132.13			4.54	134.60			4.46		
	C	134.27		4.47	132.50			4.53	134.60			4.46		
2	0	300	107	67.53	4.44	4.44	114	67.20	4.46	4.52	68	68.20	4.40	4.42
	1			67.07	4.47			65.03	4.61			67.63	4.44	
	2			67.33	4.46			65.10	4.61			67.50	4.44	
	A	136.20		4.41	134.70			4.45	136.53			4.39		
	B	135.60		4.42	133.67			4.49	135.77			4.42		
	C	135.40		4.43	134.13			4.47	135.60			4.42		
3	0	300	90	68.80	4.36	4.38	97	67.77	4.43	4.44	69	68.97	4.35	4.35
	1			68.60	4.37			66.63	4.50			68.60	4.37	
	2			68.67	4.37			66.33	4.52			68.60	4.37	
	A	137.23		4.37	136.33			4.40	137.73			4.36		
	B	136.67		4.39	136.17			4.41	138.63			4.33		
	C	136.77		4.39	136.60			4.39	138.33			4.34		
4	0	300	85	69.53	4.31	4.32	92	68.17	4.40	4.41	69	69.37	4.32	4.34
	1			70.10	4.28			67.20	4.46			69.37	4.32	
	2			70.13	4.28			67.50	4.44			69.43	4.32	
	A	137.70		4.36	136.47			4.40	137.13			4.38		
	B	138.43		4.33	136.50			4.40	137.57			4.36		
	C	138.57		4.33	137.80			4.35	138.47			4.33		

ANEXO 4:

Estudo de composição de betão.

ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DE BETÃO

C25/30 S3 D22 XC2 (P) CI0,2

C30/37 S3 D22 XC4 (P) CI0,2

10 de Abril de 2019



Empresa:
OBRAS / Local:

ESTUDO DE
COMPOSIÇÃO DE BETÃO

1 – INTRODUÇÃO

O Departamento de Betão Pronto da Alexandre Barbosa Borges, S.A., tem uma existência de cerca de 22 anos, estando em constante melhoramento e crescimento. Actualmente possui 3 centros de produção distribuídos pelos concelhos de Braga, Barcelos e Maia. Ao contrário do corrente mercado, o Departamento de Betão possui frota própria estando ao seu dispor 16 viaturas de transporte de betão e 3 viaturas de bombagem com alcances de lanças compreendidas entre os 26m e os 34m.

A central que irá fornecer o betão é automática com balanças calibradas sendo o controlo metrológico definido no âmbito do sistema da Qualidade do qual o Departamento possui certificação desde 2002.

O presente relatório refere-se ao estudo da composição de betões de classes C25/30 e C30/37 com consistências S3, dimensões máximas do agregado de 22 mm e classes de exposição ambiental XC2 e XC4 segundo NP EN 206-1, das Normas Portuguesas e Especificações do LNEC aplicáveis, destinados a ser aplicados na obra "" a edificar pela empresa

O controlo e qualidade do betão pronto e os resultados de ensaios que dele resultarem serão também efectuados de acordo com os documentos acima mencionados.

2 – COMPONENTES DO BETÃO

2.1 - AGREGADOS

No fabrico do betão serão utilizadas duas britas e duas areias. As britas são designadas, respetivamente, por brita 1 e brita 2 e as areias, respetivamente, por areia média e areia fina, correspondendo a brita 1 ao inerte mais grosso.

2.1.1 – Britas 8/16 e 11/22

São de origem granítica, lavadas e isentas de nódulos argilosos. A pedreira situa-se na região de Guimarães e provêm do fornecedor Nicolau de Macedo & Filhos, Lda.



2.1.2 – Meia Areia 0/4 e Areia Fina 0/2

A Meia Areia 0/4 é de origem natural, lavada e isenta de nódulos argilosos e provem do fornecedor Agremor - Materiais de construção e serviços, S.A.

A Areia Fina 0/2 é de origem natural, lavada e isenta de nódulos argilosos e provem do fornecedor Agremor - Materiais de construção e serviços, S.A.

2.2 - LIGANTE

O ligante a utilizar será o cimento Portland tipo II/A-L 42,5R fornecido pela empresa SECIL – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A. segundo E464:2007 e quadro 1 da NP EN 197-1.

2.3 - PLASTIFICANTE

Na amassadura do betão será utilizado um plastificante para betão – Pozzolith 476N do fornecedor BASF – Construction Chemicals Portugal, S.A.. Devido ao seu poder redutor da água, faz diminuir a razão A/C, permitindo no entanto trabalhabilidades com valores de abaixamento dentro dos parâmetros normais. Nas composições acima do C25/30 será utilizada a sinergia do plastificante para betão – Pozzolith 476N com o superplastificante Master Ease 3530 do mesmo fornecedor, permitindo assim uma maior redução da água de amassadura. Desta forma estamos a otimizar as resistências sem diminuir a plasticidade do betão pretendida.

2.4 - ÁGUA

É fornecida por furo e captação existente na central, sendo esta ensaiada segundo NP EN 1008: 2003 “Água de Amassadura para betão”.



Empresa:
OBRAS / Local:

ESTUDO DE
COMPOSIÇÃO DE BETÃO

3 - COMPOSIÇÃO

A elaboração dos estudos são efectuadas no laboratório da ABB, S.A., atendendo às características das matérias-primas, condições de produção, transporte e eventual aplicação segundo as exigências das Referências Normativas e as demais exigências do cliente.

Após estudo teórico definiram-se as composições que foram ensaiadas em laboratório e posteriormente em central tendo-se efectuado o ajuste de alguns valores. A concepção dos betões visa garantir as características exigíveis ao produto tanto no seu estado fresco como endurecido, como sejam a consistência, trabalhabilidade, resistência, durabilidade, minimização da exsudação, etc. Durante o decorrer da obra poderão ser efetuados pequenos ajustes de composição em virtude de alterações de matérias-primas, consistência, resistência, etc. de forma a garantir as características exigidas do produto. Assim, obtiveram-se as seguintes composições:

C25/30 S3 D22 XC2 (P) CI0,2

Designação	Quantidades	Unidades
Ligante	270	Kg/m ³
Agregados	1920	Kg/m ³
Razão A/L	0,57	
Plastificante	2,7	Kg/m ³
Superplastificante	1,1	Kg/m ³

 Alexandre Barbosa Borges, S.A.	Empresa: OBRAS / Local:	ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DE BETÃO

C30/37 S3 D22 XC4 (P) CI0,2

Designação	Quantidades	Unidades
Ligante	320	Kg/m ³
Agregados	1837	Kg/m ³
Razão A/L	0,51	
Plastificante	3,2	Kg/m ³
Superplastificante	1,2	Kg/m ³

Na adição de plastificante hidrófugo ao betão (RHEOBUILD 2200HI), este será doseado à razão de 0,5% sobre o peso do ligante. Enviamos em anexo os documentos do plastificante hidrófugo.

Da análise dos dados obtidos, poderemos considerar que os resultados correspondem às expectativas não se justificando por enquanto qualquer tipo de alterações.

A composição será ajustada de acordo com as variações granulométricas dos agregados. A central que irá fornecer o betão é automática, possuindo misturadora de duplo eixo horizontal com capacidade de 2,0 m³, por ciclo situada no concelho da Maia.

A medição dos agregados, ligante e água é efectuada por pesagem em balanças individuais devidamente calibradas e aferidas.

O Controlo de Conformidade dos betões é efectuado em Laboratório ABB, de forma a dar cumprimento ao definido em NP EN206-1:2007 de acordo com os critérios 1 e 2 do Quadro 14. Os ensaios de compressão são realizados de acordo com NP EN 12390-3.

