



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

ACADEMIA DA FORÇA AÉREA
Força Aérea Portuguesa



Avaliação do desempenho do betão projectado em reparação de estruturas

Marta Oliveira dos Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia de Aeródromos

Júri

Presidente: Professor Doutor Augusto Martins Gomes

Orientador: Professor Doutor João Paulo Janeiro Gomes Ferreira

Co-orientador: Professor Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Vogais: Professor Doutor Fernando Branco

Tenente EngAed Luís Pereira

Janeiro de 2011

*Em memória do meu avô:
Manuel dos Santos Passarada*

RESUMO

O betão projectado consiste no material obtido de um processo contínuo de aplicação de betão a alta velocidade, sem que seja necessário o uso de cofragens. É uma técnica utilizada com grande sucesso na reabilitação de estruturas de betão armado. Das vantagens que se podem obter com o uso do betão projectado em vez do betão convencional, destacam-se a flexibilidade, a compactação, a capacidade de aderência a vários materiais e a dispensa de cofragens.

Pretende-se com o presente trabalho caracterizar o betão projectado em alguns dos seus parâmetros mais importantes, avaliando as suas propriedades mecânicas e as características de durabilidade, através da realização de ensaios experimentais, nomeadamente ensaios de resistência à compressão, de aderência, de porosidade, de carbonatação acelerada e de penetração de cloretos.

Foram realizados painéis de ensaio com $1.90 \times 1.90 \text{ m}^2$ onde foram projectadas duas composições de betão com teores de cimento de 350 kg/m^3 e 450 kg/m^3 . Os painéis foram colocados uns na vertical e outros na horizontal, de forma a serem projectados horizontalmente e verticalmente (de baixo para cima). Foi ainda acompanhada e estudada uma obra de reabilitação de uma laje de um reservatório onde foi aplicado betão projectado.

Constatou-se que a aderência e a resistência à compressão são tanto maiores quanto maior for o teor em cimento dos betões, e que aquelas propriedades apresentam valores mais elevados para betões projectados verticalmente no sentido ascendente. A espessura de carbonatação e o coeficiente de difusão de cloretos aumentam com a diminuição do teor de cimento e apresentam valores superiores quando a projecção é feita horizontalmente.

PALAVRAS-CHAVE: betão projectado, via seca, resistência à compressão, carbonatação, penetração de cloretos, aderência.

ABSTRACT

Shotcrete is a continuous method of projecting concrete at high velocity, without the help of any formwork. This technique is being used, with great success, in the rehabilitation of reinforced concrete structures. The main advantages of using shotcrete, when compared with the use of regular concrete, are the flexibility, the compaction, the ability of adhesion to various materials and the remission of the formwork.

The objective of this study is to characterize the shotcrete in some of its most important parameters, named its mechanical and durability properties, which was achieved by running laboratory tests: compression tests, *pull-off* tests (bond strength), permeable porosity tests, accelerated carbonation tests and chloride ion penetration tests.

Test panels with $1.90 \times 1.90 \text{ m}^2$ were projected with two different dry mixtures of shotcrete, one with 350 kg/m^3 of cement and another with 450 kg/m^3 . The panels were placed vertically and horizontally, to allow their projection in the horizontal and in the vertical (upwards direction), respectively. The rehabilitation works of a water reservoir slab where shotcrete was applied are also described.

It was observed that the bond strength and the compression resistance are higher for higher values of cement in the concrete mixture and for upwards shotcrete projection. The values for the depth of carbonation and the chloride diffusion coefficient increase when the percentage of cement in the mixture decreases, being higher for the vertical panels (horizontal projection).

KEYWORDS: shotcrete, dry-mix, compression resistance, carbonation, ion chloride penetration, bond strength.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo mais gostaria de agradecer aos professores João Gomes Ferreira e João Ramôa Correia, pela disponibilidade e preocupação que sempre mostraram durante a realização desta dissertação.

Ao Engenheiro Farinha da empresa H Tecnic, por ter tornado possível a realização deste estudo e aos Engenheiros Nuno Cerqueira e João Pedreño, que me acompanharam e sempre se disponibilizaram para o esclarecimento de qualquer dúvida.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, nomeadamente o Sr. Leonel e o Sr. Fernando Costa, que com a sua ajuda indispensável tanto contribuíram na execução dos trabalhos laboratoriais.

Ao Laboratório de Solos do Grupo de Engenharia de Aeródromos da Força Aérea, pela sua colaboração e disponibilidade.

À minha família, irmãs e pais, que ao longo da minha vida sempre me acompanharam, sabendo sempre os momentos em que precisei de uma palavra de encorajamento ou mesmo de chamada de atenção.

Por fim, a todos os meus amigos e colegas que fizeram comigo este percurso académico, em especial aos meus camaradas Gaviões.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	V
ABSTRACT	VII
AGRADECIMENTOS	IX
ÍNDICE GERAL.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XVIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e objectivos do trabalho.....	1
1.2. Organização do documento	2
2. BETÃO PROJECTADO	5
2.1. Utilização do betão projectado.....	5
2.2. Adições ao betão projectado.....	6
1.1.1. Betão reforçado com fibras	7
1.1.2. Redutores de água e retardadores/aceleradores de presa	7
1.1.3. Adições suplementares do cimento	8
2.3. Vantagens e desvantagens do uso de betão projectado.....	8
2.4. Processos de projecção do betão.....	11
2.5. Equipamento	12
2.5.1. Processo por via seca	13
2.5.2. Processo por via húmida.....	14
2.6. Propriedades mecânicas do betão projectado.....	16
2.6.1. Aderência	16
2.6.2. Resistência à compressão	17
2.7. Durabilidade do betão projectado	18
2.7.1. Porosidade do betão	19
2.7.2. Carbonatação do betão.....	20
2.7.3. Penetração de Cloretos.....	23
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL	27
3.1. Composição do betão projectado.....	27
3.1.1. Materiais	27

3.1.2.	Formulação das misturas	28
3.1.3.	Cálculo do betão projectado.....	29
3.2.	Execução dos painéis de ensaio.....	33
3.3.	Plano de ensaios.....	36
3.4.	Métodos de ensaio para a caracterização do betão projectado	37
3.4.1.	Aderência do betão projectado ao substrato	38
3.4.2.	Resistência à compressão	40
3.4.3.	Resistência à carbonatação acelerada	45
3.4.4.	Resistência à penetração de cloretos	47
3.4.5.	Determinação da porosidade por absorção de água.....	49
4.	RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL	51
4.1.	Aderência do betão projectado ao substrato	51
4.2.	Resistência à compressão	54
4.3.	Resistência à carbonatação acelerada	61
4.4.	Resistência à penetração de cloretos	64
4.5.	Determinação da porosidade por absorção de água.....	66
5.	CASO DE ESTUDO.....	69
5.1.	Descrição do âmbito da obra	69
5.2.	Avaliação da resistência à compressão.....	71
5.2.1.	Materiais e procedimento	71
5.2.2.	Resultados e discussão.....	72
6.	CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	75
6.1.	Conclusões gerais.....	75
6.2.	Desenvolvimentos futuros	76
	BIBLIOGRAFIA	79
	ANEXOS.....	83
	ANEXO A – FICHA TÉCNICA CEM I 42,5R SECIL	
	ANEXO B.1 – FICHA TÉCNICA DE PRODUTO – AREIA LAVADA 0/2	
	Anexo B.2 – RELATÓRIO DE ENSAIO: DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA REAL E DA ABSORÇÃO DE ÁGUA – AREIA LAVADA 0/2.	
	ANEXO C.1 – FICHA TÉCNICA DE PRODUTO – AREIA LAVADA 0/4	

Anexo C.2 – RELATÓRIO DE ENSAIO: DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA REAL E DA ABSORÇÃO DE ÁGUA – AREIA LAVADA 0/4

ANEXO D – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO BAGO DE ARROZ

ANEXO E – CÁLCULO DA TENSÃO DE ROTURA À COMPRESSÃO DAS CAROTES.

ANEXO F – CÁLCULO DA TENSÃO DE ROTURA À COMPRESSÃO DAS CAROTES DO CASO DE ESTUDO.

ANEXO G – CÁLCULO DA TENSÃO DE ROTURA À COMPRESSÃO DOS CUBOS DO CASO DE ESTUDO.

ANEXO H – CÁLCULOS AUXILIARES PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS.

ANEXO I – CÁLCULOS AUXILIARES PARA A DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DO BETÃO POR ABSORÇÃO DE ÁGUA.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Empreendimento <i>Monolithic Dome Village</i> , Texas, 2010.....	5
Figura 2.2 – Tunel <i>Gothard Base</i> , Suíça.....	5
Figura 2.3 – Escavação e contenção periférica da Biblioteca Central e Arquivo Municipal de Lisboa. Taludes revestidos com betão projectado, pregados e drenados, nos alçados de menor altura.....	5
Figura 2.4 – Reparação da Doca Seca do Arsenal do Alfeite 2ª Fase, 2009. Reabilitação das estruturas em betão armado do interior da doca, através da picagem de toda a superfície, substituição e adição de armaduras e projecção de betão C35/45 com fibras de polietileno.	6
Figura 2.5 – Percentagem de ricochete em função da inclinação da superfície de aplicação.....	9
Figura 2.6 – Percentagem de ricochete em função da distância do impacto.....	10
Figura 2.7 – Formação das bolsas de ricochete.....	10
Figura 2.8 – Esquema tipo da montagem dos equipamentos necessário para a projecção por via seca.	11
Figura 2.9– (a) Operação esquemática de uma máquina de projecção de câmara dupla (via seca) e (b) máquina de projecção de betão de câmara dupla (via seca).....	13
Figura 2.10 – (a) Representação esquemática de uma máquina de projecção de rotor, (b) Exemplo de máquina de rotor.	14
Figura 2.11 – Bocas de injeção para a projecção (a) por via seca e (b) por via húmida.....	14
Figura 2.12 – Representação esquemática de uma bomba de betão.....	15
Figura 2.13 – Frente de carbonatação de um provete obtido de uma amostra de betão projectado.....	21
Figura 2.14 – Gradiente de pH na frente de carbonatação.	21
Figura 3.1 – Curva granulométrica do bago de arroz.	28
Figura 3.2 – Exemplo esquemático da determinação das percentagens dos componentes sólidos.	31
Figura 3.3 – Análise gráfica das granulometrias dos agregados e curvas de Faury para as composições de betão projectado em estudo.....	33
Figura 3.4 – Execução dos painéis de ensaio: (a) colocação de armadura e (b) betonagem. .	33
Figura 3.5 – Cura do betão de substrato.	34
Figura 3.6 – Direcção de colocação dos painéis de ensaio: (a) horizontal e (b) vertical.....	34
Figura 3.7 – Superfície (a) após lavagem com jacto de água e (b) após picagem com martelo pneumático.....	35

Figura 3.8 – Projecção (a) vertical do betão e (b) projecção horizontal do betão.	35
Figura 3.9 – Representação esquemática das fases do ensaio de <i>pull-off</i>	38
Figura 3.10 – Máquina de ensaios de arrancamento – <i>pull-off</i>	38
Figura 3.11 – (a) Carotagem da área de ensaio, (b) aplicação da resina epóxida e (c) colagem de uma pastilha metálica.	40
Figura 3.12 – Extracção de carotes.	41
Figura 3.13 – Corte das carotes com serra de disco.	41
Figura 3.14 – Ensaio de resistência à compressão dos provetes cilíndricos.	42
Figura 3.15 – Ensaio de resistência à compressão dos cubos.	44
Figura 3.16 – Provetes de ensaio para a carbonatação acelerada.	45
Figura 3.17 – Aspecto exterior e interior da câmara de carbonatação acelerada.	46
Figura 3.18 – Fractura dos provetes com martelo e escopro.	46
Figura 3.19 – Tipos de desenvolvimento da frente de carbonatação: (a) regular e (b) irregular.	46
Figura 3.20 – Etapas da metodologia de ensaio à penetração de cloretos por migração: (a) câmara de vácuo, (b) montagem das mangas e (c) introdução das soluções anódica e catódica.	47
Figura 3.21 – Montagem final dos tanques de ensaio de migração de cloretos.	47
Figura 3.22 – Representação esquemática para o ensaio de migração.	48
Figura 3.23 – Profundidade de penetração de cloretos de um provete tipo.	48
Figura 3.24 – Equipamentos utilizados durante o ensaio de porosidade: (a) balança hidrostática e (b) estufa a 110°C.	49
Figura 4.1 - Resistência de pull-off dos 4 casos de estudo.	51
Figura 0.1 – (a) Superfície de rotura com uma boa mistura dos constituintes do betão projectado e (b) superfície de rotura com indícios de ligação insuficiente entre os agregados.	52
Figura 4.3 – Tensão média de rotura à compressão dos ensaios realizados afectada do respectivo desvio padrão.	56
Figura 4.4 – Rotura tipo dos provetes de ensaio.	56
Figura 4.5 – Gráficos dos ensaios de compressão da série A, obtidos por um programa computacional.	57
Figura 4.6 – Taxa de crescimento da resistência média à compressão para cada painel.	58
Figura 4.7 – Anomalias dos cubos de 450 kg/m ³ de cimento projectados.	60
Figura 4.8 – influência da direcção de projecção na resistência à compressão para as composições (a) 350 e (b) 450.	60
Figura 4.9 – Carbonatação inicial tipo dos provetes de ensaio.	61

Figura 4.10 – Exemplos de anomalias dos provetes que dificultam a leitura da frente de carbonatação: (a) vazios, (b) carbonatação pelos topos do provete, (c) má mistura dos constituintes do betão.....	61
Figura 4.11 – Variação da espessura de carbonatação com a raiz quadrada do tempo.	63
Figura 4.12 – Coeficiente de difusão de cloretos.....	65
Figura 5.1 – Armadura de reforço da face inferior da laje do reservatório.	69
Figura 5.2 – Início da projecção da face inferior.	70
Figura 5.3 – Quantidade de desperdício por ricochete.....	70
Figura 5.4 – Pormenor da primeira camada de betão aplicado.....	70
Figura 5.5 – Enchimento de fissuras com resina epóxida.	71
Figura 5.6 – Reforço da laje superior com chapas metálicas.	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tensão de arrancamento: mínimos requeridos.	16
Tabela 2.2 - Influência da superfície de preparação na tensão de arrancamento, psi (MPa) em Guide to shotcrete.	16
Tabela 3.1 – Composição dos dois betões em estudo.	32
Tabela 3.2 – Identificação dos painéis de ensaio.	36
Tabela 3.3 – Ensaio realizados na avaliação do desempenho do betão projectado.	37
Tabela 3.4 – Classificação e descrição dos tipos de arrancamento por <i>pull-off</i>	39
Tabela 4.1 – Caracterização geral dos resultados obtidos no ensaio de <i>pull-off</i> em MPa.	51
Tabela 4.2 – Classificação do tipo de rotura dos provetes de <i>pull-off</i>	52
Tabela 4.3 – Identificação das séries de ensaio das carotes à compressão.	54
Tabela 4.4 – Identificação das anomalias tipo dos provetes de ensaio.	55
Tabela 4.5 – Resultados da resistência à compressão de cada painel em MPa.	56
Tabela 4.6 – Verificação de conformidade dos painéis de ensaio.	58
Tabela 4.7 – Verificação de conformidade para os valores obtidos por regressão.	59
Tabela 4.8 – Tensão média de rotura dos ensaios realizados sobre cubos e respectiva análise de conformidade.	59
Tabela 4.9 – Espessura da frente de carbonatação dos provetes colocados na câmara de carbonatação para as 3 leituras efectuadas.	62
Tabela 4.10 – Coeficientes K obtidos por regressão linear das curvas de carbonatação década composição e respectivo R^2	63
Tabela 4.11 – Estimativa da profundidade de carbonatação e RC65 para 104 anos.	64
Tabela 4.12 – Recobrimento associado ao RC65 de estruturas da classe XC4 em região húmida.	64
Tabela 4.13 – Resultados da determinação da profundidade (x_d) e do coeficiente de difusão de cloretos (D) para as composições de betão projectado em estudo.	65
Tabela 4.14 – Recobrimentos mínimos associados ao coeficiente de difusão de cloretos dos betões em estudo.	66
Tabela 4.15 – Valores em percentagem para a porosidade dos betões em estudo.	67
Tabela 5.1 - Resultados da resistência à compressão das carotes em MPa.	72
Tabela 5.2 – Verificação de conformidade das carotes.	72
Tabela 5.3 - Tensão média de rotura dos ensaios realizados sobre cubos do caso de estudo, e respectiva análise de conformidade.	73

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DO TRABALHO

O betão projectado consiste no material obtido através de um processo contínuo de aplicação de betão por projecção a alta velocidade, sem que seja necessário o uso de cofragens.

A tecnologia do betão projectado foi sofrendo uma evolução contínua desde a sua primeira utilização, em 1910, até aos dias de hoje. Na verdade, as primeiras aplicações desta tecnologia corresponderam a argamassas (misturas de cimento e areia), as quais se denominavam de *gunita*. Este novo produto foi rapidamente desenvolvido até que surge pela primeira vez, no início da década de 1930, o termo “*shotcrete*”, introduzido pela *American Railways Engineering Association* para descrever o processo de gunitagem (os materiais projectados continuam a ser argamassas).

Na década de 1950, em paralelo com o avanço tecnológico, o processo de projecção, agora sim do betão, viu o seu maior progresso: introduziu-se o processo de projecção de betão por via seca, passando o termo “*shotcrete*” a estar-lhe associado; foi desenvolvido um novo equipamento para o processo de projecção por via húmida, nomeadamente a máquina de projecção de rotor, que passava a permitir uma alimentação contínua do dispositivo.

Durante as décadas seguintes, até à data, foram sendo otimizados e desenvolvidos novos equipamentos, introduzidos novos e inovadores materiais e melhorados os processos de aplicação do betão. Com tudo isto, aumentou-se a flexibilidade, a eficácia e a utilidade desta técnica de colocação de betão.

De todos os usos possíveis do betão projectado, é de realçar o seu grande sucesso na reabilitação de estruturas de betão armado.

Este material está particularmente desenvolvido para otimizar as reparações de estruturas deterioradas por agentes químicos agressivos, por ciclos de gelo-degelo, por incêndios, pela corrosão das armaduras, entre outros. A compactação do betão aplicado, resultante da alta velocidade de projecção, confere, entre outras características, uma boa durabilidade às estruturas, tornando-as mais impermeáveis à água e mais resistentes à penetração de cloretos e à carbonatação.

Apesar do betão projectado já não ser uma novidade no mundo da engenharia nacional, continua a ser uma técnica pouco utilizada, parecendo ainda subsistirem dúvidas quanto a algumas das suas propriedades e quanto à sua aplicação. Uma prova deste facto é a quase inexistência de documentação nacional sobre betão projectado, limitando-se basicamente às Normas Portuguesas adaptadas das Normas Europeias já existentes.

Desta forma, pretende-se com o presente estudo, realizado com a colaboração da empresa *H Tecnic* (empresa especializada em reabilitação de estruturas), avaliar a influência de certos parâmetros no comportamento do betão projectado, nomeadamente a composição do betão em termos de teor em cimento e o tratamento da superfície de substrato. Relativamente aos parâmetros de desempenho do betão projectado, pretende-se avaliar as suas propriedades mecânicas e as características de durabilidade, através da realização de ensaios experimentais, nomeadamente ensaios de resistência à compressão, de aderência, de porosidade, de carbonatação acelerada e de penetração de cloretos.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, os quais se passam a descrever, de forma sumária, quanto aos seus principais conteúdos.

O capítulo 1 fornece, um enquadramento do tema a tratar, descrevendo os objectivos e hipóteses que irão ser objecto de estudo no desenvolvimento deste trabalho, assim como a sua organização.

No capítulo 2 expõe-se o estado da arte do betão projectado, iniciando-se com a enumeração dos vários usos deste material e passando-se depois a apontar as vantagens e desvantagens da sua aplicação. Após a descrição dos dois métodos de projecção existentes e de uma análise comparativa entre eles, apresenta-se os equipamentos associados a estes mesmos métodos, o seu modo de funcionamento e suas singularidades. Seguidamente, passa-se a indicar as características físicas do betão projectado, nomeadamente a sua capacidade aderente e a resistência à compressão, apontando os resultados usualmente obtidos para estas propriedades. Expõem-se ainda os factores que afectam a durabilidade do betão projectado, nomeadamente a porosidade, a carbonatação e a penetração de cloretos.

No capítulo 3 descreve-se todos os trabalhos preparatórios da campanha experimental, assim como as metodologias seguidas para cada um dos ensaios. Deste modo, no início deste capítulo, caracteriza-se os materiais utilizados na produção do betão projectado, identifica-se os parâmetros de estudo para a formulação das diferentes misturas e descreve-se o método de cálculo seguido para a determinação das respectivas composições. Na restante parte do capítulo, apresenta-se o plano de ensaios realizado, explicitando-se cada um dos ensaios quanto à sua metodologia e normas associadas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do betão projectado. É também feita uma análise crítica, individualmente, para cada um dos ensaios, comparando-se os valores obtidos com os resultados esperados indicados no capítulo 2.

No capítulo 5 descreve-se um caso de estudo, que decorreu do acompanhamento de uma obra onde foi aplicado betão projectado. Começa-se por indicar o âmbito em que se inseriu a obra, apontando-se os trabalhos realizados e, por fim, apresenta-se um breve estudo que se realizou sobre a determinação da resistência à compressão do betão aplicado em obra. Neste estudo expõe-se os resultados obtidos e realiza-se uma breve discussão dos resultados.

Por fim, no capítulo 6, realiza-se uma análise mais ampla dos resultados obtidos, cruzando-se as análises realizadas para cada um deles, assim como as conclusões alcançadas no caso de estudo. Termina-se esta conclusão com a sugestão de alguns pontos de interesse a desenvolver no futuro.

2. BETÃO PROJECTADO

2.1. UTILIZAÇÃO DO BETÃO PROJECTADO

O betão projectado pode ser aplicado em quase todos os casos em que se utiliza o betão convencional. A escolha da sua utilização depende da ponderação de diversos factores como a conveniência, o custo e a natureza da obra a realizar. Desta forma, o betão projectado pode ser utilizado como um betão convencional na construção de novas estruturas, especialmente em casos cuja arquitectura apresenta secções curvas ou outras especificidades que dificultam a utilização de moldes/cofragens, como por exemplo em abóbadas (Figura 2.1), túneis (Figura 2.2), canais, reservatórios e esgotos. Também se emprega este tipo de material para recobrimentos e coberturas tendo várias finalidades, como por exemplo de contenção, no caso de taludes e escavações (Figura 2.3), de protecção ao fogo ou ataques químicos de estruturas metálicas, de madeira e de betão.



Figura 2.1 – Empreendimento *Monolithic Dome Village*, Texas, 2010 (Monolithic, 2010).



Figura 2.2 – Túnel *Gothard Base*, Suíça (BASF SE, 2008).



Figura 2.3 – Escavação e contenção periférica da Biblioteca Central e Arquivo Municipal de Lisboa. Taludes revestidos com betão projectado, pregados e drenados, nos alçados de menor altura (Cenga, 2009).

Outra grande área de aplicação do betão projectado é a reparação e o reforço de estruturas (Figura 2.4). Todo o tipo de estruturas de betão que se encontre deteriorada pode ser reparada e/ou reforçada através do tratamento adequado da anomalia em questão juntamente com a aplicação do betão projectado, como é o caso de pontes, redes de esgotos, barragens, reservatórios, túneis, paredes, piscinas, entre outros.



Figura 2.4 – Reparação da Doca Seca do Arsenal do Alfeite 2ª Fase, 2009. Reabilitação das estruturas em betão armado do interior da doca, através da picagem de toda a superfície, substituição e adição de armaduras e projecção de betão C35/45 com fibras de polietileno. (Reproduzida por H Tecnic Lda)

O betão projectado pode ainda ser utilizado para fins refractários através da utilização de ligantes de altas temperaturas e de agregados refractários na sua composição. Este tipo de betão projectado, utilizado pela primeira vez a meio da década de 1920, aplica-se essencialmente na construção ou reabilitação de fornos e chaminés das indústrias químicas e de processamento de produtos cerâmicos, incineradoras, centrais termoeléctricas, entre outras (ACI 506R-05, 2005).

2.2. ADIÇÕES AO BETÃO PROJECTADO

Existe a possibilidade de utilizar adições na composição do betão projectado, formulando deste modo betões especiais com características melhoradas ou até mesmo com novas propriedades. Com a mistura destas adições, é possível produzir um betão mais resistente a ataques químicos e à corrosão, tornando-o ideal para aplicação em reservatórios de substâncias químicas corrosivas, chaminés e outros elementos de betão sujeitos a condições ambientais agressivas.

2.2.1. BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS

O betão projectado reforçado com fibras pode ser utilizado para as utilizações convencionais do betão projectado assim como para uso refractário. As fibras podem ser de aço ou sintéticas, como por exemplo as fibras de vidro e de polipropileno, e com a sua adição no betão este vai aumentar a sua resistência à flexão, à tracção e ao impacto. O betão projectado com fibras de aço é muito usado para fins refractários pois estas fibras aumentam a resistência ao choque térmico, armando o betão em todas as direcções, impedindo conseqüentemente o desenvolvimento de fissuras no betão. As fibras de aço têm dimensões compreendidas entre 13 e 40 mm e são geralmente adicionadas em dosagens de 20 a 70 kg/m³, conferindo um aumento da resistência ao choque até 5 a 10 vezes. De forma a proteger as fibras da corrosão, deve ser aplicada uma camada exterior de betão projectado sem fibras com pelo menos 2 cm de espessura (ACI 506R-05, 2005; Ryan, 1973).

Por sua vez, a utilização de fibras sintéticas vai fazer com que as fissuras originadas pela retracção do betão diminuam e, quando utilizada uma percentagem elevada destas fibras, pode também aumentar a resistência à flexão do betão projectado. As fibras de polipropileno têm dimensões entre 25 a 50 mm e são geralmente utilizadas em dosagens de 1 a 3 kg/m³, embora possam ser produzidos betões com 9 kg/m³ de fibras de polipropileno.

O betão projectado é aplicado em camadas sucessivas, facto este que, para além de aumentar a compactação do betão, faz com que haja uma organização das fibras ficando estas tendencialmente paralelas à superfície. Esta disposição organizada das fibras no betão projectado torna o seu efeito mais eficaz que as fibras desordenadas do betão vazado reforçado.

Geralmente a utilização de fibras vai fazer com que haja uma diminuição da rentabilidade do processo de betão uma vez que há uma maior percentagem de ricochete, principalmente no caso do betão projectado por via seca.

2.2.2. REDUTORES DE ÁGUA E RETARDADORES/ACELERADORES DE PRESA

Os redutores de água são geralmente utilizados para a projecção por via húmida com o fim de melhorar a trabalhabilidade sem se aumentar a razão a/c. Os retardadores de presa são também utilizados no método por via húmida pois a água é adicionada desde o início à mistura, iniciando desde esse momento a hidratação do betão, pelo que a utilização deste adjuvante permite a extensão de tempo útil de trabalho para a mesma mistura.

Os aceleradores de presa químicos podem ser aplicados quer no método por via seca quer no método por via húmida. Existem diversos tipos de aceleradores de presa os quais podem ter

mais do que um efeito no betão projectado. Os efeitos que os acelerados de presa têm no betão projectado são os seguintes (ACI 506R-05, 2005; Ryan, 1973):

- Aumentam a rigidez inicial, podendo-se projectar camadas de maior espessura, o que vai aumentar a rentabilidade do processo;
- Reduzem a queda de porções de betão fresco projectado;
- Tornam mais rápido o processo de hidratação do betão, aumentando a resistência inicial do betão.

A desvantagem da utilização deste tipo de adjuvante é que alguns deles diminuem a resistência final do betão, pelo que se deve ter o cuidado de utilizar a concentração mínima recomendada.

2.2.3. ADIÇÕES SUPLEMENTARES DO CIMENTO

Podem ser adicionados materiais com propriedades pozolânicas ao betão projectado como é o caso da sílica de fumo e das cinzas volantes. Estes materiais conferem uma melhor trabalhabilidade ao betão, facilitando a sua bombagem no caso da projecção por via húmida, para além de que o tornam mais resistente à penetração de sulfatos e às reacções alcalis-sílica. A substituição do cimento por uma destas adições em igual massa pode levar ao aumento do tempo de presa do betão projectado (ACI 506R-05, 2005).

2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE BETÃO PROJECTADO

Comparando as vantagens que se podem obter com o uso do betão projectado em vez do betão convencional, pode-se destacar que o betão projectado apresenta em mais situações resultados bastante competitivos: em termos de custos na reabilitação de estruturas, uma vez que dispensa a montagem de cofragens; em termos de mobilidade e acessibilidade, pois o equipamento associado é portátil permitindo chegar a áreas pouco acessíveis; e em termos de compatibilidade, pois o betão projectado tem a capacidade de aderir a vários materiais, como o betão, o aço e a madeira (Ryan, 1973).

Existem também algumas desvantagens na utilização deste tipo de material. A principal desvantagem provém do efeito de ricochete dos agregados grossos do betão durante a projecção. Este efeito tem como consequência a alteração da granulometria do betão *in situ*, nomeadamente a diminuição da percentagem de agregados grossos, o que leva a uma diminuição da resistência e um aumento da retracção. Outro resultado do ricochete do betão durante a pro-

jecção prende-se com a perda de rentabilidade do processo, uma vez que é desperdiçado bastante material durante a sua aplicação.

Existem diversas formas de minimizar os efeitos negativos do ricochete, podendo-se actuar ora na composição do betão, ora na forma como a projecção é executada. Quanto à composição do betão, é habitual adicionar cerca de 10% a mais de agregados grossos, de forma a tentar manter o traço do betão *in situ* igual ao traço do betão calculado (Ryan, 1973). Como exemplo, uma composição calculada com um traço cimento/agregados de 1:4 em volume, após a projecção, pode passar a apresentar um traço de 1:2.8 (Ryan, 1973).

A quantidade de agregados grossos também influencia a percentagem de ricochete, pelo que um betão com mais de 30% de agregados, projectado por via seca ou húmida, vai originar um grande aumento do ricochete (ACI 506R-05, 2005).

A adição de substâncias com propriedades pozolânicas à mistura do betão, como a sílica de fumo, diminui o efeito de ricochete, contribuído ao mesmo tempo para uma melhoria significativa da resistência e durabilidade do betão (Ryan, 1973; Sika, 2010). Ainda relativamente à composição do betão, a quantidade de água adicionada à mistura, em ambos os processos de projecção por via seca e húmida, tem de ser determinada tendo em conta que misturas muito fluidas provocam maior percentagem de ricochete.

A forma como o betão é projectado engloba vários factores como a velocidade de projecção, o caudal de projecção, o ângulo e distância de impacto, a espessura a aplicar e, principalmente na via seca, a capacidade técnica do operador (Ryan, 1973).

Por observação das Figuras Figura 2.5 e Figura 2.6, verifica-se que a percentagem de ricochete aumenta com o aumento do ângulo da direcção de projecção com a horizontal e que a distância óptima de projecção é de 1 m.

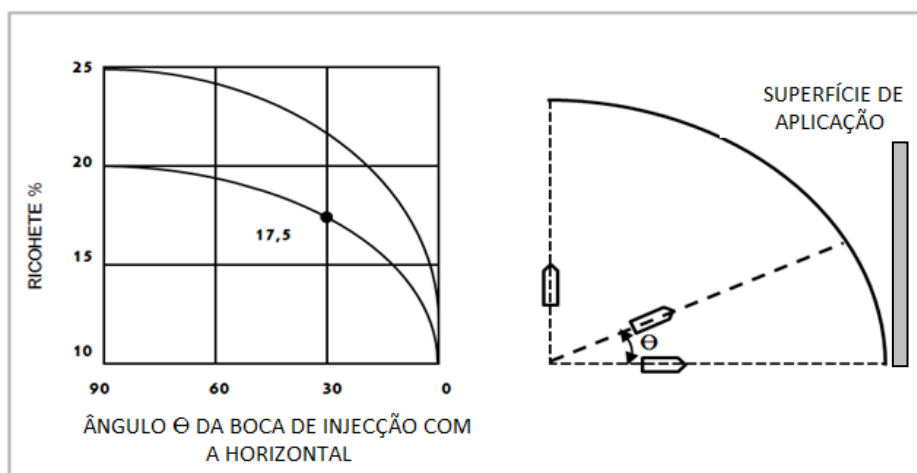


Figura 2.5 – Percentagem de ricochete em função da inclinação da superfície de aplicação (Cánovàs, 1984).



Figura 2.6 – Percentagem de ricochete em função da distância do impacto (Cánovàs, 1984).

Outra desvantagem a apontar no processo de projecção é a formação de bolsas de ricochete durante a projecção. O material que se perde por ricochete muitas das vezes aloja-se em bolsas na superfície de projecção, o que resulta em porções de betão não compactado e insuficientemente hidratado, que vão conferir uma diminuição da qualidade do betão projectado. Estas bolsas formam-se devido aos efeitos de sombra das armaduras, de canto e de sobrecarga (*overshooting*), os quais se encontram ilustrados na Figura 2.7.

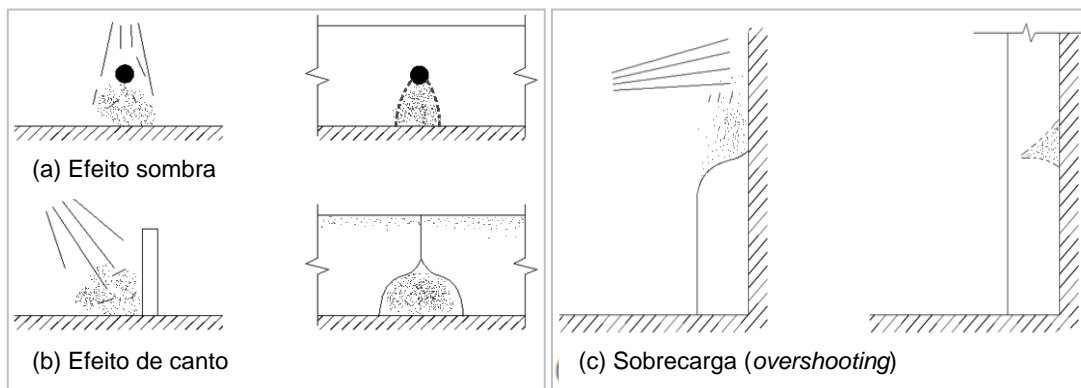


Figura 2.7 – Formação das bolsas de ricochete (Ryan, 1973).

Para minimizar o efeito de sombra (Figura 2.7a) das armaduras, deve existir um espaçamento mínimo entre varões de 50 a 65 mm, assim como um espaçamento livre atrás dos varões de pelo menos 35 a 50 mm (Ryan, 1973). Nos efeitos de canto (Figura 2.7b), há a formação de remoinhos no fluxo de ar que fazem com que se possam formar bolsas de areia, pelo que se deve efectuar a projecção junto à base da parede de substrato. A sobrecarga é da responsabilidade do operador, tendo este de ter o cuidado de identificar bolsas de desperdícios para serem retiradas antes da projecção daquela área (Figura 2.7c).

2.4. PROCESSOS DE PROJECCÃO DO BETÃO

O betão projectado pode ser aplicado através de dois métodos distintos, designados de projecção por via seca e projecção por via húmida, os quais diferem basicamente no estágio em que é adicionada água à mistura cimento/agregados.

O método por via seca inicia-se pela mistura de todos os componentes do betão excepto a água. De seguida, esta mistura de cimento e agregados é colocada na máquina de projecção, a qual vai ser responsável por alimentar a mangueira que transporta a mistura até à boca de injeção. Todo o processo de transporte é realizado por meio de ar comprimido.

Com a chegada da mistura seca à extremidade da mangueira, é adicionada água, sendo a sua quantidade regulada na boca da mangueira pelo operador, e o betão é projectado a alta velocidade para a superfície de trabalho. A montagem deste sistema encontra-se representada esquematicamente na Figura 2.8.

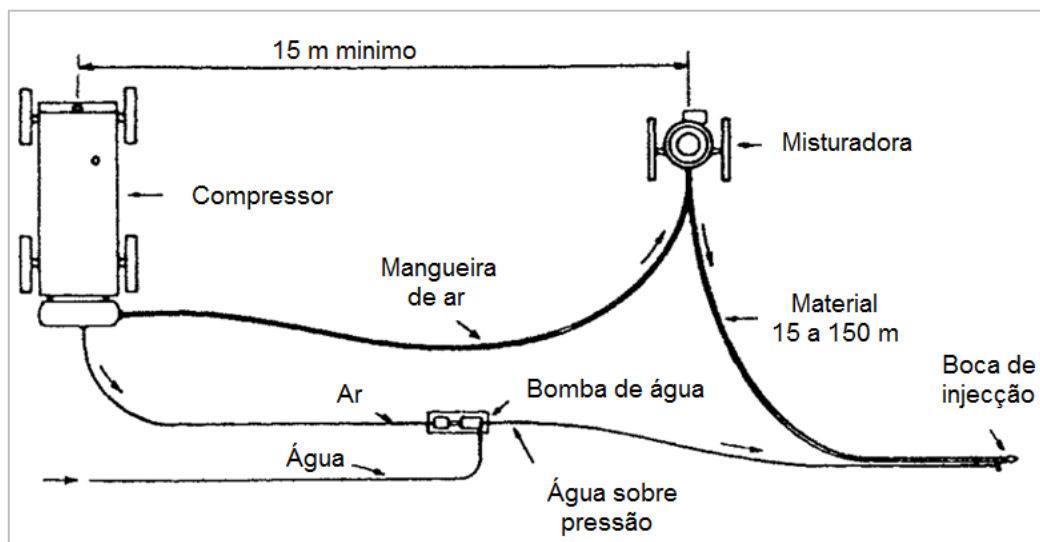


Figura 2.8 – Esquema tipo da montagem dos equipamentos necessário para a projecção por via seca (ACI 506R-05, 2005).

No método por via húmida a mistura é feita com todos os componentes do betão, ou seja, os agregados, o cimento e a água. Esta mistura hidratada é bombeada até ao local onde vai ser aplicada e, após ser introduzido ar comprimido na mangueira, é ejetada para a superfície de substrato pela boca de injeção.

Comparando os dois processos não se pode dizer que um deles é claramente mais vantajoso que o outro. As diferenças entre eles a nível da manutenção e custos de equipamento, características de operacionalidade e o tipo de agregados disponível, é que os tornam mais ou menos adequados para o tipo de trabalho a realizar.

No caso do sistema de projecção por via seca é possível apontar as seguintes vantagens e desvantagens (ACI 506R-05, 2005):

- Controla-se instantaneamente a mistura de água no betão na boca da mangueira e por consequência a sua consistência, reflectindo-se numa melhor adaptabilidade às condições ambientais da obra;
- É mais adequado para aplicar misturas compostas por agregados porosos e leves;
- Permite a utilização de um maior comprimento da mangueira de entrega, ou seja, o transporte do betão a longas distâncias;
- As mangueiras de entrega são mais fáceis de mover;
- Exige uma mão-de-obra especializada, uma vez que são necessários operadores qualificados para manusear o equipamento;
- Os agregados devem ter um teor de humidade entre 5 e 8% para otimizar o funcionamento do equipamento. No caso do teor de humidade ser superior corre-se o risco das mangueiras entupirem e de existir uma hidratação precoce do betão (Ryan, 1973).

Para o processo por via húmida apresenta-se as seguintes vantagens e desvantagens (ACI 506R-05, 2005):

- Uma vez que a água é adicionada na misturadora, é possível controlar com exactidão a sua quantidade;
- Há uma maior garantia de que a água se encontra bem misturada com os outros componentes de betão, ou seja, que a hidratação do betão é uniforme;
- Existe menos pó durante as operações, o que implica menor perda de cimento durante a projecção;
- Geralmente tem uma maior rentabilidade, uma vez que a taxa de ricochete é menor.
- Exige mão-de-obra menos especializada;
- Para se atingir uma consistência suficientemente plástica do betão é necessário que a razão a/c seja superior à da projecção por via seca, o que faz com que os efeitos de retracção do betão sejam maiores e que a aderência diminua;
- Os custos de equipamento são superiores aos custos associados à via seca.

A escolha do processo de projecção a utilizar numa determinada obra resulta na ponderação das vantagens e desvantagens inerentes a cada um destes processos, sendo seleccionado aquele cujas características se adaptem melhor às exigências da obra.

2.5. EQUIPAMENTO

A aplicação de betão projectado implica a afectação de um conjunto de equipamentos específicos desta actividade. Os dois processos de projecção existentes (via seca e via húmida) exi-

gem equipamentos e planeamentos logísticos do estaleiro diferentes, pelo que se passa a descrever, separadamente, os equipamentos associados a cada um deles.

2.5.1. PROCESSO POR VIA SECA

A projecção por via seca pode ser realizada por dois tipos de máquinas de projecção de betão (*guns*): as de pressão e as de rotor.

As máquinas de pressão podem ser constituídas por uma ou duas câmaras, permitindo a de duas câmaras uma alimentação contínua da mangueira de entrega. O princípio de funcionamento deste equipamento encontra-se esquematizado na Figura 2.9a, e consiste na introdução do material na câmara, seguindo-se o fecho da mesma através de válvulas, após o que a câmara é pressurizada, através da introdução de ar comprimido, resultando na expulsão da mistura seca para a mangueira de entrega.

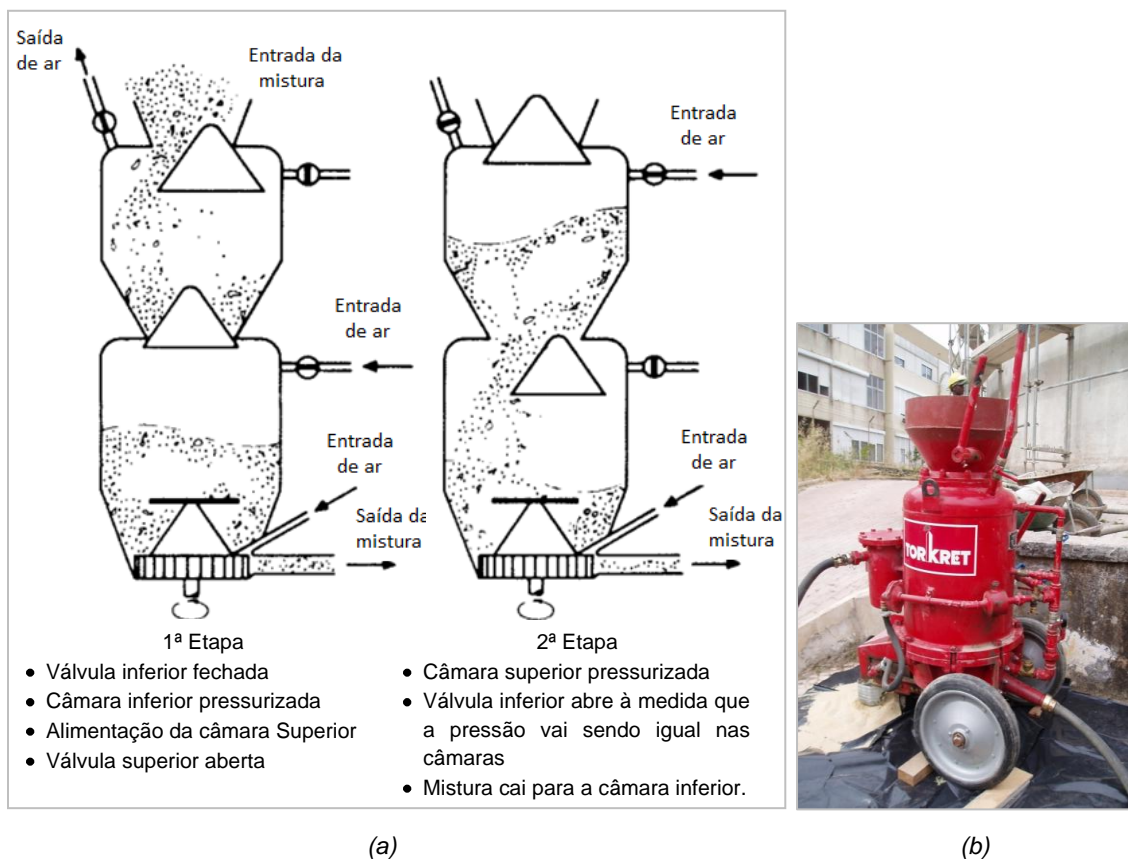


Figura 2.9– (a) (ACI 506R-05, 2005) Operação esquemática de uma máquina de projecção de câmara dupla (via seca) e (b) máquina de projecção de betão de câmara dupla (via seca).

As máquinas de rotor permitem uma alimentação contínua da mangueira de entrega e funcionam do seguinte modo: a mistura seca é introduzida, por gravidade, no cilindro do rotor através da tremonha e do agitador; seguidamente é transportada continuamente pelos canais transversais do rotor, até atingir o orifício de saída, onde é expelida a alta velocidade por meio de introdução de ar comprimido (Figura 2.10). É necessário um compressor de grande capacidade

para garantir uma boa operação deste equipamento. Segundo o *Guide for Shotcrete* (ACI 506R-05, 2005), para a utilização de mangueiras com um diâmetro de 25 mm, necessita-se de um compressor com uma capacidade de 10 m³/min a uma pressão de 0.7 MPa (7 bar). Para valores superiores de diâmetro das mangueiras a capacidade do compressor aumenta. É de salientar que a capacidade do compressor pode reduzir-se devido à idade do equipamento, à altitude de operação, ao nariz da mangueira e a possíveis fugas na câmara da máquina de projecção (ACI 506R-05, 2005).

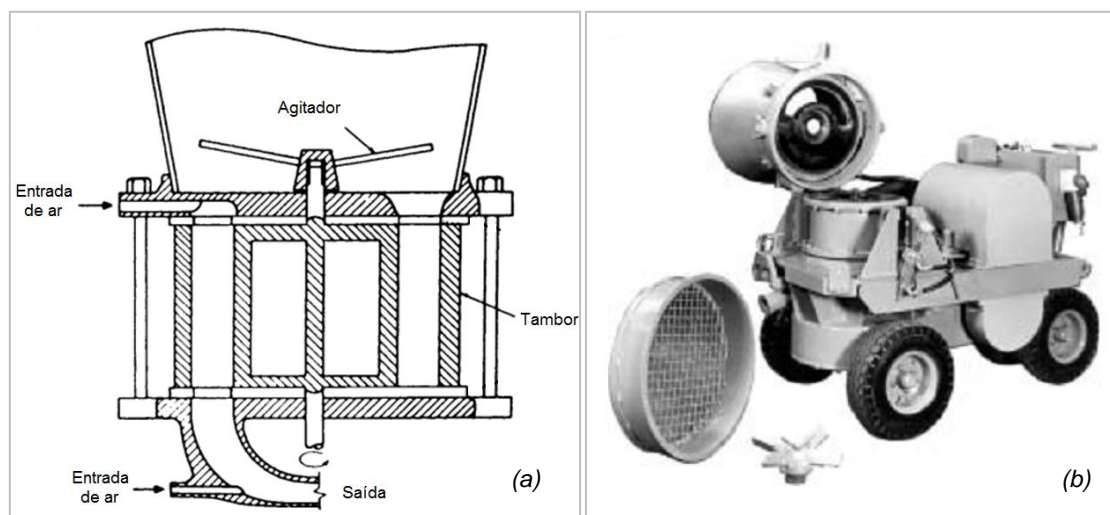


Figura 2.10 – (a) Representação esquemática de uma máquina de projecção de rotor, (b) Exemplo de máquina de rotor (ACI 506R-05, 2005).

A boca de injeção tipo associada ao processo por via seca possui uma entrada para a mangueira de entrega de material e outra, regulada por meio de uma válvula, para a mangueira de alimentação de água (Figura 2.11a).

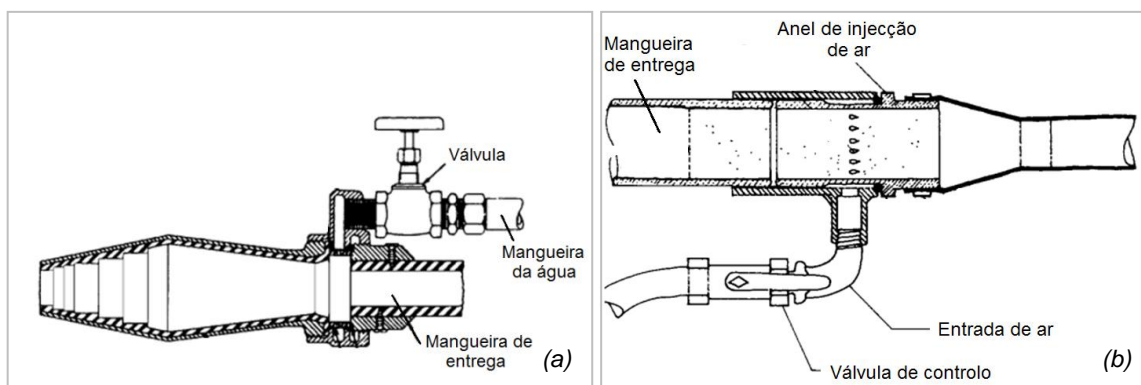


Figura 2.11 – Bocas de injeção para a projecção (a) por via seca e (b) por via húmida (ACI 506R-05, 2005).

2.5.2. PROCESSO POR VIA HÚMIDA

Alguns tipos de máquinas de projecção de rotor podem ser utilizadas na projecção por via húmida, mas este processo exige apenas uma bomba de cimento (Figura 2.12) para bombear a mistura de betão já hidratada até ao seu local de aplicação.

Uma vez chegada a mistura à boca de injeção, é introduzido ar comprimido de forma a aumentar a velocidade de ejeção do material. Para fornecer o ar comprimido basta um compressor com capacidade entre 5.6 a 10 m³/min a 0.7 MPa (7 bar).

A boca de injeção tipo da projecção por via húmida é constituída por duas entradas: uma para a mangueira de entrega de material e outra para a introdução do ar comprimido (Figura 2.11b).

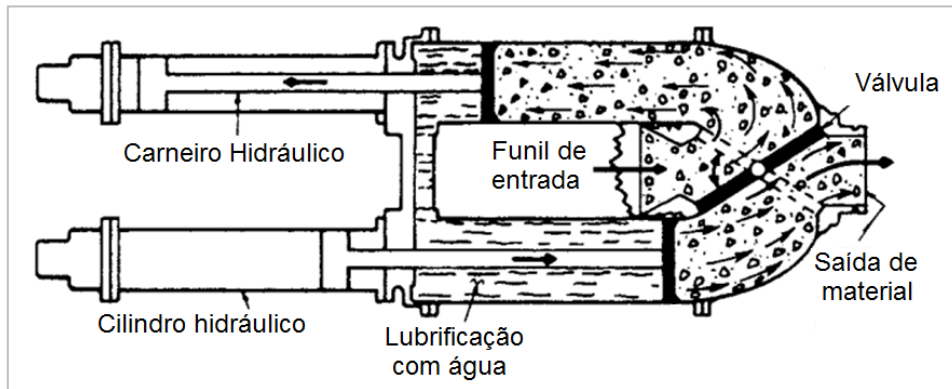


Figura 2.12 – Representação esquemática de uma bomba de betão (ACI 506R-05, 2005).

Em ambos os processos de projecção estão envolvidos três tipos de mangueiras: as de transporte de ar, as de alimentação de água e as de entrega de material. As mangueiras de entrega de material devem ser leves, flexíveis e resistentes à abrasão, sendo este último parâmetro muito importante na via seca. Para a via húmida, também se podem utilizar mangueiras rígidas de aço.

A montagem dos equipamentos e a sua disposição em obra deve ser planeada de forma a tornar eficientes as operações de projecção. Alguns princípios a ter em conta são: a proximidade ao local de aplicação, a proximidade dos componentes do betão e o número de movimentações do equipamento necessárias para a realização do projecto.

2.6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BETÃO PROJECTADO

2.6.1. ADERÊNCIA

O betão projectado apresenta geralmente uma boa aderência a vários tipos de superfície: betão, rocha, aço, alvenaria, entre outros. Para avaliar a capacidade aderente do betão projectado ao substrato, determina-se a força de corte resistente ou a força directa de tracção (ensaio *pull-off*). É também possível utilizar métodos não destrutivos como o uso de um martelo para, através do som, determinar a existência de vazios (um som cavo permite detectar zonas não aderentes).

Em termos dos valores usuais para a resistência de arrancamento, existem autores que indicam que o betão projectado deverá desenvolver, no mínimo, tensões de 0.7 MPa, sendo geralmente atingidos valores de 1.0 MPa entre betões bem compactados e superfícies correctamente preparadas (ACI 506R-05, 2005). Na *European specification for sprayed concrete* (EFNARC, 1996), definem-se valores mínimos para a resistência de arrancamento entre o betão projectado e substratos de betão ou rocha. Estes valores podem ser observados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tensão de arrancamento: mínimos requeridos (EFNARC, 1996).

Tipo de Ligação	Tensão de arrancamento mínima para betão (MPa)	Tensão de arrancamento mínima para rocha (MPa)
Não estrutural	0.5	0.1
Estrutural	1.0	0.5

O tratamento da superfície de substrato é o factor determinante na capacidade aderente entre o mesmo e o betão projectado. Segundo o *Guide to shotcrete* (ACI 506R-05, 2005), foram efectuados estudos para determinar a aderência entre betões projectados por via seca e húmida a vários tipos de superfície, dos quais se concluiu que o tipo de preparação do substrato é mais preponderante que a composição e natureza dos betões (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Influência da superfície de preparação na tensão de arrancamento, psi (MPa) em *Guide to shotcrete* (ACI 506R-05, 2005).

Tipo de betão projectado	Jacto de água	Jacto de areia	Moagem	Picagem	Picagem e jacto de areia
Via seca	230 (1.6)	290 (2.0)	30 (0.2)	190 (1.3)	245 (1.7)
Via seca + sílica de fumo + fibras	290 (2.0)	290 (2.0)	115 (0.8)	160 (1.1)	275 (1.9)
Via húmida	230 (1.6)	-	-	-	-

É ainda importante referir que, dependendo da natureza do material de substrato, para se obter uma máxima adesão, a projecção deve ser efectuada sobre um substrato saturado, ou seja, umas horas antes da projecção deve-se molhar o material de suporte até que este não consiga absorver mais água.

2.6.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão do betão projectado depende principalmente das razões agregados/cimento (ag/c) e água/cimento (a/c). Quanto menor for a razão a/c , mais compacto vai ser o betão e, por consequência, maior a sua resistência mecânica.

No caso da projecção por via seca, vários autores indicam que se conseguem atingir valores bastante baixos para a razão a/c , sendo indicado intervalos de 0.35 a 0.50 (Cánovàs, 1984) ou de 0.30 a 0.40 (ACI 506R-05, 2005), pelo que a característica condicionante na resistência à compressão é a razão c/ag .

Na projecção por via húmida a razão a/c tem de ser superior para conferir a plasticidade ao betão necessária para a sua bombagem mas, por outro lado, é mais fácil garantir que a composição do betão *in situ* é a que inicialmente se calculou, pois: (i) a água é adicionada logo na mistura dos componentes; (ii) existe menor efeito de ricochete e formação de pó durante o processo de projecção (menor perda de agregados grossos e finos e de cimento).

Relativamente à tensão de rotura à compressão, para o betão projectado por via seca, toma valores entre os 40 a 50 MPa, enquanto no caso do betão projectado por via húmida, estes valores estão compreendidos entre 30 a 50 MPa (ACI 506R-05, 2005).

Em ambos os casos é possível criar betões de alta resistência por meio da adição de outros componentes como superplastificantes, sílica de fumo e fibras, embora seja mais usual a utilização destas adições na projecção por via húmida. Desta forma consegue-se atingir valores até 85 e 100 MPa para o betão projectado por via seca e húmida, respectivamente (ACI 506R-05, 2005).

Geralmente, nos casos em que se utiliza o betão projectado, em particular nos trabalhos de reabilitação estrutural, túneis ou contenção de terras, a resistência do betão em idades jovens é mais importante que a resistência do mesmo a longo prazo. Para se conseguir aumentar a resistência inicial do betão, utilizam-se aceleradores de presa, que têm a desvantagem de poderem diminuir a resistência a longo prazo do betão.

Para garantir que o betão aplicado cumpre com as exigências pré-definidas em projecto, realizam-se ensaios de resistência à compressão de forma a avaliar a sua conformidade. Os critérios de conformidade variam consoante a norma ou especificação seguida. No caso português

segue-se a norma NP EN 14487-1 para o ensaio de carotes e a norma NP EN 206-1, para o caso de cubos.

Outro factor a ter em conta é a relação da resistência à compressão *in situ* característica com a classe de resistência à compressão. Os valores obtidos da resistência à compressão de carotes são geralmente menores do que os obtidos de provetes normalizados amostrados da mesma amassadura de betão. Este facto deve-se, entre outros, a danos na carotagem, ao grau de compactação e cura nas condições práticas locais e à posição do elemento onde a resistência *in situ* é obtida (NP EN 13791, 2008).

A norma NP EN 13791 considera um factor de redução de 0.85 para valores de resistência obtidos *in situ*, deste modo, pertencendo um betão à classe C_{30/37}, a sua resistência característica é de 37 MPa (ensaio em cubos) à qual corresponde um valor mínimo da resistência característica *in situ* de 31 MPa. No caso da avaliação da resistência *in situ* ser realizada através do ensaio de carotes com 100 mm de diâmetro, há que ter atenção às seguintes considerações (NP EN 12504, 2003):

- Valores obtidos de carotes com proporções 1/1 de altura/diâmetro deverão ser comparados com a resistência à compressão de cubos de 150 mm de lado;
- Valores obtidos de carotes com proporções 2/1 de altura/diâmetro deverão ser comparados com a resistência à compressão de cilindros;

No caso de carotes com diâmetros inferiores a 100 mm e uma relação de altura/diâmetro de 1/1, a variabilidade de resultados é superior, pelo que se deve aumentar para o triplo o número de carotes e interpolar linearmente para carotes com diâmetros entre 50 mm e 100 mm.

2.7. DURABILIDADE DO BETÃO PROJECTADO

O betão projectado, como qualquer outro betão convencional, está sujeito a fenómenos físico-químicos que vão degradando as suas propriedades ao longo do tempo. O facto de o betão não ser impermeável, isto é, de se deixar atravessar pelos gases e líquidos, actuando com ou sem pressão e com ou sem substâncias em solução ou suspensão, afecta a sua durabilidade e função nas estruturas.

O transporte de fluidos no betão ocorre por este ser um material poroso, e pode dar-se através de três processos: por capilaridade, por difusão ou por permeabilidade. Os dois primeiros ocorrem sem que exista pressão hidráulica, enquanto que o último é o mecanismo dominante em presença de uma pressão hidráulica.

A protecção à corrosão das armaduras é um dos grandes objectivos quando se estuda a composição do betão a aplicar, tendo sempre em conta as condições a que este vai estar sujeito e

qual o uso a que se destina. Desta forma, para além do conhecimento da porosidade do betão, é de grande interesse o estudo dos dois principais processos que levam à corrosão do aço das armaduras, nomeadamente a carbonatação do betão e a penetração de cloretos. Com o conhecimento de como estas reacções se desenvolvem, é possível criar medidas de prevenção e de minimização dos seus efeitos nas estruturas, isto é, de garantir a durabilidade do betão para um período de tempo definido.

2.7.1. POROSIDADE DO BETÃO

A formação de poros ou vazios no betão projectado deve-se essencialmente a três factores: à granulometria dos agregados, à razão a/c e à velocidade de impacto.

Os agregados são sempre mais ou menos porosos, sendo os mais leves geralmente mais absorventes e, portanto, mais porosos. A razão a/c influencia bastante o aparecimento de poros, principalmente no processo de projecção por via seca. Quanto menor for esta razão, menor o volume de vazios formados e portanto menor a capacidade de absorção do betão. Quando se consegue projectar o betão com valores baixos para a razão a/c, geralmente obtém-se um betão de boa qualidade, só há que ter em atenção que, se a mistura for aplicada demasiado seca, ir-se-á obter resultados contrários aos pretendidos, devido à rigidez plástica do material projectado. Por fim, a velocidade de impacto da projecção condiciona bastante a formação de vazios, uma vez que uma velocidade de impacto insuficiente não vai compactar de forma adequada o betão e, portanto, vai originar um betão demasiado permeável. Considera-se aceitável para o volume de vazios valores entre 14% e 17% (ACI 506R-05, 2005).

Pode-se classificar os poros quanto à sua dimensão em (Coutinho, *et al.*, 1994):

- a) Grandes poros, com dimensões superiores a 10 μm , devidos à granulometria e aos métodos de mistura e de compactação;
- b) Poros capilares, com dimensões de 10^{-2} a 10 μm , que resultam do excesso de água de amassadura;
- c) Pequenos poros, com dimensões da ordem do nanómetro, que resultam das reacções de hidratação do betão e que são independentes da quantidade de água da mistura.

Pode-se também classificar a porosidade quanto à forma em (Coutinho, *et al.*, 1994):

- a) Porosidade fechada, quando os vazios não comunicam entre si;
- b) Porosidade aberta, quando os vazios comunicam entre si por canais ou capilares de diâmetro maior ou menor.

Por definição, a porosidade é “a relação entre o volume de vazios e o volume total, aparente, do material” (Coutinho, *et al.*, 1994). A soma da porosidade fechada e da porosidade aberta é a porosidade absoluta, a qual geralmente é difícil de determinar sem destruir o material devido ao

facto de nem todos os vazios serem acessíveis. A porosidade que frequentemente se determina é a aberta, sendo muitas vezes designada de absorção, e cujo valor depende do método de ensaio utilizado.

Existem vários métodos para determinar a porosidade de um betão, sendo geralmente todos bastante semelhantes no seu princípio. Em Portugal as medições da porosidade no vácuo e à pressão atmosférica são realizadas segundo as Especificações LNEC E395 e E394, respectivamente.

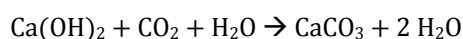
2.7.2. CARBONATAÇÃO DO BETÃO

a) QUÍMICA DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação do betão é um processo que ocorre quando os componentes alcalinos dissolvidos na solução intersticial, reagem com o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera à medida que se vai dando a sua penetração no betão através dos vazios existentes. Deste fenómeno resulta a redução da alcalinidade da solução intersticial das áreas afectadas, o que leva à despassivação das armaduras, permitindo a corrosão do aço.

O mecanismo físico-químico de carbonatação do betão tem sido amplamente estudado e o seu processo resume-se nos pontos seguintes (Mehta, *et al.*, 1994; Salta, 1996; Pina, 2009):

- O CO₂ presente na atmosfera penetra para o interior do material cimentício por difusão no ar dos poros não saturados. Existe ainda uma pequena parte de CO₂ que é difundida por dissolução na solução dos poros saturados.
- Na presença de água, o CO₂ vai reagir com os produtos resultantes da hidratação do cimento, nomeadamente os hidróxidos de sódio e de potássio, que se encontram dissolvidos na solução intersticial dos poros, dando origem por fim a carbonatos.
- Paralelamente às reacções de carbonatação do hidróxido de sódio e do hidróxido de potássio, dá-se também a carbonatação do hidróxido de cálcio. A concentração do hidróxido de cálcio solúvel na pasta cimentícia é muito superior à dos restantes hidróxidos, o que faz com que este reagente seja o principal responsável pela alcalinidade da solução intersticial. Deste modo, a seguinte equação pode ser considerada como a principal reacção do mecanismo de carbonatação:



- Existem ainda outros compostos do cimento hidratado que reagem do mesmo modo com o CO₂, como é o caso dos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, formando os respectivos carbonatos.

b) MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO

Num betão, a profundidade ou espessura de carbonatação dá-se a partir da superfície em contacto com a atmosfera e progride gradualmente, ao longo do tempo, para o interior. À linha que vai separando a área carbonatada da área não carbonatada dá-se o nome de frente de carbonatação.

Existem várias formas de identificar a localização desta linha e, por consequência, de determinar a profundidade de carbonatação do betão. O método mais frequentemente utilizado consiste na pulverização da superfície do provete com um indicador ácido/base (E 391, 1993). Geralmente, o indicador mais utilizado é uma solução incolor de fenolftaleína, que em meios com pH superior a 9 (alcalino) apresenta uma cor rosa-carmim. Deste modo, é possível distinguir claramente a frente de carbonatação no provete em estudo (Figura 2.13), uma vez que esta é a fronteira entre a zona incolor e rosa-carmim, às quais correspondem as áreas carbonatadas e não carbonatadas, respectivamente.

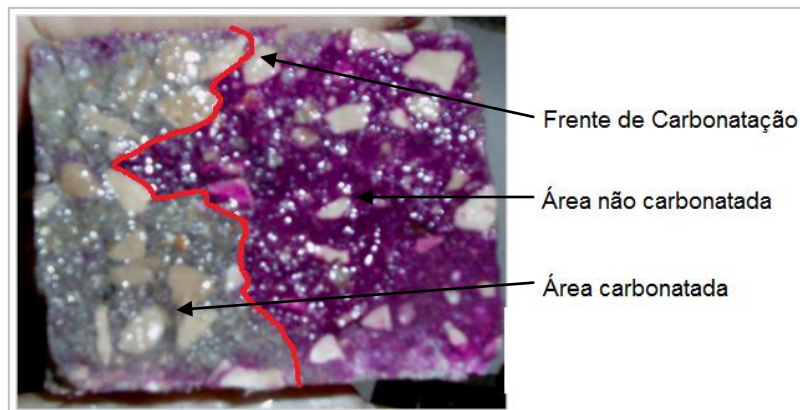


Figura 2.13 – Frente de carbonatação de um provete obtido de uma amostra de betão projectado.

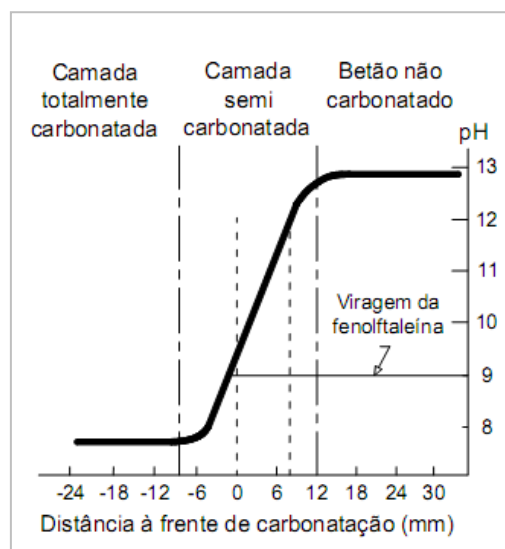


Figura 2.14 – Gradiente de pH na frente de carbonatação (Salta, *et al.*, 1996).

A principal desvantagem da utilização deste método é que a fenolftaleína não consegue diferenciar as zonas com pH entre 9 e 13, denominada de camada semi carbonatada, e onde já se pode iniciar a despassivação das armaduras (Figura 2.14).

c) MODELOS DE PREVISÃO DE CARBONATAÇÃO

Quando se projecta uma estrutura de betão é crucial a previsão da evolução das suas anomalias potenciais, de modo a se poder tomar logo à partida medidas que garantam o bom funcionamento da estrutura até ao fim da sua vida útil.

No caso da carbonatação, os modelos propostos são geralmente baseados em estudos empíricos ou semi-empíricos e, portanto, não são capazes de determinar com exactidão o período de iniciação da corrosão devido à carbonatação. Estes modelos apresentam um certo grau de complexidade, uma vez que se baseiam em diversas variáveis que influenciam a velocidade de carbonatação, tais como a concentração de CO₂ na atmosfera e no betão, o coeficiente de difusão do CO₂, a permeabilidade, a humidade relativa, a resistência à compressão, o grau de hidratação, entre outros.

Destes modelos de previsão, a maioria admite que a profundidade de carbonatação é proporcional à raiz quadrada do tempo afectada de uma constante:

$$- \tag{2.1}$$

Com:

x – Profundidade de carbonatação (mm);

k – Coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0.5});

t – Tempo de exposição (ano).

Apesar de, à primeira vista, a Equação (2.1) apresentar uma forma bastante simples, existe uma certa dificuldade em se determinar o valor do coeficiente de carbonatação, uma vez que este traduz todas as variáveis dependentes do betão e da agressividade ambiental. Em geral, nos modelos de previsão de carbonatação, o valor de k depende da quantidade de substâncias do betão reactivas com o CO₂, da diferença de concentração de CO₂ no exterior e no interior do betão e do coeficiente de difusão de CO₂ através do betão, que é fortemente afectado pela humidade.

É de notar que estes modelos dependem da diferença da concentração de CO₂ entre o exterior e o interior do betão e não directamente dos seus valores absolutos, o que possibilita a utilização de concentrações elevadas deste gás em ensaios experimentais, acelerando o processo de carbonatação, sem questionar a validade dos modelos existentes.

De forma a se determinar o coeficiente de carbonatação k , recorre-se muitas vezes ao ensaio de carbonatação acelerada. Em suma este ensaio consiste na introdução de provetes de betão numa câmara de carbonatação acelerada, com condições de temperatura, humidade e teor de CO_2 controladas. O coeficiente de carbonatação acelerada k_a obtém-se analiticamente da regressão efectuada sobre os resultados obtidos no ensaio.

2.7.3. PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Existem três diferentes mecanismos de transporte dos iões cloreto no betão: absorção capilar, permeação e difusão (Stanish, *et al.*, 1997).

Quando a superfície do betão está sujeita às condições ambientais, está geralmente em contacto cíclico com a água. A água em contacto com a superfície seca vai ser absorvida pelos poros do betão (absorção capilar), e consigo vai arrastar os iões cloreto que poderão estar nela dissolvidos. Embora este processo de transporte seja bastante comum, não é ele, por si só, o responsável por fazer chegar os iões cloreto a uma profundidade crítica para as armaduras. Este mecanismo vai sim facilitar a difusão dos cloretos ao transportá-los rapidamente até uma certa profundidade do betão.

A permeação, resultante da diferença de pressão entre a superfície do betão e o seu interior, é também uma das formas de transporte de cloretos. Quando existe um aumento de pressão exterior e há iões cloreto presentes na superfície, dá-se a migração dos mesmos para o interior do betão, cujos vazios se encontram com uma menor pressão. É de notar que as condições para que este tipo de mecanismo ocorra não se reúnem com frequência na maioria das estruturas de betão, pelo que não é o meio de transporte mais comum para a penetração dos iões cloreto.

O método principal de penetração de cloretos no betão é a difusão, a qual consiste no movimento dos iões cloreto devido ao gradiente de concentração. Este processo só ocorre na presença de uma fase líquida contínua no interior do betão e quando existe um gradiente de iões cloreto instalado. A difusão no betão obedece à 1ª Lei de Fick, a qual regula qualquer outro processo de difusão. Esta lei, no caso unidimensional, é descrita pela Equação (2.2):

$$\text{---} \quad (2.2)$$

Com:

- F – fluxo de iões cloreto [kg/s];
- D_{eff} – coeficiente de difusão efectiva [m^2/s];
- C – concentração de cloretos [kg/m^3];
- X – distância à superfície [m].

A Equação (2.2) só é válida para condições estáveis, ou seja, quando não há variações da concentração ao longo do tempo. Para condições não estáveis, deriva-se a Equação (2.2) em ordem ao tempo e obtém-se a Equação (2.3), denominada de 2ª Lei de Fick.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

Resolvendo esta equação para as seguintes condições de fronteira:

- , a concentração à superfície é constante;
- , a concentração inicial no betão é nula;
- , qualquer ponto suficientemente longe da superfície tem concentração nula.

Obtém-se a solução expressa na equação

$$c = c_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.4)$$

Em que:

- representa o perfil de cloretos, isto é, a concentração de cloretos a uma distância x da superfície do betão após o tempo t a partir do início da exposição;
- representa a concentração de cloretos à superfície do betão;
- é a função de erro (pode ser determinada pela consulta de compêndios de matemática ou através de programas analíticos).

Existem diversos factores que influenciam a difusão de cloretos no betão. Em primeiro lugar, este mecanismo é afectado pela estrutura porosa do material. O betão não é um material homogéneo, sendo composto por uma fase líquida e uma fase sólida, o que leva a que a própria difusão dos cloretos não seja também ela homogénea, uma vez que esta vai-se dar preferencialmente através da fase líquida.

Para além deste facto, as características físicas dos poros vão também influenciar o coeficiente de difusão, estando este efeito implícito na variável de coeficiente de difusão efectivo.

A temperatura do betão durante a cura é outro factor que afecta a capacidade de difusão dos cloretos. Quanto mais elevada for a temperatura de cura, mais rapidamente se dá o processo de hidratação e mais cedo se atinge a maturidade do betão, apresentando este uma melhor resistência à penetração de cloretos que um betão, com a mesma idade, que tivesse uma cura

com menor temperatura. Embora a cura com temperaturas elevadas seja vantajosa a curto prazo, a longo prazo o betão com uma cura normal apresenta valores inferiores para o coeficiente de difusão, pois já houve tempo das reacções de hidratação terem ocorrido em toda a sua extensão.

Por fim, o facto de o betão ter capacidade de se ligar aos cloretos vai influenciar a percentagem de penetração dos iões cloreto. O betão não é um material inerte perante a existência de cloretos na solução intersticial. Uma fracção dos iões cloreto vai reagir com os componentes do betão, tornando-se parte integrante da sua matriz, reduzindo a quantidade de cloretos que é difundida. De forma a contornar este efeito, determina-se o coeficiente de difusão apenas após se ter atingido a estabilidade, garantindo deste modo que se deram todas as reacções possíveis entre o betão e os cloretos.

A corrosão das armaduras por penetração de cloretos só ocorre quando se encontram reunidas as seguintes condições: a frente de penetração de cloretos encontra-se junto à armadura e a concentração de iões cloreto nessa mesma profundidade atinge uma determinada concentração crítica.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Os objectivos da campanha experimental consistiram na avaliação das características mecânicas e de durabilidade do betão projectado, em condições o mais próximas da realidade da execução de uma obra, de forma a contribuir para o aumento do conhecimento da aplicação desta técnica na reabilitação de estruturas.

Neste capítulo refere-se a campanha experimental realizada, identificando-se os materiais utilizados e respectivas características, assim como as composições do betão projectado em estudo e o respectivo cálculo. Seguidamente, apresenta-se o método da realização dos painéis de ensaio, as suas características e condições de cura. Por fim, descrevem-se as metodologias de ensaio realizadas.

3.1. COMPOSIÇÃO DO BETÃO PROJECTADO

3.1.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados na campanha experimental foram armazenados em recipientes construídos para o efeito no estaleiro da obra onde os trabalhos de projecção do betão foram realizados. É importante referir que, embora se tenha tido o cuidado de manter os recipientes cobertos, estes estiveram sujeitos a condições variáveis de temperatura e humidade. Este facto, uma vez mais, vai de encontro aos objectivos deste estudo de se estar perante um cenário próximo da realidade de uma obra.

a) CIMENTO

O cimento utilizado no fabrico do betão projectado foi o cimento Portland do tipo CEM I 42.5 R da marca comercial SECIL (ANEXO A). Segundo a NP EN 197-1 (NP EN 197, 2001), a percentagem de clínquer deste cimento varia entre 95 e 100%, o que comparando com os cimentos Portland modificados faz com que este tipo de cimento tenha uma maior resistência mecânica inicial.

b) AGREGADOS

Na produção do betão foram utilizadas duas areias lavadas com granulometrias diferentes e uma brita com a denominação de bago de arroz.

A areia com granulometria mais fina (dimensão nominal de 0/2), designada por areia 02, é uma areia proveniente de Sesimbra, sendo a areia de granulometria mais grossa (dimensão nominal de 0/4), designada por areia 04, proveniente do Seixal. As características consideradas para ambas as areias, nomeadamente a curva granulométrica e a massa volúmica, foram fornecidas pelo fornecedor (GRUPO SOARVAMIL) e encontram-se apresentadas nos ANEXOS B.1 e B.2, para a areia 02, e ANEXOS C.1 e C.2, para a areia 04.

Quanto ao bago de arroz utilizado, uma vez que não foi fornecida a respectiva ficha técnica, foi necessário realizar uma análise granulométrica para a determinar e quantificar as diferentes dimensões das partículas que o constituem. Este ensaio foi realizado segundo a metodologia e os princípios apresentados na norma NP 1379 (NP 1379, 1976). Deste modo, em função da máxima dimensão do agregado, determinou-se a massa do provete a ensaiar. Entende-se por máxima dimensão do agregado a menor abertura do peneiro através da qual passa, pelo menos, 90% da massa do agregado (Coutinho, 1973). Por inspecção ocular, a máxima dimensão do bago de arroz está claramente entre 4.75 mm e 25 mm, pelo que foi utilizado uma amostra de aproximadamente 3 kg.

Após a realização deste ensaio e dos cálculos inerentes, obteve-se a curva granulométrica para o bago de arroz, como se pode observar na Figura 3.1. Os dados obtidos no ensaio para o cálculo desta curva encontram-se expressos no ANEXO D.

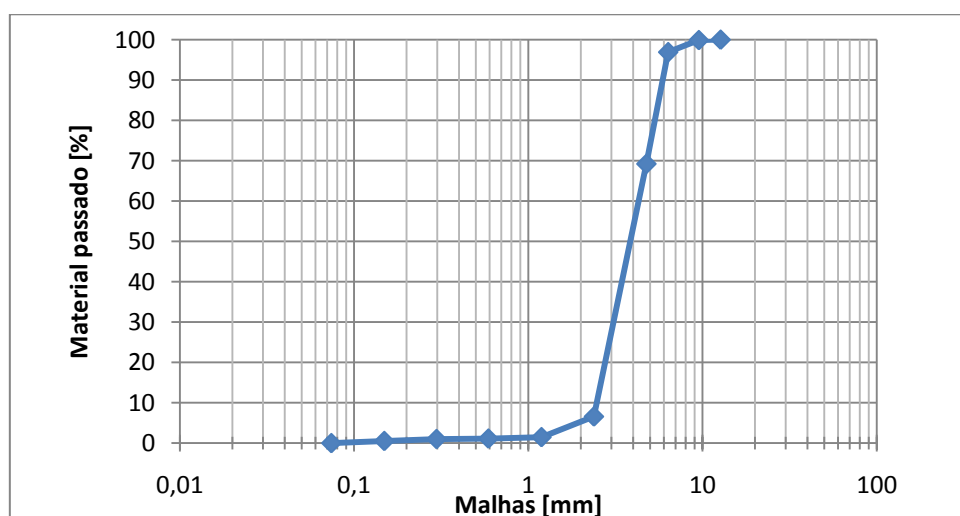


Figura 3.1 – Curva granulométrica do bago de arroz.

3.1.2. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS

Um dos parâmetros de estudo proposto é a análise da variação das características mecânicas e de durabilidade do betão projectado com diferentes teores de cimento.

Consultando a especificação LNEC E464, é possível obter valores mínimos para o teor de cimento e para a classe de resistência em função das acções ambientais, de modo a garantir uma vida útil de projecto de 50 e 100 anos. Sendo o presente estudo um caso académico, definiu-se que o risco de corrosão de armaduras é por carbonatação e que o ambiente se encontra ciclicamente húmido e seco, o que vai corresponder a uma classe XC4 para a exposição ambiental.

A escolha destes parâmetros prende-se com o facto deste tipo de betão ser bastante utilizado em estruturas em contacto periódico com a água como é o caso de túneis, barragens ou pontes. Para a classe de exposição considerada, e tendo em conta que o cimento utilizado é do tipo CEM I, a especificação LNEC E464 indica que a dosagem mínima de cimento é de 280 kg/m^3 , a que corresponde uma classe mínima de resistência $C_{30/37}$.

Em bibliografia específica referente a betão projectado obtém-se ainda outras indicações quanto à quantidade de cimento a utilizar na mistura. No caso de projecção por via seca, há autores que apontam que a dosagem normal de cimento pode variar entre 300 kg/m^3 a 375 kg/m^3 (Brito, *et al.*, 2005). Outros indicam que para se obter um betão com uma resistência à compressão na ordem dos 35 MPa o teor em cimento deverá variar entre 385 kg/m^3 e 505 kg/m^3 (ACI 506R-05, 2005).

Tendo em conta estes dados, definiram-se duas composições de betão projectado a estudar: uma composição com um teor de 350 kg/m^3 de cimento e outra com 450 kg/m^3 .

3.1.3. CÁLCULO DO BETÃO PROJECTADO

Para a determinação das quantidades dos agregados a utilizar em cada uma das duas composições a estudar, ou seja, para o cálculo do betão projectado, utilizou-se o método de Faury.

O método de Faury é um método baseado numa curva de referência que, se denomina por curva de referência de Faury. Este método tem em conta a consistência do betão, a natureza e forma do agregado, o raio médio do molde, e o efeito de parede.

A curva de referência de Faury corresponde à consideração do agregado mais o cimento (curva F). As suas ordenadas variam numa escala linear e as abcissas, com início em $0,0065 \text{ mm}$, variam numa escala proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas. Esta curva é constituída por dois segmentos de recta distintos para os intervalos em baixo apresentados, e está definida pela Equação (3.1) (Coutinho, *et al.*, 1994).

1º segmento de recta: —

2º segmento de recta: —

$$\frac{V}{V_0} = \frac{V_0 - V_1}{V_0 - V_2} \quad (3.1)$$

Com:

D – Máxima dimensão do agregado condicionante (mm);

R – Raio médio do molde a encher (mm);

A – Parâmetro da curva de Faury obtido em função da natureza dos agregados e da trabalhabilidade;

B – Parâmetro da curva de Faury obtido em função da natureza da compactação.

O efeito de parede é o fenómeno de movimentação dos finos do betão para junto de superfícies contínuas, limites que restringem o betão, tais como armaduras e cofragem, o que vai levar a um empobrecimento da massa do interior da estrutura betonada (Coutinho, *et al.*, 1994). Este efeito encontra-se caracterizado na curva de Faury pela razão R/D . No presente estudo considerou-se $R=D$ por ser a posição mais desfavorável, isto é, a que leva a um índice de vazios maior. Embora se tenha definido que $R=D$, é de salientar que no betão projectado o efeito de parede é reduzido, uma vez que apenas poderão estar envolvidas armaduras e pelo facto de este betão não ser vibrado, o que não facilita a movimentação dos finos.

Para se obter a curva de referência de Faury associada apenas aos agregados (curva F'), ou seja, sem a contribuição do cimento, é necessário primeiramente determinar o índice de vazios (I) pela Equação (3.2). Seguidamente, calcula-se o volume absoluto de matéria sólida (S) pela Equação (3.3).

$$I = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \quad (3.2)$$

$$(3.3)$$

Com:

D – Máxima dimensão do agregado condicionante (mm);

R – Raio médio do molde a encher (mm);

K – Coeficiente numérico que depende da consistência do betão, da natureza do agregado e da potência da compactação;

K' – Coeficiente numérico que depende da consistência do betão e da potência da compactação.

De forma a determinar a percentagem de cimento incorporado no volume total de sólidos, calcula-se o volume absoluto de cimento (C) pela Equação (3.4) e obtém-se a percentagem de cimento pela Equação (3.5). O valor do teor de cimento é um parâmetro previamente definido.

$$\text{---} (m^3/m^3) \tag{3.4}$$

$$\text{---} \tag{3.5}$$

Com:

m_c – Teor em cimento da mistura (kg/m^3);

m_{vol} – Massa volúmica do cimento (kg/m^3).

Por fim, para os mesmos pontos das abcissas considerados na curva F, subtrai-se a percentagem de cimento nas ordenadas respectivas e reconverte-se os valores para 100%, obtendo-se assim, a curva F'.

Para a determinação da percentagem de cada um dos componentes sólidos, traça-se uma recta vertical para que esta, ao cortar duas curvas granulométricas consecutivas, circunscreva áreas semelhantes nas duas curvas. As rectas são traçadas da esquerda para a direita. O ponto onde essa recta cruzar a curva de Faury sem cimento, corresponde à percentagem do agregado em questão. Pode-se observar na Figura 3.2 o esquema do processo acima descrito (Coutinho, *et al.*, 1994).

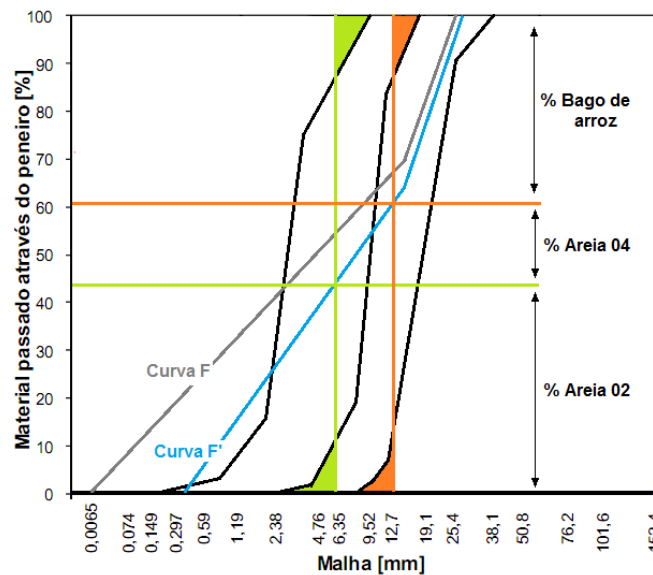


Figura 3.2 – Exemplo esquemático da determinação das percentagens dos componentes sólidos.

Com este método é de fácil conclusão que é possível obter diferentes conjuntos de valores para as percentagens dos agregados, e todos eles serem válidos. É necessário escolher o conjunto de valores que torna a curva final da mistura o mais próxima da curva ideal (curva F'). Para este efeito, determina-se o módulo de finura da curva F' e o da mistura granulométrica e, num processo iterativo, vai-se alterando as percentagens dos agregados até que os dois módulos de finura sejam iguais. Entende-se por módulo de finura a “soma das percentagens

totais que ficam retidas em cada peneiro, da série normal, dividida por 100 (Coutinho, 1973) (Equação (3.6)).

(3.6)

É de notar que se o módulo de finura da mistura for superior ao da curva F' tal significa que a mistura possui elementos de granulometria superior em excesso, pelo que se tem de diminuir a percentagem de agregados grossos.

De forma a determinar-se a composição final da mistura, é necessário calcular o volume absoluto de agregados em 1 m³ de betão. Tal valor obtém-se subtraindo o volume absoluto de cimento (C) ao volume absoluto de matéria sólida (S). A quantidade de cada componente da mistura, expressa em kg/m³, calcula-se multiplicando a percentagem do respectivo agregado à sua massa volúmica e ao volume absoluto de agregados.

A determinação da quantidade de água adequada a uma dada mistura pode ser efectuada de diversas maneiras: (i) através da aplicação de equações empíricas, (ii) por observação dos valores máximos da razão a/c relativos à classe de exposição (LNEC E-464, 2007) ou (iii) por indicações da razão a/c em bibliografia específica. No caso do betão projectado, vários autores consideram que a razão a/c na projecção por via seca, varia entre 0.3 a 0.5 (ACI 506R-05, 2005; Cánovàs, 1984), sendo o valor mais utilizado de 0.35 e, portanto, o escolhido para a determinação da quantidade de água no presente cálculo do betão.

Aplicando o método anteriormente descrito, calculou-se as duas composições de betão projectado a estudar, apresentando-se na Tabela 3.1 os resultados obtidos para cada uma delas. Na Figura 3.3 apresenta-se a curva de referência de Faury e as respectivas curvas granulométricas dos agregados, assim como as curvas de Faury sem a componente do cimento para as duas composições em estudo.

Tabela 3.1 – Composição dos dois betões em estudo.

	Unidades	Composição 350	Composição 450
Cimento	kg/m ³	350	450
Areia 02	kg/m ³	632	614
Areia 04	kg/m ³	300	269
Bago de arroz	kg/m ³	678	642
Água	l/m ³	123	158
a/c	-	0.35	0.35
ag/c	-	4.60	3.39

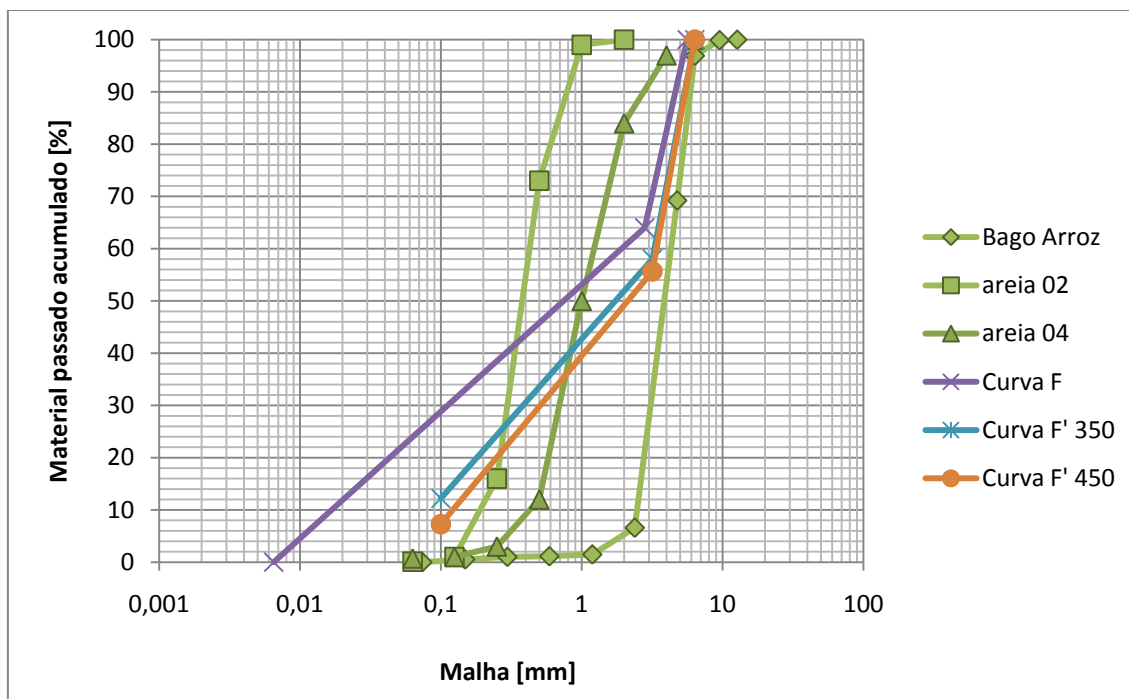


Figura 3.3 – Análise gráfica das granulometrias dos agregados e curvas de Faury para as composições de betão projectado em estudo.

3.2. EXECUÇÃO DOS PAINÉIS DE ENSAIO

Antes da projecção do betão por via seca, foram construídos em estaleiro os painéis de ensaio com $1.90 \times 1.90 \text{ m}^2$. Primeiramente, estes painéis foram armados com uma rede electro-soldada (tipo Malhasol) de forma a assegurar a estabilidade estrutural dos mesmos após a remoção das carotes necessárias para a realização dos ensaios (Figura 3.4a). Seguidamente, os painéis foram preenchidos com um betão corrente de classe C30/37, até se atingir uma espessura de aproximadamente 8 cm (Figura 3.4b), obtendo-se deste modo o betão de substrato. A classe de resistência deste betão foi propositadamente definida como sendo igual à do betão projectado de forma a haver compatibilidade nos betões.



Figura 3.4 – Execução dos painéis de ensaio: (a) colocação de armadura e (b) betonagem.

Foi ainda colocado um geotêxtil sobre a superfície dos painéis, o qual era regularmente molhado, para fazer a cura do betão (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Cura do betão de substrato.

Os painéis de ensaio foram transportados posteriormente do estaleiro da empresa H-Tecnic para o estaleiro de uma obra em curso na qual iriam ser também realizados trabalhos de projecção de betão. Dos cinco painéis realizados, dois foram colocados na horizontal, de forma a que a projecção fosse realizada de baixo para cima, ficando apoiados em andaimes como é possível ver na Figura 3.6a. Os restantes painéis foram colocados na vertical (Figura 3.6b).



(a)

(b)

Figura 3.6 – Direcção de colocação dos painéis de ensaio: (a) horizontal e (b) vertical.

Antes da projecção do betão e passados 72 dias da aplicação do betão de substrato, foram realizados dois tipos de tratamento da superfície: lavagem com jacto de água e picagem com martelo pneumático. A lavagem com jacto de água (Figura 3.7a) foi efectuada nos painéis 450V, 350V e 350H, enquanto que a picagem com martelo pneumático (Figura 3.7b) foi realizada nos painéis 450H e 450V.

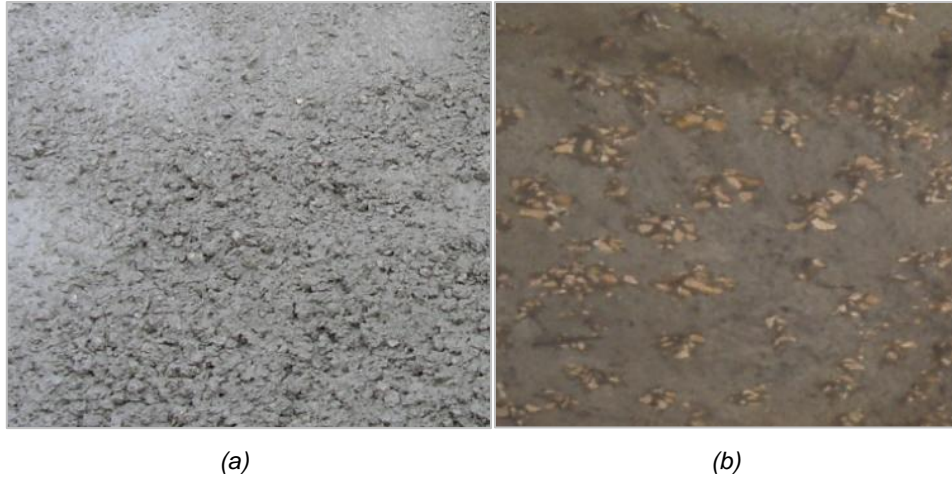


Figura 3.7 – Superfície (a) após lavagem com jacto de água e (b) após picagem com martelo pneumático.

Os trabalhos de projecção do betão por via seca foram realizados aproximadamente 3 meses após a betonagem com o betão corrente e tiveram a duração de 1 dia (Figura 3.8). É de referir que esta actividade foi executada seguindo os parâmetros referidos na NP EN 14487-2.



Figura 3.8 – Projecção (a) vertical do betão e (b) projecção horizontal do betão.

Foram projectados dois painéis com o betão de 350 kg/m^3 de cimento, estando um colocado na horizontal e outro na vertical. Os restantes três painéis foram projectados com o betão de 450 kg/m^3 , estando dois deles na vertical e o restante na horizontal.

Assim, e de forma a facilitar a identificação de cada um dos painéis, denominou-se cada um deles da forma indicada na Tabela 3.2. Todos os painéis foram projectados com uma espessura de aproximadamente 7 cm, tendo sido efectuadas camadas de projecção até perfazer este valor.

Tabela 3.2 – Identificação dos painéis de ensaio.

Tratamento de Superfície	Direcção do painel	Teor em cimento (kg/m ³)
Jacto de água	H	350
	V	350
		450
Picagem	H	450
	V	450

No início da projecção observou-se que (i) a máquina entupia repetidamente, tendo-se tido de parar os trabalhos de projecção e desentupir as mangueiras, e que (ii) o material projectado não estava a aderir bem ao substrato.

Os materiais que eram expelidos ao desentupir as mangueiras eram essencialmente os finos da mistura do betão, nomeadamente o cimento. Este problema veio a ser, em parte, resolvido com a aquisição de um compressor de 7 m³. Com o novo compressor foi efectuada a projecção de todos os painéis de ensaio mas, mesmo assim, constatou-se que o betão ainda não estava a ser projectado com a pressão correcta.

Só depois dos trabalhos concluídos, antes da máquina ser utilizada na obra, é que se veio a descobrir que, devido ao filtro do óleo não estar em condições, a máquina não criava pressão suficiente na câmara, pelo que o problema foi resolvido com a mudança do filtro.

Por fim, os painéis foram cobertos com um geotêxtil de forma a fazer a cura do betão, o qual era molhado frequentemente.

3.3. PLANO DE ENSAIOS

Na caracterização das duas composições de betão projectado em estudo foram efectuados diversos ensaios no estado endurecido, a diferentes idades, cada um deles seguindo a respectiva norma ou especificação. Na Tabela 3.3 apresenta-se de forma resumida e clara as actividades experimentais levadas a cabo com os seus respectivos parâmetros identificativos.

Tabela 3.3 – Ensaios realizados na avaliação do desempenho do betão projectado.

Ensaio	Tipo de aplicação	Forma dos provetes	Composição		Idade	Número de provetes por composição	Norma
Aderência (<i>pull-off</i>)	Projectado	Pastilhas ø50 mm	350	H	73 dias	3	ASTM D7234
			450	H			
				V			
Resistência à compressão	Vazado	Cubos (15x15)cm	450	-	28 dias	2	NP EN 12390-3
	Projectado	Cubos (15x15)cm	450	-	28 dias	3	
		Cilindros (ø50X50)mm	350	H	7 15 e 28 dias	10	NP EN 12504 NP EN 12390-3
				V			
		450	H				
	V						
Resistência à carbonatação acelerada	Projectado	Bolachas ø100 mm	350	H	2 meses	5	LNEC E 391
				V			
			450	H			
				V			
Resistência à penetração de cloretos	Projectado	Bolachas (ø100x50)mm	350	H	4 meses e meio	3	LNEC E 463
				V			
			450	H			
				V			
Absorção de água	Projectado	Bolachas ø100 mm	350	H	4 meses e meio	2	LNEC E 394
				V			
			450	H			
				V			

3.4. MÉTODOS DE ENSAIO PARA A CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO PROJECTADO

No presente subcapítulo descreve-se o objectivo da realização de cada ensaio, assim como a metodologia seguida para cada um, tendo sempre presente a respectiva norma ou especificação.

3.4.1. ADERÊNCIA DO BETÃO PROJECTADO AO SUBSTRATO

a) ENSAIO DE ARRANCAMENTO: *PULL-OFF*

O ensaio de *pull-off* tem como objectivo avaliar a capacidade de aderência da camada de revestimento, seja esta uma argamassa ou um betão de reforço, ao betão de substrato. Este ensaio insere-se no grupo de ensaios parcialmente destrutivos e consiste na extracção de uma pastilha metálica colada através da aplicação de uma força de tracção perpendicular à superfície (Figura 3.9). A pastilha é colada ao revestimento de reforço através de uma resina epóxida ou de outro produto com semelhante aderência, executando-se uma carotagem parcial da zona de teste, com uma profundidade superior à espessura do reforço, de forma a se mobilizar a zona de ligação substrato-reforço (Austin, *et al.*, 1995; ASTM D7234, 2005).

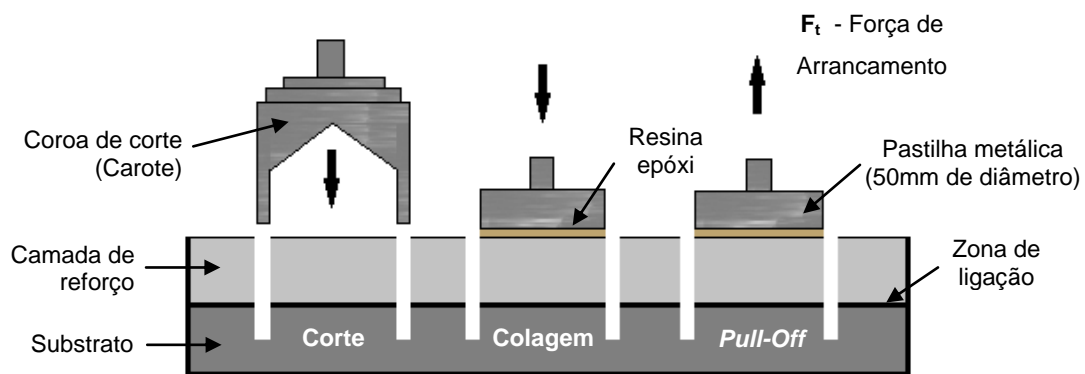


Figura 3.9 – Representação esquemática das fases do ensaio de *pull-off*.

Na realização deste ensaio utiliza-se uma máquina de *pull-off* que, por sua vez, mede a força necessária para proceder ao arrancamento da pastilha. Relacionando o valor obtido da força de tracção com a área da pastilha obtém-se a resistência ao arrancamento, ou seja, a máxima tensão que é possível aplicar ao reforço. No caso em estudo os ensaios foram efectuados com o equipamento apresentado na Figura 3.10, que consiste numa máquina de *pull-off* analógica da marca Controls, com pastilhas metálicas de 50 mm de diâmetro e seguindo a metodologia descrita na norma NP EN 14488-4.



Figura 3.10 – Máquina de ensaios de arrancamento – *pull-off*.

Quanto ao arrancamento, este pode resultar em três diferentes cenários:

- (i). Perda de aderência entre o substrato e a camada de reforço;
- (ii). Rotura do material de reforço;
- (iii). Rotura do betão de substrato.

Como se pode observar na Tabela 3.4, aqueles cenários encontram-se classificados como rotura adesiva, rotura coesiva no reforço e rotura coesiva do substrato, respectivamente (Branco, *et al.*, 2007).

Tabela 3.4 – Classificação e descrição dos tipos de arrancamento por *pull-off*.

Tipologia	Rotura	Descrição
A	Adesiva	Rotura pela interface entre o betão projectado e o suporte
B	Coesiva no reforço	Rotura pelo betão de reforço
C	Coesiva no substrato	Rotura pelo betão de substrato

b) PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE ENSAIO E COLAGEM

Após o tratamento da superfície de cada um dos painéis mencionados no ponto anterior foi efectuada a projecção do betão como foi indicado no capítulo 3.4. Para a execução do ensaio de arrancamento, passados 73 dias da projecção, foi necessário, antes de tudo mais, a realização de três carotagens parciais em cada painel a ensaiar. O corte foi efectuada com uma caroteadora de 50 mm de diâmetro e de forma a atingir-se uma profundidade de corte no substrato de aproximadamente 2 cm (Figura 3.11a).

Seguidamente, regularizou-se a área de ensaio com uma rebarbadora de disco, de forma a garantir a horizontalidade das pastilhas. Para otimizar a aderência da cola ao betão, escovou-se a zona de ensaio com uma escova de arame do que se seguiu uma lavagem com água.

Após a secagem da superfície tratada procedeu-se à colagem das pastilhas metálicas (Figura 3.11b e c). Para tal foi utilizado um adesivo epóxico líquido com a designação comercial CONCREACTIVE® LPL 4000.

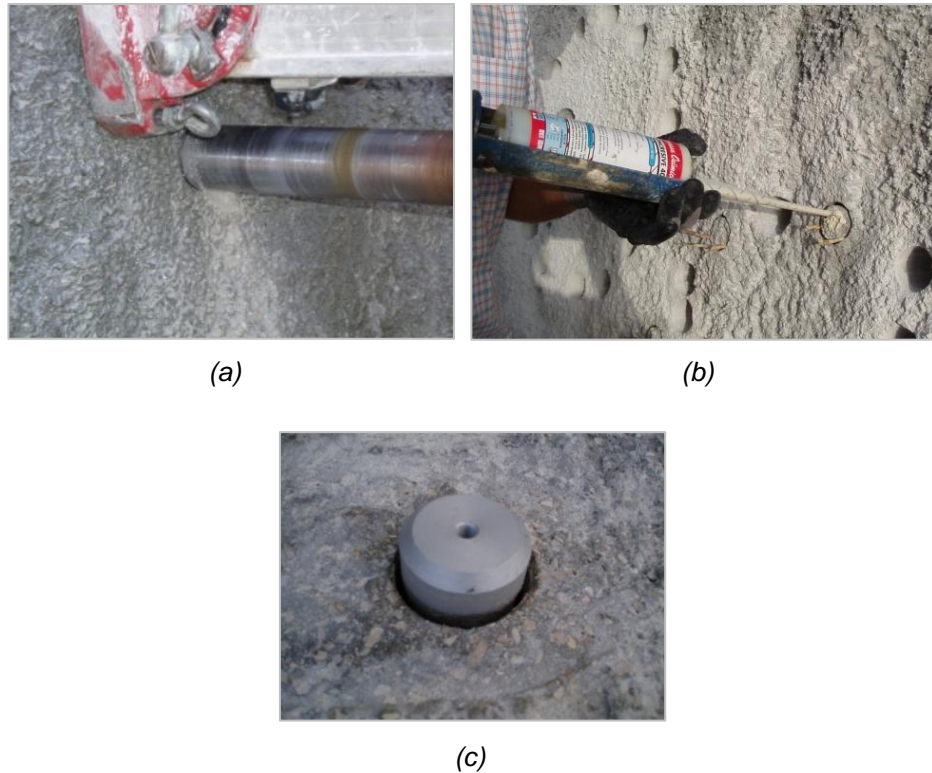


Figura 3.11 – (a) Carotagem da área de ensaio, (b) aplicação da resina epóxida e (c) colagem de uma pastilha metálica.

3.4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para determinar a resistência à compressão do betão projectado executou-se dois tipos de estudo em paralelo: um sobre carotes extraídas dos painéis de ensaio e outro sobre cubos cujo enchimento foi realizado por projecção ou vazamento.

As carotes foram extraídas com uma caroteadora de 45 mm seguindo a norma NP EN 12504-1, como está apresentado na Figura 3.12. Foram realizadas três séries de amostragem aos 7, 15 e 28 dias de idade do betão projectado, cada uma com 10 carotes. Durante o processo de carotagem dos painéis horizontais, principalmente nas idades mais jovens do betão, algumas carotes partiam-se, muitas das vezes pela superfície de ligação entre o betão projectado e o substrato, pelo que foi necessário realizar um maior número de cortes de forma a obter as 10 carotes.



Figura 3.12 – Extração de carotes.

Seguidamente à extração de cada série de amostras, procedeu-se ao corte das mesmas, com uma serra de disco, para que estas ficassem com uma altura igual ao seu diâmetro (Figura 3.13). Mais uma vez teve-se alguma dificuldade no corte das carotes de idade mais jovem pois o betão ainda não tinha atingido uma coesão óptima. Outra dificuldade observada no corte das carotes foi o facto de ser difícil garantir a ortogonalidade entre os topos e o eixo dos provetes devido a limitações da máquina. É de notar também que, devido à espessura do disco de corte, as alturas dos provetes de ensaio não ficaram exactamente iguais para toda a série.



Figura 3.13 – Corte das carotes com serra de disco.

Segundo a norma NP EN 12390-3, as faces dos provetes que irão estar em contacto com os pratos da máquina de compressão devem ser regularizadas, de forma a se obter uma superfície plana, pelo que geralmente se aplica um método de regularização, geralmente o desgaste. No caso das carotes em estudo, não foi possível regularizar com desgaste devido às dimensões dos provetes não serem compatíveis com a máquina de rectificação de superfícies disponível, pelo que não foi realizado qualquer tratamento das superfícies para além do corte das mesmas.

Como foi indicado anteriormente, foram também realizados cubos com dimensões de $15 \times 15 \text{ cm}^2$, dois deles vazados e outros três projectados, os quais foram ensaiados aos 28 dias. O enchimento dos cubos foi realizado segundo a norma NP EN 12390-2, à excepção dos que foram projectados. No caso dos cubos projectados, embora não exista nenhuma norma que determine esta metodologia, considerou-se que a realização destes provetes seria mais uma forma de obter informação relativa à resistência de compressão. Os cubos foram curados numa câmara húmida à temperatura de 20° C , durante 23 dias, tendo a cura sido realizada em obra nos primeiros 5 dias.

O ensaio de resistência à compressão propriamente dito, consiste numa aplicação gradual de carga, a uma velocidade constante, sob toda a superfície de contacto do provete, até à rotura deste provete, registando-se a respectiva carga última. Todos os ensaios foram efectuados tendo em conta a NP EN 12390-3.

No caso dos provetes obtidos das carotes, estes foram ensaiados numa máquina de compressão de argamassas. Como as dimensões dos provetes eram superiores à dos pratos da máquina e à distância entre eles, foi retirada a peça do prato superior e colocaram-se chapas de metal para servir de pratos como se mostra na Figura 3.14. Desta forma a carga ficou distribuída por toda a superfície de contacto do provete. É de notar que este arranjo poderá afectar em parte os resultados pelo facto de as peças estarem soltas e sofrerem ligeiros ajustes durante o ensaio.



Figura 3.14 – Ensaio de resistência à compressão dos provetes cilíndricos.

Os resultados dos ensaios realizados aos 7 dias de idade foram determinados por observação da força máxima de compressão no *display* da máquina de ensaios e confirmados através da leitura do gráfico força/tempo, obtido através da ligação de um computador e um *datalogger* à máquina de compressão. Os resultados dos ensaios efectuados aos 15 dias de idade do betão já só foram determinados através da leitura do gráfico força/tempo obtido pela ligação de um computador à máquina, pois o *display* da máquina de ensaios estava avariado. Os resultados dos ensaios realizados aos 28 dias de idade do betão foram obtidos apenas pela observação da força máxima de compressão no *display* da máquina que, entretanto tinha sido substituído.

Não foi ligado o computador à máquina de ensaios pois o *display* novo não tinha uma entrada compatível com os cabos do computador. Para além deste facto, só após a realização dos ensaios, é que se teve conhecimento que a máquina não tinha sido calibrada após a substituição do *display*, o que possivelmente poderá ter tido influência nos resultados apresentados.

A tensão de rotura à compressão dos provetes cilíndricos, f_c , foi calculada segundo a Equação (3.7).

$$\frac{F}{A} = f_c \quad (3.7)$$

Com:

- F – Força de rotura à compressão (N);
- d – Diâmetro médio (mm).

Para a determinação da conformidade da resistência de compressão das carotes teve-se presente a NP EN 14487-1, que determina: “se o valor de uma ou duas carotes é superior a $\pm 20\%$ da média, os resultados não devem ser considerados, salvo se a média é realizada no mínimo com 3 carotes”. Desta forma, calculou-se a média dos resultados obtidos para a tensão de rotura de cada uma das séries, determinou-se o valor correspondente a 20 % dessa média e achou-se o intervalo de valores aceitáveis para os provetes (Equação(3.8)).

(3.8)

Após analisar-se em cada série se existia algum valor fora deste intervalo, calculou-se, quando necessário, a nova média para a tensão de rotura e determinou-se o respectivo desvio padrão.

Para avaliar a conformidade do betão quanto à resistência de compressão aos 28 dias, para um número de resultados entre 3 e 14, tem de se verificar dois critérios:

1º Critério: (3.9)

2º Critério: (3.10)

Com:

- mínima resistência característica *in situ* à compressão;
- resultado individual da tensão de rotura para cada ensaio;
- média dos “n” resultados.

No caso dos cubos, o ensaio foi realizado numa máquina de ensaios à compressão para cubos, com uma velocidade de carga entre 0.2 a 1.0 MPa/s (Coutinho, *et al.*, 1994) (Figura 3.15). Como indica a norma, teve-se em atenção a recomendação de não colocar as faces de betonagem em contacto com os pratos da máquina.



Figura 3.15 – Ensaio de resistência à compressão dos cubos.

A tensão de rotura à compressão dos cubos, f_c , foi calculada segundo a Equação (3.11).

$$- \quad (3.11)$$

Com:

- F – Força de rotura à compressão (N);
- A – Área de aplicação da carga (mm^2).

Para a determinação da conformidade da resistência à compressão dos cubos teve-se presente a NP EN 206-1, que determina que: “quando de uma amostra são fabricados dois ou mais provetes e o intervalo de variação dos resultados individuais do ensaio é maior do que 15% da média, estes resultados devem ser desprezados”. Desta forma, calculou-se a média dos resultados obtidos para a tensão de rotura, determinou-se o valor correspondente a 15% dessa média e achou-se o intervalo de valores aceitáveis para os provetes (Equação (3.12)).

$$(3.12)$$

Após analisar-se em cada série de ensaios se existia algum valor fora deste intervalo, calculou-se, quando necessário, a nova média para a tensão de rotura e determinou-se o respectivo desvio padrão.

Para avaliar a conformidade do betão quanto à resistência de compressão aos 28 dias, para um número de resultados $n=3$, tem de se verificar dois critérios:

Para a realização de cada série de medições partiram-se os provetes com recurso a um martelo e escopro (Figura 3.18) e aspergiram-se com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0.1%.



Figura 3.17 – Aspecto exterior e interior da câmara de carbonatação acelerada.



Figura 3.18 – Fractura dos provetes com martelo e escopro.

Com a ajuda de um paquímetro digital, mediu-se a profundidade da frente de carbonatação a qual é identificada pela linha que separa a parte não carbonatada do betão que, devido à fenolftaleína, fica da cor rosa-carmim, na parte carbonatada. A medição dos provetes foi realizada segundo o método recomendado pela LNEC E 391, que identifica duas hipóteses para o desenvolvimento da frente de carbonatação: a frente de carbonatação desenvolve-se paralelamente à superfície ou a frente de carbonatação é irregular. No caso da primeira hipótese, o resultado final corresponde à distância entre a superfície e a linha de frente de carbonatação (d_k) (Figura 3.19a), enquanto que, na segunda hipótese, deve-se medir o valor médio (d_k) e o valor máximo ($d_{k,max}$) da frente de carbonatação Figura 3.19b.

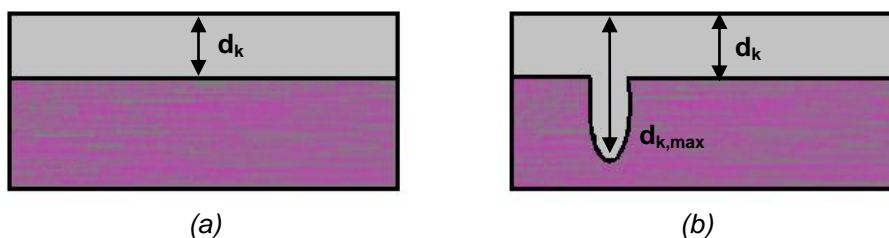


Figura 3.19 – Tipos de desenvolvimento da frente de carbonatação: regular (a) e irregular (b).

Por fim, calculou-se a resistência à carbonatação, R_{C65} , através da Equação (3.15) (LNEC E 465, 2007).

$$\text{-----} \quad (3.15)$$

Com:

- concentração de dióxido de carbono na câmara de carbonatação [kg/m^3];
- tempo de exposição [anos];
- profundidade de carbonatação [m].

3.4.4. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Para determinar o coeficiente de difusão dos cloretos no betão, seguiu-se a especificação LNEC E 463, a qual se baseia na aplicação de um potencial eléctrico aos topos do provete para fazer com que os iões cloreto sejam transportados através do betão (migração).

Os provetes de ensaio foram obtidos do corte de carotes, com 100 mm de diâmetro, extraídas dos painéis de ensaio conforme o indicado na norma.

Este ensaio é executado dentro da câmara seca do Laboratório de Engenharia Civil do IST que está aproximadamente a $20 \pm 5^\circ\text{C}$, de forma a garantir que se cumpram as condições de temperatura. O método de ensaio inicia-se com a introdução dos provetes de ensaio numa câmara de vácuo (Figura 3.20a) e, ao fim de 3 horas, à pressão de 10-50 mbar, enche-se a câmara com uma solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Decorrida uma hora, deixa-se entrar o ar na câmara, ficando os provetes dentro dela aproximadamente 22 h.



Figura 3.20 – Etapas da metodologia de ensaio à penetração de cloretos por migração: (a) câmara de vácuo, (b) montagem das mangas e (c) introdução das soluções anódica e catódica.

Retiram-se de seguida os provetes das câmaras, colocam-se dentro das mangas de borracha (Figura 3.20b) que são, por sua vez, introduzidas no tanque de ensaio. Enche-se as mangas com uma solução anódica de 300 ml, composta por NaOH e o tanque com uma solução catódica de 10% NaCl (Figura 3.20c). Por fim, imerge-se o ânodo (rede) dentro de cada manga, tendo o cuidado de o deixar em contacto com a superfície do provete, e liga-se o cátodo e o ânodo do tanque ao pólo negativo e positivo da fonte de alimentação.



Figura 3.21 – Montagem final dos tanques de ensaio de migração de cloretos.

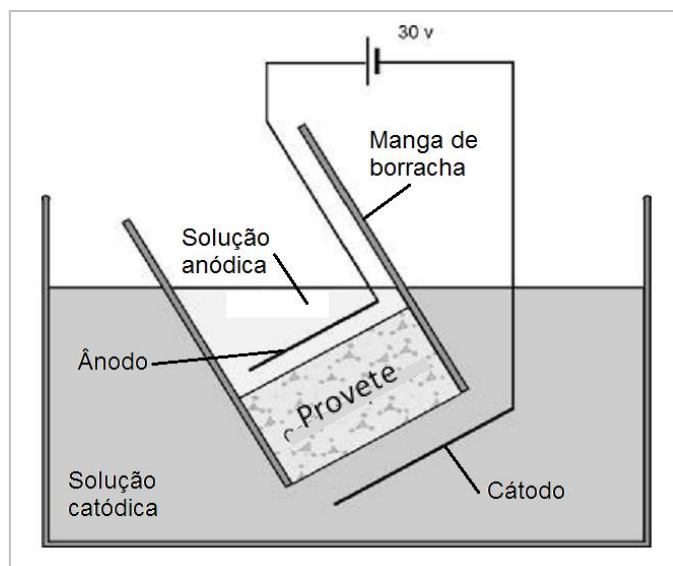


Figura 3.22 – Representação esquemática para o ensaio de migração (Stanish, *et al.*, 1997).

Tendo terminada a montagem do dispositivo (Figura 3.21 e Figura 3.22), liga-se a alimentação com uma tensão de 30 V, regista-se a intensidade de corrente que atravessa inicialmente cada provete e ajusta-se a voltagem consoante o estabelecido na especificação. É também determinado consoante o valor da intensidade de corrente inicial, o tempo de duração do ensaio.

Realiza-se duas leituras da temperatura dentro de cada manga (solução anódica), uma no início do ensaio e outra no fim, antes de se retirar os provetes do tanque. Terminado o tempo de ensaio estipulado, retira-se os provetes do tanque, remove-se as carotes das mangas e partem-se as carotes diametralmente com a ajuda de um martelo e escopro.

Para determinar a espessura de penetração de cloretos escolhe-se a metade do provete que apresente uma superfície mais perpendicular e borrija-se a mesma com uma solução de nitrato de prata (Figura 3.23). Após 15 minutos, com um paquímetro, mede-se a espessura identificada pelo precipitado branco do nitrato de prata.



Figura 3.23 – Profundidade de penetração de cloretos de um provete tipo.

Com os dados recolhidos calcula-se o coeficiente de difusão em regime não estacionário a partir da Equação simplificada (3.16) (LNEC E 463, 2004):

$$\frac{Q}{A} = \frac{V}{A} \frac{dC}{dt} = \frac{V}{A} \frac{dC}{dt} \quad (3.16)$$

Com:

- Coeficiente de difusão em regime não estacionário [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$];
- valor absoluto da voltagem aplicada [V];
- valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica [°C];
- espessura do provete [mm];
- valor médio da profundidade de penetração [mm];
- duração do ensaio [h];

3.4.5. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE POR ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para determinar a absorção do betão endurecido à pressão atmosférica seguiu-se a especificação LNEC E 394, cujo método proposto tem por base o cálculo da diferença entre a massa do provete de betão endurecido imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco.

Segundo a LNEC E 394, introduziram-se os provetes, que se encontravam numa câmara seca a 20°C, num recipiente com o cuidado de não estarem em contacto uns com os outros, e foi-se adicionando água, de hora a hora, de modo a que os provetes fossem submersos 1/3 da sua altura, 2/3 da sua altura e na totalidade da sua altura. Seguidamente, realizaram-se pesagens dos provetes saturados, intervaladas no mínimo de 24h, até que o valor da massa fosse constante. Entende-se que se atinge massa constante quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas for inferior a 0.1% da média das duas leituras.



(a)



(b)

Figura 3.24 – Equipamentos utilizados durante o ensaio de porosidade: (a) balança hidrostática e (b) estufa a 110°C.

Quando se atingiu a massa constante dos provetes saturados, determinou-se a massa hidrostática de cada um deles numa balança hidrostática (Figura 3.24a) e colocaram-se os provetes a secar numa estufa a 110°C (Figura 3.24b) até que a massa voltasse a ser constante.

A absorção de água por imersão (A) é calculada, em percentagem, pela seguinte expressão:

$$\text{-----} \quad (3.17)$$

Com:

m_1 – massa do provete saturado no ar (g);

m_2 – massa hidrostática do provete saturado (g);

m_3 – massa do provete seco (g).

4. RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. ADERÊNCIA DO BETÃO PROJECTADO AO SUBSTRATO

Os resultados obtidos para a resistência de arrancamento nos quatro casos em estudo encontram-se sintetizados na Tabela 4.1. É de notar que os dados utilizados correspondem apenas a roturas válidas, isto é, a roturas do tipo A, B ou C, estando a rotura pela superfície de colagem associada a um resultado nulo.

Tabela 4.1 – Caracterização geral dos resultados obtidos no ensaio de *pull-off* em MPa.

	Picagem		Lavagem	
	450 H	450 V	450 V	350 H
Média	1,12	0,80	1,25	0,25
Desvio Padrão	-	0,06	-	-
Valor mínimo	0,20	0,76	1,22	0,10
Valor máximo	2,04	0,87	1,27	0,41

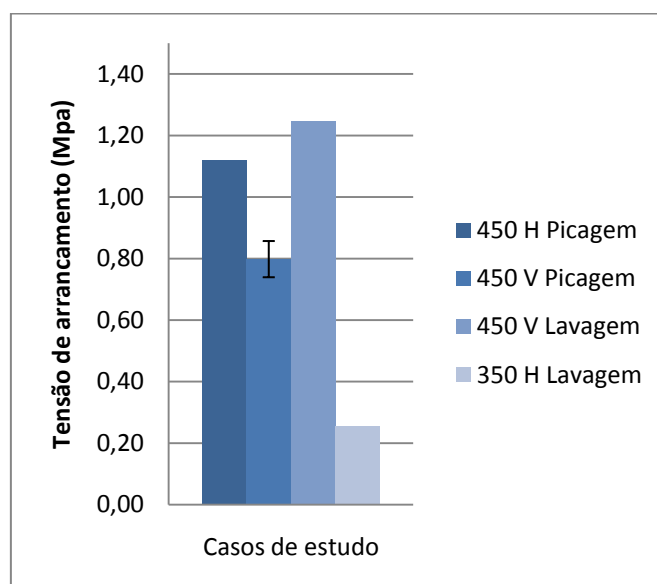


Figura 4.1 – Resistência de *pull-off* dos 4 casos de estudo.

Quanto à tipologia de rotura dos ensaios todas elas foram do tipo B (Tabela 4.2), ou seja, pelo betão projectado, à excepção de alguns casos onde a rotura se deu pela cola, e que, por conseguinte, não foi considerada para o estudo. Foi ainda possível observar diferentes aspectos da superfície de rotura (Figura 4.2), os quais se dividiram em dois grupos: os que apresenta-

vam uma boa mistura dos constituintes do betão projectado e os que apresentavam indícios de insuficiente ligação entre os agregados.

Tabela 4.2 – Classificação do tipo de rotura dos provetes de pull-off.

Painel	Provetes	1	2	3
450 Horizontal Picagem	Rotura	B coesiva no reforço	Cola	B coesiva no reforço
	Aspecto da Superfície	Mistura insuficiente	-	Boa mistura
	T (MPa)	0,20	(0,76)	2,04
450 Vertical Picagem	Rotura	B	B	B
	Aspecto da Superfície	Boa Mistura	Boa Mistura	Boa Mistura
	T (MPa)	0,76	0,87	0,76
450 Vertical Lavagem	Rotura	Cola	B	B
	Aspecto da Superfície	-	Boa Mistura	Boa Mistura
	T (MPa)	(1,07)	1,27	1,22
350 Horizontal Lavagem	Rotura	B	B	Cola
	Aspecto da Superfície	Boa Mistura	Mistura insuficiente	-
	T (MPa)	0,41	0,10	(0,46)



Figura 4.2 – (a) Superfície de rotura com uma boa mistura dos constituintes do betão projectado e (b) superfície de rotura com indícios de ligação insuficiente entre os agregados.

Os resultados apresentados merecem as seguintes considerações:

- Como é visível na Tabela 4.2, os resultados obtidos para a tensão média de arrancamento da série de ensaio 450H-Picagem não têm significado estatístico pois só se obtiveram dois resultados válidos e que apresentam grande diferença entre si. Neste caso, numa avaliação individual aos provetes de ensaio, verifica-se que o valor máximo

de tensão de arrancamento é de 2.04 MPa. Comparando este valor com os apresentados na Tabela 2.2 para a picagem, verifica-se que é um pouco superior, estando mais próximo dos valores apontados para o tratamento por jacto de areia. De qualquer forma, ter-se-ia de realizar mais ensaios nesta série para obter-se resultados mais conclusivos.

- Verifica-se que existe uma grande diferença da resistência de arrancamento entre composições diferentes, nomeadamente a de 350 kg/m³ e a de 450 kg/m³ de cimento, correspondendo à última um valor da resistência ao arrancamento maior, como era de esperar.
- Comparando as séries 450 H e 450 V Picagem, pode observar-se que a resistência de arrancamento do painel que se encontra na vertical é menor que a do painel cuja projecção foi efectuada de baixo para cima. O facto de a projecção dos painéis horizontais ter sido efectuada com um maior número de camadas para se atingir a mesma espessura dos painéis verticais, pode ter aumentado a compactação do betão. De qualquer forma, esta consideração é meramente especulativa uma vez que o ensaio 450 H Picagem foi inconclusivo.
- Comparando as séries 450 V Picagem e 450 V Lavagem, observa-se que os resultados de tensão de aderência são superiores para o tratamento de superfície por lavagem a jacto de água. Esta relação está de acordo com o estudo apresentado na Tabela 2.2, embora os resultados, em termo absolutos, sejam ligeiramente inferiores.
- Todas as séries, à excepção da 350 H Lavagem, apresentam valores superiores ao valor mínimo referido no ponto 2.5.1 (0.7 MPa). Os resultados obtidos na série 350 H Lavagem podem ter sido afectados pelo local de ensaio dos provetes ou pelo facto da mistura da água com o material seco não ter sido a necessária para hidratar o cimento, para além do que só se obtiveram 2 resultados válidos.
- A existência de vazios e a mistura insuficiente de água na boca de projecção influenciam claramente os ensaios de arrancamento. Foi observado, nos ensaios das séries 450 H e 350 H, uma rotura aparentemente devida à fraca mistura da água com os restantes elementos do betão ou à deficiência de cimento. Estas anomalias poderão ter origem nos problemas ocorridos durante a projecção e apresentados no subcapítulo 3.2.
- O betão de reparação, isto é, o betão projectado, é o elemento condicionante, uma vez que todas as roturas se deram nesta camada, estando assim a resistência de arrancamento associada à resistência à tracção do betão projectado. Isto significa que a preparação do substrato foi, em qualquer dos casos, suficiente para não condicionar a rotura.

4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de compressão das carotes extraídas foram realizados para séries de 7 a 10 provetes, estando cada série identificada na Tabela 4.3.


De início, para as séries obtidas em idades mais jovens, foram caroteadas 10 amostras de cada painel de ensaio mas, durante o corte e uma vez que o betão ainda não apresentava uma coesão óptima, alguns provetes ficaram inaptos para a realização do ensaio. Tendo este aspecto em atenção, nas extracções seguintes de carotes, já se realizaram 10 a 11 carotes, de forma a garantir que depois do corte se obteria um maior número de provetes aptos a serem ensaiados.

Tabela 4.3 – Identificação das séries de ensaio das carotes à compressão.

Série	Teor de cimento (kg/m ³)	Direcção do painel	Número de provetes ensaiados	Idade (dias)
A	350	V	9	7
B		H	7	
C	450	V	7	
D		H	10	
E	350	V	9	15
G		H	8	
F	450	V	10	
H		H	10	
I	350	V	10	28
K		H	10	
J	450	V	9	
L		H	9	

Na análise dos dados obtidos durante os ensaios de compressão, foi também tida em conta uma observação visual (qualitativa) do estado das amostras antes do seu ensaio. As anomalias detectadas são de duas naturezas: provocadas pelo corte e manuseamento dos provetes ou intrínsecas ao próprio material. O efeito destas anomalias nos resultados é preponderante e deve ser tido em conta. Na Tabela 4.4 apresentam-se as anomalias tipo encontradas, estando o registo das observações dos provetes, caso se apliquem, efectuado no Anexo E juntamente com os dados obtidos dos ensaios.

Tabela 4.4 – Identificação das anomalias tipo dos provetes de ensaio.

Anomalia	Descrição	Foto/Esquema
Vazio lateral	Vazio na superfície lateral do provete, de forma linear e com uma direcção tendencialmente horizontal	
Superfície deteriorada	Perda parcial de material na superfície, tornando-a irregular	
Superfície irregular com vazios	Perda parcial de material na superfície e porosidade elevada	
Superfície não plana	O plano das faces do cilindro não está ortogonal ao eixo.	

Na determinação da tensão de rotura à compressão de cada série houve alguns ensaios que foram desprezados logo à partida pois os resultados que deles se retiravam não faziam sentido. Nestes casos, uma análise comparativa das massas dos provetes desprezados com as dos restantes provetes da série indicava que tinham uma massa muito inferior à média da série.

Apresenta-se na Tabela 4.5 e na Figura 4.3 os valores finais para a tensão média de rotura à compressão, por painel e para as idades de 7, 15 e 28 dias. Os resultados foram arredondados aos 0.5 MPa consoante o prescrito na norma NP EN 12504, e a tensão média foi determinada tendo em conta os provetes que verificavam a condição da Equação (3.8).

Tabela 4.5 – Resultados da resistência à compressão de cada painel em MPa.

Painel	Idade (dias)	Média final	Desvio Padrão (δ)	Valor mínimo	Valor máximo
		(aproximação aos 0,5 MPa)			
350 V	7	23,5	3,0	20,52	28,70
	15	24,0	3,0	19,68	26,92
	28	23,5	3,0	19,08	27,78
350 H	7	21,0	2,0	18,33	23,21
	15	26,0	5,0	20,46	33,03
	28	26,5	2,5	23,26	30,16
450 V	7	23,5	6,0	16,98	32,25
	15	26,5	3,0	23,13	30,05
	28	25,0	4,0	18,09	30,89
450 H	7	26,0	5,0	19,84	32,98
	15	29,0	4,0	24,24	34,50
	28	30,0	3,0	25,26	34,51

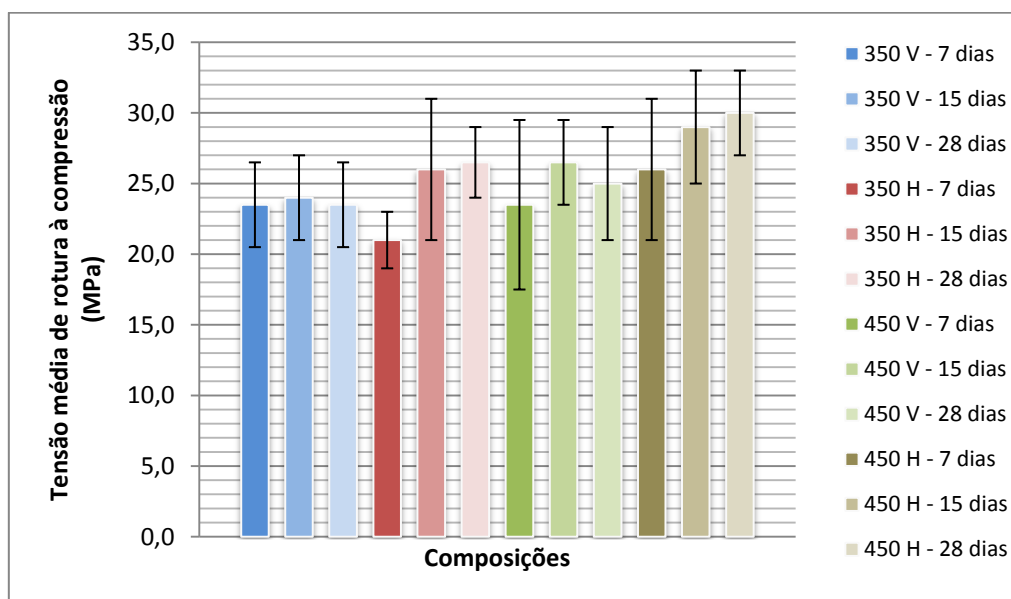


Figura 4.3 – Tensão média de rotura à compressão dos ensaios realizados afectada do respectivo desvio padrão.

É de notar que os resultados válidos correspondiam todos a roturas como a da Figura 4.4, conforme indica a norma NP EN 12390-3.



Figura 4.4 – Rotura tipo dos provetes de ensaio.

Os gráficos resultantes dos ensaios realizados são do tipo dos que se apresentam na Figura 4.5 para a série A. A variação ao longo do eixo das abcissas provém do tempo que decorria desde que se iniciava o programa computacional até que se iniciava/terminava o ensaio na máquina. A amplitude da curva de pico é que indica a velocidade de ensaio e, por observação da Figura 4.5, verifica-se que todos os provetes possuem curvas com velocidades semelhantes. É de notar que a curva A9 corresponde a um dos ensaios que foram desprezados logo à partida pois e, como se pode observar, a curva é irregular.

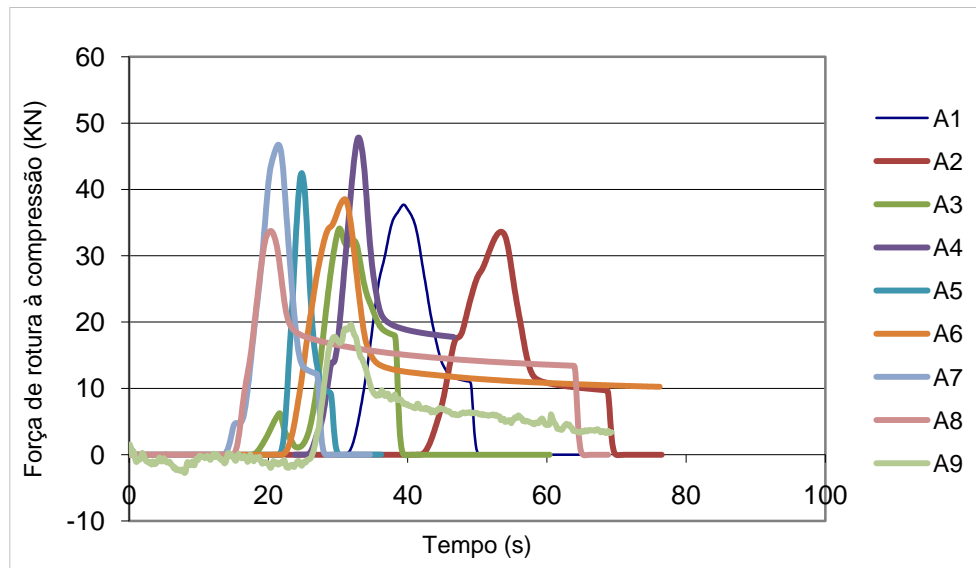


Figura 4.5 – Gráficos dos ensaios de compressão da série A, obtidos por um programa computacional.

Na Figura 4.6 apresenta-se uma análise da taxa de crescimento da resistência à compressão de cada um dos painéis de ensaio.

Os valores da tensão média de rotura obtidos aos 28 dias de idade para os painéis 350 V e 450 V (Figura 4.6b e d) são inferiores aos obtidos no ensaio anterior, isto é, apresentam uma diminuição da resistência, enquanto que no caso dos painéis 350 H e 450 H (Figura 4.6a e c) a tensão de rotura aumenta, ainda que ligeiramente. Este facto não era de todo o esperado, pelo que se pode supor que este acontecimento tenha tido origem no facto de a máquina não estar calibrada, como referido anteriormente.

Para se ter uma ideia dos valores que possivelmente se obteriam aos 28 dias considerando a tendência de crescimento da resistência dos ensaios realizados aos 7 e 15 dias, realizou-se uma regressão logarítmica com os dois primeiros ensaios. A escolha da curva de tendência baseou-se no facto de em estudos anteriores ser a que melhor descreve o aumento de resistência ao longo do tempo.

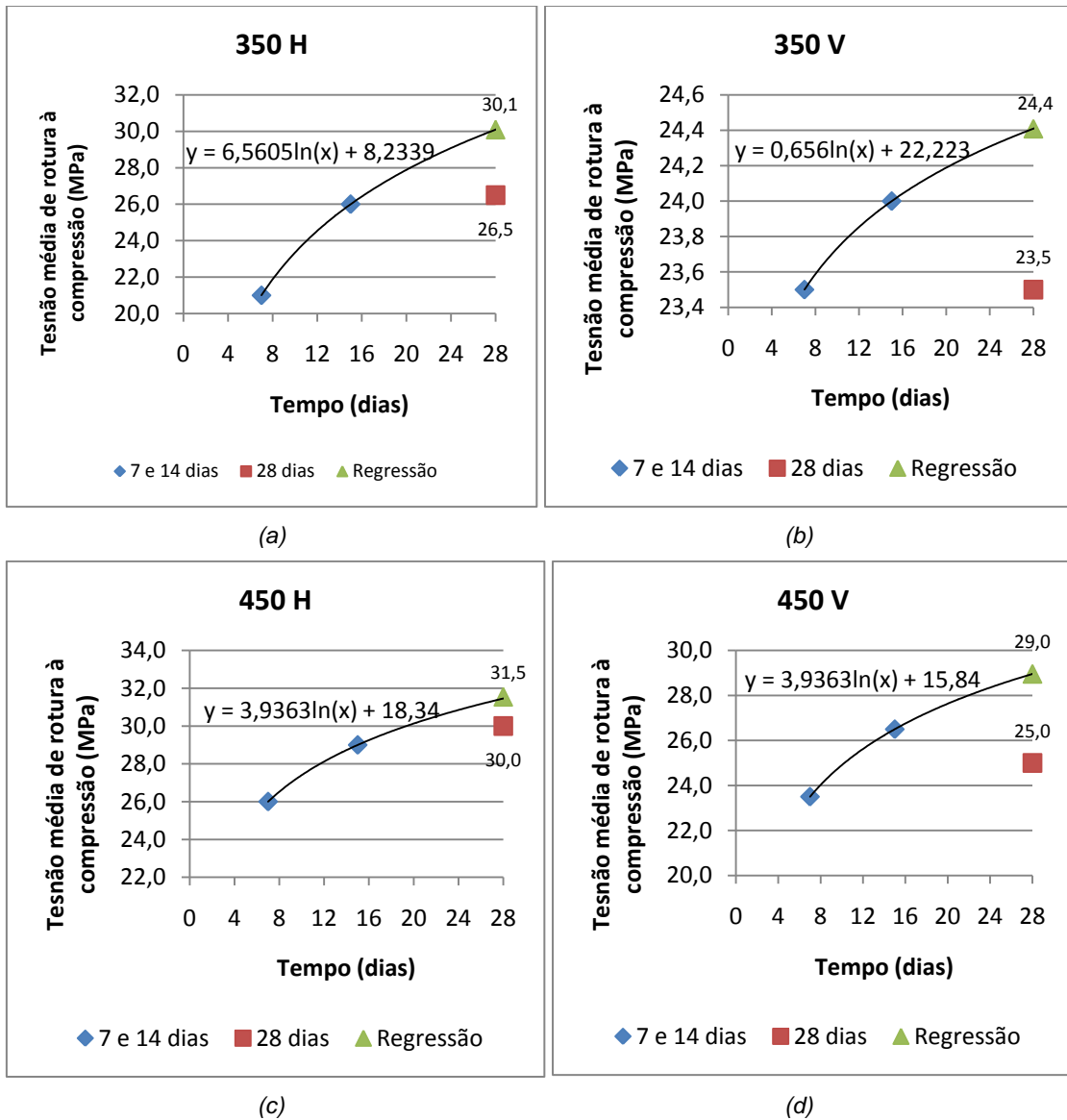


Figura 4.6 – Taxa de crescimento da resistência média à compressão para cada painel.

Para o ensaio das séries aos 28 dias realizou-se a verificação de conformidade do betão, consoante o descrito no subcapítulo 3.4.2, e que se apresenta na Tabela 4.6. É de notar que a tensão média característica *in situ* correspondente a betões da classe C30/37 é de 31 MPa (subcapítulo 2.5.2).

Tabela 4.6 – Verificação de conformidade dos painéis de ensaio.

Série	1º Critério		2º Critério	
	$f_{cm} > f_{ck, is} + 4$		$f_{min} > f_{ck, is} - 4$	
350 V	23,5	35,0	19,08	27,0
350 H	26,5		23,26	
450 V	25,2		18,09	
450 H	30,0		25,26	

Por observação da Tabela 4.6, verifica-se que nenhuma das séries é conforme pois não se cumprem os critérios de conformidade.

No caso de se considerarem os valores obtidos para a tensão média de rotura por regressão (Tabela 4.7), continua-se a não verificar os critérios de conformidade, o que indica que possivelmente existiram outros factores que também afectaram a resistência de compressão, nomeadamente ligados ao cálculo das composições do betão ou à projecção.

Tabela 4.7 – Verificação de conformidade para os valores obtidos por regressão.

Série	1º Critério	
	$f_{c,med} > f_{ck,is}+4$	
350 V	24,4	35
350 H	30,1	
450 V	29,0	
450 H	31,5	

Na Tabela 4.8, apresenta-se os resultados para a tensão média resistente dos cubos com 450 kg/m^3 de cimento, assim como a análise de conformidade para a classe C30/37, consoante o descrito no subcapítulo 3.4.2.

Tabela 4.8 – Tensão média de rotura dos ensaios realizados sobre cubos e respectiva análise de conformidade.

Teor de cimento e preenchimento	1º Critério		2º Critério	
	Tensão média aproximada aos 0,5 MPa	$f_{ck}+4$	Valor mínimo	$f_{ck}-4$
450 projectado	30,5	41	26,15	33
450 vazado	44,5		43,4	

Observa-se que a conformidade é verificada para os cubos vazados e não é verificada para os cubos que foram projectados. O procedimento de enchimento dos cubos por projecção não está normalizado, serviu o ensaio a estes cubos para se obter uma informação quanto à diferença de valores que estes apresentam em relação a cubos normalizados. É ainda de notar que os cubos projectados apresentavam várias anomalias (Figura 4.7), que decorrem do processo de projecção não permite compactar o betão nos cantos do molde.

O facto dos cubos vazados estarem em conformidade com a classe para que foi projectada a composição 450 exclui a hipótese anteriormente levantada para explicar os valores reduzidos das tensões de rotura das carotes obtidos aos 28 dias (pelo menos das de composição 450). Sendo assim, para além da máquina de ensaios não estar calibrada, o outro factor que pode ter influenciado os resultados de resistência das carotes prende-se com a projecção. De facto, e como foi indicado no subcapítulo 3.2, existiram alguns problemas no decorrer da projecção,

para além de que a mistura da água, ao ser efectuada por um operador durante a projecção, pode não ter sido a correcta.

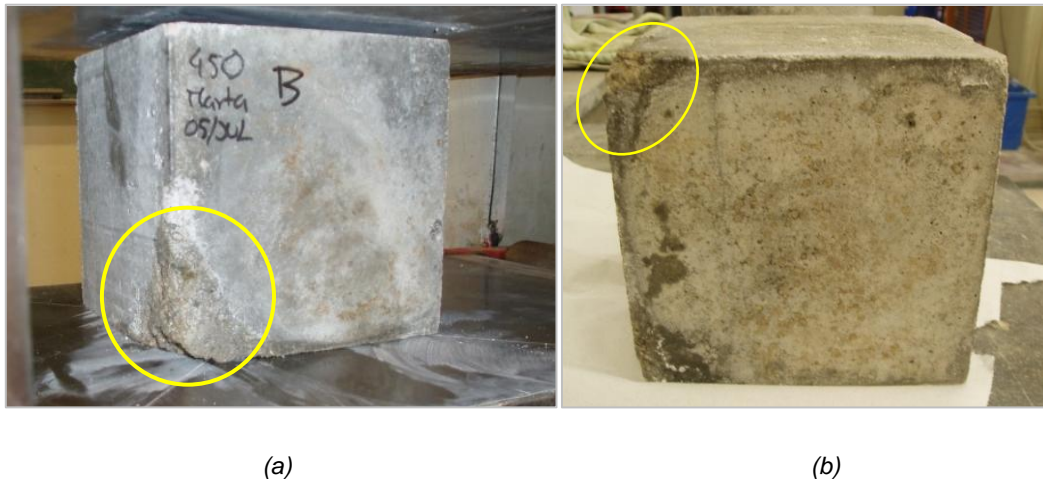


Figura 4.7 – Anomalias dos cubos projectados de 450 kg/m³ de cimento.

Tentou-se determinar a quantidade de água real utilizada na projecção de forma a se tirarem informações quanto à razão a/c aplicada, mas o equipamento utilizado foi um caudalímetro cuja precisão não permitia uma leitura exacta, para além de que existiam várias fugas de água nas juntas entre o equipamento e as manguueiras.

Por fim, pode-se ainda realizar uma análise quando à influência da direcção de projecção na resistência à compressão do betão. Na Figura 4.8 comparam-se os resultados obtidos para as composições 350 e 450.

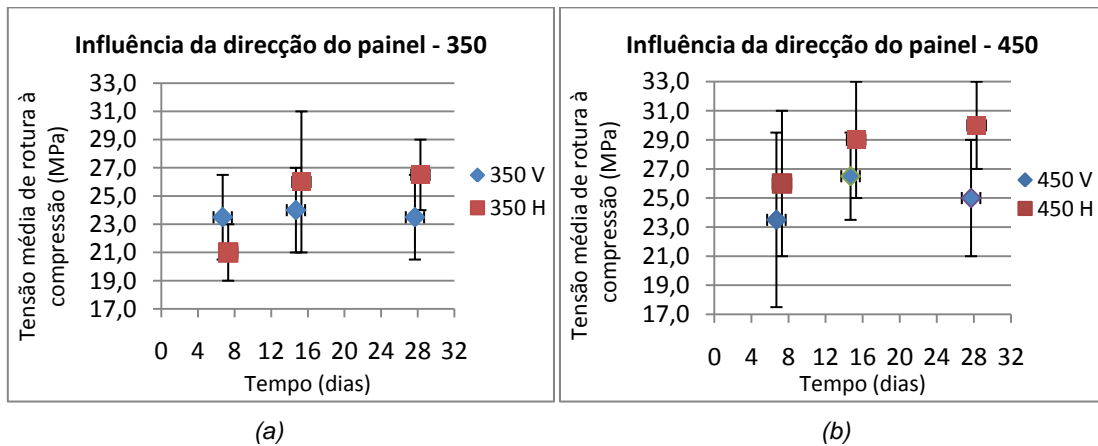


Figura 4.8 – influência da direcção de projecção na resistência à compressão para as composições (a) 350 e (b) 450.

Ao contrário do que se poderia esperar, para ambas as composições, a projecção realizada de baixo para cima (painéis horizontais) originou maiores valores de resistência do que a projecção horizontal (painéis verticais). Tal facto pode-se explicar pela necessidade de se realizar um maior número de camadas na projecção dos painéis horizontais para se atingir a mesma espessura dos painéis verticais, o que poderá levar a uma maior compactação do betão.

4.3. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO ACELERADA

Foram realizadas 3 séries de leituras da profundidade de carbonatação: aos 36, 76 e 93 dias de exposição dos provetes na câmara de carbonatação. Na primeira série ensaiaram-se 5 provetes de cada tipo de amostra, na segunda mediram-se 3 provetes e na última série estudaram-se 2 provetes de cada amostra.

Antes de se colocarem os provetes na câmara de carbonatação e visto que já tinha decorrido cerca de um mês e meio da extracção dos mesmos, averiguou-se se existia alguma carbonatação inicial. Foi observado que em nenhum dos provetes havia indícios de carbonatação do betão (Figura 4.9).



Figura 4.9 – Carbonatação inicial tipo dos provetes de ensaio.

Os resultados obtidos para a espessura da frente de carbonatação nas 3 leituras realizadas foram obtidos segundo o descrito no subcapítulo 3.4.3. É importante referir que o produto de protecção utilizado não serviu exemplarmente a sua função, visto que, principalmente nas duas últimas leituras, os provetes apresentavam carbonatação pelos topos dos provetes, pelo que só foram consideradas medições afastadas no mínimo 5 mm dos topos. Outro facto que dificultou a leitura da espessura do betão carbonatado foi a existência de vazios ou outras anomalias nos provetes, podendo-se observar algumas delas na Figura 4.10.

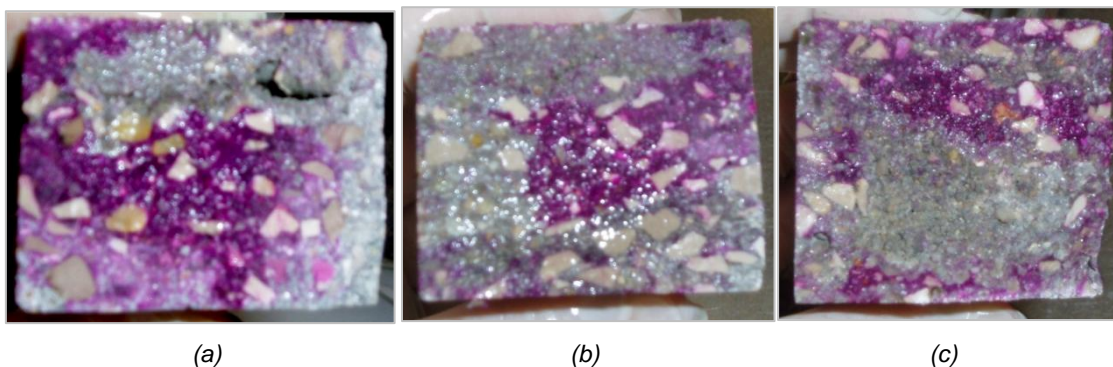


Figura 4.10 – Exemplos de anomalias dos provetes que dificultam a leitura da frente de carbonatação: (a) vazios, (b) carbonatação pelos topos do provete, (c) má mistura dos constituintes do betão.

Considerando todos estes parâmetros obteve-se os resultados apresentado na Tabela 4.9 para a profundidade de carbonatação dos provetes ensaiados nas três datas de inspecção, correspondendo estes à média das espessuras uniformes de cada série.

Tabela 4.9 – Espessura da frente de carbonatação dos provetes colocados na câmara de carbonatação para as 3 leituras efectuadas.

	1ª LEITURA			2ª LEITURA				3ª LEITURA				
	36 dias	$t^{0,5} = 6$ dias		76 dias	$t^{0,5} = 8,7$ dias			93 dias	$t^{0,5} = 9,6$ dias			
	ID	$d_{i\ med}$ (mm)	d_{Max} (mm)	d_{med} (mm)	ID	$d_{i\ med}$ (mm)	d_{Max} (mm)	d_{med} (mm)	ID	$d_{i\ med}$ (mm)	d_{Max} (mm)	d_{med} (mm)
450 H	1.1	4,36	-	4,89	2.1	5,25	-	10,33	3.1	15,33	-	11,67
	1.2	4,74	-		2.2	23,30	36,85		3.2	8,00	8	
	1.3	5,42	-		2.3	15,40	-					
	1.4	Partiu-se										
	1.5	5,03	8,52									
450 V	1.1	4,15	-	4,74	2.1	29,16	-	21,63	3.1	13,33	-	14,17
	1.2	5,36	-		2.2	Recusado			3.2	15,00	-	
	1.3	5,82	-		2.3	14,10	-					
	1.4	3,82	8,43									
	1.5	4,56	43,22									
350 H	1.1	6,72	20,51	8,20	2.1	12,24	-	15,74	3.1	25,00	-	18,50
	1.2	5,64	20,21		2.2	18,94	-		3.2	12,00	-	
	1.3	11,61	-		2.3	16,05	-					
	1.4	6,85	15,09									
	1.5	10,20	-									
350 V	1.1	20,85	-	17,11	2.1	23,37	-	23,69	3.1	Todo Carbonatado		-
	1.2	15,94	-		2.2	20,44	-		3.2	Todo Carbonatado		
	1.3	14,60	-		2.3	27,25	-					
	1.4	Recusado										
	1.5	17,06	-									

De acordo com o modelo de previsão de carbonatação a espessura de carbonatação varia com a raiz quadrada do tempo, pelo que, se apresenta na Figura 4.11 a variação linear da espessura uniforme de carbonatação de cada uma das séries em função da raiz quadrada do tempo de exposição na câmara de carbonatação. Efectuou-se ainda uma regressão linear para cada série de forma a determinar a constante k da Equação (2.1).

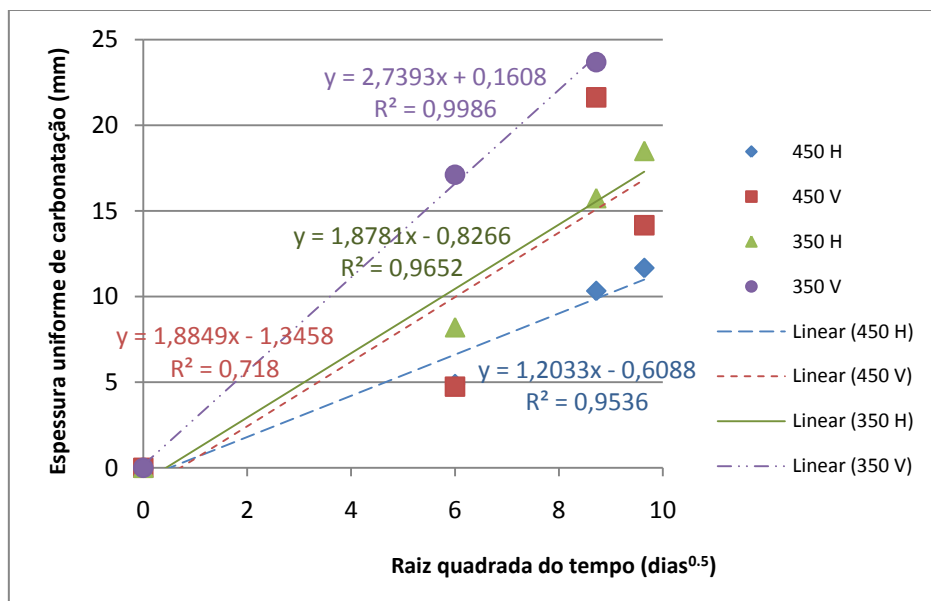


Figura 4.11 – Variação da espessura de carbonatação com a raiz quadrada do tempo.

Tabela 4.10 – Coeficientes K obtidos por regressão linear das curvas de carbonatação década composição e respectivo R².

	k	R ²
450 H	1,2033	0,954
450 V	1,8848	0,718
350 H	1,8781	0,965
350 V	2,7393	0,999

Analisando os resultados apresentados, pode-se tecer as seguintes considerações:

- Para betões com a mesma composição, verifica-se que a espessura de carbonatação é superior para os que pertencem a painéis verticais, isto é, os que foram projectados horizontalmente. Tal facto pode ser explicado pela projecção dos painéis horizontais ter sido efectuada com um maior número de camadas para se atingir a mesma espessura dos painéis verticais e, com isto, ter aumentado a compactação do betão;
- Para betões projectados com a mesma direcção, verifica-se que a espessura de carbonatação é superior nos que possuem menor teor de cimento na sua composição. Este comportamento era o esperado visto que a durabilidade dos betões, nomeadamente a carbonatação, é tanto maior quanto maior o teor em cimento das misturas;
- A velocidade de propagação da carbonatação é menor para o caso 450 H e maior para o caso 350 V, tendo as outras duas composições velocidades intermédias e muito próximas entre si;
- A qualidade da análise, determinada pelo R², indica que, excepto no caso 450 V, a variação da espessura de carbonatação tem um comportamento linear com a raiz qua-

drada do tempo, como apresentado no modelo (R^2 muito próximo de 1). A composição 450 V apresenta, na 3ª leitura, uma diminuição da espessura carbonatada, o que pode ser explicado pelo facto da amostra ensaiada não ser representativa, uma vez que foram medidos só 2 provetes, resultando no R^2 mais baixo.

De modo a referenciar-se os valores obtidos para a espessura de carbonatação, de forma exemplificativa, quanto ao seu significado na durabilidade de uma estrutura, determinou-se através das equações de regressão linear de cada composição, a espessura de carbonatação para 104 anos. Seguidamente calculou-se a resistência à carbonatação, RC65, correspondente a cada um dos casos (Tabela 4.11) e compararam-se os resultados com os valores do Quadro A.1 da LNEC E 465, para a classe de exposição XC4, região húmida, classe de fiabilidade RC2, para estruturas com um período de vida útil de 50 anos e com período de iniciação¹ de 104 anos (Tabela 4.12).

Tabela 4.11 – Estimativa da profundidade de carbonatação e R_{C65} para 104 anos.

104 anos		
Série	X (mm)	R_{C65}
450 H	234	190
450 V	366	78
350 H	365	78
350 V	534	36

Tabela 4.12 – Recobrimento associado ao RC65 de estruturas da classe XC4 em região húmida (LNEC E 465, 2007).

	Recobrimento (mm)	R_{C65}
RC2 $t_q=50$ anos $t_{ic}=104$ anos	15	361
	20	203
	25	130
	30	90
	35	66
	40	51

Como se pode observar, para o exemplo apresentado, a utilização do betão 450 H implicaria a aplicação de uma espessura de recobrimento de 25 mm, os betões 450 v e 350 H uma espessura de recobrimentos de 35 mm, enquanto que o betão 350 V já necessitaria de ser colocado com uma espessura superior a 40 mm.

4.4. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Foram executados 3 provetes de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura para cada composição em estudo. Optou-se por não cortar os provetes que tinham espessuras ligeiramente superiores a 50 mm para não se correr o risco de os danificar durante o corte.

¹ O período de iniciação corresponde ao “tempo necessário para que o dióxido de carbono ou os cloretos penetrem no betão de recobrimento através do sistema de poros abertos ao exterior e criem as condições para a despassivação do aço.” (LNEC E 465, 2007).

Existem provetes com espessuras inferiores aos 50 mm, que provêm de locais dos painéis onde a espessura de projecção era insuficiente para produzir carotes com a espessura necessária.

Realizaram-se duas séries de ensaios, sendo primeiro testados os betões de composição 350 e depois os de 450. A duração de ensaio de ambas as séries foi de 24 horas, ao fim das quais se obteve os resultados apresentados na Tabela 4.13 e na Figura 4.12. Os cálculos auxiliares encontram-se apresentados no Anexo H.

Tabela 4.13 – Resultados da determinação da profundidade (x_d) e do coeficiente de difusão de cloretos (D) para as composições de betão projectado em estudo.

Betão	T_{med} (°C)t	U (V)	L (mm)	x_d (mm)	D ($\times 10^{-12}$) (m^2/s)	D_{med} ($\times 10^{-12}$) (m^2/s)	Desvio Padrão
350 V	17,30	10	42	14,36	16,45	17,4	2,24
	17,30		47	12,86	15,85		
	17,30		44	16,43	19,99		
350 H	17,45	10	51	10,50	13,24	13,1	1,08
	17,40		50	11,21	14,13		
	17,50		54	9,36	11,98		
450 V	17,15	10	54	10,86	14,41	13,6	0,98
	16,95		49	11,14	13,79		
	17,00		50	10,14	12,48		
450 H	17,00	15	49	8,93	7,16	8,1	0,84
	17,05		50	10,14	8,46		
	17,25		49	10,57	8,73		

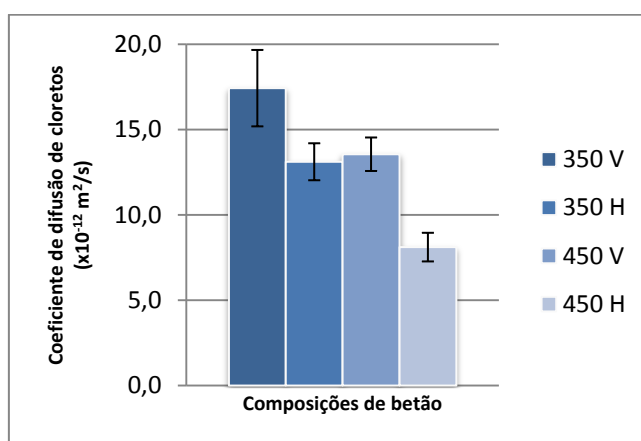


Figura 4.12 – Coeficiente de difusão de cloretos.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que, para a mesma composição do betão, o coeficiente de difusão é superior para os casos em que a projecção é feita na horizontal (painel vertical), ou seja, mais facilmente se deixam atravessar por iões cloreto. Este facto indica que possivelmente os painéis verticais são menos compactos que os horizontais.

Como já foi referido, a projecção dos painéis horizontais necessitou da aplicação de um maior número de camadas para se atingir a mesma espessura dos painéis verticais, pelo que poderá ter havido uma maior compactação dos painéis horizontais.

Para a mesma direcção dos painéis de ensaio, o coeficiente de difusão é superior nas composições 350, o que indica que composições mais pobres em teor de cimento se deixam atravessar mais facilmente pelos iões cloreto, o que está de acordo com o esperado.

Com isto, conclui-se que o betão mais resistente à penetração de cloretos é o 450 H, e o menos resistente é o betão 350 V.

De forma a referenciar-se os valores obtidos para o coeficiente de difusão dos cloretos quanto ao seu significado na durabilidade de uma estrutura, comparou-se os resultados com os valores apresentados no Quadro A.8 da especificação LNEC E 465. Por exemplo, para uma estrutura projectada para um período de vida útil de 50 anos, pertencente à classe de fiabilidade RC2, cujo betão é do tipo CEM I/II e para recobrimentos de 2,0, 2,5 e 3,0 cm, o coeficiente de difusão potencial é de 8.7×10^{-12} , 13.5×10^{-12} e $19.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. É de notar que estes valores são referentes a uma estrutura de betão da classe XS1 (ar transportando sais marinhos mas sem contacto directo com água do mar) localizada a 1 km da linha de costa, classe esta mais exigente que a classe considerada neste estudo (XC4).

Para este exemplo, no caso de utilização dos betões em estudo, obtém-se a correspondência apresentada na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Recobrimentos mínimos associados ao coeficiente de difusão de cloretos dos betões em estudo.

Betão	$D_{\text{med}} (\times 10^{-12})$ (m^2/s)	Recobrimento (cm)
350 V	17,4	3,0
350 H	13,1	2,0
450 V	13,6	2,5
450 H	8,1	2,0

4.5. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE POR ABSORÇÃO DE ÁGUA

Foram ensaiados dois provetes cilíndricos, de 100 mm de diâmetro, por cada tipo de amostra de betão projectado, em vez dos três recomendados pela especificação, pois este ensaio não estava previsto quando se retiraram as carotes dos painéis de ensaio. Achou-se, no entanto, que seria de interesse obter alguma informação quanto à porosidade do betão, mesmo que não se obedecesse ao número de provetes mínimo indicado na especificação. Os provetes foram obtidos do corte de carotes realizadas aos painéis de ensaio e as suas alturas não eram uniformes. Enquanto que o facto das alturas não serem uniformes não traz nenhuma consequên-

cia para os resultados (desde que qualquer ponto no interior do volume do provete esteja afastado menos do que 100 mm da superfície), o tipo de provete (corte) poderá influenciar os valores de ensaio.

Procedendo do modo descrito no ponto 3.4.5, os resultados obtidos para a porosidade dos betões são os que se apresentam na Tabela 4.15. Os dados recolhidos durante os ensaios e os cálculos auxiliares estão descritos no Anexo I.

Tabela 4.15 – Valores em percentagem para a porosidade dos betões em estudo.

ID	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	Absorção (%)	Absorção med (%)	
350 H	1,1	988,4	553,7	934,2	12,5	12,8
	1,2	1101,7	612,5	1037,9	13,0	
350 V	2,1	689,4	390,3	650,1	13,1	12,9
	2,2	791,6	449,0	748,1	12,7	
450 H	3,1	1084,0	616,5	1025,2	12,6	12,9
	3,2	848,1	481,0	799,9	13,1	
450 V	4,1	778,8	447,1	738,9	12,0	12,8
	4,2	759,4	430,0	714,5	13,6	

Os resultados, para qualquer que seja a composição e a direcção do painel de ensaio, foram muito semelhantes. Sendo assim, pode-se concluir que a porosidade do betão não depende da direcção de projecção e que, para estes teores de cimento, não existe nenhuma composição que influencie a porosidade mais do que a outra.

Comparando os resultados com o valor teórico esperado (14 a 17%), verifica-se que todos se encontram ligeiramente abaixo do valor mínimo indicado. Com isto, pode-se concluir que os painéis, nos locais de onde os provetes foram extraídos, apresentam uma boa compactação.

5. CASO DE ESTUDO

Em paralelo ao estudo anteriormente apresentado, foi possível acompanhar uma obra na qual foi empregue o betão projectado. A empreitada de denominação “Reabilitação do Reservatório da Brandoa Média”, tinha como dono de obra o SMAS Oeiras e Amadora e encontrava-se adjudicada à empresa H Tecnic, Lda.

O acompanhamento desta obra permitiu a observação de outras técnicas de reabilitação e reforço de estruturas e, no caso do betão projectado, foi possível observar determinados aspectos que não foram alvo de estudo nos trabalhos experimentais realizados.

Foi no estaleiro desta obra que foram projectados os painéis de ensaio, otimizando-se deste modo os custos associados à sua execução.

5.1. DESCRIÇÃO DO ÂMBITO DA OBRA

Os trabalhos de projecção de betão foram efectuados apenas na reabilitação da laje de topo do reservatório médio, pelo que só se irá focar os trabalhos efectuados neste elemento da estrutura. Foram efectuados diferentes procedimentos para a reparação e reforço das duas faces da laje.

Na face inferior realizaram-se os seguintes trabalhos:

- Diagnóstico e mapeamento das zonas degradadas do betão;
- Picagem com martelo hidráulico das zonas assinaladas;
- Limpeza a jacto de água a alta pressão;
- Reforço das armaduras: colocação de armadura em aço A 400NR com 12 mm de diâmetro (Figura 5.1);



Figura 5.1 – Armadura de reforço da face inferior da laje do reservatório.

- Projecção: betão de classe de resistência C30/37 e de classe de exposição XD1, composto por cimento, agregados finos e grossos, sílica de fumo (Sika Fume®) e fibras de polipropileno. A projecção foi efectuada em duas camadas, ficando com a espessura final de 6 cm, dos quais 3 são de recobrimento (Figuras Figura 5.2 Figura 5.3 Figura 5.4).



(a)



(b)

Figura 5.2 – Início da projecção da face inferior.



Figura 5.3 – Quantidade de desperdício por ricochete.



Figura 5.4 – Pormenor da primeira camada de betão aplicado.

Na face superior realizaram-se os seguintes trabalhos:

- Remoção do revestimento existente;
- Limpeza a jacto de água a alta pressão;
- Tratamento e enchimento de fissuras com resina epóxida (Figura 5.5);
- Reforço com chapas metálicas para punçoamento: colocação de chapas metálicas em aço S275, galvanizadas a quente $\mu=100$, com dimensões de 4000x100x5 mm. A cola-

gem das chapas foi efectuada com a resina epóxida Sikadur® 30, com 2 mm de espessura média. As chapas foram ainda cravadas na laje com ferrolhos de 10 mm em aço A 400NR SD (Figura 5.6);

- Colocação de betonilha em camada de forma com 6.5 cm de espessura média, com pendente de 0.5%.



Figura 5.5 – Enchimento de fissuras com resina epóxida.



(a)



(b)

Figura 5.6 – Reforço da laje superior com chapas metálicas.

5.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

5.2.1. MATERIAIS E PROCEDIMENTO

Os componentes do betão projectado em obra, nomeadamente o cimento e os agregados, foram os mesmos utilizados na realização dos painéis de ensaio, mas a composição da mistura aplicada foi diferente. O betão da obra foi executado com uma composição de 350 kg/m^3 de cimento, cujo traço, em volume, de cimento/bago de arroz/areia grossa/ areia fina, foi 3:6:2:3. Foram também adicionadas fibras de polipropileno e sílica de fumo com as concentrações de 600 g/m^3 e 14 kg/m^3 , respectivamente.

Relativamente ao controlo da qualidade do betão projectado, foram efectuados dois tabuleiros de ensaio com betão projectado, conforme a norma NP EN 14488-1, dos quais se retiram carotes para serem ensaiadas à compressão. Os processos de corte das carotes e os procedimentos seguidos para o ensaio à compressão foram os mesmos utilizados para os provetes ensaiados no âmbito da campanha experimental. Realizaram-se duas séries de ensaios aos 20 e 28 dias de idade do betão.

Para além dos tabuleiros de ensaio, foram também realizados cubos vazados. Os cubos vazados dividem-se em duas séries que se distinguem por uma ter na sua composição fibras de polipropileno e sílica de fumo, e outra só fibras. Os cubos foram ensaiados à compressão aos 28 dias, conforme a NP EN 12390-3.

5.2.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se na Tabela 5.1 os valores finais para a tensão média de rotura à compressão, por painel e para as idades 20 e 28 dias. Os resultados foram obtidos de 10 provetes e encontram-se arredondados aos 0,5 MPa consoante o prescrito na norma NP EN 12504, e a tensão média foi determinada tendo em conta os provetes que verificavam a condição da Equação (3.8). Os cálculos intermédios encontram-se descritos no Anexo F.

Tabela 5.1 - Resultados da resistência à compressão das carotes em MPa

Idade (dias)	Média final	Desvio Padrão (δ)	Valor mínimo	Valor máximo
	(aproximação aos 0,5 MPa)			
20	43,5	5,0	35,1	49,1
28	47,5	3,0	43,7	53,0

Os resultados dos ensaios foram determinados por observação da força máxima de compressão no *display* da máquina de ensaios.

Para o ensaio aos 28 dias, realizou-se a verificação de conformidade do betão, consoante o descrito no subcapítulo 3.4.2, e que se apresenta na Tabela 5.2, tendo-se concluído que o betão é conforme.

Tabela 5.2 – Verificação de conformidade das carotes.

Critérios de Conformidade					
1º Critério			2º Critério		
$f_{ck,is} + 4 < f_{c,med}$			$f_{ck,is} - 4 < f_{c,min}$		
35,0	<	47,5	27,0	<	43,7

Na Tabela 5.3 apresenta-se os resultados para a tensão média resistente dos cubos de fibras e fibras+Sikafume[®], assim como a análise de conformidade para a classe C30/37, consoante o descrito no subcapítulo 3.4.2. No Anexo G explicita-se os cálculos intermédios para a determinação da tensão média de roturas das duas composições.

Tabela 5.3 - Tensão média de rotura dos ensaios realizados sobre cubos do caso de estudo, e respectiva análise de conformidade.

Cubos	1º Critério		2º Critério	
	$f_{c,med} \geq f_{ck}+4$		$f_{c,min} \geq f_{ck}-4$	
Fibras	41,0	41	40,4	33
Fibras + Sikafume [®]	44,0		39,1	

Durante a projecção da face inferior da laje, foi calculada a percentagem de desperdício diária, tendo-se terminado a obra com uma média de 42% (valor fornecido pelo Eng. João Pedreño da empresa H Tecnic).

A tensão média de rotura das carotes está conforme para a classe pretendida (C30/37) e é superior ao resultado obtido para os cubos com a mesma idade (28 dias) e a mesma composição (fibras+Sikafume[®]). Uma possível razão para que o valor seja superior é o facto de na projecção a razão a/c ser menor do que nos cubos, pois para estes serem vazados é necessário que tenham alguma trabalhabilidade (maior quantidade de água de amassadura). Outra explicação pode decorrer do facto de na projecção o betão ficar mais compactado.

Comparando os valores obtidos para a tensão de rotura à compressão dos cubos conclui-se que, para o mesmo teor em cimento e fibras, os cubos com sílica de fumo possuem uma capacidade resistente superior, para além do que a rentabilidade da projecção é superior (menor efeito de ricochete, logo menos desperdício).

Fazendo uma análise qualitativa da rentabilidade da adição da sílica de fumo à composição do betão projectado, pode-se concluir que, no caso desta obra, foi positiva, pois a sílica de fumo diminuiu bastante o desperdício, e uma vez que este tinha de ser retirado de dentro do reservatório através de métodos muito pouco expeditos, poupou-se bastante nas horas-homem associadas a este trabalho. No caso de outras obras já poderá não se verificar o mesmo, uma vez que a sílica de fumo é um produto dispendioso.

6. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Tendo presente os objectivos propostos, nomeadamente a caracterização do betão projectado ao nível dos seus parâmetros mais importantes, quer em termos mecânicos, quer em termos de durabilidade, analisaram-se os resultados obtidos na campanha experimental e chegou-se, por fim, às conclusões que se apresentam seguidamente.

a) PROPRIEDADES MECÂNICAS: ADERÊNCIA E COMPRESSÃO

A aderência é tanto maior quanto maior for o teor em cimento dos betões, e apresenta valores mais elevados para betões projectados verticalmente no sentido ascendente. Em termos absolutos, os valores da tensão resistente aderente foram todos, à excepção da série 350 H-Lavagem, superiores ao valor mínimo teórico recomendado.

Quanto ao tratamento da superfície, conclui-se que a lavagem por jacto de água do substrato é o processo que origina maiores valores de aderência e que estes se encontram ligeiramente inferiores a resultados de estudos anteriores.

A fiabilidade dos resultados para o ensaio de aderência não foi a desejada pois, no caso 450 H-Picagem, os valores não foram estatisticamente conclusivos. Este facto poderia ser melhorado com o aumento do número de ensaios realizados.

A resistência à compressão aumenta com o aumento do teor de cimento no betão e apresenta valores superiores para os casos dos betões que foram projectados de baixo para cima. Em termos dos valores absolutos obtidos nos ensaios de compressão das carotes retiradas dos painéis de ensaio, concluiu-se que estão todos abaixo do definido pela classe de resistência C30/37, ou seja, não estão conformes, e que tal facto se explica pelos problemas que ocorreram durante a operação de projecção do betão. Para reforçar esta hipótese, refere-se que no caso de estudo, a projecção foi efectuada depois do arranjo da máquina de projecção e da aquisição de um compressor de maior capacidade, obtendo-se valores da resistência de compressão conformes com a classe de resistência pretendida.

b) DURABILIDADE: POROSIDADE, CARBONATAÇÃO E PENETRAÇÃO DE CLORETOS

A espessura de carbonatação, para as mesmas condições e período de tempo de exposição, aumenta com a diminuição do teor de cimento e apresenta valores superiores para os casos dos painéis verticais (projecção horizontal). Quanto à velocidade de propagação da carbonata-

ção no betão verifica-se que é tanto maior quanto menor o teor em cimento das misturas e apresenta valores superiores para a direcção de projecção horizontal (painéis verticais).

Verificou-se que os resultados obtidos para a resistência à carbonatação obedecem a uma relação de linearidade com a raiz quadrada do tempo, como era esperado, com uma variabilidade de resultados bastante baixa para todos os casos, excepto para o 450 V.

O coeficiente de difusão de cloretos, à semelhança da espessura de carbonatação, aumenta com a diminuição do teor de cimento e apresenta valores superiores para os betões que foram projectados na horizontal.

Em relação aos valores mínimos de percentagem de porosidade de betões projectados, os resultados de todas as composições estudadas são inferiores a estes, pelo que se poderia depreender deste facto que apresentam uma boa compactação. Os resultados obtidos do estudo da carbonatação e da penetração de cloretos indicam que, para uma mesma composição, se a projecção do betão for horizontal resulta numa durabilidade inferior do betão, o que revela que estes betões são mais porosos, mas este facto não foi corroborado pelo ensaio de determinação da porosidade. De facto, e como foi referido, o ensaio de porosidade foi executado com apenas 2 provetes de cada composição, e os resultados foram todos muito próximos entre composições diferentes.

Sendo assim, conclui-se que o ensaio de porosidade não deve ser considerado quanto à sua representatividade da realidade, sendo as conclusões obtidas dos ensaios de carbonatação acelerada e de penetração de cloretos mais fiáveis.

c) CONSIDERAÇÕES GERAIS

O betão projectado é um processo de construção/reabilitação de estruturas que consegue apresentar características mecânicas e de durabilidade semelhantes a outros betões convencionais, tendo como grande vantagem a sua flexibilidade, sendo desnecessário o uso de cofragens. A natureza da obra, as áreas a serem projectadas, as condições operacionais, a urgência de conclusão da obra, entre outros, são factores que podem tornar este método de aplicação bastante atractivo em termos de uma análise custo/benefício.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No seguimento directo deste trabalho seria de grande interesse a realização de um estudo do efeito do número de camadas de projecção e da sua cura nas características mecânicas e de

durabilidade do betão, uma vez que este foi um parâmetro que se verificou ter uma grande influência nos resultados da campanha experimental.

Outro aspecto muito importante, e que não foi abordado neste estudo, prende-se com a rentabilidade do betão projectado, em termos gerais e em termos particulares, nomeadamente a comparação dos desperdícios resultantes das diferentes direcções de projecção. Desta forma, no caso particular da reabilitação, ao comparar esta técnica com outros métodos de reparação do betão, poderá realizar-se uma análise comparativa de custo/benefício das mesmas.

Seria também interessante desenvolver um estudo mais detalhado sobre a quantidade de água utilizada durante a projecção por via seca e a influência da sua variação nas propriedades do betão projectado, acompanhado com o desenvolvimento de um processo que permitisse garantir um maior controlo da adição de água ao operador. Desta forma, diminuir-se-ia a probabilidade de ocorrência de erros devido à capacidade técnica do operador e garantir-se-ia a homogeneização de todo o betão projectado aplicado.

Como se verificou no caso de estudo, as adições de materiais pozolânicos e de fibras à mistura do betão projectado trazem várias vantagens ao comportamento do betão projectado quer a nível das suas propriedades mecânicas, quer a nível da sua durabilidade. Assim, o estudo de misturas de betão projectado com a adição de fibras sintéticas e/ou materiais com propriedades pozolânicas traria informação relevante não só sobre o comportamento estrutural e a durabilidade do betão projectado, mas também sobre a sua influência na rentabilidade do processo de projecção.

Por fim, seria ainda de grande interesse o estudo do comportamento do betão projectado a acções externas adversas tais como incêndios e/ou explosões e ciclos de gelo-degelo, assim como a forma de otimizar as composições do betão de modo a aumentar a sua resistência a este tipo de acções.

BIBLIOGRAFIA

- ACI 506R-05. 2005.** *Guide to shotcrete.* ACI : Committee Report, 2005.
- ASTM D7234. 2005.** *Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers.* American Society for Testing and Materials, 2005.
- Austin, Simon, Robins, Peter e Pan, Youguang. 1995.** Tensile bond testing of concrete repairs. 1995, Vol. 28, pp. 249-259.
- BASF SE. 2008.** BASF SE. [Online] 2008. [Citação: 11 de Dezembro de 2010.] www.construction-chemicals.basf.com.
- Branco, Fernando A., Brito, Jorge e Colen, Inês Flores. 2007.** *Avaliação in-situ da aderência de materias de revestimento.* Comunicação, 2007.
- Brito, Jorge de e Flores, Inês. 2005.** *Diagnóstico, patologia e reabilitação de construções em betão armado.* Lisboa : Apontamentos da cadeira de Patologia e Reabilitação da Construção, 2005.
- Cánovàs, M. F. 1984.** *Patologia y Terapéutica del Hormigón Armado.* 2ª. Madrid : Editorial Dossat, 1984.
- Cenga. 2009.** Cenga Consultores de Engenharia de Angola. [Online] Evidensys, 2009. [Citação: 11 de Dezembro de 2010.] www.cenga-angola.com.
- Coutinho, A. de Sousa e Gonçalves, Arlindo. 1994.** *Fabrico e propriedades do betão.* 2ª. Lisboa: LNEC, 1994. Vol. III.
- Coutinho, A. de Sousa e Gonçalves, Arlindo. 1994.** *Fabrico e propriedades do betão.* 2ª. Lisboa : LNEC, 1994. Vol. II.
- Coutinho, A. de Sousa. 1973.** *Fabrico e propriedades do betão.* Lisboa : LNEC, 1973, Vol. I.
- EFNARC. 1996.** *European specification for sprayed concrete.* 1996.
- LNEC E 391. 1993.** *Determinação da resistência à carbonatação.* LNEC, 1993.
- LNEC E 394. 1993.** *Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica.* LNEC, 1993.
- LNEC E 463. 2004.** *Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.* LNEC, 2004.

LNEC E 464. 2007. *Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais.* Lisboa : LNEC, 2007.

LNEC E 465. 2007. *Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS.* LNEC, 2007.

LNEC FE Pa36. 1986. *Revestimentos de paredes - ensaio de arrancamento por tracção. Ficha de Ensaio.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1986. 3 p.

Mehta, P. e Monteiro, P. 1994. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais.* São Paulo : PINI, 1994. p. 573.

Monolithic. 2010. *Monolithic.* [Online] 7 de Outubro de 2010. [Citação: 11 de Dezembro de 2010.] www.monolithic.com.

NP 1379. 1976. *Inertes para argamassas e betões. Análise granulométrica. 1.* 1976.

NP EN 12390. 2003. *Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.* 2003.

NP EN 12390. 2003. *Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.* 2003.

NP EN 12504. 2003. *Ensaio de betão nas estruturas. Parte 1: Carotes. Extracção, exame e ensaio à compressão.* 2003.

NP EN 13791. 2008. *Avaliação da Resistência à compressão do betão nas estruturas e em produtos pré-fabricados.* 2008.

NP EN 14487. 2008. *Betão projectado. Parte 1: Definições, especificações e conformidade.* 2008.

NP EN 14487. 2008. *Betão projectado. Parte 2: execução.* 2008.

NP EN 14488. 2008. *Ensaio de betão projectado. Parte 4: Resistência de aderência em carotes à tracção simples.* 2008.

NP EN 197. 2001. *Cimento. Parte 1: Composição, especificação e critérios de conformidade para cimentos correntes. 1.* 2001.

NP EN 206. 2007. *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.* 2007.

Pina, Francisco. 2009. *Resistência à carbonatação de argamassas de reparação para estruturas em betão armado. Estudo de argamassas cimentícias e cimentícias modificadas com*

BIBLIOGRAFIA

polímeros. Lisboa : Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civi, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2009.

Ryan, T. F. 1973. *Gunite a handbook for engineers*. London : Cement and Concrete Association, 1973.

Salta, M. e Gonçalves, A. 1996. *Métodos de caracterização da resistência dos betões em ambientes agressivos. Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, Seminário*. Lisboa : LNEC, 1996.

Salta, M. 1996. *Introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas*. Lisboa : LNEC, 1996.

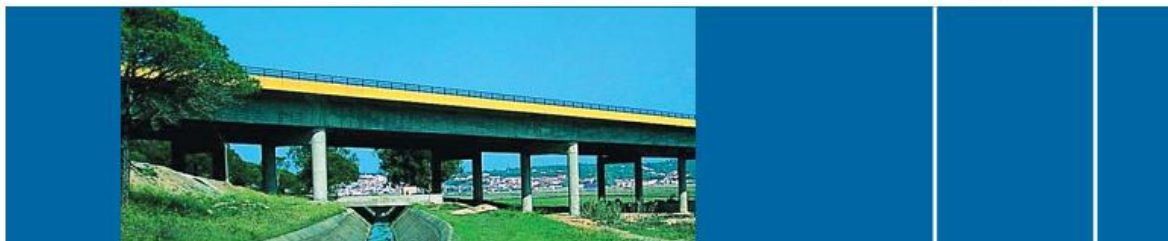
Sika. 2010. *Soluções Sika para a Construção. Catálogo Comercial*. Sika Portugal, SA. 2010.

Stanish, K. D., Hooton, R. D. e Thomas, M. D. A. 1997. *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*. Univerity of Toronto. Toronto, Ontario, Canada. 1997.

ANEXOS

CEM I 42,5R

Cimento Portland



Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clinker Portland
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injeção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.

Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).

Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

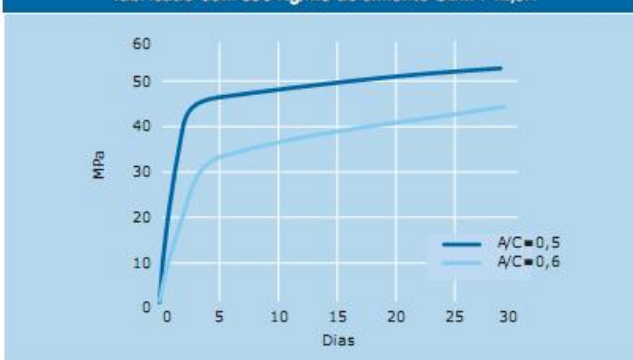
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência NP EN 196-1
2 dias	7 dias	
≥ 20	-	
		28 dias
		≥ 42,5 e ≤ 62,5

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2,
Ponte de Alcácer do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

Vendas Centro
Tel. 244 779 500 . Fax. 244 777 455

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

E-mail - comercial@secil.pt
Site - www.secil.pt

ANEXO B.2 – RELATÓRIO DE ENSAIO: DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA REAL E DA ABSORÇÃO DE ÁGUA – AREIA LAVADA 0/2

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DAS EMPRESAS DE BETÃO PRONTO



Sede e Unidade Laboratorial de Lisboa:
 Av.º Conselheiro Barjona de Freitas, 10 A - 1500-204 LISBOA
 Tel.: 21 778 53 65, 21 774 19 25, 21 774 19 32 - Fax.: 21 778 58 39
 Unidade Laboratorial do Porto:
 Zona Industrial da Carriça, Lote 17 - 4745-312 MURO
 Tel.: 22 986 74 00, 22 986 74 01, 22 986 74 02 - Fax.: 22 986 74 08



RELATÓRIO DE ENSAIO

Processo: L09/00408 Ensaio: 1225 Relatório: L09/001423 Data: 02-04-2009

AGREGADOS: DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA REAL E DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

Marca: ---
 Designação:---

Requerente: SOARVAMIL, LDA

Obra: ---

Identificação: Areia Lavada 0/2 - Mesquita

Pedido: V/FAX Nº: CC.0409
 Data de Entrada: 06-03-2009

SOARVAMIL, LDA

SR. ACÁCIO PERALTA
 ESTRADA DA PORTELA (QTA DO ALTO), A.A.P.

1700 LISBOA

DIRECTOR DE SERVIÇOS LABORATORIAIS

TÉCNICO DE BETÃO

João André

Rui Nobre

Data do ensaio: 02/04/2009

Identificação da amostra	Fracções granulométricas sujeitas a ensaio (mm)	Massa da provete seco (kg)	Método de ensaio	Massa volúmica (Mg/m ³)			WA ₂₄ (%)
				ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	
Areia lavada 0/2	0,063/4	1,298	Picnómetro	2,62	2,60	2,61	0,4

ρ_a – massa volúmica do material impermeável das partículas
 ρ_{rd} – massa volúmica das partículas secas em estufa
 ρ_{ssd} – massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca
 WA₂₄ – absorção de água após a imersão durante 24 h.

OBSERVAÇÕES:

Ensaio realizado de acordo com a norma NP EN 1097-6: 2003 EN 1097-6/A1:2005.
 Redução da amostra de acordo com a NP EN 932-2.
 Peneiração da amostra de acordo com a norma NP EN 933-1.
 Amostra laboratorial entregue pelo cliente.
 Resultado dos ensaios referem-se exclusivamente aos itens ensaiados.
 Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra.

ANEXO C.2 – RELATÓRIO DE ENSAIO: DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA REAL E DA ABSORÇÃO DE ÁGUA – AREIA LAVADA 0/4

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DAS EMPRESAS DE BETÃO PRONTO



Sede e Unidade Laboratorial de Lisboa:
 Av.ª Conselheiro Barjona de Freitas, 10 A - 1500-204 LISBOA
 Tel.: 21 778 53 65, 21 774 19 25, 21 774 19 32 - Fax.: 21 778 58 39
 Unidade Laboratorial do Porto:
 Zona Industrial da Carriça, Lote 17 - 4745-312 MURO
 Tel.: 22 986 74 00, 22 986 74 01, 22 986 74 02 - Fax.: 22 986 74 08



RELATÓRIO DE ENSAIO

Processo: L09/01778 Ensaio: 1225 Relatório: L09/007345 Data: 25-11-2009

AGREGADOS: DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA REAL E DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

SOARVAMIL, LDA

SR. ACÁCIO PERALTA
 ESTRADA DA PORTELA (QTA DO ALTO), A.A.P.
 --
 1700 LISBOA

Marca: --

Designação:--

Requerente: SOARVAMIL, LDA

Obra: Pinhal Conde Cunha 4 - Corroios - Seixal

DIRECTOR DE SERVIÇOS LABORATORIAIS

TÉCNICO DE BETÃO

Identificação: Amostra 01/09 - Areia Lavada 0/4 - P. Conde Cunha

João André

Rui Nobre

Pedido: V/Fax Nº: CC.2109

Data de Entrada: 28-10-2009

Data do ensaio: 24-11-2009

Identificação da amostra	Fracções granulométricas sujeitas a ensaio (mm)	Massa da provete seco (kg)	Método de ensaio	Massa volúmica (Mg/m ³)			WA ₂₄ (%)
				ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	
Amostra 01/09 – Areia Lavada 0/4 – P. Conde Cunha	0,063/4	1,389	Picnómetro	2,63	2,61	2,62	0,3

ρ_a – massa volúmica do material impermeável das partículas

ρ_{rd} – massa volúmica das partículas secas em estufa

ρ_{ssd} – massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca

WA₂₄ – absorção de água após a imersão durante 24 h.

OBSERVAÇÕES:

Ensaio realizado de acordo com a norma NP EN 1097-6: 2003 EN 1097-6/A1:2005.

Redução da amostra de acordo com a NP EN 932-2.

Peneiração da amostra de acordo com a norma NP EN 933-1.

Amostra laboratorial entregue pelo cliente.

Resultado dos ensaios referem-se exclusivamente aos itens ensaiados

Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra.

ANEXO D – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO BAGO DE ARROZ

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (NP 1379)	
Data	Material: Bago de Arroz
24.09.2010	Massa da Amostra: 3048,2 g

Malha (mm)	Resíduo		Resíduo Acumulado	
	(g)	(%)	Retido (%)	Passado (%)
12,7				100
9,52	1,9	0,1	0,1	99,9
6,35	90,9	3,0	3,1	96,9
4,76	843,5	27,7	30,8	69,2
2,38	1908,2	62,6	93,4	6,6
1,19	155,7	5,1	98,5	1,5
0,59	10,7	0,4	98,9	1,1
0,297	3,6	0,1	99,0	1,0
0,149	14,6	0,5	99,5	0,5
0,074			100	0
0				0
Refugo	17,3	0,6		
Total	3046,4	100,0	523,2	

(mm)	
D max (D)	6,35
D min (d)	1,19

ANEXO E – CÁLCULO DA TENSÃO DE ROTURA À COMPRESSÃO DAS CAROTES.

Nota: valores a amarelo não foram considerados conforme a indicação da análise de conformidade e o valores a vermelhos correspondem a ensaios desprezados.

SÉRIE A - 350 V, 7 dias									
ID	D (mm)	h(mm)	m(g)	F pico (kN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	45,16	45,73	162,70	36,98		45,16	45,70	1601,76	23,09
	45,22	45,61							
	45,10	45,76							
2	45,21	43,44	156,00	32,95		45,22	43,52	1605,78	20,52
	45,19	43,68							
	45,25	43,45							
3	45,28	45,28	163,10	33,45		45,18	45,53	1603,18	20,86
	45,13	45,82							
	45,13	45,49							
4	45,04	44,63	158,40	46,89		45,10	44,38	1597,51	29,35
	45,19	44,37							
	45,07	44,13							
5	45,18	46,47	166,20	41,65		45,16	46,49	1601,52	26,01
	45,15	46,64							
	45,14	46,36							
6	45,12	45,56	164,00	37,83		45,16	45,54	1602,00	23,61
	45,11	45,82							
	45,26	45,25							
7	45,10	45,91	165,40	45,94		45,14	45,84	1600,58	28,70
	45,18	46,07							
	45,15	45,55							
8	45,19	44,71	159,50	33,17	superfície muito irregular	45,21	44,75	1605,55	20,66
	45,26	44,60							
	45,19	44,94							
9	45,39	46,38	164,40	22,47		45,20	46,44	1604,36	14,01
	45,11	46,67							
	45,09	46,28							

Série B - 350 H, 7 dias									
ID	D (mm)	h(mm)	m(g)	F c (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	44,34	45,40	153,7	38,58		44,36	45,38	1545,75	24,96
	44,38	45,19							
	44,37	45,54							
2	44,50	46,35	157,5	34,04		44,39	45,94	1547,84	21,99
	44,30	45,80							
	44,38	45,67							
3	44,25	44,68	151	28,27		44,31	44,82	1542,26	18,33
	44,30	45,19							
	44,39	44,58							
4	44,27	46,31	155,1	35,72		44,26	46,05	1538,79	23,21
	44,24	45,68							
	44,28	46,15							
5	44,44	46,83	156,6	19,28	vazios na lateral	44,33	46,69	1543,66	12,49
	44,27	46,46							
	44,29	46,79							
6	44,29	45,42	153,1	32,08		44,40	45,41	1548,30	20,72
	44,42	45,51							
	44,49	45,30							
7	44,42	43,34	146,1	29,78		44,37	43,20	1545,98	19,26
	44,34	43,11							
	44,34	43,14							

SÉRIE C - 450 V, 7 dias								
ID	D (mm)	h(mm)	F c (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	45,19	46,29	32,65	superfície deteriorada	45,21	45,90	1605,31	20,34
	45,14	45,5						
	45,3	45,91						
2	45,15	46,18	22,47	Deteriorado e com vazios	45,19	45,96	1604,13	14,01
	45,25	45,9						
	45,18	45,81						
3	45,15	44,58	38,72	superfície não plana	45,13	44,51	1599,87	24,20
	45,11	44,51						
	45,14	44,44						
4	45,18	45,33	38,29	superfície muito irregular	45,18	45,37	1602,94	23,89
	45,15	45,52						
	45,2	45,26						
5	45,24	47,23	27,27	Superfície irregular com vazios	45,22	47,10	1605,78	16,98
	45,19	47,03						
	45,22	47,04						
6	45,35	45,41	56		45,37	45,44	1616,69	34,64
	45,2	45,45						
	45,56	45,47						
7	45,17	45,29	51,65		45,16	45,29	1601,76	32,25
	45,18	45,2						
	45,13	45,37						

SÉRIE D - 450 H, 7 dias									
ID	D (mm)	h(mm)	m(g)	Fc (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	45,39	44,65	163,3	53,37		45,39	44,77	1618,36	32,98
	45,39	44,87							
	45,4	44,78							
2	45,38	47,24	167,4	16,6	superfície irregular e vazios laterais	45,38	47,23	1617,41	10,26
	45,28	47,37							
	45,48	47,07							
3	45,38	47,72	170,2	36,59		45,34	47,78	1614,32	22,67
	45,37	47,8							
	45,26	47,82							
4	45,35	43,68	154	46,32		45,53	43,07	1628,35	28,45
	45,52	42,73							
	45,73	42,79							
5	45,33	46,82	166,9	29,09	vazios lateral	45,40	47,04	1618,59	17,97
	45,28	47,2							
	45,58	47,11							
6	45,29	45,19	164,6	55,16	boas condições	45,47	45,02	1623,59	33,97
	45,29	44,81							
	45,82	45,05							
7	45,34	45,34	161,2	37,73		45,30	45,18	1611,71	23,41
	45,29	45,14							
	45,27	45,05							
8	45,33	44,13	162,5	50,7	superfície não plana	45,41	44,11	1619,54	31,31
	45,33	43,83							
	45,57	44,37							
9	45,5	44,66	159,1	40,87	superfície deteriorada	45,42	44,82	1620,50	25,22
	45,34	44,98							
	45,43	44,82							
10	45,29	45,5	162,1	36,57		45,42	45,65	1620,26	22,57
	45,4	45,84							
	45,57	45,6							
11	45,26	45,27	161	32,01	superfície irregular	45,33	45,33	1613,61	19,84
	45,42	45,44							
	45,3	45,29							

SÉRIE E - 350 V, 15 dias									
ID	D (mm)	h(mm)	m(g)	F (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	44,32	45,84	458,70	40,83		44,36	45,87	1545,28	26,42
	44,37	46,00							
	44,38	45,78							
2	44,31	45,96	157,60	35,30		44,34	45,77	1544,35	22,86
	44,39	45,53							
	44,33	45,81							
3	44,46	45,35	153,30	34,49	vazios lateral	44,49	45,34	1554,59	22,19
	44,43	45,36							
	44,58	45,30							
4	44,80	45,41	157,00	37,89		44,51	45,40	1556,22	24,35
	44,38	45,38							
	44,36	45,40							
5	44,42	45,00	154,90	40,01		44,47	45,13	1553,42	25,76
	44,43	45,31							
	44,57	45,07							
6	44,21	45,57	157,40	28,09		44,48	45,51	1553,89	16,79
	44,65	45,42							
	44,58	45,53							
7	44,39	45,61	158,10	27,35	vazios lateral	44,46	45,67	1552,26	17,62
	44,45	45,76							
	44,53	45,65							
8	44,28	45,07	156,60	30,49	vazios lateral	44,42	45,00	1549,47	19,68
	44,58	44,97							
	44,39	44,97							
9	44,44	45,31	155,80	41,89		44,51	45,35	1555,98	26,92
	44,37	45,48							
	44,72	45,27							

SÉRIE F - 450 V, 15 dias									
ID	D (mm)	h(mm)	m(g)	Fc (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	44,52	45,11	157,00	36,02	superfície não plana	44,44	45,26	1551,33	23,22
	44,47	45,44							
	44,34	45,22							
2	44,58	45,90	160,70	39,36	superfície com vazio	44,56	45,97	1559,25	25,24
	44,44	45,90							
	44,65	46,10							
3	44,23	46,21	161,60	46,24		44,46	46,40	1552,26	29,79
	44,51	46,68							
	44,63	46,31							
4	44,40	45,60	156,90	37,72		44,42	45,64	1549,93	24,34
	44,46	45,52							
	44,41	45,81							
5	44,34	45,43	158,70	35,72		44,34	45,38	1544,12	23,13
	44,32	45,46							
	44,36	45,26							
6	44,41	46,52	162,40	57,92		44,45	46,55	1552,02	37,32
	44,38	46,56							
	44,57	46,58							
7	44,60	45,11	157,70	45,85	vazio lateral	44,51	45,21	1555,75	29,47
	44,57	45,28							
	44,35	45,24							
8	44,48	44,12	148,00	18,29	superfície deteriorada com muitos vazios	44,54	44,19	1558,08	11,74
	44,52	44,31							
	44,62	44,15							
9	44,64	45,69	158,80	46,85		44,55	45,70	1559,01	30,05
	44,42	45,68							
	44,60	45,73							
10	44,42	45,70	151,80	16,90	superfície irregular com muitos vazios	44,41	45,80	1549,00	10,91
	44,42	45,63							
	44,39	46,07							

SÉRIE G - 350 H, 15 dias

ID	D (mm)	h(mm)	m(g)	Fc (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	44,41	44,15	150,40	39,17	superfície com vazios e vazios lateral	44,46	44,09	1552,72	25,23
	44,43	44,00							
	44,55	44,11							
2	44,26	45,72	157,80	52,33	superfície com vazios	44,32	45,82	1542,73	33,92
	44,42	45,92							
	44,28	45,83							
3	44,29	45,52	154,00	31,44	superfície irregular e vazios lateral	44,24	45,43	1536,93	20,46
	44,27	45,40							
	44,15	45,38							
4	44,27	45,47	155,20	50,84		44,27	45,16	1539,25	33,03
	44,26	45,02							
	44,28	45,00							
5	44,31	43,95	149,00	35,63	superfície irregular	44,28	43,93	1539,94	23,14
	44,28	44,00							
	44,25	43,85							
6	44,27	45,71	157,10	40,99		44,31	45,71	1541,80	26,59
	44,24	45,78							
	44,41	45,65							
7	44,34	45,11	152,20	32,32	superfície deteriorada, vazio lateral	44,38	45,02	1546,68	20,90
	44,40	44,93							
	44,39	45,01							
8	44,22	45,86	154,60		Erro na máquina				
	44,24	45,64							
	44,19	45,96							
9	44,30	45,06	153,00	49,51		44,44	45,02	1550,86	31,92
	44,80	44,92							
	44,21	45,07							
10	44,36	45,74	156,30	27,33	vazio lateral	44,44	45,67	1551,33	17,62
	44,41	45,58							
	44,56	45,70							

SÉRIE H - 450 H, 15 dias

ID	D (mm)	h(mm)	m(g)	Fc (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	44,32	44,60	152,70	57,97	muito poroso	44,29	44,61	1540,41	37,63
	44,31	44,64							
	44,23	44,58							
2	44,36	45,30	158,70	51,49		44,47	45,35	1553,42	33,15
	44,40	45,40							
	44,66	45,35							
3	44,31	44,75	154,60	46,15		44,50	44,73	1555,52	29,67
	44,50	44,68							
	44,70	44,75							
4	44,16	44,46	153,90	42,02	superfície irregular	44,23	44,43	1536,70	27,34
	44,21	44,40							
	44,33	44,42							
5	44,45	44,22	154,70	53,63	vazio lateral	44,49	44,15	1554,59	34,50
	44,51	44,10							
	44,51	44,12							
6	44,41	44,33	154,10	40,49		44,44	44,31	1551,09	26,10
	44,44	44,38							
	44,47	44,22							
7	44,28	44,73	156,20	52,72	superfície irregular	44,25	44,68	1537,63	34,29
	44,23	44,63							
	44,23	44,69							
8	44,42	45,36	156,50	42,71		44,37	45,40	1546,21	27,62
	44,43	45,30							
	44,26	45,53							
9	44,42	45,35	155,00	38,63	superfície com vazios	44,41	45,32	1549,23	24,93
	44,41	45,25							
	44,41	45,36							
10	44,23	45,17	155,10	37,28		44,25	45,16	1538,09	24,24
	44,38	45,16							
	44,15	45,15							

SÉRIE I - 350 V, 28 dias							
ID	m(g)	Fc (kN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	155,90	39,10		44,00	45,00	1520,53	25,71
2	157,90	45,81		44,00	46,00	1520,53	30,13
3	158,70	24,74	superfície não plana e vazios laterais	44,00	46,00	1520,53	16,27
4	151,20	29,01	muitos vazios	44,00	44,50	1520,53	19,08
5	144,00	42,24		44,00	41,50	1520,53	27,78
6	151,70	30,46	superfície não plana	44,00	44,00	1520,53	20,03
7	151,10	35,94		44,00	44,00	1520,53	23,64
8	156,00	37,31	superfície não plana e vazios	44,00	45,50	1520,53	24,54
9	156,30	33,05		44,00	45,25	1520,53	21,74
10	152,00	38,39	alguns vazios	44,00	43,80	1520,53	25,25

Nota: as medições foram realizadas com um paquímetro de precisão 1 mm.

SÉRIE J - 450 V, 28 dias							
ID	m(g)	Fc (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	155,7	46,97	superfície não plana	44,00	44,50	1520,53	30,89
2	154,2	43,85	superfície não plana com vazios	44,00	44,00	1520,53	28,84
3	151	25,23	superfície não plana	44,00	44,20	1520,53	16,59
4	153,3	33,42		44,00	44,00	1520,53	21,98
5	155	41,95	superfície deteriorada	44,00	44,50	1520,53	27,59
6	153,2	27,5	muitos vazios	44,00	45,00	1520,53	18,09
7	150,2	34	superfície não plana	44,00	43,50	1520,53	22,36
8	136,7	50,88		44,00	39,00	1520,53	33,46
9	152,5	37,35		44,00	44,50	1520,53	24,56
10	156,7	41,69	superfície não plana	44,00	45,00	1520,53	27,42

Nota: as medições foram realizadas com um paquímetro de precisão 1 mm.

SÉRIE K - 350 H, 28 dias							
ID	m(g)	Fc (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	153,2	39,43	superfície não plana	44,00	44,50	1520,53	25,93
2	157	30,47		44,00	46,00	1520,53	20,04
3	148,3	45,86		44,00	42,50	1520,53	30,16
4	154,5	37,8	vazios	44,00	45,00	1520,53	24,86
5	156,8	45,41	vazio lateral	44,00	44,50	1520,53	29,86
6	152,6	40,59		44,00	45,50	1520,53	26,69
7	151,1	38,6		44,00	44,00	1520,53	25,39
8	153,7	49,63		44,00	44,50	1520,53	32,64
9	158,2	35,36		44,00	46,00	1520,53	23,26

Nota: as medições foram realizadas com um paquímetro de precisão 1 mm.

SÉRIE L - 450 H, 28 dias							
ID	m(g)	Fc (KN)	Obs.	D med (mm)	h med (mm)	Área (mm ²)	fc (MPa)
1	166,3	52,48		44,00	47,00	1520,53	34,51
2	160,6	49,52	superfície irregular	44,00	46,00	1520,53	32,57
3	159,6	41,8	vazios laterais	44,00	46,00	1520,53	27,49
4	153,7	40,49		44,00	44,50	1520,53	26,63
5	155,8	47,47	superfície muito irregular	44,00	44,75	1520,53	31,22
6	156,2	38,41	superfície não plana	44,00	44,50	1520,53	25,26
7	159,6	42,51		44,00	45,00	1520,53	27,96
8	161,8	62,78		44,00	46,00	1520,53	41,29
9	157,8	40,8	superfície não plana, vazios	44,00	46,00	1520,53	26,83

Nota: as medições foram realizadas com um paquímetro de precisão 1 mm.

ANEXO F – CÁLCULO DA TENSÃO DE ROTURA À COMPRESSÃO DAS CAROTES DO CASO DE ESTUDO.

Carotes FIBRAS+SIKA FUME aos 20 dias

Nota: comparar valores com cubos

ID	m (g)	dmed (mm)	hmed (mm)	Área (mm ²)	Fc (KN)	fc (MPa)	Observações
1	204,4	48,0	49,0	1809,6	82,08	45,4	
2	207,5	48,0	49,7	1809,6	81,18	44,9	perfuração na superfície lateral
3	207,8	48,0	50,0	1809,6	63,46	35,1	
4	205,2	48,0	49,0	1809,6	80,21	44,3	
5	206,6	48,0	49,8	1809,6	72,71	40,2	
6	205,3	48,0	49,5	1809,6	83,83	46,3	vazios lateral
7	212,8	48,0	51,5	1809,6	72,09	39,8	superfície não plana
8	201,1	48,0	48,5	1809,6	67,46	37,3	vazios lateral
9	200,7	48,0	48,2	1809,6	88,25	48,8	inclinação do eixo vertical
10	211	48,0	50,5	1809,6	88,76	49,1	
11	202,4	48,0	49,0	1809,6	88,08	48,7	

Média (fcm) MPa	43,6
20% da média	8,7
Valor mínimo aceitável	34,9
Valor máximo aceitável	52,3
Desvio Padrão	4,8

Carotes FIBRAS+SIKA FUME aos 28 dias

Nota: comparar valores com cubos

ID	m (g)	dmed (mm)	hmed (mm)	Área (mm ²)	Fc (KN)	fc (MPa)	Observações
1	200,4	48,0	48,0	1809,6	79,13	43,7	
2	196,7	48,0	47,0	1809,6	93,35	51,6	
3	197,3	48,0	47,5	1809,6	86,59	47,9	
4	200,7	48,0	48,0	1809,6	81,46	45,0	
5	203,2	48,0	48,5	1809,6	85,37	47,2	
6	197,8	48,0	47,0	1809,6	108,79	60,1	
7	203,1	48,0	48,5	1809,6	60,99	33,7	Superfície não plana
8	201,2	48,0	48,0	1809,6	82,57	45,6	
9	205,8	48,0	49,0	1809,6	95,87	53,0	Superfície não plana
10	203,3	48,0	49,0	1809,6	84,29	46,6	

Média (fcm) MPa	47,4
20% da média	9,5
Valor mínimo aceitável	38,0
Valor máximo aceitável	56,9
Nova média (fcm) MPa	47,6
Desvio Padrão	3,2

ANEXO G – CÁLCULO DA TENSÃO DE ROTURA À COMPRESSÃO DOS CUBOS DO CASO DE ESTUDO.**Cubos FIBRA vazado**

Idade	ID	m (g)	F (KN)	Área (mm ²)	fc (MPa)	Média
19 dias	A	7705,2	882,3	22500,0	39,2	39,2
28 dias	1	7707,6	913,1	22500,0	40,6	40,6
28 dias	2	7671,0	918,9	22500,0	40,8	
28 dias	3	7685,9	908,1	22500,0	40,4	

Cubos FIBRA+CINZAS vazado

Idade	ID	m (g)	F (KN)	Área (mm ²)	fc (MPa)	Média
28 dias	1	7488,2	879,3	22500,0	39,1	41,0
28 dias	2	7349,0	966,6	22500,0	43,0	

ANEXO H – CÁLCULOS AUXILIARES PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS.

Betão	Provete	L (mm)	I_{30V} (mA)	U (v)	I_{ajust} (mA)	Ti (°C)	Tf (°C)	T med (°C)	Duração (h)	I_f (mA)
350 V	1	42	260	10	70	17,8	16,8	17,3	24	70
	2	47				17,9	16,7	17,3		
	3	44				17,8	16,8	17,3		
350 H	1	51	240	10	60	18,3	16,6	17,45	24	60
	2	50				18,1	16,7	17,4		
	3	54				18,3	16,7	17,5		
450 V	1	54	180	10	40	16,6	17,7	17,15	24	40
	2	49				16,2	17,7	16,95		
	3	50				16,2	17,8	17		
450 H	1	49	160	15	70	16,3	17,7	17	24	80
	2	50				16,3	17,8	17,05		
	3	49				16,2	18,3	17,25		

Betão	Provete	mm							
		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	xd
350 V	1	11	16,5	11	17	11	20	14	14,4
	2	13,5	15,5	11	17	10	15	8	12,9
	3	15	15	19,5	15,5	15	20	15	16,4
350 H	1	10	11	9	11	9	12	11,5	10,5
	2	11	11,5	11	13	11	10	11	11,2
	3	8,5	9	9	10	8,5	12	8,5	9,4
450 V	1	10	11	11	12	12	10	10	10,9
	2	13	12	12	10	10	9	12	11,1
	3	12	9,5	11	8	11	10,5	9	10,1
450 H	1	9	9,5	8	10	8	10	8	8,9
	2	9	9,5	8	9,5	11	16	8	10,1
	3	11	11	11,5	10	9,5	12	9	10,6

ANEXO I – CÁLCULOS AUXILIARES PARA A DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DO BETÃO POR ABSORÇÃO DE ÁGUA.

m1								
ID		D1	D2	D3	Diferença D2-D1	0,1% da média D2-D1	Diferença D2-D3	0,1% da média D2-D3
		17.Dez.10	20.Dez.10	21.Dez.10				
350 H	1,1	985,8	988,1	988,4	2,3	1,0	0,3	1,0
	1,2	1101,2	1102,0	1101,7	0,8	1,1	-0,3	1,1
350 V	2,1	689,3	689,0	689,4	-0,3	0,7	0,4	0,7
	2,2	790,8	791,2	791,6	0,4	0,8	0,4	0,8
450 H	3,1	1081,2	1083,4	1084,0	2,2	1,1	0,6	1,1
	3,2	846,1	847,7	848,1	1,6	0,8	0,4	0,8
450 V	4,1	777,1	778,6	778,8	1,5	0,8	0,2	0,8
	4,2	758,7	759,6	759,4	0,9	0,8	-0,2	0,8

ID	m2	
350 H	1,1	553,7
	1,2	612,5
350 V	2,1	390,3
	2,2	449
450 H	3,1	616,5
	3,2	481
450 V	4,1	447,1
	4,2	430

m3					
ID		D1	D2	D3	D4
		22.Dez.10	23.Dez.10	29.Dez.10	30.Dez.10
350 H	1,1	942,9	937	934,5	934,2
	1,2	1051,4	1041,7	1038	1037,9
350 V	2,1	656,2	651,6	650,3	650,1
	2,2	754	750,2	748,2	748,1
450 H	3,1	1043,2	1032,4	1025,6	1025,2
	3,2	810,6	803,9	800,1	799,9
450 V	4,1	750	741,6	739	738,9
	4,2	723,5	717,2	714,7	714,5

m3					
Diferença D2-D1	0,1% da média D2-D1	Diferença D2-D3	0,1% da média D2-D3	Diferença D4-D3	0,1% da média D4-D3
5,9	0,9	2,5	0,9	0,3	0,9
9,7	1,0	3,7	1,0	0,1	1,0
4,6	0,7	1,3	0,7	0,2	0,7
3,8	0,8	2,0	0,7	0,1	0,7
10,8	1,0	6,8	1,0	0,4	1,0
6,7	0,8	3,8	0,8	0,2	0,8
8,4	0,7	2,6	0,7	0,1	0,7
6,3	0,7	2,5	0,7	0,2	0,7