



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

# **Durabilidade de Betões Auto - Compactáveis Produzidos com Agregados Reciclados Provenientes de Demolição de Estruturas de Betão**

**Maria de Fátima Carmo Vila**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira

Covilhã, Outubro de 2011



# AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Luiz António Pereira de Oliveira pela sua disponibilidade e paciência que me dedicou e por todos os ensinamentos transmitidos ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Ao professor João Paulo de Castro Gomes, pela ajuda ao longo da realização dos ensaios laboratoriais.

Ao professor Miguel Nepomuceno, por ter disponibilizado materiais necessários para o desenvolvimento deste estudo.

Ao colega engenheiro João Centeio, pela boa vontade demonstrada e pela ajuda ao longo da realização da parte experimental deste estudo.

Aos colegas engenheiros Inês Simão, Liliana Patrício, Vânia Bastardo, Ioland Tavares, por toda a camaradagem e amizade demonstrada não só ao longo da realização da tese, como também ao longo de todo o percurso académico. Uma atenção especial ao Ioland por ter realizado todos os trabalhos pesados ao longo do desenvolvimento da parte laboratorial.

Aos meus pais Teresa Vila e Luís Vila, pela oportunidade que me deram de poder realizar os meus objectivos.

À minha irmã, Ana Rita e namorado Márcio, por toda a ajuda e paciência que tiveram nas horas mais difíceis.

Aos técnicos do departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da UBI, Sr. Luciano, Sr. Félix e Sr. Albino, por toda a ajuda prestada.

A todos o meu profundo agradecimento.



# RESUMO

Existe cada vez mais nos tempos que correm uma preocupação com os recursos naturais existentes e com a forma de como estes são explorados. Desta forma todas as indústrias nas quais se insere a da construção civil, têm demonstrado uma mudança no que se refere ao uso de matérias-primas. Assim, o sector tem-se focado no uso de resíduos provenientes da construção e demolição para a criação de betões.

Outra problemática existente refere-se à durabilidade das estruturas. Existindo inúmeros estudos onde se verifica que as estruturas apresentam precocemente altos níveis de degradação, o que implica um aumento de custos.

Assim, a presente investigação debruçou-se sobre o tema da durabilidade do betão auto-compactável com o uso de agregados grossos reciclados. Para isso, foram produzidos quatro tipos de betão diferente, sendo um o betão de referência e os restantes com 20%, 40% e 100% de substituição de agregados. Para avaliar as propriedades relacionadas à durabilidade, realizaram-se os seguintes ensaios, permeabilidade ao oxigénio, permeabilidade à água, absorção capilar e profundidade de penetração de água.

Desta forma e com os resultados obtidos, conclui-se que é viável tecnicamente, o uso de agregados reciclados no betão auto-compactável pra fins estruturais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos provenientes de demolição e construção de edifícios; agregados grossos reciclados; betão auto - compactável; durabilidade



# ABSTRACT

There is in the present an increasingly interest concern existing natural resources and how they are explored. This way, as in all sectors the construction has demonstrated a change in relation to the use of raw materials. Recently the sector has focused on the use of concrete wastes from structures demolitions.

Another existing problematic refers to the durability of structures. There are numerous studies which verify that structures show early high levels of degradation what implies in an increase in global construction costs.

So, this research has addressed the issue of durability of self - compacting concrete with the use of recycled aggregates. For this purpose, were produced four different types of concrete, one of them as used as reference mixture and the others were prepared with 20%, 40%, 100% of natural coarse aggregates replacement. To evaluate the durability the self compacting concrete, following properties were determined: oxygen permeability, water permeability, capillary absorption and depth of penetration of water.

With the results obtained, it is concluded that the use of recycled aggregates in self - compacting concrete don't affect significantly the concrete behavior, indicating that is viable in self compacting concrete to replace natural coarse aggregates by recycled aggregates similar to those here studied.

**KEYWORDS:** construction and demolition wastes, recycled coarse aggregate, self - compacting concrete, durability



# Índice

Capítulo 1 - Introdução .....	1
1.1 Enquadramento do tema .....	1
1.2 Objectivos do trabalho.....	1
1.3 Organização da tese .....	2
Capítulo 2 - A durabilidade do betão.....	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Critérios de durabilidade .....	4
2.3 Previsão da vida útil de estruturas de betão.....	7
2.3.1 Método determinístico .....	7
2.3.2 Método semi - probabilístico .....	8
2.3.3 Método probabilístico simplificado.....	9
2.3.4 Método puramente probabilístico .....	11
2.4 Conclusão.....	11
Capítulo 3 - Mecanismos de deterioração do betão .....	12
3.1 Introdução.....	12
3.2 Mecanismos de transporte.....	13
3.3 Ataques químicos .....	14
3.3.1 Carbonatação .....	14
3.3.2 Ataque dos ácidos .....	16
3.3.3 Ataque dos sulfatos .....	17
3.3.4 Ataque dos cloretos.....	18
3.3.5 Reacção álcalis - agregado .....	20
3.4 Ataques físicos.....	21
3.4.1 Desgaste superficial.....	21
3.4.2 Fissuração.....	22
3.4.3 Gelo/degelo .....	23
3.4.4 Fogo.....	23
3.4.5 Diferenças de temperatura .....	24
3.4.6 Carregamento directo .....	25
3.4.7 Corrosão da armadura .....	25

3.5	Conclusão.....	26
Capítulo 4 - Durabilidade de betão com agregados reciclados .....		27
4.1	Introdução.....	27
4.2	Características dos RCD.....	28
4.2.1	Composição dos RCD.....	28
4.2.2	Propriedades dos agregados reciclados .....	30
4.2.2.1	Resistência mecânica .....	30
4.2.2.2	Massa volúmica e baridade.....	30
4.2.2.3	Absorção de água .....	31
4.2.2.4	Forma e textura.....	31
4.3	Betão normal com agregados reciclados.....	32
4.3.1	Carbonatação .....	32
4.3.2	Absorção capilar.....	32
4.3.3	Cloretos .....	33
4.3.4	Gelo/degelo.....	33
4.4	Betão auto - compactável com agregados reciclados .....	33
4.5	Conclusão.....	35
Capítulo 5 - Descrição do programa experimental.....		37
5.1	Introdução.....	37
5.2	Caracterização dos materiais .....	37
5.2.1	Cimento .....	37
5.2.2	Adição .....	37
5.2.3	Adjuvante.....	38
5.2.4	Agregados.....	38
5.2.4.1	Areias .....	38
5.2.4.2	Agregados grossos naturais .....	39
5.2.4.3	Agregados grossos reciclados .....	39
5.2.5	Água .....	40
5.3	Ensaio dos betões.....	40
5.3.1	Ensaio no betão em estado fresco .....	41
5.3.1.1	Ensaio de espalhamento (“slump flow”).....	41
5.3.1.2	Ensaio do funil.....	42
5.3.2	Carotagem dos provetes .....	43
5.3.3	Pré - condicionamento .....	44
5.4	Ensaio de durabilidade.....	44

5.4.1	Absorção capilar .....	44
5.4.2	Permeabilidade ao oxigénio .....	46
5.4.3	Permeabilidade à água .....	47
5.4.4	Profundidade de penetração de água sobre pressão.....	48
5.5	Apresentação e discussão dos resultados .....	49
5.5.1	Análise granulométrica .....	49
5.5.1.1	Agregados finos.....	50
5.5.1.1	Agregados grossos.....	51
5.5.1.1.1	Agregados grossos naturais .....	51
5.5.1.1.2	Agregados grossos reciclados .....	52
5.5.2	Curva granulométrica.....	53
5.5.2.1	Agregados finos.....	53
5.5.2.2	Agregados grossos naturais .....	54
5.5.2.3	Agregados grossos reciclados .....	55
5.5.3	Ensaio do betão no estado fresco .....	56
5.5.4	Ensaio de durabilidade .....	57
5.5.4.1	Permeabilidade ao oxigénio.....	57
5.5.4.2	Permeabilidade à água.....	57
5.5.4.3	Absorção capilar .....	59
5.5.4.4	Profundidade de penetração de água sobre pressão .....	61
Capítulo 6 - Conclusões .....		63
6.1.1	Introdução .....	63
6.1.2	Conclusões gerais.....	63
6.1.3	Propostas para desenvolvimento futuro.....	65
Referências bibliográficas .....		66
Anexo A - Fichas Técnicas		
Anexo B - Análise granulométrica dos agregados		
Anexo C - Estudo dos betões		
Anexo D - Ensaio de durabilidade - permeabilidade à água		
Anexo E - Ensaio de durabilidade - absorção capilar		
Anexo F - Ensaio de durabilidade - profundidade de penetração de água sobre pressão		

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Origem das patologias do betão (Adaptado de Campos, 2006) .....	3
Figura 2 - Modelo de degradação de Tuutti (Coito, 2008) .....	8
Figura 3 - Relação entre o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha (Andrade, 2005) .....	10
Figura 4 - Forma de apresentação dos índices de confiabilidade (Andrade, 2005) .....	11
Figura 5 - Esquema da entrada de agentes agressivos no betão (Adaptado de Nanukuttan e Póvoa, 2010) .....	13
Figura 6 - Influência da relação A/C na permeabilidade (Campos, 2006) .....	14
Figura 7 - Deterioração do betão por acção da carbonatação (Simas, 2007) .....	15
Figura 8 - Formação de sais devido à acção dos ácidos (Adaptado de Hovder e Moser, 2004) .....	16
Figura 9 - Degradação do betão devido ao ataque dos ácidos ( <a href="http://www.revistatechne.com.br/">http://www.revistatechne.com.br/</a> ) ....	16
Figura 10 - Ataque de sulfatos ( <a href="http://icc.ucv.cl/hormigon/fotospat.html">http://icc.ucv.cl/hormigon/fotospat.html</a> ) .....	17
Figura 11 - As diversas condições de exposição de estruturas marítimas (Coito, 2008) .....	19
Figura 12 - Ataque dos cloretos ( <a href="http://www.altoqi.com.br">http://www.altoqi.com.br</a> ) .....	19
Figura 13 - Fissuração provocada pela reacção álcalis ( <a href="http://www.revistatechne.com.br">http://www.revistatechne.com.br</a> ) .....	20
Figura 14 - Desgaste da superfície do betão (Oyamada, s.d.) .....	22
Figura 15 - Causas da fissuração (Adaptado de Campos, 2006) .....	23
Figura 16 - Destacamento do betão devido à acção do gelo ( <a href="http://www.concrete-experts.com/">http://www.concrete-experts.com/</a> ) ....	23
Figura 17 - Esquema de corrosão de armadura (Simas, 2007) .....	26
Figura 18 - Constituição dos resíduos provenientes de demolição (Adaptado de Reis, 2010) .....	29
Figura 19 - Absorção de água (Adaptado Grdic <i>et al</i> , 2010) .....	34
Figura 20 - a) Areia fina; b) Areia grossa .....	38
Figura 21 - a) Brita natural 1; b) Brita natural 2 .....	39
Figura 22 - Britadeira .....	39
Figura 23 - a) Brita reciclada 1; b) Brita reciclada 2 .....	40
Figura 24 - Procedimento de amassadura (Nepomuceno, 2005) .....	41
Figura 25 - Placa e cone de Abrams (Nunes, 2001) .....	42
Figura 26 - Funil utilizado para a realização do ensaio .....	42
Figura 27 - Denominação dos corpos de prova .....	43
Figura 28 - Ensaio de absorção capilar .....	45

Figura 29 - Curva típica do ensaio de absorção capilar (Figueiras, 2006) .....	46
Figura 30 - Aparelho de medição da permeabilidade ao oxigénio e à água.....	47
Figura 31 - Ensaio de profundidade de penetração de água sobre pressão .....	49
Figura 32 - Final do ensaio de profundidade de penetração de água sobre pressão.....	49
Figura 33 - Peneiração mecânica .....	50
Figura 34 - Curva granulométrica dos agregados finos.....	51
Figura 35 - Curva granulométrica dos agregados grossos naturais .....	52
Figura 36 - Curva granulométrica dos agregados grossos reciclados.....	53
Figura 37 - Resultados do ensaio de permeabilidade à água, para corpos de prova sem pré condicionamento.....	58
Figura 38 - Resultados do ensaio de permeabilidade à água, para corpos de prova com pré condicionamento.....	58
Figura 39 - Gráfico representativo da relação entre os betões com e sem pré condicionamento para o ensaio de permeabilidade água .....	59
Figura 40 - Resultados do ensaio de absorção capilar para os corpos de prova sem pré condicionamento .....	60
Figura 41 - Valores de coeficiente de absorção capilar para os betões sem pré condicionamento .....	60
Figura 42 - Resultados do ensaio de absorção capilar para os corpos de prova com pré condicionamento .....	60
Figura 43 - Valores de coeficiente absorção capilar para os betões com pré condicionamento .....	61
Figura 44 - Gráfico representativo da relação entre os betões com e sem pré condicionamento para o ensaio de absorção capilar .....	61
Figura 45 - Profundidade de penetração de água nos diferentes tipos de betão estudados .....	62

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de valores limite para a composição e propriedades do betão de acordo com a classe de exposição (Adaptada de ENV206, 2003).....	5
Tabela 2 - Indicação do tempo de vida útil estimado para cada categoria de estruturas (Adaptado da EN 1990, 2002) .....	5
Tabela 3 - Classe de exposição em função do ambiente de exposição (EN 1992-1) .....	6
Tabela 4 - Valores de recobrimento mínimo (Adaptado da EN - 1992-1).....	7
Tabela 5 - Agentes agressivos do betão (Adaptado,Torgal e Jalali, 2008) .....	12
Tabela 6 - Agentes agressivos do betão (Continuação,Torgal e Jalali, 2008).....	13
Tabela 7 - Distribuição de RCD por resíduo (Reis, 2010) .....	28
Tabela 8 - Propriedades do BAC (Adaptado de Figueiras, 2006).....	34
Tabela 9 - Características dos agregados usados na experiência laboratorial (Adaptado de Rangel, 2010) .....	38
Tabela 10 - Considerações iniciais e parâmetros da argamassa .....	41
Tabela 11 - Tipo de corpos de prova usados nos ensaios de durabilidade .....	43
Tabela 12 - Distribuição granulométrica dos agregados finos .....	51
Tabela 13 - Distribuição granulométrica dos agregados grossos naturais .....	52
Tabela 14 - Distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados.....	53
Tabela 15 - Aproximação da distribuição granulométrica dos agregados finos à distribuição granulométrica de referência .....	54
Tabela 16 - Aproximação da distribuição granulométrica dos agregados grossos naturais à distribuição granulométrica de referência .....	55
Tabela 17 - Aproximação da distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados à distribuição granulométrica de referência .....	55
Tabela 18 - Aproximação da distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados à distribuição granulométrica de referência (Continuação) .....	56
Tabela 19 - Parâmetros reológicos da mistura e respectivas correcções das misturas.....	57



# Lista de Acrónimos

BAC	Betão Auto - Compactável
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les constructions, Paris (France)</i>
UBI	Universidade da Beira Interior



# SIMBOLOGIA

A/C	Razão em massa entre as quantidades de água e de cimento da mistura
AF	Areia fina
AG	Areia grossa
B1	Brita 3/6
B2	Brita 6/15
BR1	Agregado reciclado 1
BR2	Agregado reciclado 2
BRC100	Betão auto-compactável com 100% de agregados reciclados
BRC20	Betão auto-compactável com 20 % de agregados reciclados
BRC40	Betão auto-compactável com 40 % de agregados reciclados
BRF	Betão auto-compactável de referência com 0% de agregados reciclados
$D_m$	Diâmetro médio de espalhamento no ensaio de espalhamento de betões
$D_o$	Diâmetro inicial na base do cone no ensaio de espalhamento de betões
FC	Massa do fíler calcário na mistura
$G_c$	Área de espalhamento relativa no ensaio de espalhamento do betão
$R_c$	Velocidade relativa de escoamento no ensaio de fluidez do betão, em s <sup>-1</sup>

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Enquadramento do tema

Ao longo do tempo tem-se vindo a verificar uma crescente preocupação com a durabilidade das estruturas de betão. Sousa Coutinho (1988) demonstrou essa apreensão, pois identificava o betão como um material vulnerável e de utilização limitada, devido à sua principal característica - a heterogeneidade.

Tal não aconteceu, e o betão tornou-se o material mais popular na indústria, sendo utilizado praticamente em todas as obras de Engenharia Civil. Devido à importância deste material no sector foram sendo desenvolvidos inúmeros estudos de forma a melhorar o seu comportamento. Uma vez que, se foi verificando que a maioria das estruturas e tal como Sousa Coutinho (1988) previa, apresentavam danos precoces o que aumentava os custos da obra. Surgindo assim o betão auto-compactável.

Para além da durabilidade das estruturas, também a preocupação ambiental é um problema que vai surgindo actualmente. Sendo a indústria da construção um dos motores da sociedade económica, este tema, não pode ser desvalorizado, e para tornar a construção civil amiga do ambiente foram desenvolvidos estudos que prevêem que a reciclagem de resíduos provenientes da construção e demolição de estruturas é uma mais-valia para o sector, eliminando assim, aterros feitos maioritariamente a céu aberto e em florestas, prejudicando a fauna e flora do planeta. Presume-se, segundo estimativas apresentadas, que em 2002 em Portugal, os resíduos provenientes da construção civil declarados eram cerca de 2,4%, e que mais de 50% podia ser facilmente reutilizados sem qualquer prejuízo para o ambiente (Barros e Jorge, 2008).

Desta forma o presente trabalho pretende avaliar a durabilidade do betão auto-compactável, com o uso de agregados reciclados.

## 1.2 Objectivos do trabalho

Este trabalho tem como objectivo geral avaliar a durabilidade do betão auto-compactável com o uso de agregados reciclados. E tem como objectivo específico avaliar a:

- Permeabilidade ao oxigénio;
- Permeabilidade à água;
- Absorção capilar;

- Profundidade de penetração de água sobre pressão.

### **1.3 Organização da tese**

A apresentação da investigação foi realizada em 6 capítulos, conforme se descreve a seguir.

O primeiro e presente capítulo contem a introdução, onde se faz a contextualização do tema, destacando-se os objectivos pretendidos.

No segundo, terceiro e quarto capítulos, é feita uma revisão bibliográfica dos temas que se identificaram como sendo relevantes para a compreensão do tema.

Assim, no segundo capítulo apresenta-se o conceito de durabilidade e quais os critérios que são utilizados na sua caracterização. São também apresentados os modelos utilizados para a previsão da vida útil.

No terceiro capítulo, apresentam-se os mecanismos de deterioração do betão e a sua forma de actuação.

Já no quarto capítulo, apresentam-se as características dos RCD e os estudos já elaborados sobre o tema da durabilidade com agregados reciclados.

No quinto capítulo, apresenta-se o procedimento experimental utilizado. São apresentados e caracterizados os materiais, descritos os ensaios realizados e a confecção dos corpos de prova. São também apresentados os resultados dos vários ensaios laboratoriais realizados.

No sexto e último capítulo, apresentam-se as conclusões retiradas da investigação abordando as influências das variáveis estudadas, bem como as sugestões para futuros trabalhos.

# Capítulo 2 - A durabilidade do betão

## 2.1 Introdução

Vários são os autores e documentos normativos que mencionam a durabilidade, mas todos eles no geral, definem a durabilidade da mesma forma, como a capacidade que o material tem em manter o desempenho para o qual foi projectado num determinado intervalo de tempo, sem que exista necessidade de intervenção ou manutenção não previstas (Campos, 2006; Almeida, 2007).

Durante muito tempo, a resistência do betão, foi em detrimento da durabilidade, a característica mais importante a considerar no betão.

Contudo, caracterizar a durabilidade é um processo pouco objectivo pois depende de vários factores que atravessam todas as etapas da vida das estruturas, como por exemplo a forma, a composição das misturas (razão A/C), materiais utilizados e até mesmo das pessoas intervenientes no processo (proprietário, projectistas, construtores) entre outras. (Clifton e Naus, s.d; Helene, 1997).

De acordo com os estudos realizados por Helene referenciado em Campos (2006), este concluiu que a maior parte das patologias do betão se deve à fase de projecto, como se pode observar na seguinte figura:

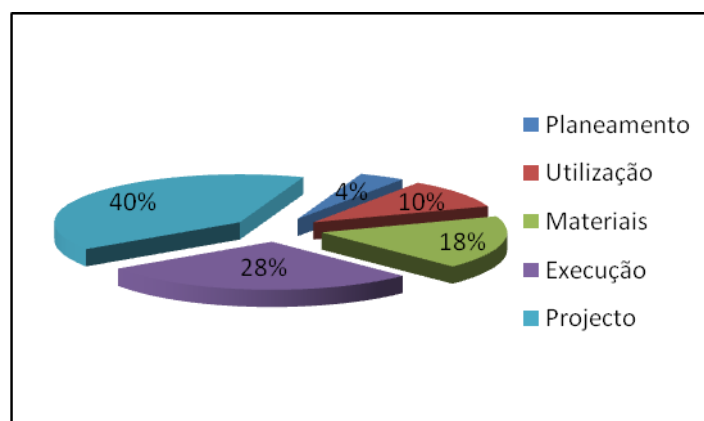


Figura 1 - Origem das patologias do betão (Adaptado de Campos, 2006)

Devido à dificuldade de caracterização da durabilidade, os estudos realizados acerca do estado das estruturas revela que estas apresentam níveis de degradação precoce muito elevados. Um dos principais exemplos dados pela bibliografia existente é o de nos Estados Unidos, 575.000 pontes estarem degradadas e das quais 40% a nível estrutural. Outros exemplos podem ser dados, como é o caso do Reino Unido, onde o valor previsto para reabilitação acende aos 620 milhões de euros. Já em Portugal, está previsto que nos próximos

anos, pelo menos metade do orçamento disponibilizado ao ministério das obras públicas seja aplicado em obras de reabilitação (Moreira, 2006).

Deste modo, existem autores, como por exemplo Ferreira (2006), que defende a criação de um projecto de durabilidade, onde se avalie a estrutura, não com base em medidas prescritivas, mas sim, utilizando os novos métodos de avaliação do desempenho e durabilidade. Como por exemplo, os métodos probabilísticos que apesar de ainda serem pouco utilizados, já demonstraram que conduzem a valores, mais objectivos para o tempo de vida útil do betão.

## 2.2 Critérios de durabilidade

Para a consideração da durabilidade em Portugal são considerados essencialmente dois documentos normativos essencialmente, a ENV 206 e o EN 1992 -1. O primeiro incide nos aspectos que dizem respeito à qualidade do betão, enquanto o EN 1992, tem em consideração as cargas e o ambiente de exposição do betão de acordo com a utilização prevista. Desta forma, os dois documentos apresentam a aplicação de uma série de medidas prescritivas.

Devido à multiplicidade de factores necessários para a caracterização da durabilidade, as normas têm essencialmente, para melhorar a resistência ao meio ambiente a chamada regra dos 4 c's, ou seja, para atingir estruturas duráveis é necessário ter em conta, a composição do betão, a compactação, a cura e o cobrimento.

Em relação à qualidade do betão em obra, a ENV 206, apresenta determinados critérios que devem ser respeitados. É de salientar, que estes critérios têm sempre em consideração a classe de exposição da estrutura e são eles:

- Tipo e classe de material constituinte;
- Máxima razão a/c;
- Mínima dosagem de cimento;
- Mínima classe de resistência à compressão do betão (opcional)

E quando relevante,

- Mínimo teor de ar no betão

Como se pode observar na seguinte tabela:

Tabela 1 - Exemplo de valores limite para a composição e propriedades do betão de acordo com a classe de exposição (Adaptada de ENV206, 2003)

		Classes de Exposição									
		Corrosão induzida por									
Sem risco		Carbonatação				Cloretos provenientes					
de ataque ou corrosão		XC1	XC2	XC3	XC4	Água do mar			Outras origens		
						XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3
Máxima Razão a/c	--	0,65	0,6	0,55	0,5	0,5	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45
Mínima Classe de Resistência	C12/50	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45
Mínima dosagem de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	--	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320

Intimamente ligado ao conceito de durabilidade está o conceito de vida útil, que se define, como o tempo para o qual a estrutura satisfaz os requisitos de durabilidade sem necessidade de manutenção.

Assim, de acordo com a finalidade da estrutura, é considerado um determinado tempo de vida útil.

Tabela 2 - Indicação do tempo de vida útil estimado para cada categoria de estruturas (Adaptado da EN 1990, 2002)

Categorias para o período de vida	Valores Indicativos do período de vida (anos)	Exemplos
1	10	Estruturas temporárias <sup>(1)</sup>
2	10 a 25	Partes estruturais substituintes
3	15 a 30	Estruturas agrícolas ou similares
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas comuns
5	100	Monumentos, pontes e obras não publicas

(1) Estruturas que podem ser desmontadas para serem reutilizadas não são consideradas temporárias

Tal como a ENV 206, que se baseia no ambiente de exposição, a EN 1992 também o faz, assim, é permitido ao projectista saber qual o tipo de acção dominante no meio ambiente (física ou química) que vai ocorrer na estrutura ao longo do seu tempo de vida e deste modo considerar determinados parâmetros, de modo a aumentar a protecção dos materiais e consequentemente da própria estrutura.

A EN 1992-1 definiu assim, que para cada meio ambiente a existência de uma determinada classe (Tabela 3).

Tabela 3 - Classe de exposição em função do ambiente de exposição (EN 1992-1)

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que podem ocorrer as classes de exposição
<b>1 Nenhum risco de corrosão ou ataque</b>		
X0	Para betão sem armadura ou elementos metálicos embebidos: todas as exposições excepto em situação de gelo/degelo, abrasão ou ataque químico Para betão com armadura ou elementos metálicos embebidos: muito seco	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente muito baixa
<b>2 Corrosão induzida por carbonatação</b>		
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente baixa Betão permanentemente submerso em água
XC2	Húmido, raramente seco	Superfícies de betão sujeitas a contacto prolongado com água Um grande número de fundações
XC3	Humidade moderada	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente moderada ou elevada Betão exterior protegido da chuva
XC4	Alternadamente húmido e seco	Superfícies de betão sujeitas a contacto com água, não incluídas na classe de exposição XC2
<b>3 Corrosão induzida por cloretos</b>		
XD1	Humidade moderada	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas Elementos de betão expostos a águas industriais contendo cloretos
XD3	Alternadamente húmido e seco	Elementos de pontes expostos a pulverizações contendo cloretos Pavimentos Lajes de parques de estacionamento
<b>4 Corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar</b>		
XS1	Exposto ao sal transportado pelo ar mas não em contacto directo com a água do mar	Estruturas próximas da costa ou na costa
XS2	Permanentemente submerso	Elementos de estruturas marítimas
XS3	Zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima	Elementos de estruturas marítimas
<b>5. Ataque gelo/degelo</b>		
XF1	Saturação moderada em água, sem produto descongelante	Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF2	Saturação moderada em água, com produto descongelante	Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar
XF3	Saturação elevada em água, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF4	Saturação elevada em água com produtos descongelantes ou com água do mar	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes Superfícies de betão expostas a pulverizações directas contendo produtos descongelantes e expostas ao gelo Zonas sujeitas aos efeitos da rebentação de estruturas marítimas expostas ao gelo
<b>6. Ataque químico</b>		
XA1	Ambiente químico ligeiramente agressivo, de acordo com a EN 206-1, Quadro 2	Terrenos naturais e água no terreno
XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo, de acordo com a EN 206-1, Quadro 2	Terrenos naturais e água no terreno
XA3	Ambiente químico altamente agressivo, de acordo com a EN 206-1, Quadro 2	Terrenos naturais e água no terreno

Com a classe definida, é possível ao projectista definir qual a altura da camada de recobrimento do betão, consoante a classe estrutural do betão.

O recobrimento ou cobrimento como é muitas vezes denominado na bibliografia pesquisada, é muito importante na resistência ao agente agressor. É a camada de recobrimento que permite a protecção da armadura no caso do betão armado.

O recobrimento é dado pela seguinte equação:

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \quad (1)$$

Onde  $C_{min}$  deve respeitar as condições ambientais e de aderência entre os materiais. E  $\Delta C_{dev}$ , é uma variação que representa alterações que possam existir na fase de execução.

A tabela seguinte apresenta um exemplo para o cálculo de  $C_{min}$ :

Tabela 4 - Valores de recobrimento mínimo (Adaptado da EN - 1992-1)

Classe Estrutural	Classe de Exposição de acordo com o Quadro 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Para além das medidas normativas, que têm que ser obrigatoriamente aplicadas, o projectista em conjunto com o dono de obra, pode considerar medidas adicionais para aumentar a resistência ao meio ambiente. É o caso da escolha do tipo de cimento e agregados utilizados, uma vez que existem vários tipos de cimento que são mais eficazes num determinado ambiente que outro que possa ser mais barato mas, não proteger de modo eficaz a estrutura. O uso de materiais de revestimento é também uma mais-valia para tornar o betão mais resistente à entrada de agentes agressivos.

## 2.3 Previsão da vida útil de estruturas de betão

Sabe-se que os danos nas estruturas se devem essencialmente à fase de projecto (Campos, 2006). Nesta fase verifica-se se as estruturas cumprem determinadas condições de segurança e funcionalidade. Para isso, é necessário ter em conta os materiais utilizados, cargas aplicadas, entre outros.

Pode dizer-se de forma geral que existem 4 métodos que permitem fazer esta análise, e que são apresentados seguidamente.

### 2.3.1 Método determinístico

São modelos que apesar de ainda serem utilizados, já estão a ser substituídos por outros que permitem obter melhores resultados. Este tipo de modelo considera que a durabilidade do betão depende essencialmente da forma como se dá a entrada e transporte dos agentes agressores no betão. Deste modo, apenas têm em consideração a qualidade do betão e a camada de recobrimento (Campos, 2006).

Um dos métodos mais conhecidos deste tipo é o modelo de Tuutti, este, considera que as principais causas de degradação se devem à carbonatação e penetração de cloretos, que originam a despassivação da armadura. O modelo considera dois tempos de vida, o tempo de vida útil e o tempo de vida residual. Em relação ao tempo de vida útil, este caracteriza-se como sendo o tempo, onde a estrutura, satisfaz os requisitos para a qual foi projectada. Como se pode observar na Figura 2, este é dividido em dois períodos, o período de iniciação, quando se dá a entrada da agressão no betão e o período de propagação, em que existe o desenvolvimento dessa mesma agressão no interior do betão. O tempo de vida residual inicia-se quando existe uma diminuição das qualidades do betão, sendo necessárias reparações para manter o nível desejado. Como seria se de esperar à medida que o tempo vai passando o grau de degradação aumenta (Coito, 2008).

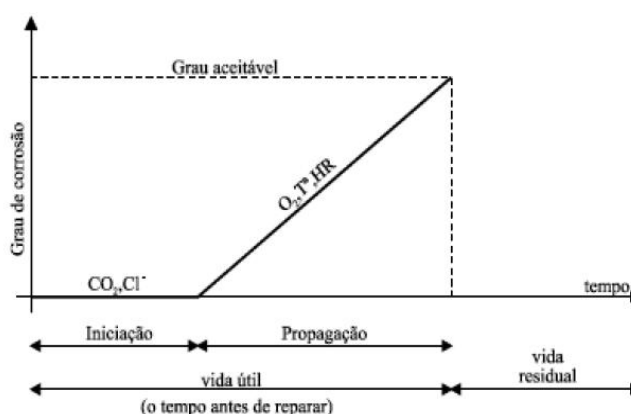


Figura 2 - Modelo de degradação de Tuutti (Coito, 2008)

### 2.3.2 Método semi - probabilístico

É o método mais utilizado em Portugal, sendo a aplicação feita de acordo com o RSA e a EN 1991. Este método já tem em consideração o valor das acções e da resistência da estrutura. Estes valores são calculados com base em valores médios e afectados por coeficientes de segurança. Já existe uma aproximação ao tempo de vida útil da estrutura. A verificação é feita em relação a um estado limite, seja de utilização ou de serviço.

O estado de limite de utilização (ELU) atinge-se quando a estrutura apresenta degradação severa, ou seja, atinge a rotura. Em relação ao estado limite de serviço (ELS), a estrutura apresenta níveis de degradação inferiores ao ELU, como por exemplo fendilhação ou deformação, não levando de imediato à rotura da estrutura.

Para a verificação dos estados limites, é feita uma análise, onde para cada acção existente na estrutura, existe uma determinada resposta:

$$S_d \leq R_d \quad (2)$$

Em que:

Sd: Valor de cálculo do esforço actuante

Rd: Valor de cálculo do esforço resistente

Apesar da utilização frequente e das normas aconselharem a sua aplicação, este método apresenta algumas limitações, que se verificam no estudo de estruturas mais complexas, como o caso de estruturas com comportamento não linear. Não permite também, avaliar a segurança em estruturas já existentes (Neves *et al*, 2001).

### 2.3.3 Método probabilístico simplificado

Ao contrário do método descrito anteriormente, este já pode ser utilizado em estruturas existentes. É usado em estruturas especiais, tal como barragens, pontes, centrais nucleares, entre outras. Tem também a vantagem de poder ser aplicado aos materiais (Andrade, 2005).

A estrutura é analisada, tendo em consideração o impacto social, ecológico e económico, isto é, os estados limites são os mesmos, mas a forma de os calcular é diferente. É introduzido um novo estado limite, o estado limite de robustez.

Para o estado de limite último, o índice de confiabilidade depende do custo referente ao aumento da segurança da estrutura e das consequências da rotura, que vão desde custos económicos até a perda de vidas humanas. Indicando até, que há casos em que a estrutura não deve ser construída.

Em relação ao estado limite de serviço, são considerados índices de fiabilidade de acordo com o custo associado ao aumento de segurança, existindo valores que se aplicam conforme os custos apresentados sejam reduzidos, médios ou elevados.

O estado limite de robustez é calculado devido ao facto de haver alguma situação não considerada em projecto, como o caso de um acidente, este permite verificar se a estrutura, devido ao reparo ou substituição de algum elemento continua a verificar os ELU e ELS.

As acções são calculadas, tendo em conta as variações no tempo e no espaço, em vez de considerarem apenas uma situação mais gravosa, como acontece na aplicação do RSA ou EC1.

A probabilidade de rotura é calculada tendo por base um índice de confiabilidade, ou seja, quanto maior for o valor deste índice, menor será a probabilidade de estrutura colapsar (Andrade, 2005).

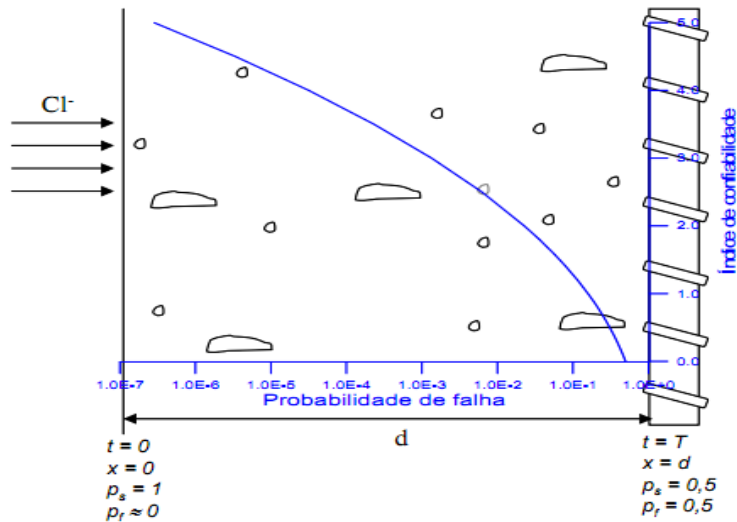


Figura 3 - Relação entre o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha (Andrade, 2005)

A Figura 3 representa um estudo de caso, através do método probabilístico simplificado, para verificar a agressão dos cloretos. Como se pode observar, no momento zero, em que a estrutura é colocada no meio agressivo, a probabilidade de esta chegar à rotura é praticamente nula. Dado que, não houve contacto do agente corrosivo com a armadura. Mas ao longo do tempo essa probabilidade diminui, e o índice de confiabilidade também, indicando que a probabilidade de rotura é maior ao longo do tempo.

São feitos vários estudos em relação a aplicação deste método, um dos mais conhecidos é o de simulação de Monte Carlo. O método tem em consideração a 2ª lei de Fick e permite estudar a previsão da vida útil das estruturas de betão, tendo como agente agressivo os cloretos e avaliação da despassivação da armadura.

O estudo da agressão de cloretos, é um método onde as variáveis a considerar são poucas e a aplicação do modelo é simplificada. Pois apenas se considera o coeficiente de difusão (obtido em testes laboratoriais) e a condição de exposição (concentração de cloretos). A partir destes valores é possível calcular o índice de confiabilidade em função do tempo e prever qual o tempo de vida útil da estrutura.

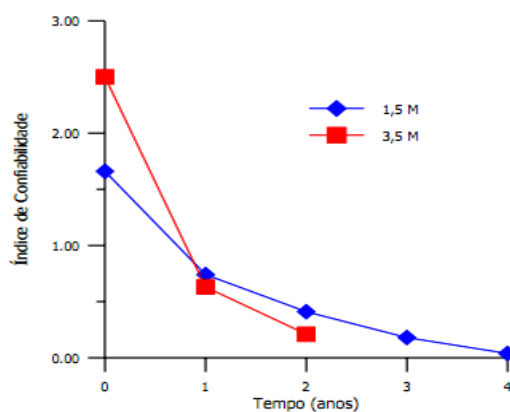


Figura 4 - Forma de apresentação dos índices de confiabilidade (Andrade, 2005)

De acordo com o estudo realizado por Andrade, e para as condições estudadas, verificou-se que a estrutura tinha aproximadamente 4 anos de vida útil. Desta forma, podem ser feitos outros estudos de modo a aumentar a resistência da estrutura, a durabilidade e consequentemente o tempo de vida útil.

#### 2.3.4 Método puramente probabilístico

As variáveis são descritas em termos probabilísticos, em termos de média, desvio padrão e, ou covariância. Desta forma, é um método onde é necessária uma maior quantidade de informação, de forma a obter distribuições estatísticas que permitam chegar a resultados específicos.

A sua aplicação é extremamente limitada, devido à elevada complexidade na sua aplicação.

## 2.4 Conclusão

Apesar de a durabilidade se apresentar como um conceito simples, a verdade é que, obter estruturas duráveis depende de inúmeros factores, entre os quais se evidenciam a classe de exposição e qualidade do betão utilizado.

A durabilidade, que foi durante algum tempo um pouco secundarizada em relação à resistência mecânica, tem vindo ao longo do tempo a assumir-se como uma característica principal quando se projecta uma estrutura de betão.

Para este desenvolvimento muito tem contribuído o estudo dos modelos de previsão da durabilidade, que deixaram desde há muito tempo de se basear apenas na experiência dos engenheiros e construtores, para passarem a reproduzir matematicamente a forma como os agentes agressivos, principal factor na caracterização da durabilidade, penetram e se movimentam ao longo da estrutura de betão. Obtendo desta forma resultados que permitem um maior conhecimento do comportamento da estrutura ao longo do da sua vida, como também do próprio tempo de vida útil da estrutura.

# Capítulo 3 - Mecanismos de deterioração do betão

## 3.1 Introdução

Como já vimos no capítulo anterior, a durabilidade depende de vários factores, entre os quais a classe de exposição assume um papel de extrema relevância.

A deterioração do betão dá-se então devido à interacção dos constituintes do betão com o meio exterior, processos químicos, ou então devido acções que são aplicadas na própria estrutura, ou seja, por processos físicos. Há ainda a considerar os processos biológicos que se devem à actuação de microrganismos. Microrganismos estes, que podem desencadear processos físicos ou químicos (Torgal e Jalali, 2008).

A dificuldade que surge na avaliação dos mecanismos de deterioração do betão é saber qual a origem de determinada patologia, isto porque, qualquer agente agressivo provoca geralmente a fissuração do betão e destacamento da camada de recobrimento. (Ferreira, 2000).

Na seguinte tabela são apresentados alguns dos mais conhecidos factores de degradação do betão.

Tabela 5 - Agentes agressivos do betão (Adaptado, Torgal e Jalali, 2008)

Factor de Degradação	Processo	Degradação
<b>Mecânicos</b>		
Carregamento estático	Deformação	Deflexão, fendilhação e rotura
Carregamento cíclico	Fadiga, deformação	Deflexão, fendilhação e rotura
<b>Biológico</b>		
Micro organismos	Produção de ácido	Lixiviação
Bactérias	Produção de ácido	Lixiviação
<b>Químicos</b>		
Água pura	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido e gases ácidos	Neutralização	Despassivação do aço
Dióxido de Carbono	Carbonatação	Despassivação do aço
Cloretos	Penetração, destruição da camada de despassivação	Despassivação do aço
Despassivação do aço + H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	Corrosão	Expansão do aço

Tabela 6 - Agentes agressivos do betão (Continuação, Torgal e Jalali, 2008)

Sulfatos	Pressão dos cristais	Desagregação do betão
Agregado (sílica) + álcalis	Reacção da sílica	Expansão, desagregação
Agregado (carbonato) + álcalis	Reacção do carbonato	Expansão, desagregação
<b>Físicos</b>		
Variação da temperatura	Expansão/ contracção	Deformação restringida
Variação de humidade	Retracção e expansão	Deformação restringida
Baixa temperatura + água	Formação de gelo	Desagregação do betão
Sal descongelante + geada	Transferência de Calor	Escamação do betão
Gelo (mar)	Abrasão	Escamação, fendilhação
Transito	Abrasão	Desgaste e rotura
Água corrente	Erosão	Danos superficiais
Água turbulenta	Cavitação	Cavidades
<b>Electromagnéticos</b>		
Electricidade	Corrosão	Expansão do aço, perda de secção e de aderência
Magnetismo	Corrosão	Expansão do aço, perda de secção e de aderência

## 3.2 Mecanismos de transporte

No que diz respeito a este tema, pode dizer-se que o factor mais importante para a propagação dos agentes agressivos é a matriz cimentícia do betão. Isto porque, esta vai influenciar a entrada de agentes e essencialmente a velocidade do seu movimento (Levy e Helene, 2004).

São consideradas três formas de entrada de agentes agressivos, permeabilidade, absorção capilar e difusão.

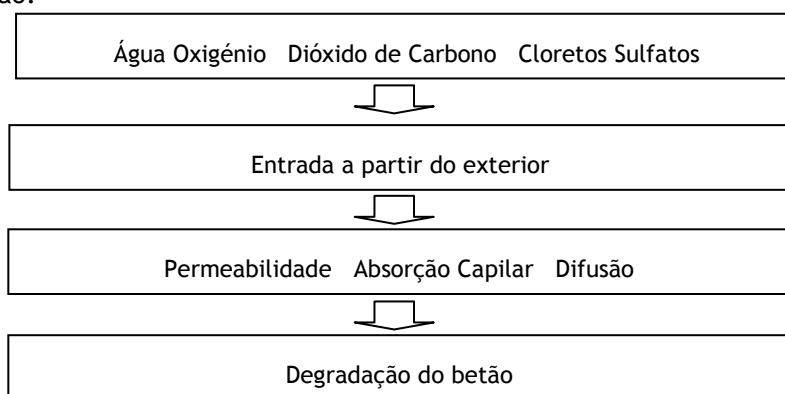


Figura 5 - Esquema da entrada de agentes agressivos no betão (Adaptado de Nanukuttan e Póvoa, 2010)

A permeabilidade é a propriedade que o material tem em se deixar atravessar por um fluido ou gás, devido a uma diferença de pressão. O movimento das substâncias é regido pela lei de Darcy.

Este parâmetro depende essencialmente da razão A/C (Figura 6). Desta forma, para tornar o betão mais resistente, devem usar-se razões A/C mais pequenas.

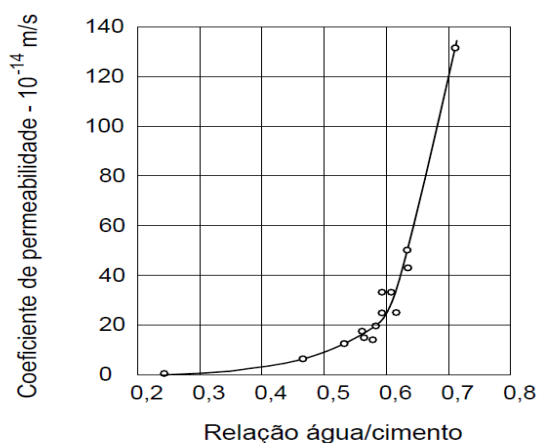


Figura 6 - Influência da relação A/C na permeabilidade (Campos, 2006)

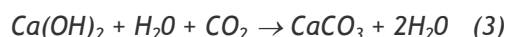
A absorção capilar deve-se à entrada de água no betão, devido as diferenças de pressão existentes entre a superfície do líquido e a superfície do betão. Este tipo de entrada de substâncias ocorre principalmente quando a estrutura está sujeita a ciclos de molhagem e secagem.

É através da difusão que se dá a entrada de gases no betão. Os gases mais prejudiciais são, o oxigénio, pois ajuda nas reacções de degradação do betão e o dióxido de carbono que provoca a carbonatação. A entrada dos gases deve-se à existência de gradientes de concentração.

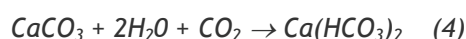
### 3.3 Ataques químicos

#### 3.3.1 Carbonatação

A carbonatação deve-se à entrada do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera no interior do betão. Esta entrada faz-se por difusão. O CO<sub>2</sub> na presença de água reage com os elementos da pasta de cimento, ou seja, a água reage com o hidróxido de cálcio, como pode ser exemplificado na seguinte equação:



O produto de reacção formado é o carbonato de cálcio, que reage com água libertada e com o dióxido de carbono livre:



À medida que estas reacções vão acontecendo, a alcalinidade do betão vai sendo reduzida. Esta redução é feita do exterior para o interior do betão, formando-se três zonas de carbonatação. A zona não carbonatada, onde não houve entrada de  $\text{CO}_2$  e o pH é aproximadamente 13. Relativamente à zona carbonatada, já houve consumo dos iões hidróxidos e o pH é inferior a 9. Entre estas zonas existe uma zona intermédia, onde se inicia a reacção da carbonatação e o pH começa a reduzir. A delimitação destas zonas, tal como a própria reacção não é visível a olho nu, sendo detectada quando o nível de degradação já é elevado (Coito, 2008 e Campos, 2006).

A reacção e a velocidade a que ela se propaga, dependem de vários factores, que vão desde a composição da mistura, até a presença de água no meio onde está inserida a estrutura.

Acontece, que num betão completamente saturado ou seco, esta reacção não se verifica, uma vez que o dióxido de carbono necessita de água para reagir (Campos, 2006).

Visto que, o dióxido de carbono entra no betão por difusão, a matriz porosa influencia o modo como a reacção se desenvolve, logo a razão A/C é um factor principal. Por exemplo, para uma razão A/C de 0,6, a profundidade de carbonatação, pode chegar a 15mm em 15 anos, enquanto para uma razão A/C igual a 0,45, a profundidade de carbonatação atinge os 15mm, mas em 100 anos. (Torgal e Jalali, 2008)

Os principais danos causados por esta reacção no caso do betão armado fazem-se sentir tanto ao nível do betão como do aço. Tendo em conta que a diminuição da alcalinidade provoca a despassivação da armadura, que é um dos principais factores de degradação no aço. Em relação ao betão, provoca fissuração, expansão e destacamento da camada de recobrimento do betão (Simas, 2007).



Figura 7 - Deterioração do betão por acção da carbonatação (Simas, 2007)

Apesar de ser uma reacção agressiva, esta apresenta algumas vantagens, segundo Neville (1995), uma vez que a formação do  $\text{CaCO}_3$ , é uma reacção expansiva, que ao ser desencadeada irá ocupar um volume maior que  $\text{Ca(OH)}_2$ , diminuindo a porosidade, e a água

libertada ajuda na hidratação do cimento, aumentando desta forma a resistência e diminuindo a permeabilidade.

A carbonatação deve-se a vários factores que vão desde a porosidade, permeabilidade do betão e teor de hidróxido de cálcio. Quanto menos poroso, menos permeável será, sendo desta forma, mais resistente à carbonatação. Há que ter em atenção o uso de adições, no caso do BAC, onde se verifica que a utilização de filer calcário pode aumentar a profundidade de carbonatação (Shutter *et al*, 2008; Figueiras, 2006).

No mercado existem produtos que permitem obter bons resultados em termos de protecção do betão, como é o caso de tintas, que permitem uma protecção da superfície e também o uso de argamassas cimentícias modificadas que são resistentes à entrada de CO<sub>2</sub> (Simas, 2007).

### 3.3.2 Ataque dos ácidos

É um ataque químico, neste caso os ácidos decompõem os produtos de hidratação do cimento, formando sais (Hovder e Moser, 2004).

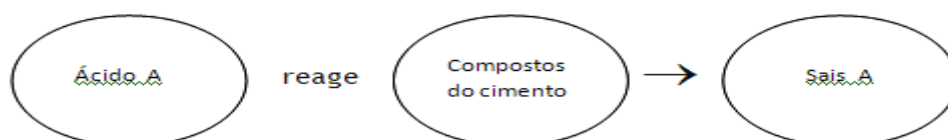


Figura 8 - Formação de sais devido à acção dos ácidos (Adaptado de Hovder e Moser, 2004)

A degradação que ocorre no betão devido ao ataque dos ácidos não é sempre igual. Uma vez que esta depende das características dos ácidos e se estes são orgânicos ou inorgânicos.

No caso dos ácidos orgânicos, como por exemplo, o ácido acético e láctico, existe a formação de uma massa que dissolve o cimento originando perda de resistência. Enquanto que os inorgânicos como é o caso dos ácido carbónico ou sulfúrico, por exemplo, provocam reacções expansivas, que levam à rotura permanente do betão (Ferreira, 2000).



Figura 9 - Degradação do betão devido ao ataque dos ácidos (<http://www.revistatechne.com.br/>)

Também, a classe de exposição é também um factor importante, uma vez que betões sujeitos a ciclos de molhagem/secagem, ou imersos têm maior apetência para sofrer um ataque de ácidos. Um exemplo recorrente de um ciclo de molhagem/secagem é o caso das chuvas que apresentam cada vez mais um pH menor, devido às alterações climáticas existentes.

É também relevante referir, que quanto menor o pH do agente agressivo, mais severo será o ataque (Campos, 2006;Hovder e Moser, 2004).

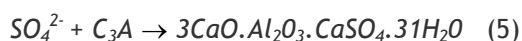
Como em relação a qualquer outro agente agressivo, o betão é mais ou menos resistente, consoante a sua composição, segundo Neville (Campos, 2006), as adições utilizadas vão influenciar a resistência do betão. No caso do uso de adições calcárias, o betão tem mais probabilidade de sofrer um ataque, ao contrário do betão com o uso de pozolanas, que apresenta uma maior resistência.

De encontro ao concluído por Neville, que refere a importância das utilizações utilizadas na resistência a este tipo de ataque, vai também o estudo publicado pelo comité da RILEM sobre a durabilidade do betão, TC 205- DSC (Shutter *et al*, 2008) onde se fez a comparação do comportamento de determinados tipos de adição para determinados tipos ácido verificando-se que, no caso do ácido sulfúrico, o uso de cinzas volantes em substituição ao pó calcário aumentava a degradação do betão. Já no caso dos ácidos láctico e acético, que são bastante danosos nos pavimentos de fábricas de leite, o uso de cinzas volantes e pó calcário de dimensões mais finas, levam a uma menor perda de massa.

### 3.3.3 Ataque dos sulfatos

Os iões sulfatos encontram-se nos componentes do betão e maioritariamente nos solos (Moreira *et al*, 2007).

O ataque acontece devido à reacção que existe entre os sulfatos e o aluminato tricálcico, na presença de água (H<sub>2</sub>O) e do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>):



Este tipo de reacção é expansiva, o que provoca um aumento de volume de duas vezes e meia maior que o inicial. Desta forma, são originadas fissuras que aumentam a permeabilidade do betão e provocam posteriormente perda de resistência.



Figura 10 - Ataque de sulfatos (<http://icc.ucv.cl/hormigon/fotospat.html>)

O ataque é mais ou menos agressivo, dependendo da permeabilidade do betão, desta forma existem normas que limitam o valor da relação A/C. Uma das formas para aumentar a resistência a este tipo de ataque são o aumento da camada de recobrimento, o uso de adições, entre outros. Em relação ao uso de adições, verifica-se que, pozolanas e escórias aumentam a resistência do betão.

Os fenómenos mais conhecidos de ataques de sulfatos são identificados através da formação da etringite e taumasite. A diferença entre estes fenómenos reside no facto de reagirem com sulfatos de diferente tipo.

A taumasite ocorre em estruturas em contacto com o solo, como por exemplo lajes de fundação. Neste caso o betão vai sendo consumido e forma-se a taumasite, um material mole que degrada o betão.

Como se trata de reacções em elementos de estruturas que estão soterradas, não é possível fazer uma manutenção do betão. (Coutinho, 2001)

Em relação a etringite, esta ocorre geralmente em betões onde houve problemas de temperatura durante a fase de cura. Há formação de gesso, que provoca um aumento de volume no betão, levando assim à fissuração do betão (Moreira et al, 2007).

Comparando o betão tradicional com o betão auto compactável, a forma como a reacção se dá é diferente, uma vez que o BAC, com uma microestrutura mais densa, torna-se menos permeável, o que torna o ataque mais lento. Mas o uso de adições, frequentemente utilizadas no BAC como o fíler calcário, deve ser bem ponderado, uma vez que pode tornar a estrutura mais vulnerável em locais de baixas temperaturas.

#### **3.3.4 Ataque dos cloretos**

É considerado um dos piores agentes de agressão, uma vez que provoca a corrosão da armadura, devido à despassivação desta. Os cloretos entram no betão por absorção capilar ou por difusão (Coito, 2008).

Mas podem existir situações em que os cloretos já se encontrem na própria mistura de betão, no caso de utilização de água imprópria, ou através do uso de determinadas adições.

A água do mar é a maior fonte de cloretos, e desta forma, são necessárias precauções especiais para quando o betão é exposto a estes ambientes. Esta preocupação deve-se ao facto de ao estar inserido num ambiente marítimo, Neste tipo de ambientes a estrutura está sujeita a diferentes ambientes agressivos, uma vez que há zonas submersas e outras que estão num ciclo de molhagem/secagem. Assim, a forma como o ataque se dá é diferente, pelo facto de que existem zonas de molhagem/secagem que podem sofrer congelamento, o que já não acontece com uma zona que esteja completamente submersa (Campos, 2006).

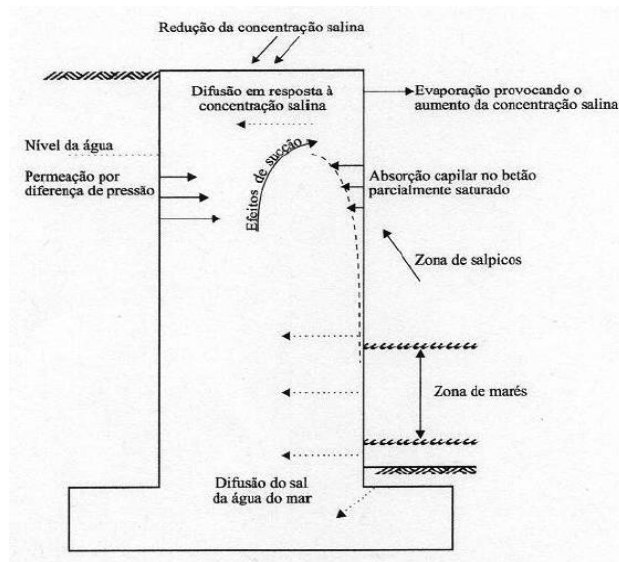


Figura 11 - As diversas condições de exposição de estruturas marítimas (Coito, 2008)

Para acontecer a reacção dos cloretos com o betão, é necessária a presença de água e oxigénio, sendo este último o principal factor (Campos, 2006).

Como já foi dito no início esta reacção provoca essencialmente a despassivação da armadura, que leva à fissuração e destacamento do betão (Campo, 2006).



Figura 12 - Ataque dos cloretos (<http://www.altoqi.com.br>)

Sabe-se que a presença dos cloretos no betão se deve a diversos factores, que vão desde a classe de exposição até aos materiais utilizados na composição da mistura de betão. Sabe-se também que os cloretos presentes no betão reagem com os compostos hidratados do cimento, levando a um maior desgaste da estrutura, assim, para prevenir ou diminuir a velocidade deste ataque, deve ter-se em atenção o tipo de cimento utilizado. Uma estrutura menos porosa e menos permeável será mais resistente a este tipo de agressão. Assim, a utilização de betão auto-compactável é uma mais-valia, uma vez que, como tem na sua composição uma maior quantidade de materiais finos, torna a estrutura do betão mais densa e desta forma mais resistente a entrada de cloretos (Shutter *et al*, 2008; Neves *et al*, 2001).

### 3.3.5 Reacção álcalis - agregado

É uma reacção química que ocorre entre a sílica e os agregados do betão. A reacção que ocorre é expansiva, devendo-se à formação de um gel no interior dos poros, provocando um aumento de volume. Devido a esta alteração, o betão sofre fissuração, levando posteriormente ao destacamento e à perda de aderência do material. É uma reacção química muito lenta, que pode em certos casos levar 5 a 12 anos, até que existam modificações na estrutura que apontem para a ocorrência deste tipo de reacção (Campos, 2006; Ferreira, 2000; Swamy, 2003).

Este tipo de reacção é mais perigosa em estruturas de grande porte tal como barragens ou pontes.



Figura 13 - Fissuração provocada pela reacção álcalis (<http://www.revistatechne.com.br>)

Como na maior parte das reacções químicas que ocorrem no betão, a presença de humidade é um factor importante para que a reacção aconteça, para além, depende também da reactividade dos agregados e da quantidade de álcalis presente no cimento.

Devido ao agregado com que a sílica reage podem considerar-se três reacções principais:

- Reacção álcalis - sílica;
- Reacção álcalis - silicato;
- Reacção álcalis - carbonato.

As duas primeiras reacções são muito parecidas, havendo a formação de um gel. Mas enquanto na primeira a sílica reage com os iões hidroxilos. Na segunda há uma reacção mais lenta, entre os iões hidroxilos e a sílica presente nos feldspatos e rochas sedimentares. Esta é uma das reacções mais frequentes nas barragens. O gel que se forma, tem a capacidade de absorver toda a humidade existente, o que faz com que exista um aumento de volume para a qual a estrutura não está preparada e que leva posteriormente à origem de fissuras. Outra condicionante, na formação do gel, é a temperatura, que vai influenciar a velocidade de reacção. Na terceira ao contrário das duas primeiras, não há formação de gel. Os iões

hidroxilo reagem com o carbonato de magnésio de algumas rochas provocando uma desagregação dos agregados, que enfraquecem desta forma, a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, levando à perda de aderência entre estes, provocando posteriormente a expansão do betão (Swamy 2003).

De forma a prevenir ou diminuir a intensidade deste ataque, devem utilizar-se cimentos com uma percentagem igual ou inferior a 0,6% de teor de álcalis. Como esta medida não é totalmente eficaz, deve-se também optar pelo uso de agregados não reactivos (Lima *et al*,s.d).

Segundo Swamy (2003), a existência deste tipo de reacção não é tão dependente da condição de exposição, mas sim do tipo de reacções químicas que vão ocorrendo entre os componentes do cimento e os agregados. Assim, deve ser dada uma atenção especial à reactividade das partículas. A reactividade está relacionada com a temperatura e com o tamanho dos agregados, desta forma, o uso de materiais finos, aumenta o risco de expansão do betão. Pode também, para tentar-se diminuir a ocorrência deste tipo de reacções, usar diferentes tipos de agregados, como uso de pozolanas e cinzas volantes, que são um tipo de adição não reactiva (Lima *et al*,s.d).

Outro critério a considerar é a razão A/C, pois como se sabe, a humidade também influencia este tipo de agressão, é também necessário ter em atenção estruturas que estejam em contacto directo com a água (Levy, 2001).

## **3.4 Ataques físicos**

### **3.4.1 Desgaste superficial**

Tal como o próprio nome indica, trata-se da perda da camada superficial do betão, este é um processo que não implica o desgaste a nível estrutural, mas sim ao nível do desempenho da estrutura. Pode ocorrer de três formas: abrasão, erosão e cavitação.

A abrasão deve-se ao atrito seco, ou seja, deve-se ao contacto da estrutura com outro tipo de material sólido. É o que acontece por exemplo, nas vias de comunicação quando há movimentos de carros e ou pessoas. A perda de superfície deve-se aos inúmeros ciclos de repetição deste tipo de situações. Quanto mais duro for o betão, mais resistente este será. Logo deve ter-se em consideração o uso de agregados com maior dureza (Oyamada, s.d).

Uma forma de diminuir a agressividade destes movimentos é a eliminação da vibração do betão, uma vez que esta faz com que os agregados maiores fiquem em camadas mais interiores do betão. Em vez de ficarem mais próximas da superfície, onde permitem que o betão seja mais resistente. O betão a usar neste tipo de situações deve ser um betão resistente, com classe superior a C30/37 (Moreira *et al*, 2007).

Logo o BAC, enquadra-se com este tipo de características e é portanto uma mais-valia para os betões expostos a estes meios agressivos.

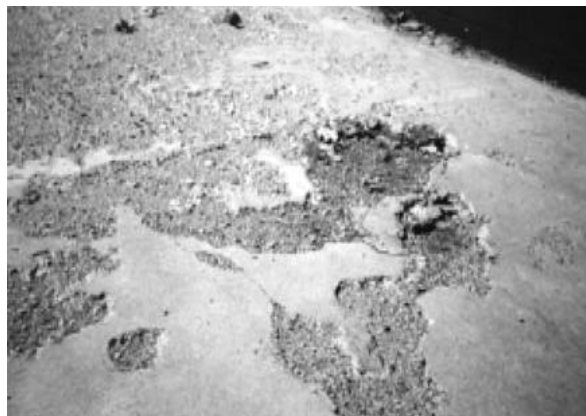


Figura 14 - Desgaste da superfície do betão (Oyamada, s.d.)

Já a erosão, deve-se ao transporte de partículas através da água. É o que acontece por exemplo, em pilares de pontes, ou em barragens (Oyamada, s.d).

Este tipo de desgaste depende da forma e tamanho das partículas, para além da velocidade da água. Para minimizar este efeito, deve ser considerado na fase de escolha de materiais, agregados com partículas maiores e com maior dureza.

Na cavitação, dá-se o rebentamento de bolhas de ar, que se deslocam no fluxo de água. Quando se dá o rebentamento de bolhas em zonas de maior pressão, há libertação de muita energia para uma área muito pequena, o que vai provocar um maior desgaste na zona de rebentamento.

Este tipo de processo ocorre essencialmente em condutas. E deve-se às irregularidades existentes na superfície do betão, e em zonas onde há uma mudança de declive.

### 3.4.2 Fissuração

As fissuras não são por si só um agente agressivo, o que acontece, é que estas são provocadas por diferentes agentes agressivos. O betão ao fissurar facilita a entrada do agente agressor, proporcionando deste modo, o desenvolvimento da agressão no betão.

Assim sendo, pode dizer-se, de forma geral, que são três as causas principais de fissuração, (Figura 15) para além da fissuração que pode surgir devido às características do próprio material (Campos, 2006).

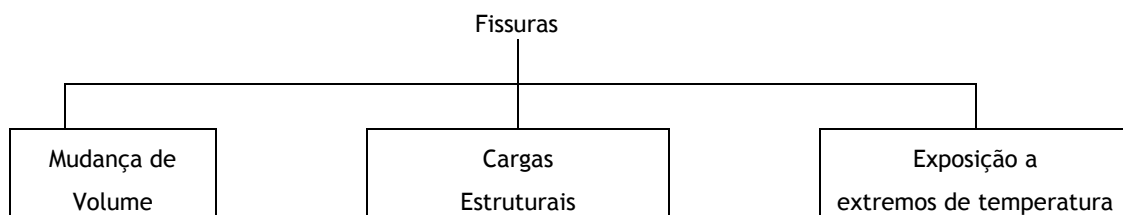


Figura 15 - Causas da fissuração (Adaptado de Campos, 2006)

Para o utilizador comum, as fissuras funcionam com um aviso sobre o estado da estrutura. Logo, e, devido também ao facto de as fissuras poderem ser originadas por vários factores, a EN 1990, prevê uma abertura limite para a fissura.

### 3.4.3 Gelo/degelo

Este tipo de agressão ocorre essencialmente em países frios. Neste caso, o congelamento do betão provoca um aumento de volume, cerca de 9% superior ao inicial, o que causa fissuração e destacamento do betão (Figura 16). Ao descongelar, vai surgir uma rede de poros que permite o movimento de outras substâncias que deterioram o betão. A repetição destes ciclos vai diminuindo a resistência do betão.



Figura 16 - Destacamento do betão devido à acção do gelo (<http://www.concrete-experts.com/>)

Outro dos factores que aumenta a velocidade deste tipo de ataque, é a utilização de sal nas estradas e pontes, que têm ao longo dos anos apresentando níveis elevados de degradação. A resistência a este tipo de ataque, tal como na maioria das agressões do betão, depende maioritariamente da estrutura cimentícia do betão, ou seja da porosidade, que por sua vez depende da relação A/C e da composição do betão.

Uma das soluções mais utilizadas de maneira a minimizar este problema é a utilização de agentes introdutivos de ar, que vão preencher os poros do betão, impedido desta forma a deposição de água nos poros.

#### 3.4.4 Fogo

O fogo não é considerado normalmente como uma forma de degradação de estruturas, uma vez que, este processo ocorre essencialmente devido a acidentes. Desta forma, o que se pretende de um material como o betão, não é saber se este é resistente, mas sim, estudar o seu comportamento nesta situação. O betão é considerado um material resistente ao fogo. Ao contrário de outros materiais como a madeira, não é combustível e não emite gases tóxicos durante a combustão como o caso do plástico. O uso de armaduras diminui a capacidade de resposta, pois estas não possuem a mesma aptidão do betão (Campos, 2006).

Desta forma, há critérios que se pretendem assegurar no caso de o betão sofrer um incêndio:

- Capacidade de carga;
- Resistência ao calor de modo a não haver condução de calor até ao aço;
- Resistir à penetração das chamas.

A capacidade que o betão tem de resistir ao fogo também depende dos agregados utilizados, segundo Neville (1995), os betões ricos em sílica, provocam perdas menores de força resistente, em comparação com o fíler calcário.

Como curiosidade, o uso de água na extinção de incêndios, provoca gradientes de pressão o que provoca, reduções da capacidade resistente do betão.

Mas também a microestrutura do betão tem papel importante nesta capacidade de reacção do betão, desta forma, como a microestrutura do betão auto compactável é diferente do betão dito convencional, é necessário ter em consideração algumas diferenças no seu comportamento conforme identificado no documento final sobre a durabilidade do betão auto-compactável TC 205- DSC da RILEM (Shutter *et al*, 2008).

Desta forma devem ser consideradas as mesmas medidas prescritivas que se usam no tratamento de betões de alto desempenho, uma vez que têm características idênticas.

É de notar alguma preocupação em relação às adições de fíler calcário, frequentemente utilizado na composição do betão, visto este, sofrer decomposição a 750°, logo devem ser tomadas medidas no caso de a estrutura vir a ser exposta a temperaturas superiores.

#### 3.4.5 Diferenças de temperatura

A temperatura é um factor muito importante que deve ser tido em conta na fase de projecto de estrutura, uma vez que os estudos que se realizam em laboratório muito dificilmente espelham as características a que a estrutura estará sujeita no ambiente exterior, tais como, a humidade, o vento, entre outros (Neville, 1995).

É preciso também referir, que os projectistas enfrentam outros obstáculos, pois assiste-se a variação constante das condições climáticas, e o que é aplicável hoje, pode não ser amanhã.

A temperatura influencia principalmente a cura do betão. Assim, as altas temperaturas vão provocar uma cura mais rápida, e os produtos de hidratação não terão tempo suficiente para se desenvolverem, diminuindo ao longo do tempo a resistência do betão.

Goto e Roy, referenciados em Neville (1995), concluíram, após a realização de estudos acerca deste tema que a cura a temperaturas elevadas provoca o aumento da rede porosa do betão, comparativamente a temperaturas de cura normais. Este facto, permite um maior movimento das substâncias agressivas no interior do betão.

Em relação às baixas temperaturas, como já foi referido surge o problema dos ciclos gelo/degelo que levam a furação do betão e à perda de resistência ao longo da vida do betão.

#### **3.4.6 Carregamento directo**

É um factor de deterioração que depende em grande parte do utilizador, uma vez que há situações em que a estrutura não foi preparada para resistir a determinado tipo de carregamentos. Por exemplo um edifício que foi projectado para ser uma moradia familiar, não pode ser transformada numa fábrica sem que para isso tenham sido tidas em conta as novas cargas e ter sido feito o respectivo reforço da estrutura.

A capacidade de carga da estrutura está, desta forma, relacionada com a funcionalidade da estrutura durante a sua vida útil.

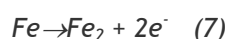
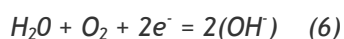
Para além da responsabilidade do utilizador, importa referir, que na fase de projecto por vezes, as cargas aplicadas são incorrectamente consideradas, principalmente na forma como o sismo ou o vento actuam na estrutura (Clifton e Naus, s.d).

O excesso de carga na estrutura provoca fissuras na estrutura, que se transformam em fendas, provocando a rotura prematura da estrutura ou a sua inutilização (Campos, 2006).

#### **3.4.7 Corrosão da armadura**

É das principais causas de deterioração do betão. Este tipo de corrosão acontece no caso do betão armado.

Acontece que o oxigénio reage com a água formando uma pilha electroquímica, que provoca uma reacção óxido - redução em conjunto com armadura presente no betão.



De acordo com as equações apresentadas, forma-se um cátodo, que sofre redução e origina electrões, e um anião, que sofre perda de electrões, ou seja sofre oxidação.

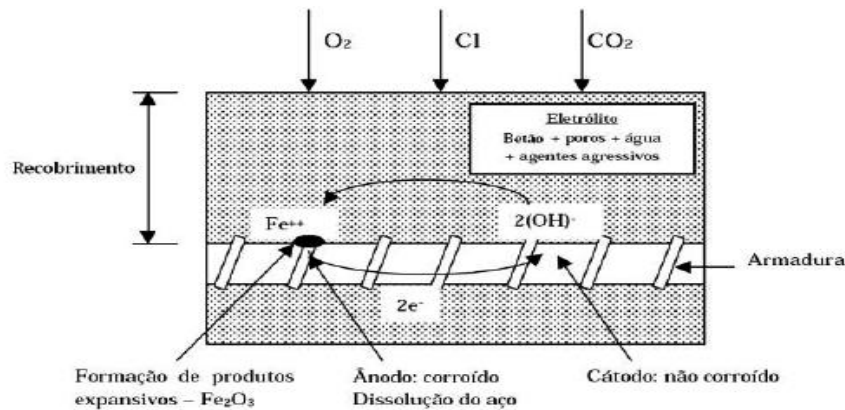


Figura 17 - Esquema de corrosão de armadura (Simas, 2007)

O betão é um meio alcalino e forma-se uma camada que protege o aço. Quando as reacções anteriores se dão no betão, o pH diminui, levando à destruição da camada de protecção do aço. Originando-se assim a ferrugem que provoca fissuração e expansão do betão.

Pode considerar-se dois tipos de corrosões:

- Corrosão localizada, deve-se essencialmente ao ataque de cloretos que se focam na destruição da armadura;
- Corrosão Generalizada, de modo a manter o pH alto, há um consumo de hidróxido de cálcio, formando-se um ciclo vicioso que leva ao consumo dos compostos hidratados do cimento.

### 3.5 Conclusão

Neste capítulo, são perceptíveis as inúmeras agressões a que as estruturas de betão estão sujeitas ao longo do seu tempo de vida útil. Deste modo torna-se imprescindível que a durabilidade passe a ser uma das características mais importantes na realização de estruturas.

A entrada e desenvolvimento das agressões no interior do betão, depende essencialmente da permeabilidade, do número de poros do betão e da sua ligação entre eles, ou seja da porosidade. Assim, o estudo de características como a absorção capilar, permeabilidade, profundidade de penetração de água, tornam-se importantes para avaliar a qualidade do betão. Este trabalho pretende ser mais um contributo na forma de melhorar a qualidade das estruturas existentes no futuro e ao mesmo tempo contribuir tecnologicamente no sentido de viabilizar a sustentabilidade da construção através da reciclagem dos seus resíduos.

# Capítulo 4 - Durabilidade de betão com agregados reciclados

## 4.1 Introdução

A incorporação de resíduos provenientes da construção e demolição de estruturas, mais conhecidos por RCD, em betões e outras actividades relacionadas com o sector tem como objectivo desenvolver uma economia sustentável. Este propósito surge à luz do protocolo de Quioto e do programa Agenda 21 (Santo, 2010). Esta tomada de decisão deve-se ao facto de a construção civil ser uma das actividades, em Portugal, que mais energia consome o que implica o aumento de gases poluentes, por exemplo, por cada tonelada de clínquer de cimento produzido são libertados para a atmosfera 0,39 toneladas de dióxido de carbono (Torgal e Jalali, 2008b).

Inicialmente os resíduos provenientes da demolição e construção, ou no sentido mais lato, entulhos eram considerados segundo o decreto-lei nº 178/2006 de 5 de Setembro de “*«Resíduo urbano» o resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações*”. Sendo posteriormente, em 2008 através do decreto-lei nº46/2008, considerados RCD (Reis, 2010).

Desta forma, pode-se considerar que RCD é todo o material que resulta das obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição. Também os solos provenientes de escavações e limpeza de terrenos, para posteriores obras de engenharia civil são considerados RCD (Santo, 2010).

Desde sempre que o Homem promoveu a reutilização de materiais na construção, não com a intenção de tornar a construção mais sustentável, mas sim, de a tornar mais económica. Desta forma, usavam os resíduos na construção de fundações, em argamassas de qualidade inferior, e até mesmo em regularização de pavimentos. Um impulsionador deste tipo de reutilização foi Marquês de Pombal, que após o terramoto de Lisboa, ordenou que fossem usados os resíduos provenientes do terramoto nas novas construções (Reis, 2010).

Actualmente a reutilização dos materiais passa pelo uso dos resíduos gerados na construção e demolição de estruturas (RCD), como agregados na realização de betões entre outras aplicações.

## 4.2 Características dos RCD

### 4.2.1 Composição dos RCD

O sector da construção é composto por uma multiplicidade de tarefas que vão desde pinturas, revestimento de superfícies, construção de paredes, o que implica a utilização de materiais muito diversificados. Logo é de esperar que a constituição dos RCD seja muito diferenciada, indo desde solos a cimentos, plásticos entre outros (Angulo e Mueller, 2009). Para além de serem visivelmente diferentes também apresentam características químicas distintas.

Estes são gerados ao longo do ciclo de vida da estrutura, podendo considerar três etapas principais, fase de construção, manutenção e demolição.

Na primeira fase, os resíduos gerados devem-se ao processo construtivo, e aos desperdícios dos materiais, como é o caso das cerâmicas, das argamassas, plásticos, madeiras, sobras de tintas. Na fase de manutenção, os RCD aparecem devido à correcção de patologias que vão surgindo ao longo do tempo, das quais surge por vezes necessidade de pequenas demolições. A última fase depende da vida útil dos edifícios, uma vez que se trata da fase de demolição, que acontece devido ao facto de a estrutura perder a capacidade de resposta. De acordo com a seguinte figura exemplifica-se a variedade de materiais que compõem os RCD.

Tabela 7 - Distribuição de RCD por resíduo (Adaptado de Reis, 2010)

Materiais	% Peso Total
Betão, alvenaria, argamassa	50
Madeira	5
Papel, Cartão e outros combustíveis	1-2
Plásticos	1-2
Metais (aço incluído)	5
Solos de escavação, brita de restauração de pavimentos	20-25
Asfalto	5-10
Lamas de dragagem e perfuração	5-10

A maior parte dos resíduos são formados na fase de demolição das estruturas, visto que é o final da vida da estrutura. Como seria de esperar, os resíduos são formados na sua maior parte por alvenaria e betão (Figura 18).

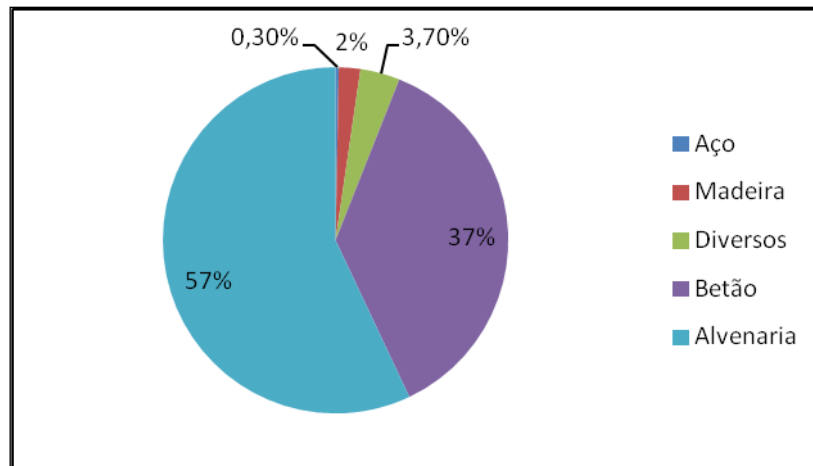


Figura 18 - Constituição dos resíduos provenientes de demolição (Adaptado de Reis, 2010)

Na composição dos resíduos deve ter-se também em conta a presença de impurezas.

As impurezas são uma das principais limitações na utilização deste tipo de resíduos, pois afectam o comportamento do betão.

Encontram-se na sua maior parte em madeiras, gessos, solos, vidros e metais. É necessário considerar também que podem existir em cimentos, uma vez que estes quando expostos a um determinado meio ambiente podem ter sofrido algum tipo de ataque agressivo, e ainda apresentarem na sua composição, cloretos, sulfatos entre outros (Leite, 2010).

Em relação à durabilidade das estruturas a utilização de determinados resíduos potencia um determinado tipo de ataque (Gonçalves, 2007):

- Vidro - reacção álcalis - sílica;
- Gesso - ataque por sulfatos;
- Madeira e papel - desgaste superficial;
- Solos argilosos - retracção;
- Ladrilhos - Gelo/degelo;

Devido a esta multiplicidade de materiais, é necessário existir um processo que permita a sua separação, para que sejam correctamente separados de maneira a simplificar a sua utilização.

Surge então o conceito de construção selectiva ou desconstrução, que é definida segundo Couto (2006) como *“um processo que se caracteriza pelo desmantelamento cuidadoso, de modo a possibilitar a recuperação de materiais e componentes da construção, promovendo a sua reutilização e reciclagem”*.

Apesar de a construção selectiva ser um processo moroso e complexo, é fundamental a sua aplicação de modo a obter uma correcta caracterização dos materiais e uma simplificação da

reciclagem para no final se alcançar um material de qualidade, impulsionando deste modo a comercialização e utilização deste tipo de material (Reis, 2010).

#### **4.2.2 Propriedades dos agregados reciclados**

O uso de agregados reciclados nos betões é ainda limitada, estando apenas a ser aplicada em obras de estudo que vão sendo acompanhadas ao longo do tempo de modo a verificar qual o impacto do uso de agregados reciclados na composição de betões.

Esta incerteza na utilização de agregados reciclados deve-se ao facto de os estudos apresentados sobre o tema ainda serem escassos e quando existem não são totalmente consensuais ou conclusivos.

Um dos principais factores é a diferença de comportamento dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais. As diferenças surgem ao nível da textura, da forma e também da própria composição do agregado. Pois os agregados reciclados apresentam na sua composição material ligante endurecido, que altera a forma como reage com os restantes constituintes do betão. Isto porque a presença de material ligante aumenta a porosidade e absorção de água das misturas (Fonseca, 2009).

Desta forma, torna-se importante o estudo das propriedades apresentadas pelos agregados reciclados de modo a obter estruturas mais duráveis.

Segundo Levy e Helene (2004), a substituição de agregados naturais por reciclados implica o estudo de três características principais: absorção de água, porosidade e carbonatação. Neste estudo são apresentadas outras características que se pensam ser importantes na realização de betões com bom comportamento a longo prazo em termos de durabilidade.

##### **4.2.2.1 Resistência mecânica**

Devido à presença de material ligante espera-se que exista uma diminuição da resistência mecânica do betão (Amorim, 2008). Mas têm sido desenvolvidos estudos, como o apresentado por Rangel (2010), que conclui que no caso do BAC, não existem diferenças significativas em relação ao betão de referência.

##### **4.2.2.2 Massa volúmica e baridade**

A massa volúmica é dada pela quantidade de matéria em relação ao volume dessa mesma matéria. A baridade por sua vez é calculada a partir da massa seca dos agregados, num determinado volume. A partir da massa volúmica e da baridade é possível calcular o volume de vazios da estrutura (Fonseca, 2009).

Segundo estudos realizados, confirma-se que os agregados reciclados são mais porosos que os agregados naturais (Alves, 2007). Desta forma a massa volúmica e baridade vão ser inferiores.

Assim, massa volúmica e baridade são indicadores do desempenho dos agregados reciclados, uma vez que, quanto maior a massa volúmica e baridade menos poroso é o agregado.

Um dos estudos destas características é o efectuado por Rangel (2010), onde verificou que a massa volúmica dos agregados reciclados é inferior à dos naturais e consequentemente maior a taxa de absorção de água.

#### **4.2.2.3 Absorção de água**

Como tem sido referido ao longo do presente estudo, os agregados reciclados apresentam uma maior taxa de poros, logo maior será a absorção de água existente. Este é um factor que pode limitar a utilização de agregados reciclados, visto que a água é o principal meio de transporte dos agentes agressivos.

Segundo um estudo de Mellman *et al*, referenciado em Ferreira (2009), estes afirmam que nos momentos iniciais de imersão dos agregados, a absorção de água apresenta taxas entre os 70 a 95%.

Esta é a maior dificuldade encontrada no uso de agregados reciclados, pois torna-se um processo complicado fazer o acerto em termos de água e superplastificante na realização de misturas (Leite, 2001). A correcção de água vai influenciar a trabalhabilidade do betão no estado fresco, o que diminui a compacidade no estado endurecido.

#### **4.2.2.4 Forma e textura**

A forma e textura das partículas também vão influenciar o comportamento do betão, principalmente no estado fresco.

Metha (Levy, 2001), define que a textura dos agregados pode ser lisa, áspera ou celular, e que quanto mais áspera é a textura maior é a taxa de absorção do agregado. É por este motivo que ao agregados reciclados apresentam uma maior taxa de absorção.

Em relação à forma dos agregados, esta característica influencia a consistência e compacidade do betão, visto que depende da forma como os agregados se dispõem no betão. Logo os agregados reciclados que possuem formas mais alongadas aumentam o atrito existente entre as partículas (Alves, 2007; Levy, 2001).

A rugosidade apresentada pelos agregados pode segundo Brito (Ferreira, 2009), ser uma mais-valia, pelo facto de poder aumentar a resistência mecânica.

Em relação a estas características é possível obter agregados reciclados com uma forma mais arredondada, porque segundo Amorim (2008), a forma depende da britadeira utilizada e de como se processa a britagem.

### 4.3 Betão normal com agregados reciclados

O uso de agregados grossos reciclados no betão dito normal, já foi alvo de várias experiências que permitem aferir o seu comportamento. Contudo os resultados obtidos não são consensuais, uma vez que há autores que defendem a sua utilização, enquanto outros referem que o uso de agregados grossos reciclados diminui o desempenho do betão.

Brito e Alves (2010) realizaram estudos sobre este tema e verificaram que o betão com agregados reciclados apresenta um desempenho inferior em relação ao betão de referência. Mas explicam também que o conhecimento prévio das características dos agregados possibilita a melhoria do comportamento.

Por sua vez, Levy e Helene referenciados em Leite (2001), que efectuaram também ensaios com agregados grossos reciclados concluíram que os betões de agregados reciclados são tão duráveis quanto os de referência.

Há também outros autores, como Kikuchi (Leite, 2001) citado no mesmo estudo que admitem a substituição até 30% do agregado sem prejuízo no comportamento do betão.

Como o presente estudo se refere à durabilidade de betões com agregados reciclados é apresentado a influência do uso deste tipo de agregados na actuação de determinados agentes agressivos.

#### 4.3.1 Carbonatação

Esta tal como outras características da durabilidade não é alvo de consenso entre os autores.

Barra defende o uso de agregados reciclados no betões, pois referenciado em Levy (2001), conclui que devido ao facto de os agregados reciclados possuírem na sua constituição material ligante, faz com que exista maior quantidade de teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ , o que permite maior resistência à carbonatação, uma vez que é mais demorada a redução da alcalinidade do betão.

Por sua vez, Gomes (Amorim, 2008), realizou um caso de estudo com 50% de substituição de agregados reciclados, onde verificou que a resistência à carbonatação diminui cerca de 10% face ao betão de referência.

Também, Figueiredo em Alves (2007) afirma que com o aumento da percentagem de substituição de agregados reciclados a resistência à carbonatação diminui. Ao mesmo resultado chegou Amorim (2008), que procedeu ao estudo de betões com diferentes percentagens de agregados reciclados (0%, 25%, 50% e 100%) onde verificou que a profundidade de carbonatação era maior com o aumento da substituição.

#### 4.3.2 Absorção capilar

Os ensaios relativos à absorção capilar e de imersão de água são aqueles onde os resultados obtidos são consensuais entre os autores. Este aspecto deve-se ao facto de os agregados

reciclados apresentam maiores taxas de porosidade em relação aos betões de referência e por isto, maiores são as taxas de absorção de água.

Rosa, Figueiredo e Gomes referenciados em Alves (2007), verificaram que a taxa de absorção de água aumenta com o aumento da utilização de agregados reciclados. Amorim (2008) também chegou ao mesmo resultado.

Já Evangelista (Alves, 2007) verificou que os resultados dos ensaios eram inconclusivos.

#### **4.3.3 Cloretos**

A penetração de cloretos depende da porosidade do betão, quanto mais poroso este for, menor será a sua resistência.

Desta forma Amorim (2008) e Evangelista (Alves, 2007), verificaram que os betões com agregados reciclados apresentam piores desempenhos que os betões de referência.

Já Matias (Alves, 2007), refere que os resultados apresentados pelos dois tipos de betão, não apresentam valores muito diferentes, que pudessem impossibilitar o uso de betões com agregados reciclados.

O mesmo resultado é apresentado por Gomes (Amorim, 2008), onde conclui para betões com 50% de agregados reciclados a diferença é entre os 5,6% face ao betão de referência.

#### **4.3.4 Gelo/ degelo**

Vázquez (Amorim, 2008) admite que a introdução de betões com agregados reciclados diminui a resistência ao congelamento. E que deste modo, não devem ser aplicados em climas mais rigorosos. Uma das possibilidades é uso de agentes introdutores de ar.

### **4.4 Betão auto - compactável com agregados reciclados**

O BAC é um betão com determinadas características que lhe permitem apresentar um melhor comportamento em termos de durabilidade. Essas características são essencialmente, o facto de se movimentar segundo o seu próprio peso e a capacidade de preencher espaços (Nepomuceno, 2005). Ou seja, a trabalhabilidade, dada pelas características atrás referidas passa a ser uma característica essencial do betão, para isso tem contribuído o uso de superplastificantes e adjuvantes, que permitem obter misturas mais fluidas e mais resistentes à segregação (Nunes, 2001).

Desta forma, pretende-se que o BAC com agregados reciclados apresente as mesmas características que possui quando se utilizam agregados naturais.

Tabela 8 - Propriedades do BAC (Adaptado de Figueiras, 2006)

Estado	Propriedades	Desempenho
Fresco	•Elevada Deformabilidade	Capacidade de ser colocado sem vibração
	•Elevada Resistência à segregação	
Idades Jovens	•Pequena segregação e baixo valor de retracção plástica	Prevenir defeitos iniciais
	•Baixo valor de retracção de secagem e retracção autógena	
	•Elevada resistência a fendilhação	
Endurecido	•Baixa Permeabilidade	Protecção contra factores externos

Pelo facto da utilização do BAC, ainda não estar completamente difundida no sector, os estudos acerca da introdução de agregados reciclados na sua composição são ainda escassos. Contudo, os poucos estudos efectuados referem que o uso de RCD, é uma mais-valia para o ambiente e para a economia da construção, podendo ser assim utilizados sem prejuízo para a estrutura.

Um dos estudos apresentados foi desenvolvido por Grdic et al (2010). Os autores realizaram três tipos de betão com diferentes percentagens de agregados grossos reciclados, 0%,50% e 100%. Realizaram dois tipos de ensaios de durabilidade, o de absorção capilar e o de penetração de água. No primeiro ensaio, observaram que a absorção de água aumenta com o aumento de substituição de agregados (Figura 19). Este facto é explicado pela maior taxa de absorção de água apresentada pelos agregados reciclados.

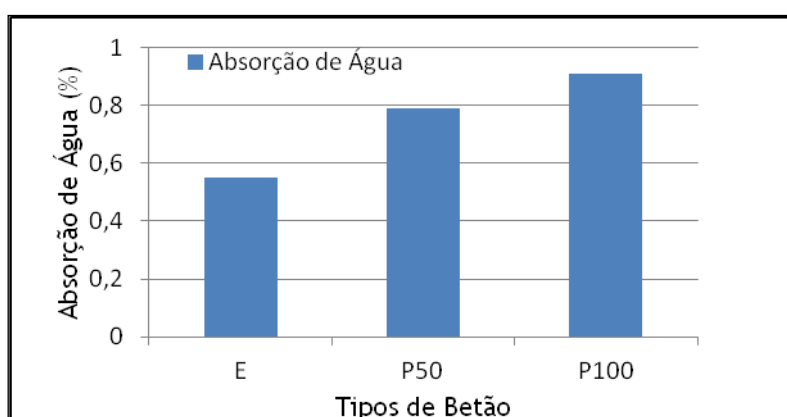


Figura 19 - Absorção de água (Adaptado Grdic et al, 2010)

Em relação ao ensaio de penetração de água, esta apenas existiu no betão de referência, com um valor de 10mm.

O estudo conclui assim, que o BAC com agregados reciclados pode apresentar-se como um betão à prova de água, para isso importa saber qual o tipo de agregado reciclado que se utiliza. Pois ao usar-se um agregado reciclado de qualidade o novo betão, também o será.

Já Kou e Poon (2009), foram mais longe e realizaram uma investigação, onde os betões estudados apresentavam na sua composição agregados grossos e finos reciclados.

Existe uma relutância no uso de agregados finos na composição dos betões, devido à presença de um maior número de impurezas que afectam as propriedades do betão. Apesar disso há já estudos que viabilizam a sua utilização.

Em relação ao estudo de Kou e Poon (2009), foram realizados betões com 100% de agregados reciclados, onde a percentagem de finos utilizada foi de, 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Estudaram também o comportamento do betão com diferentes relações A/C.

Verificou-se que com o uso de agregados finos a absorção de água é maior, e que ao ser compensada na mistura leva a maiores diâmetros de espalhamento no ensaio de slump flow, provocando uma maior segregação. Em relação à durabilidade realizou-se o ensaio de penetração de cloretos.

Verificou-se para as diferentes séries de betão estudadas com diferentes razões A/C, que à medida que se aumentava a percentagem de substituição de finos, a resistência à penetração dos cloretos também aumentava. Os autores concluíram que este facto se deve ao facto de os agregados finos reciclados utilizados apresentarem dimensões inferiores aos agregados finos naturais. Verificou-se, também, que para percentagem de substituição de 100% de agregados finos, os betões com menor razão A/C apresentava maior resistência a entrada de cloretos.

De acordo com os resultados finais, considerou-se que os betões estudados apresentavam uma penetração de cloretos de baixa a moderada.

Outra característica estudada no estudo apresentado foi a retracção do betão, que aumentava com a substituição de maiores percentagens de finos. Mas que segundo os autores pode ser controlada através da relação A/C.

Assim, verifica-se a viabilidade da substituição de agregados finos e grossos ao mesmo tempo. Indo de encontro às conclusões apresentadas por Grdic *et al* (2010).

## 4.5 Conclusão

Em Portugal, apesar de todos os esforços realizados por instituições governamentais, o tema da utilização de agregados reciclados na construção é timidamente discutido, devido essencialmente aos problemas económicos e sociais do país. O sector é formado maioritariamente por pequenas empresas, que não demonstram qualquer tipo de cuidado no uso destes resíduos, sendo depositados ilegalmente em florestas ou locais ermos. Este problema surge devido ao facto de existirem poucos centros que possam acolher e tratar este

tipo de resíduos, e quando existem é necessário o pagamento de uma taxa, que se encontra a volta dos 50 euros para cada tonelada de resíduo.

Outra das limitações na sua utilização é o facto de os estudos com a incorporação deste tipo de agregados em betões ser reduzido.

E tal como apresentado no caso do betão tradicional, os resultados não são consensuais, visto que existem inúmeras variáveis que influenciam o comportamento do betão. Que vão desde o tipo de agregado utilizado, o tipo de corpo de prova, se a absorção de água é compensada na altura da mistura, ou se é mais vantajoso pré saturar os agregados anteriormente, entre outros. Todos estes parâmetros dificultam a aplicação de agregados reciclados nas misturas de betão.

Assim, o presente estudo, pretende ser mais uma contribuição para o conhecimento e para utilização deste tipo de resíduos no sector na produção de betão estrutural.

# Capítulo 5 - Descrição do programa experimental

## 5.1 Introdução

De acordo com o tema desenvolvido nesta investigação, o programa experimental pretende comparar os parâmetros de durabilidade medidos em misturas de betão auto - compactável com agregados grossos naturais e com agregados grossos reciclados.

Logo, no presente capítulo são descritos os materiais necessários à realização da experiência. Os materiais utilizados neste programa experimental foram os mesmos estudados em investigações anteriores (Rangel, 2010). É também feita uma descrição de todos os procedimentos experimentais necessários, desde os estudos feitos no betão fresco, para avaliar as propriedades reológicas até aos ensaios que permitem avaliar e caracterizar a durabilidade do BAC.

## 5.2 Caracterização dos materiais

### 5.2.1 Cimento

Foi usado o cimento Portland (CEM I 42,5 R), cuja composição química e propriedades físicas são apresentadas em anexo de acordo com a informação cedida pela empresa fabricante. Como o material já existia no laboratório, em investigações anteriores já tinha sido realizado o estudo da sua massa volúmica. Assim, o cimento escolhido apresenta uma massa volúmica de 3140 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.2.2 Adição

Devido ao facto de o BAC ser um betão com uma elevada quantidade de finos, é necessário considerar o uso de adições, não só por questões de excessos de cimentos, mas por necessidade de garantir a viscosidade necessária ao betão auto - compactável. Neste caso, foi escolhida como adição o fíler calcário, distribuído pela empresa OMYA COMITAL. Tem a designação comercial de MICRO 100 AB. O fíler calcário apresenta na sua constituição carbonato de cálcio oolítico. O fíler calcário tem uma massa volúmica de 2720 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.2.3 Adjuvante

O adjuvante utilizado foi um policarboxilato modificado, Sika Viscocrete 3005, comercializado pela empresa SIKA. As características químicas do material estão disponibilizadas em anexo.

### 5.2.4 Agregados

A máxima dimensão dos agregados é de 19mm, e foram considerados três grupos de agregados, os agregados finos, os agregados grossos naturais e por último, os agregados grossos reciclados.

Tabela 9 - Características dos agregados usados na experiência laboratorial (Adaptado de Rangel, 2010)

Designação	AREIAS		BRITAS			
	A1	A2	B1	B2	BR1	BR2
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2570	2610	2710	2700	2509	2485
Absorção de água (%)	0,3	0,4	0,15	0,14	4,1	4,05
Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	1520	1540	1460	1450

#### 5.2.4.1 Areias

Foram usados dois tipos de areias, uma areia rolada fina, denominada no trabalho de AF (Figura 20-a) e uma areia rolada grossa denominada de AG (Figura 20-b). São comercialmente denominadas de areia 0/2 (areia fina) e areia 0/4 (areia grossa). As areias fina e grossa, são originárias da Figueira da Foz e Abrantes respectivamente. Foram cedidas ao laboratório de materiais e construção da UBI pela central de produção de betão - Betão Liz.



a)

b)

Figura 20 - a) Areia fina; b) Areia grossa

#### 5.2.4.2 Agregados grossos naturais

Foram utilizados dois tipos de agregados naturais, uma brita mais fina denominada de brita 3/6 e uma brita mais grossa, 6/15. Foram cedidos pela empresa Bartolomeu, e têm origem na quinta da Caçoa - Fundão. São geologicamente considerados granitos, apresentando uma matriz equigranular, porfiróide e biotítica. No trabalho foram denominadas de brita 1 (3/6) e brita 2 (6/15).



a)

b)

Figura 21 - a) Brita natural 1; b) Brita natural 2

#### 5.2.4.3 Agregados grossos reciclados

Os inertes reciclados usados também são de dois tipos, BR1 E BR2. Foram obtidos através da britagem (Figura 22) de provetes de betão existentes no laboratório de materiais e construção da UBI.



Figura 22 - Britadeira

Após britagem, feita de modo a obter agregados com uma dimensão de aproximadamente 12mm, foi feita uma peneiração manual, através do peneiro de 4mm de modo a separar os agregados grossos dos finos. Após esta peneiração, foi realizada outra de modo a finalizar a separação dos agregados grossos, sendo o agregado BR1, (Figura 23-a) aquele que passa no peneiro de 8mm e o BR2 (Figura 23-b) aquele que fica retido neste mesmo peneiro.

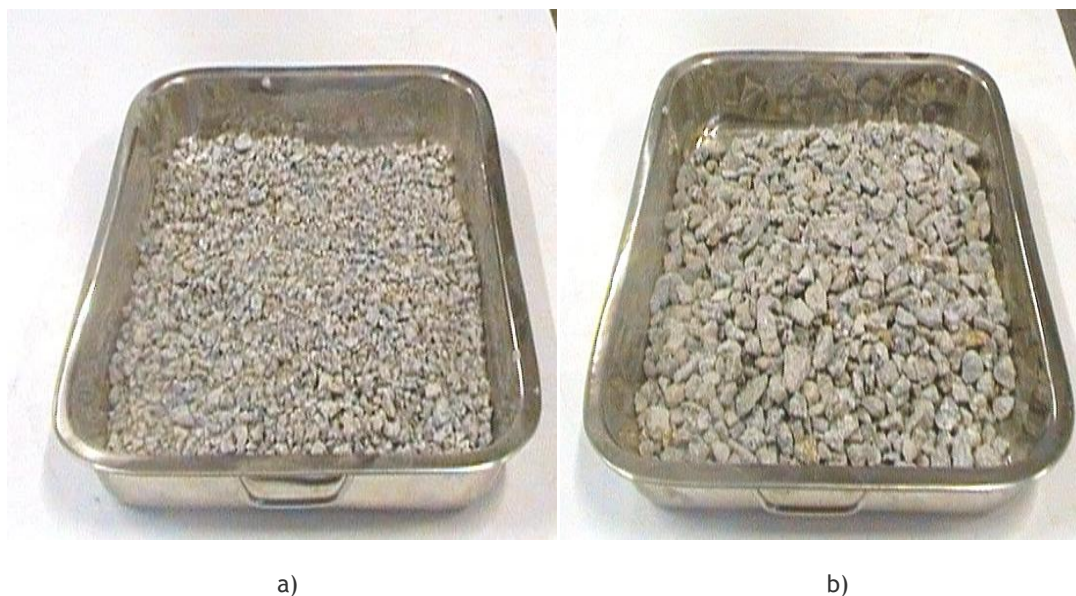


Figura 23 - a) Brita reciclada 1; b) Brita reciclada 2

Os agregados reciclados ao contrário dos naturais, apresentam uma superfície mais rugosa e um formato mais alongado, que depende da forma como é feita a britagem.

#### 5.2.5 Água

A água utilizada nas amassaduras foi a da rede pública da cidade da Covilhã, indo assim, ao encontro do exigido pela NP 1008-2003.

### 5.3 Ensaios dos betões

As proporções das misturas de betão utilizadas neste estudo são aquelas elaboradas por Rangel (2010), uma vez que, como já foi referenciado a presente investigação pretende continuar o estudo do BAC com o uso de agregados reciclados na vertente das propriedades que influenciam a durabilidade do mesmo.

Assim, foram preparadas quatro composições de betão, com diferentes percentagens de agregados reciclados (0%, 20%,40% e 100%).

Para iniciar o estudo, foi elaborada a análise granulométrica dos agregados utilizados na mistura (AF, AG, B1, B2, BR1, BR2). Seguidamente foi feita uma aproximação da curva granulométrica obtida com a curva de referência proposta por Nepomuceno (2005).

Para o estudo dos betões foram considerados determinados parâmetros da argamassa que são apresentados seguidamente:

Tabela 10 - Considerações iniciais e parâmetros da argamassa

Parâmetros da composição				
Vm/Vg	Vv (m3)	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
2,25	0,03	0,8	0,7	0,375

Foram realizadas duas amassaduras de 25l para cada tipo de betão. Para o cálculo das quantidades de materiais necessárias na composição, foi usada uma folha de cálculo em EXCEL, os valores para cada mistura são apresentados em anexo.

As amassaduras foram realizadas, tendo por base a metodologia proposta por Nepomuceno.

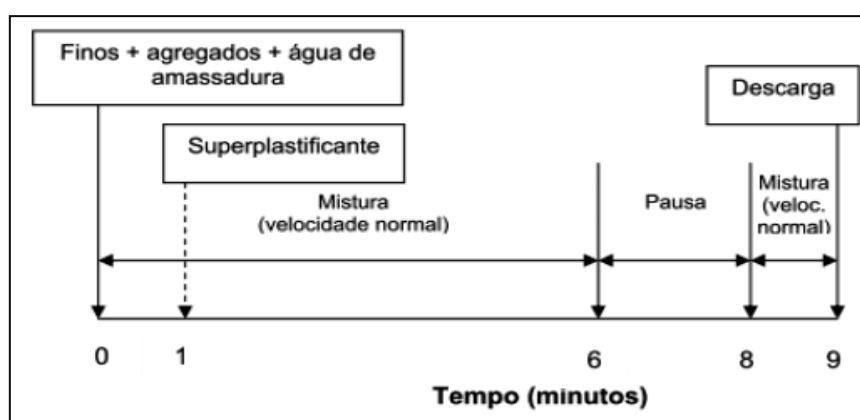


Figura 24 - Procedimento de amassadura (Nepomuceno, 2005)

### 5.3.1 Ensaios no betão em estado fresco

Para avaliar as propriedades reológicas do betão no estado fresco e verificar a autocompactibilidade foram realizados o ensaio de espalhamento e o ensaio do funil de acordo com as normas EN 12350 -8 e EN 12350 - 9 respectivamente.

#### 5.3.1.1 Ensaio de espalhamento (*slump flow*)

Este ensaio permitiu avaliar o diâmetro de espalhamento ( $D_m$ ), que demonstra a deformabilidade do betão. Visualmente observou-se o grau de segregação.

Para a realização do ensaio é preciso um cone de *Abrams*, uma placa de aço, com a marca de uma circunferência de 500mm. É necessário ter também um cronómetro e uma fita métrica.

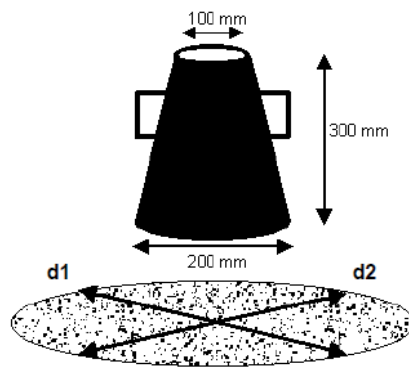


Figura 25 - Placa e cone de Abrams (Nunes, 2001)

Após se ter calculado o diâmetro médio, que se calcula através da medição de dois diâmetros perpendiculares, pode-se então calcular o  $G_c$ , que indica a área relativa de espalhamento do betão. De modo a verificar-se a autocompactabilidade do betão, o valor obtido da equação 2, deve estar num intervalo entre 8 e 11,25.

$$D_m = \frac{D_1 + D_2}{2} \text{ (mm)} \quad (8)$$

$$G_c = \left( \frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (9)$$

### 5.3.1.2 Ensaio do funil

Permite avaliar a viscosidade do betão, através do cálculo do  $R_m$  (tempo de escoamento relativo).

Para a realização do ensaio é necessário um funil em forma de V e um cronómetro.



Figura 26 - Funil utilizado para a realização do ensaio

Deve humedecer-se o funil, e seguidamente enche-lo sem compactar, no fundo do funil existe uma abertura, assim, é medido o tempo que o betão demora a escoar pelo funil, este intervalo de tempo, em segundos, vai desde o momento de abertura do funil, até á altura em que surge a primeira luz fundo no funil.

$$R_c = \left( \frac{10}{t} \right) \quad (10)$$

O valor de  $R_c$  deve, tal como o de  $G_c$  deve situar-se num intervalo de valores, de forma a verificar a auto compactabilidade, sendo o intervalo entre 0,5 e 1.

Tanto o ensaio do funil como o de espalhamento, permitem aferir, como foi referido a auto-compactabilidade do betão. A auto compactabilidade é característica relacionada com a trabalhabilidade que o betão deve apresentar no estado fresco de modo a se verificarem as suas principais características. Deste modo para se verificar a autocompactabilidade, o betão deve apresentar três características principais: capacidade de enchimento, capacidade de passagem e resistência à segregação (Nunes, 2001; Nepomuceno, 2005).

### 5.3.2 Carotagem dos provetes

Nesta etapa foram realizados os provetes de acordo com as dimensões exigidas pelas normas e especificações de cada ensaio de durabilidade (Tabela 11). De acordo com o recomendado pela RILEM, os carotes foram feitos na face perpendicular à face de enchimento.

Tabela 11 - Tipo de corpos de prova usados nos ensaios de durabilidade

Ensaio	Corpo de Prova	
	Tipo	Dimensões [mm]
Permeabilidade ao Oxigénio	Cilindro	50*50
Permeabilidade à Água	Cilindro	50*50
Penetração de Água	Cubo	150
Absorção Capilar	Cilindro	100*100

Os corpos de prova também foram identificados com uma letra que indica se o corpo de prova caroteado estava na superfície superior, no meio ou na superfície inferior respectivamente, A, B, C (Figura 27).

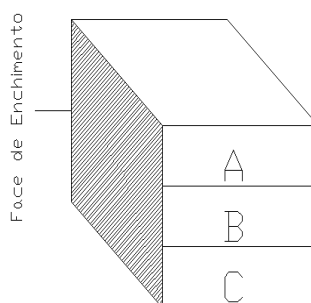


Figura 27 - Denominação dos corpos de prova

### 5.3.3 Pré - condicionamento

Após a realização das amassaduras de betão, estes foram colocados na câmara de cura com humidade relativa de 90% e temperatura de 22°C constante ao longo do tempo, após 24 horas os moldes foram descofrados e colocados novamente na câmara durante 28 dias.

Após, este tempo, foi necessário preparar os corpos de prova para poder realizar os ensaios de durabilidade, sendo alvo de uma nova etapa, o pré condicionamento.

O pré condicionamento pretende de alguma forma preparar os corpos de prova para a realização de ensaios posteriores. Este tem como objectivo uniformizar a matriz porosa do betão, em termos da distribuição de humidade, de maneiras diminuir a variabilidade dos resultados.

Neste caso, para a realização deste passo, foi tido em consideração o estudo realizado por Castro Gomes *et al* (2011). Neste estudo faz-se uma comparação entre o método proposto pelo RILEM TC 116- PCD, e conclui-se que existe uma forma viável de diminuir o tempo de pré condicionamento.

Assim e de acordo com o estudo publicado, os corpos de prova foram colocados durante 24h numa estufa a 50°C. Após este período de tempo, foram colocados numa câmara com humidade relativa de 75% constante durante sete dias. Após este tempo, estavam reunidas as condições para a realização dos ensaios.

Para avaliar a função do pré condicionamento no comportamento do betão, realizaram-se ensaios de corpos de prova que apenas ficaram durante 24h na estufa, e realizaram-se os mesmos ensaios para corpos de prova, que seguiram o método de pré condicionamento descrito por Castro Gomes *et al* (2011).

## 5.4 Ensaios de durabilidade

Os ensaios a realizar permitem caracterizar o betão, e poder avaliar o seu comportamento através de modelos matemáticos. Como se sabe a água é o principal meio de transporte dos agentes agressivos, logo foram realizados ensaios que permitem avaliar o movimento de água no betão. Assim, realizaram-se os seguintes ensaios, permeabilidade à água, permeabilidade ao oxigénio, profundidade de penetração de água e absorção capilar.

### 5.4.1 Absorção capilar

Como já foi referido no capítulo 2, a água é o principal meio de transporte para as substâncias agressivas no interior do betão. Assim, é necessário verificar a forma como o transporte se processa no interior do betão.

O ensaio da absorção capilar é um dos métodos mais utilizados para avaliar a durabilidade do betão. A absorção de água calcula-se tendo por base a diferença entre a massa do corpo

de prova que teve uma face em contacto com a água com a massa do corpo de prova seco, dividida pela área da face que esteve em contacto com a água.

Para a realização do ensaio foi seguida a especificação E 393 do LNEC - Determinação da absorção de água por capilaridade.

Foram necessários dois corpos de prova cilíndricos com dimensão de 100mm\*100mm. Estes, após passarem pela fase de pré condicionamento, foram pesados, obtendo assim, o valor da massa do corpo de prova seco ( $m_0$ ).

Seguidamente foram colocados num tabuleiro com uma altura de água de  $5 \pm 1$ mm, deve ter-se o cuidado para não molhar as faces laterais.



Figura 28 - Ensaio de absorção capilar

O ensaio dura 72 horas e durante este intervalo a altura de água deve manter num valor constante.

Durante o tempo de duração do ensaio deve medir-se o valor da massa ( $m_i$ ) para o tempo ( $t_i$ ), que é respectivamente, 3, 6, 24 e 72 horas.

Após obter todos estes valores do ensaio, pode determinar-se qual o valor da absorção capilar, que é expressa em  $g/m^2$ .

$$\text{Absorção Capilar} = \frac{M_i - M_0}{A} \quad (11)$$

A partir deste valor é feito um gráfico (Figura 29) onde o eixo das abcissas corresponde à raiz de  $t$  e o eixo das ordenadas o valor da absorção de água por unidade de área. O declive retirado deste gráfico corresponde ao valor da absorção capilar.

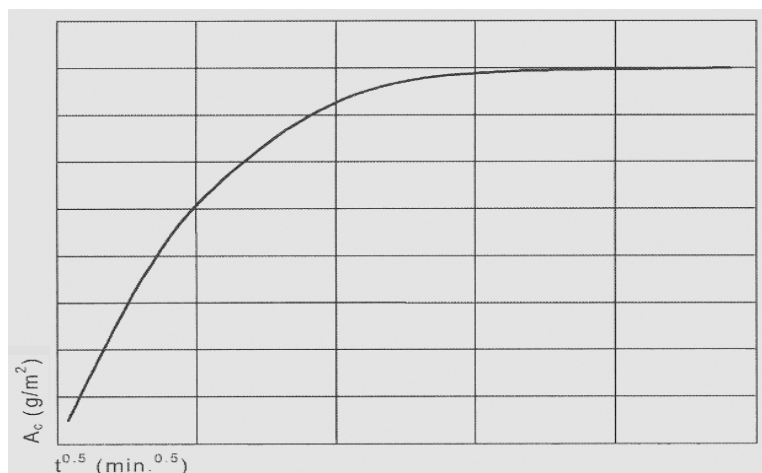


Figura 29 - Curva típica do ensaio de absorção capilar (Figueiras, 2006)

#### 5.4.2 Permeabilidade ao oxigénio

O objectivo deste ensaio é avaliar a permeabilidade do betão. Quanto mais permeável for o betão mais exposto este estará aos agentes agressivos e menor será a sua durabilidade. A permeabilidade tal como a absorção de água, é um indicador importante no comportamento do betão a longo prazo. Uma vez que, se estrutura apresenta elevados índices de permeabilidade indica que houve problemas durante a fase de cura do betão.

Para determinar o coeficiente de permeabilidade do betão foi seguido procedimento utilizado na UBI, que se baseia na especificação do LNEC E 392.

Para realizar o ensaio são necessários seis corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50mm\*40mm. No laboratório de durabilidade da UBI, já existe um sistema que permite aferir a permeabilidade (Figura 30).

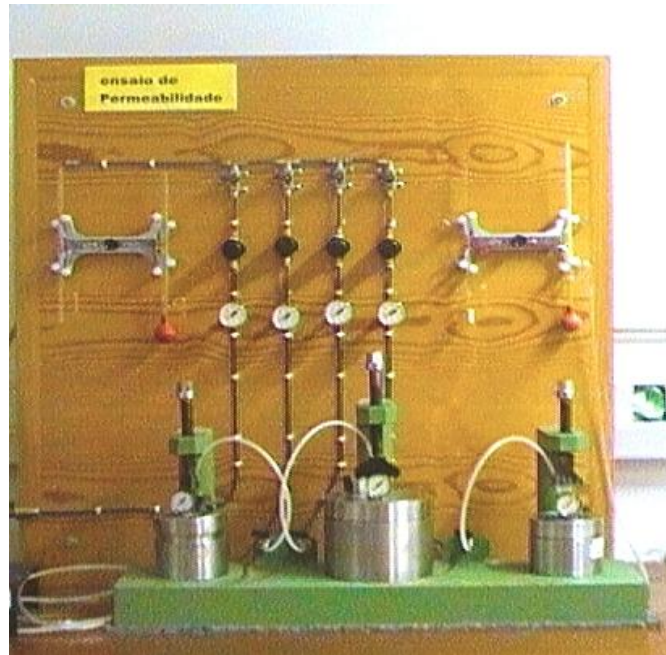


Figura 30 - Aparelho de medição da permeabilidade ao oxigénio e à água

Antes de se iniciar o ensaio, os corpos de prova devem ser impermeabilizados lateralmente com uma camada fina de silicone. Após esta etapa deve-se esperar algumas horas.

Após este tempo, coloca-se o corpo de prova na válvula de ensaio. Após o fluxo de água estabilizar, o que demora aproximadamente 30 minutos, basta medir o tempo que a água que se encontra na válvula intermédia, percorra uma distância de 10 centímetros.

Depois basta substituir os valores obtidos na respectiva equação:

$$K = \frac{4,04 * R * L * 10^{-6}}{A(P_2^2 - 1)} \quad (12)$$

Em que:

$R$ : Fluxo de Oxigénio à saída, em  $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$L$ : Espessura do corpo de prova, em m

$A$ : Área de secção atravessada pelo oxigénio, em  $\text{m}^2$

$P_2$ : Pressão do Oxigénio à entrada, em bar

#### 5.4.3 Permeabilidade à água

O procedimento deste ensaio é efectuado da mesma forma que se realiza o ensaio de permeabilidade ao oxigénio. Podendo ser utilizados os mesmos corpos de prova usados na permeabilidade ao oxigénio sem haver qualquer tipo de influencia nos resultados obtidos.

Para a realização do ensaio, é necessário colocar 25 ml de água, na célula de ensaio, ao mesmo tempo que é aplicada uma pressão de ar. O ensaio do corpo de prova dura cerca de

1 hora, seguidamente é feito o corte do corpo de prova onde se mede a profundidade de penetração de água.

Como para a realização do ensaio se usou a água e nenhum qualquer tipo de corante a expressão que permite calcular o coeficiente de permeabilidade é a seguinte:

$$K_w = 1.02 * 10^{-7} * k_w \quad (13)$$

Onde:

$$k_w = \frac{d_p^2 * \delta}{2 * h * t} \quad (14)$$

Em que:

$d_p$ : Profundidade de Penetração de água, em m

$\delta$ : Absorção de água por imersão com vácuo, em %

$t$ : Tempo que levou a penetrar à profundidade, em minutos

$h$ : Altura de água, em m (1bar = 10,207m de coluna de água)

#### 5.4.4 Profundidade de penetração de água sobre pressão

Este ensaio permite determinar a absorção inicial existente na superfície do betão. O ensaio é realizado segundo a norma portuguesa NP EN 12390 - 8.

Apesar de avaliar a absorção, este ensaio não permite ao contrário do ensaio de absorção capilar (3.3.4.1) verificar a permeabilidade do betão e a forma como os agentes agressivos são transportados no interior do betão.

Por conseguinte, este ensaio, permite avaliar a qualidade do betão da camada de recobrimento, quando este está sujeito a agressões ambientais, como por exemplo, quando, a chuva bate no betão. Ao verificar-se uma boa qualidade do betão da camada de recobrimento, podemos dizer que o betão é mais resistente à entrada de agressões e desta forma, melhor será o seu comportamento ao longo do tempo.

Para a realização do ensaio são necessários 2 corpos de prova cúbicos com dimensão de aresta de 150mm.

Antes da realização do ensaio deve preparar-se o corpo de prova, assim a face que será sujeita a pressão deve ser escovada com uma escova de arame.

A seguir coloca-se o corpo de prova no aparelho (Figura 32). Deve ser então aplicada uma pressão de água de  $500 \pm 50$  kPa, durante  $72 \pm 2$ h. A pressão de água deve ser aplicada no centro do cubo a permitir uma distribuição mais uniforme. Deve fazer-se ao longo do tempo do ensaio uma observação visual do corpo de prova de modo a verificar se as faces que não estão expostas à pressão de água se apresentam húmidas, ou seja, se têm presença de água.

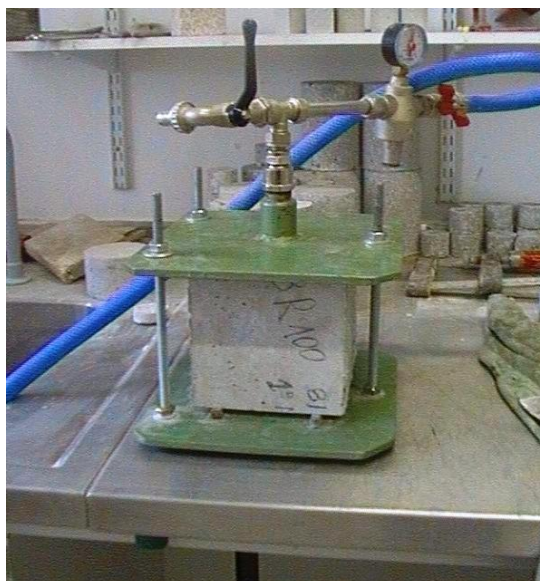


Figura 31 - Ensaio de profundidade de penetração de água sobre pressão

Após as 72h, limpa-se o corpo de prova de modo a retirar excessos de água que possam existir. Deve então separar-se o corpo de prova ao meio de modo a facilitar a medição da profundidade de água neste (Figura 32).



Figura 32 - Final do ensaio de profundidade de penetração de água sobre pressão

O valor registado deve ser aproximado ao milímetro.

## 5.5 Apresentação e discussão dos resultados

São apresentados os resultados referentes aos ensaios laboratoriais descritos anteriormente

É feita também um relacionamento entre os resultados obtido e as variáveis em discussão, sendo desta forma, comparados os resultados entre o betão de referência e os vários betões com diferentes percentagens de substituição de agregados reciclados.

### 5.5.1 Análise granulométrica

Ao ensaio da análise granulométrica foi feito de acordo com a especificação do LNEC E245-1971. A realização do ensaio tem como objectivo determinar e caracterizar as diferentes dimensões das partículas do agregado.

Seguidamente é apresentada a distribuição granulométrica dos agregados utilizados, e também as curvas de distribuição. Estas são apresentadas num gráfico de escala logarítmica, onde o eixo das ordenadas corresponde ao material que passa nos peneiros e o eixo das abcissas a dimensão do agregado.

No anexo B são apresentados mais detalhadamente os cálculos efectuados.

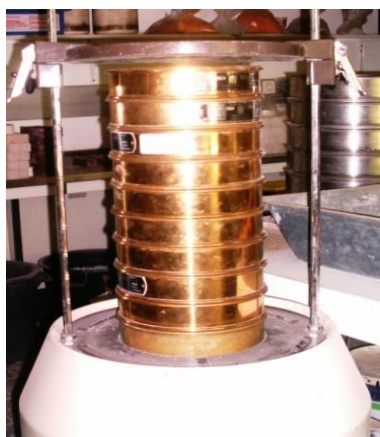


Figura 33 - Peneiração mecânica

#### 5.5.1.1 Agregados finos

Na seguinte tabela é apresentada a distribuição granulométrica e módulo de finura do material fino, bem como, as respectivas curvas granulométricas (Figura 34).

Tabela 12 - Distribuição granulométrica dos agregados finos

Malha do Peneiro [mm]	Material Acumulado que passa [%]	
	Areia Fina (AF)	Areia Grossa (AG)
76,20	100,00	100,00
50,00	100,00	100,00
38,10	100,00	100,00
25,40	100,00	100,00
19,10	99,96	100,00
12,70	99,96	100,00
9,52	99,96	100,00
4,76	99,96	99,51
2,38	99,85	74,59
1,190	99,42	50,80
0,590	83,28	30,84
0,297	21,15	13,47
0,149	1,53	3,99
0,074	0,20	1,34
Módulo de Finura	1,949	3,268

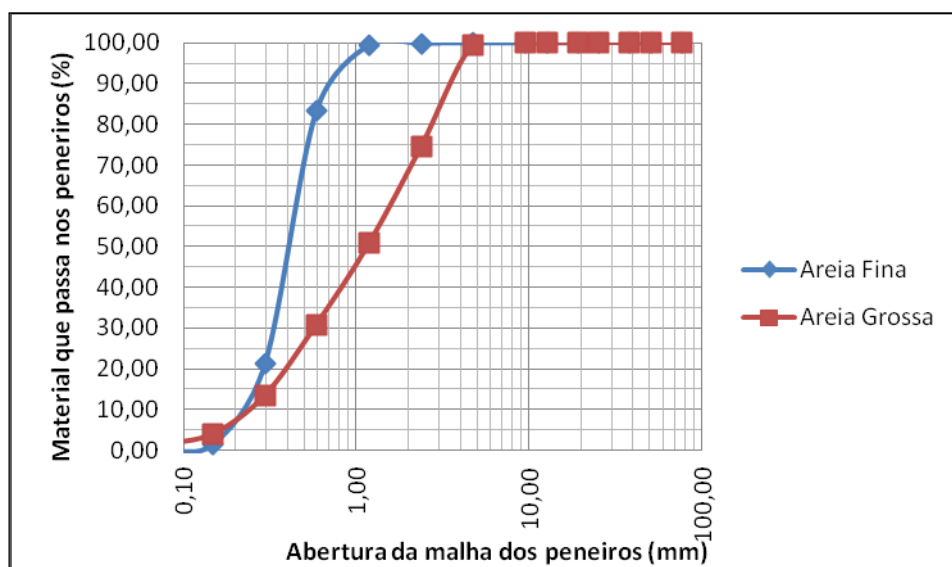


Figura 34 - Curva granulométrica dos agregados finos

### 5.5.1.1 Agregados grossos

#### 5.5.1.1.1 Agregados grossos naturais

São apresentadas as distribuições granulométricas dos agregados naturais e o respectivo módulo de finura. Na figura 35, são apresentadas as curvas granulométricas.

Tabela 13 - Distribuição granulométrica dos agregados grossos naturais

Malha do Peneiro [mm]	Material Acumulado que passa [%]	
	Brita (B1)	Brita (B2)
76,20	100,00	100,00
50,00	100,00	100,00
38,10	100,00	100,00
25,40	100,00	100,00
19,10	100,00	100,00
12,70	99,98	36,15
9,52	99,95	16,11
4,76	53,82	0,87
2,38	9,92	0,20
1,190	4,57	0,13
0,590	2,43	0,09
0,297	1,38	0,08
0,149	0,82	0,06
0,074	0,38	0,03
Módulo de Finura	5,271	3,268

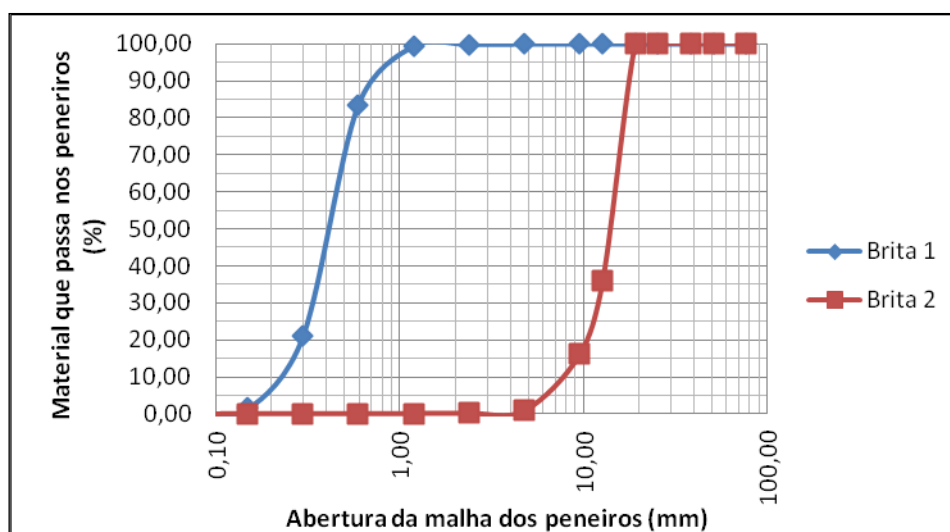


Figura 35 - Curva granulométrica dos agregados grossos naturais

#### 5.5.1.1.2 Agregados grossos reciclados

Na seguinte tabela é apresentada a distribuição granulométrica e módulo de finura do material grosso reciclado, bem como, a respectivas curvas granulométricas (Figura 36).

Tabela 14 - Distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados

Malha do Peneiro [mm]	Material Acumulado que passa [%]	
	Brita (BR1)	Brita (BR2)
76,20	100,00	100,00
50,00	100,00	100,00
38,10	100,00	100,00
25,40	100,00	100,00
19,10	100,00	98,66
12,70	99,98	36,93
9,52	99,40	9,71
4,76	18,89	0,09
2,38	1,94	0,06
1,190	0,85	0,06
0,590	0,48	0,06
0,297	0,30	0,04
0,149	0,21	0,03
0,074	0,13	0,01
Módulo de Finura	5,779	6,913

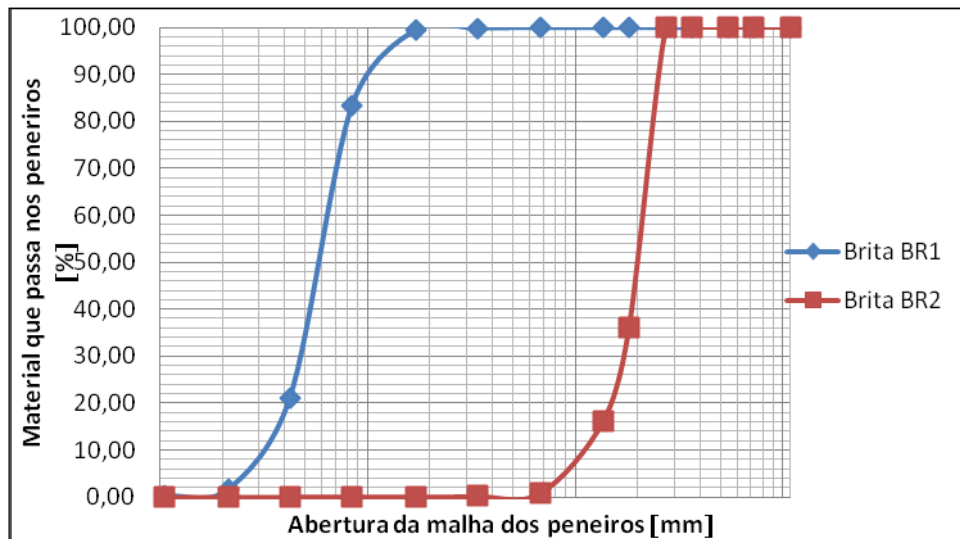


Figura 36 - Curva granulométrica dos agregados grossos reciclados

### 5.5.2 Curva granulométrica

De forma a obter as percentagens de material a utilizar na mistura, foi feita uma comparação entre a curva granulométrica dos agregados utilizados com a curva de referência proposta por Nepomuceno (2006). Assim foram manipulados valores de forma a obter uma curva granulométrica próxima da curva de referência.

Assim, são apresentados seguidamente tabelas onde se apresenta a distribuição dos agregados, como também as respectivas curvas granulométricas de referência e as curvas granulométricas dos agregados. Estas são apresentadas num gráfico de escala logarítmica, onde o eixo das ordenadas representa o material que passa nos peneiros e o eixo das abcissas, a dimensão do agregado.

No anexo C são apresentadas as quantidades de material necessário para a realização das misturas de BAC (0%, 20%, 40% e 100% de substituição de agregados grossos).

#### 5.5.2.1 Agregados finos

Na seguinte tabela é apresentada a aproximação da distribuição granulométrica dos agregados à curva de referência.

Tabela 15 - Aproximação da distribuição granulométrica dos agregados finos à distribuição granulométrica de referência

Malha do Peneiro [mm]	Material Acumulado que passa [%]		Curva Real	Curva de Referência	Erro Percentual
	Areia (AF)	Areia (AG)			
		0,82			
9,52	99,96	100,00	99,97	100,00	0,03
4,76	99,96	99,51	99,88	100,00	0,12
2,38	99,85	74,59	95,30	99,10	3,80
1,19	99,42	50,80	90,67	90,80	0,13
0,59	83,28	30,84	73,84	62,30	11,54
0,297	21,15	13,47	19,77	21,00	1,23
0,149	1,53	3,99	1,97	4,70	2,73
0,074	0,20	1,34	0,41	0,80	0,39
Módulo de Finura	1,949	3,268	2,186	2,221	
Erro Médio					2,22

De forma a diminuir o erro, foi encontrada a seguinte, distribuição dos agregados, com 82% de areia fina e 18% areia grossa. Foi encontrado um erro mínimo de 2,22% que se considera aceitável, visto não haver uma diferença significativa do módulo de finura.

#### 5.5.2.2 Agregados grossos naturais

Na seguinte tabela é apresentada a aproximação da distribuição granulométrica dos agregados à curva de referência.

Tabela 16 - Aproximação da distribuição granulométrica dos agregados grossos naturais à distribuição granulométrica de referência

Malha do Peneiro [mm]	Material Acumulado que passa [%]		Curva Real	Curva de Referência	Erro Percentual
	Brita (B1)	Brita (B2)			
	0,68	0,32			
76,2	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
50	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
12,7	99,98	36,15	94,57	94,57	15,02
9,52	99,95	16,11	74,90	74,90	1,78
4,76	53,82	0,87	36,54	36,54	0,34
2,38	9,92	0,20	5,99	5,99	0,82
1,19	4,57	0,13	2,24	2,24	0,91
0,59	2,43	0,09	1,31	1,31	0,37
0,297	1,38	0,08	0,79	0,79	0,17
0,149	0,82	0,06	0,50	0,50	0,08
0,074	0,38	0,03	0,28	0,28	0,01
Módulo de Finura	5,271	6,825	5,768	5,770	
Erro Médio					1,30

Para um erro mínimo de 1,30% foi encontrada a porcentagem de material grosso a utilizar nas composições da mistura. Sendo 68% de brita 1 (3/6) e 32% de brita 2 (6/15).

### 5.5.2.3 Agregados grossos reciclados

Na seguinte tabela é apresentada a aproximação da distribuição granulométrica dos agregados à curva de referência.

Tabela 17 - Aproximação da distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados à distribuição granulométrica de referência

Malha do Peneiro [mm]	Material Acumulado que passa [%]		Curva Real	Curva de Referência	Erro Percentual
	Brita (BR1)	Brita (BR2)			
	0,9	0,1			
76,2	100	100	100	100	0
50	100	100	100	100	0
38,1	100	100	100	100	0
25,4	100	100	100	100	0
19,1	100	100	99,87	100	0,13
12,7	99,98	36,15	93,67	94,57	0,9
9,52	99,4	16,11	90,43	74,9	15,53
4,76	18,89	0,87	17,01	36,54	19,53

Tabela 18 - Aproximação da distribuição granulométrica dos agregados grossos reciclados à distribuição granulométrica de referência (Continuação)

Malha do Peneiro [mm]	Material Acumulado que passa [%]		Curva Real	Curva de Referência	Erro Percentual
	Brita (BR1)	Brita (BR2)			
	0,9	0,1			
2,38	1,94	0,2	1,75	5,99	4,24
1,19	0,85	0,13	0,77	2,24	1,47
0,59	0,48	0,09	0,44	1,31	0,87
0,297	0,3	0,08	0,28	0,79	0,51
0,149	0,21	0,06	0,19	0,5	0,31
0,074	0,13	0,03	0,12	0,28	0,16
Módulo de Finura	5,779	6,913	5,893	5,77	
Erro Médio					2,91

Foi necessário realizar esta aproximação no caso dos agregados reciclados, por forma encontrar a melhor aproximação no caso dos betões com percentagens de agregados reciclados. A aproximação encontrada, tal como, é apresentado no gráfico é de 90% de brita 1 reciclada e 10% de brita 2 reciclada.

Para obter esta aproximação foi necessário ter em conta, a aproximação já realizada para os agregados finos.

### 5.5.3 Ensaios do betão no estado fresco

Foram realizados estudos de modo a avaliar as propriedades reológicas do betão. Como descrito no capítulo 3, foram feitos, o ensaio de espalhamento, e o ensaio do funil V.

Na tabela 20 estão apresentados os resultados obtidos em termos de  $G_c$  (área relativa de espalhamento) e  $R_c$  (velocidade relativa do escoamento). Estão também apresentadas as correcções que foram necessárias fazer ao longo da realização das misturas.

Como se pode verificar os valores das correcções foram aumentando, com o aumento da percentagem de substituição de agregados naturais por agregados grossos. Esta correcção é considerada normal, uma vez que, os agregados reciclados possuem maiores taxas de absorção de água.

Em relação ao trabalho realizado por Rangel (2010), os valores das correcções necessárias são diferentes, devido ao facto de este ter utilizado na amassadura agregados pré saturados com superfície seca.

No presente trabalho, as misturas foram realizadas com os agregados secos, pois Ferreira (Fonseca, 2009), estudou a influência da pré saturação dos agregados e verificou que, o melhor em termos de durabilidade, é a correcção ser feita na altura da mistura. Isto devido à

elevada absorção de água dos betões com agregados reciclados, que é maior nos tempos iniciais do contacto com a água.

Tabela 19 - Parâmetros reológicos da mistura e respectivas correcções das misturas

Betão		d [mm]		do [mm]	t [s]	Gc	Rc	Correcções [ml]	
		d1	d2					Água	Superplastificante
BRF	1º Amassadura	690	710	200	13,68	11,25	0,731	50	32
		700							
	2º Amassadura	600	600		12,96	8,00	0,772	60	22
		600							
BR20	1º Amassadura	600	600	200	16,70	8,00	0,599	110	68
		600							
	2º Amassadura	650	650		13,81	9,56	0,724	105	57
		650							
BR40	1º Amassadura	700	700	200	19,23	11,25	0,520	50	62
		700							
	2º Amassadura	680	660		17,24	10,22	0,580	50	52
		670							
BR100	1º Amassadura	670	680	200	18,19	10,39	0,550	110	82
		675							
	2º Amassadura	670	680		14,39	10,39	0,695	90	82
		675							

Mas no final verificou-se que todas as misturas apresentam os parâmetros reológicos dentro dos valores estipulados para ser considerado um betão auto - compactável.

#### 5.5.4 Ensaios de durabilidade

Realizaram-se os ensaios descritos no capítulo 3, ou seja, permeabilidade ao oxigénio, permeabilidade à água, absorção capilar e profundidade de penetração de água. As medições e cálculos efectuados são apresentados nos anexos D, E, F respectivamente.

##### 5.4.4.1 Permeabilidade ao oxigénio

Em relação à permeabilidade ao oxigénio, e para os betões ensaiados aos 28 dias, não foi possível o registo de valores para a pressão de oxigénio utilizada (2,5 bar) no corpo de prova.

De forma a confirmar os resultados obtidos para os betões com 28 dias de idade, que caracterizam a impermeabilidade dos betões estudados, decidiu-se realizar o mesmo ensaio, mas para betões com 174 dias e pré condicionados. Nesta série de ensaios utilizou-se também uma pressão superior (3,5 bar) à utilizada nos ensaios precedentes. Neste caso verificou-se o movimento da bolha de ar na pipeta e que o tempo para percorrer os 10cm, especificados na metodologia do ensaio oscilava entre os 5 e 7 minutos, para os diferentes betões. De referir

que durante os 174 dias, os corpos de prova estiveram na câmara de cura sob condições de cura normal.

Desta forma confirma-se, nas condições do método utilizado, que os betões preparados com agregados reciclados são considerados impermeáveis.

#### 5.4.4.2 Permeabilidade à água

Em relação ao ensaio de permeabilidade à água, foi feita uma comparação entre corpos de prova com e sem pré condicionamento.

Assim, a figura 37, mostra os valores de coeficiente de permeabilidade para cada tipo de betão sem pré condicionamento, enquanto a figura 38, apresenta os valores relativos aos betões pré condicionados. Já a figura 39 apresenta uma relação entre os betões com e sem pré condicionamento.

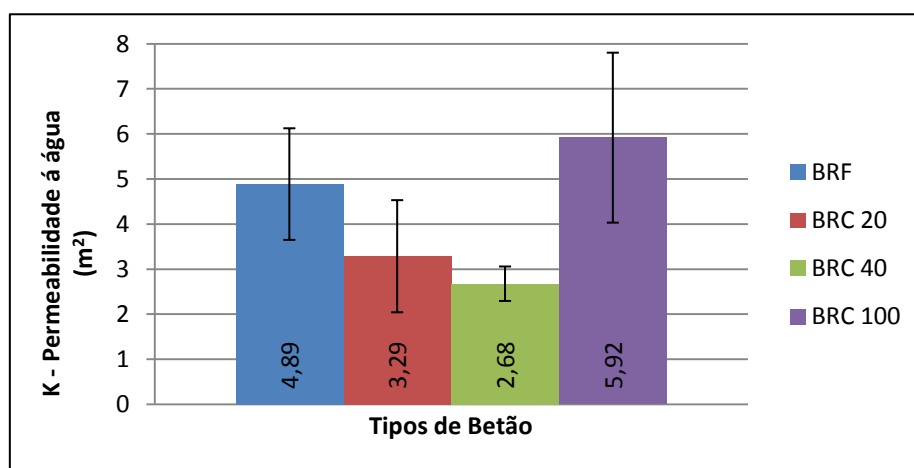


Figura 37 - Resultados do ensaio de permeabilidade à água, para corpos de prova sem pré condicionamento

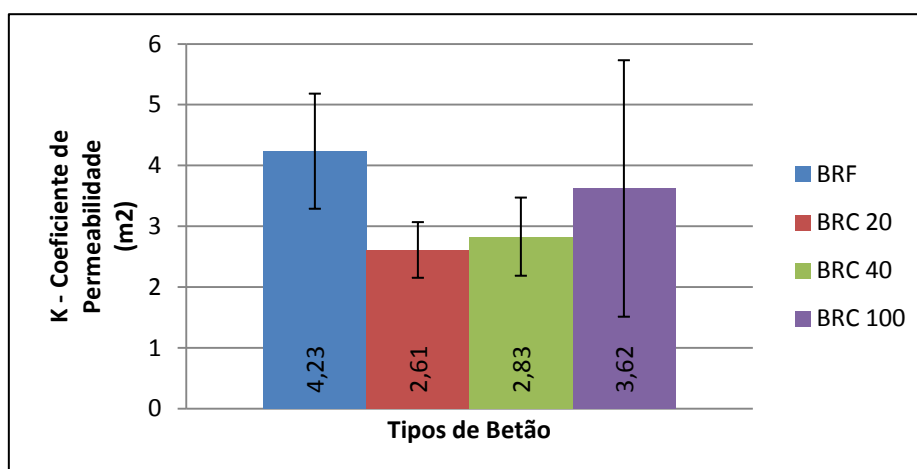


Figura 38 - Resultados do ensaio de permeabilidade à água, para corpos de prova com pré condicionamento

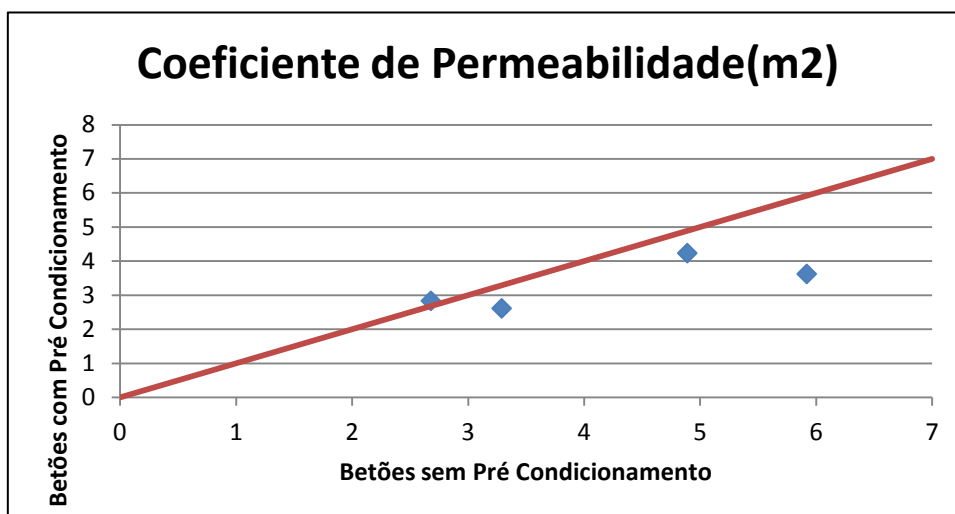


Figura 39 - Gráfico representativo da relação entre os betões com e sem pré condicionamento para o ensaio de permeabilidade água

Analisando as três figuras, mencionam-se os seguintes aspectos:

1. Relativamente aos betões sem pré condicionamento (Figura 37) e ao analisar-se apenas os respectivos valores do coeficiente de permeabilidade verifica-se que os betões com substituição de agregados reciclados apresentam um coeficiente de permeabilidade inferior ao de referência à excepção do BRC 100, mas analisando o desvio padrão apresentado, pode dizer-se que não há diferenças significativas entre o BRF e BRC 100;
2. Para os betões com pré condicionamento (Figura 38) há uma diminuição do coeficiente de permeabilidade para os betões com agregados reciclados em relação aos betões sem pré condicionamento, uma vez que o pré condicionamento equilibra a humidade interior do betão;
3. De acordo com a Figura 37, o desvio padrão o BRC 20 apresenta um comportamento muito semelhante ao BRC 40;
4. Ao longo da realização do ensaio laboratorial verificou-se que a penetração de água no betão com 100% de agregados reciclados era feita de forma mais irregular, ao contrário dos restantes betões onde a entrada de água se fazia de forma constante ao longo da superfície do betão, e por esta razão o desvio padrão apresentado pelo BRC 100 é maior que os restantes betões estudados.

#### 1.4.4.3 Absorção capilar

Os valores obtidos na realização do ensaio indicam que todas as misturas têm um comportamento similar, uma vez que a absorção capilar depende da porosidade da matriz do betão e essa foi pouco modificada com a incorporação do reciclado. Desde a figura 40 à 44, é

ilustrado o comportamento do betão, ao longo das 72h de realização do ensaio e os valores obtidos.

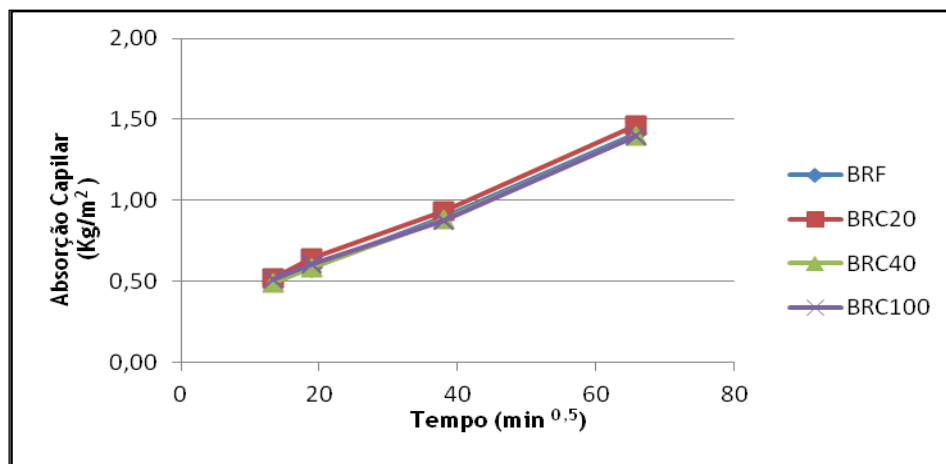


Figura 40 - Resultados do ensaio de absorção capilar para os corpos de prova sem pré condicionamento

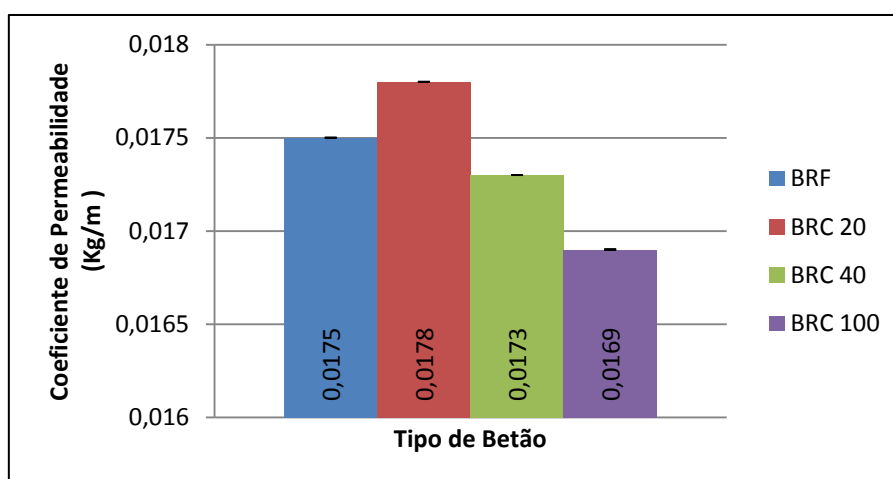


Figura 41 - Valores de coeficiente de absorção capilar para os betões sem pré condicionamento

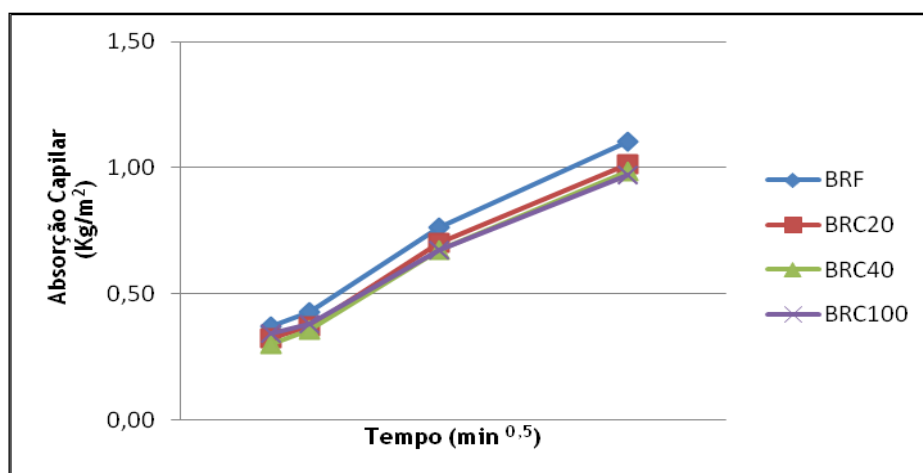


Figura 42 - Resultados do ensaio de absorção capilar para os corpos de prova com pré condicionamento

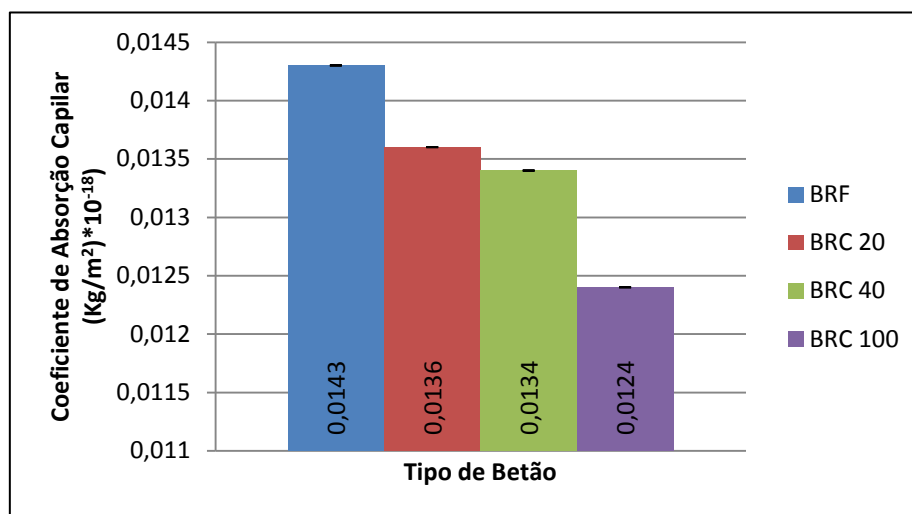


Figura 43 - Valores de coeficiente absorção capilar para os betões com pré condicionamento

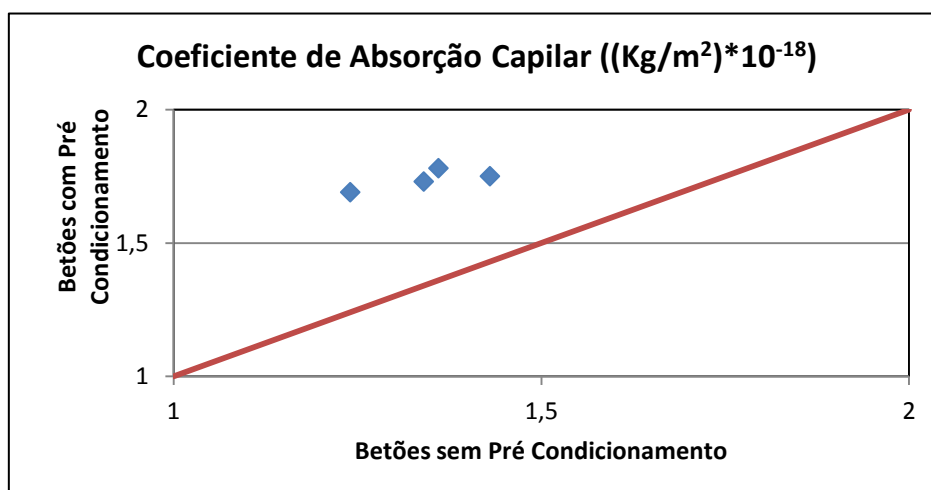


Figura 44 - Gráfico representativo da relação entre os betões com e sem pré condicionamento para o ensaio de absorção capilar

Da análise dos resultados salientam-se os seguintes aspectos:

1. Como se pode constatar ao comparar os resultados apresentados nas figuras 41 e 43, os coeficientes de absorção capilar dos betões com pré condicionamento são inferiores ao betão sem pré condicionamento, o que confirma a tendência observada no ensaio de permeabilidade à água;
2. Para os betões sem pré condicionamento, (Figuras 40 e 41) o BRC 20 apresenta menor coeficiente de absorção capilar que BRF. Em relação aos outros dois tipos de betão, o coeficiente de permeabilidade é menor que o de referência;
3. Para os corpos de prova com pré condicionamento (Figura 43), apresenta-se um resultado onde se verifica que a absorção é cada vez menor, com o aumento da

percentagem de agregados reciclados, ao contrário dos betões sem pré condicionamento;

- Os resultados indicam também, que os betões com pré condicionamento apresentam um comportamento mais regular, o que indica que o pré condicionamento permite homogeneizar a humidade interna da matriz cimentícia, diminuindo a variabilidade dos resultados e tornando-os aparentemente mais lógicos, pois percebe-se na figura 43 que o aumento de agregados reciclados teve um efeito na redução do coeficiente de capilaridade;
- Verificou-se que o desvio padrão existente para cada diferente tipo de betão é praticamente nulo.
- No ensaio de absorção capilar, verificou-se que apesar de existir uma diferença nos coeficientes de absorção capilar em termos de betões com ou sem pré condicionamento, estes apresentam taxas de absorção de água idênticas. Tal como se esperava o betão apresentou nas primeiras horas de realização do ensaio uma maior taxa de absorção de água. Nas primeiras 24h a taxa de absorção para os betões sem pré condicionamento era de 58,59%, e nos betões com pré condicionamento era de 58,23%.

#### 1.4.4.4 Profundidade de penetração de água sobre pressão

Na realização deste ensaio apenas se utilizaram betões com pré condicionamento, pois verificou-se através dos resultados dos ensaios anteriores que estes apresentam coeficientes de absorção capilar e de permeabilidade inferiores aos que são apresentados pelos corpos de prova sem pré condicionamento. O que indica que o pré condicionamento é uma mais-valia no comportamento a longo prazo do betão, uma vez que, este tem como objectivo uniformizar e redistribuir a humidade do betão por forma, a obter uma matriz cimentícia mais homogénea em termos de humidade interna. Desta forma, os resultados obtidos são apresentados na figura 45. No anexo E, são apresentados os valores medidos ao longo da realização do ensaio.

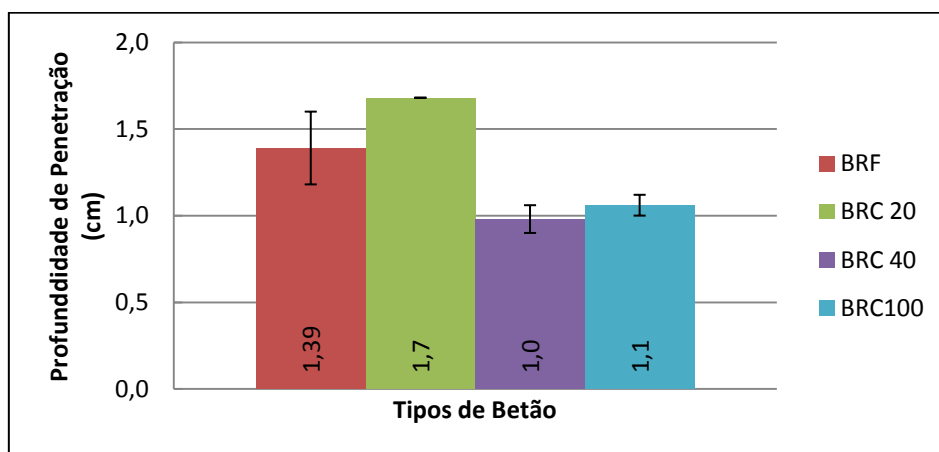


Figura 45 - Profundidade de penetração de água nos diferentes tipos de betão estudados

Da realização do ensaio e de acordo com a figura 45 salientam-se os seguintes aspectos:

1. Os betões com 40% e 100% de agregados reciclados apresentam um comportamento ligeiramente superior ao betão de referência e de acordo com o desvio padrão considera-se que não existe diferença de comportamento entre estes dois tipos de betão;
2. Em relação ao BRC 20, com 20% de substituição de agregados reciclados, este apresenta uma penetração de água superior ao de referência;
3. Na realização do ensaio, verificou-se que a distribuição de água era feita de forma mais ou menos constante ao longo da superfície do betão, para o betão de referência e betão com 20% de agregados reciclados. Nos restantes betões estudados, a penetração de água, foi feita apenas na zona de aplicação da pressão de água;
4. Os resultados vão de encontro ao concluído por Grdic (2010), onde verifica que os betões com agregados reciclados podem ser à prova de água, ou seja, nas condições das metodologias normalizadas, aqui apresentadas, podem ser classificados como de elevada estanquidade ou mesmo em alguns casos impermeáveis.

De uma forma geral verificou-se que o BRC 40 apresentam melhor resultados que o betão de referência. Sabe-se que as características das partículas vão influenciar o comportamento do betão, sendo uma delas a porosidade. Como se pode observar nas figuras 21 e 23 do capítulo 5, os agregados grossos naturais têm uma forma mais arredondada, enquanto que os agregados grossos reciclados apresentam um formato mais alongado. Sendo assim, pensa-se que os betões BRC 40 são favorecidos por possuírem dois tipos de granulometrias na sua composição, o que permite um arranjo das partículas de modo a diminuir o número de vazios do betão e desta forma torná-lo mais resistente à entrada de agentes agressivos. Já em relação ao BRC 20, que também devia apresentar um comportamento melhor que o de referência pois também apresenta dois tipos de granulometria diferentes isso já não se verifica, este facto deve-se as necessidades de correcção de água realizadas durante a mistura, que foram maiores que nos restantes betões aumentando assim a razão A/C que vai influenciar na porosidade do betão, aumentando-a.

Outra das razões pela qual, os betões com agregados reciclados apresentam melhores resultados prende-se também com o uso de superplastificante. Como se pode observar, à medida que se aumentava a substituição de agregados grossos naturais por agregados reciclados, a correcção a efectuar em termos de superplastificante na mistura aumentou também. É sabido que o superplastificante permite aumentar a deformabilidade do betão, sem afectar a sua viscosidade. Para além disso dotam a mistura de uma maior homogeneidade, pois permitem uma diminuição do atrito existente entre as partículas. Logo conferem uma menor porosidade no betão endurecido.

# Capítulo 6 - Conclusões

## 6.1.1 Introdução

Ao longo dos capítulos apresentados foram sendo feitas observações e pequenas conclusões que destacaram a importância dos assuntos abordados para a realização e compreensão do estudo realizado.

A investigação sobre a durabilidade do BAC com a incorporação de agregados reciclados é apenas um contributo, que permitiu dar a conhecer e a compreender o comportamento do betão com este tipo de adição. Este é um tema, que ainda é pouco explorado mas que se apresenta em crescente desenvolvimento em termos de investigação.

No presente capítulo são apresentadas as conclusões retiradas ao longo da campanha experimental. São também apresentadas propostas para futuros desenvolvimentos do tema.

## 6.1.2 Conclusões gerais

Com a revisão da literatura, verifica-se que é essencial o aprofundamento do estudo da reutilização de RCD em novas obras de Engenharia Civil. Para além disso, outras problemáticas vão surgindo no sector que se prendem com questões de durabilidade, e para a qual se têm desenvolvido métodos que permitem uma melhor compreensão da forma como esta é considerada e calculada em projecto e ao longo da vida da própria estrutura.

Relativamente à campanha experimental e ao betão no estado fresco, observou-se que todos os betões se centraram nos limites para a consideração da auto-compactabilidade. Verificou-se, que a correcção em termos de água e superplastificante é bastante complexa, uma vez que os agregados reciclados apresentam altas taxas de absorção de água inicialmente. Para além disso, a forma como os agregados reagem é diferente de mistura para mistura, pois foram realizadas duas amassaduras para o mesmo tipo de betão e com os mesmos materiais, e foi necessário fazer correcções diferentes. Este aspecto deve-se não só à heterogeneidade do betão, mas também, como foi possível observar ao longo da revisão bibliográfica, à forma das partículas e da quantidade de cimento presente no agregado, que não pode ser controlado durante a britagem e é difícil de contabilizar.

Em relação aos resultados dos ensaios realizados, fez-se uma comparação para verificar a influência do pré condicionamento no comportamento dos betões estudados.

Observou-se também que o pré condicionamento não influencia o betão da mesma forma, pois observou-se qual a variação existente entre os resultados obtidos e chegou-se à conclusão de que não é igual para os diferentes tipos de betão.

Dito isto e em relação aos ensaios de durabilidade, verificou-se que não existe um modelo em termos de comportamento, ou seja, tendo como comparação o ensaio de permeabilidade à água e de profundidade de penetração de água, no caso do primeiro ensaio o BRC 20 tem um

coeficiente de permeabilidade inferior ao BRF, este resultado já não acontece no ensaio de profundidade de penetração de água, onde o BRF apresenta menor profundidade de penetração de água.

Contudo as conclusões, retiradas deste estudo vão de encontro às apresentadas por Grdic (2010), onde se verifica que o betão com agregados reciclados apresenta um bom comportamento em termos de comparação com o betão sem agregados reciclados, ou seja com o betão de referência.

### **6.1.3 Propostas para desenvolvimento futuro**

Só através de realização de estudos é que se torna possível compreender qual a influência dos agregados reciclados no comportamento do betão.

Apesar deste estudo ser mais um contributo para a compreensão do tema, existem ainda algumas dúvidas que podem ser esclarecidas com a realização investigação sobre a temática aqui tratada.

Ficaram por avaliar diversas propriedades em termos de durabilidade e também na forma como a utilização de outro tipo de agregados irá afectar o comportamento do betão Deste modo, apresentam-se algumas propostas para desenvolvimento futuro:

1. Estudo da influência da variabilidade do resíduo de construção e demolição de estruturas;
2. Estudo da influência da substituição dos agregados finos naturais por agregados finos reciclados na durabilidade do betão auto-compactável;
3. Estudos que permitam avaliar o desempenho dos agregados reciclados face a outras propriedades de durabilidade (penetração de cloretos, resistividade, carbonatação).

# Referências bibliográficas

Almeida, K. S.; Souza, M.R.;Oliveira, M.Q.;Monteiro,E.B; Junior,A.C.L. (2007). Investigação preliminar da durabilidade de edificações na região.*Exacta*.No.5:267 - 274.

Alves, F.A.P. (2007). *Betões com Agregados Reciclados - Levantamento do “state-of-the-art” Experimental Nacional*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Amorim, P.M.E. (2008). *Influência das Condições de Cura no Desempenho em Termos de Durabilidade de Betões com Agregados Reciclados de Betão*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Andrade, J.J.O. (2005). Critérios probabilísticos para a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado. Universidade do Minho.No.22.

Angulo, S.C. (1998). *Produção de Concretos de Agregados Reciclados*. Tese para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil. Universidade Estadual de Londrina.Londrina.

Angulo S.C.;Mueller. A. (2008).Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. *Materials and Structures*.No.42:739 - 748.Rilem.

Assié, S.; Escadeillas, G. ;Waller, V.(2007). Estimates of self-compacting concrete ´ potencial ´ durability. *Construction and Building Materials*. No.21:1909 - 1917.

Brito, J. ; Alves, F. (2010). Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. *Materials and Structures*.No.43:35 - 51.

Campos, R.R. (2006). *A Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado - Critérios e Directrizes*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal Fluminense, Niterói.

Clifton,J.R.;Naus,D.J. *Service - Life Prediction - State-of-the-art-report*.Reported by ACI committee 365

Coito, M.P.S. (2008). *Avaliação Probabilística da Vida Útil de Estruturas de Betão sob a Acção da Carbonatação e dos Cloretos*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Coutinho, A.S. (1988). *Fabrico e propriedades do betão*. 2ªedição,LNEC, Lisboa.

Coutinho, J. S. (1998). *Melhoria da Durabilidade por tratamento de Cofragem*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

Coutinho, J.S (2001). *Ataque por sulfatos*. Acedido a 2 de Maio de 2011. URL: [http://www.deecc.ufc.br/Download/TB819\\_Patologia\\_e\\_Recuperacao\\_de\\_Estruturas\\_de\\_Concreto/ATAKSulfato.pdf](http://www.deecc.ufc.br/Download/TB819_Patologia_e_Recuperacao_de_Estruturas_de_Concreto/ATAKSulfato.pdf).

Couto, A.B.; Couto, J.P. ; Teixeira, J.C. (2006). *Desconstrução - uma ferramenta para a sustentabilidade da construção*. Nutau. São Paulo

E 245 (1971). *Especificação para inertes para argamassas e betões: análise granulométrica*. LNEC. Lisboa.

E392 (1993). *Especificação para a determinação da permeabilidade ao oxigénio*. LNEC. Lisboa

E393 (1993). *Especificação para a determinação da absorção de água por capilaridade*. LNEC. Lisboa.

EN 12350-8 (2010). *Testing fresh concrete-Part 8:self-compacting concrete-slump flow test*.

EN 12350-9 (2010). *Testing fresh concrete-Part 9:self-compacting concrete-V funnel test*.

EN 1990 (2002). *Basis of Structural Design*.

EN 1992-1 (2004). *Projecto de Estruturas de Betão*.

Ferreira, R.M. (2000). *Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Guimarães.

Ferreira, R.M. (2006). *Optimização da vida útil das estruturas de betão armado. 4as jornadas de Engenharia de Estruturas*. LNEC. Lisboa.

Ferreira, R.M. ; Jalali, S.(2006). *Software for probability-bases durability analysis of concrete structures. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*. ISBN 0 415 39654 9.

Figueiras, H.I.M. (2006). *Estudo e Desenvolvimento Experimental de Composições de Betão Auto - Compactável. Aferição das suas Características Mecânicas e Durabilidade*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto.

Fonseca, N.M.S. (2009). *Betões Estruturais com Incorporação de Agregados Grossos Reciclados de Betão - Influência das Condições de Cura no Desempenho Mecânico*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Gomes, J.P.C.;Wang,D;Oliveira, L.P.;Ferreira,R.M.(2011). *Study of preconditioning procedures for absorption and permeability of concrete.XII International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Porto.

Gomes, M.; Brito J.(2009). *Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. Materials and Structures*.No.42:663 - 675.

Gonçalves, P.C.M. (2007). *Betões com Agregados Reciclados - Análise Comentada da Legislação Existente*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Grdic,Z.J.;Curcic,G.AT;Despotovic;I.M.;Ristic,N.S.(2010).*Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials*.No.24:1129 - 133.

Helene, P.R.L. (1997). Introdução da durabilidade no projecto de estruturas de concreto. *Ambiente Construído*.No.2: p.45-57,ISSN 1415-8876.

Hovde, P.J.; Moser, K. (2004). Performance based methods for service life. RILEM. ISBN: 90-6363-040-9.

<http://icc.ucv.cl/hormigon/fotospat.html>. Acedido a 28 de Abril de 2011

[http://www.altoqi.com.br/#duvidas\\_usuais/Textos\\_explicativos/A\\_deterioracao\\_das\\_estruturas.htm](http://www.altoqi.com.br/#duvidas_usuais/Textos_explicativos/A_deterioracao_das_estruturas.htm). Acedido a 20 de Abril de 2011

<http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/modulo3.pdf>. Acedido a 30 de Abril de 2011

<http://www.concrete-experts.com/pages/ft.htm>. Acedido a 26 de Abril de 2011

<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n59.html>. Acedido a 29 de Abril de 2011

<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/123/artigo53082-1.asp>. Acedido a 29 de Abril de 2011

<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/imprime59011.asp>. Acedido a 29 de Abril de 2011

Kou, S.C.; Poon, C.S. (2009)- Properties of self compacting-concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Composites*.No.31:622 - 627.

Leite, M.B. (2001). *Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*, «Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Levy, S.M. (2001). *Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, Produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Levy, S.M. ; Helene, P.(2004). Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*.No.34:1975 - 1980.

Li, K.; Chen, Z. ; Lian, H.( 2009). Concepts and requirements of durability design of concrete structures: An extensive review of CCE01. *Materials and Structures*.No.41:717 - 731.

Malheiro, R.L.M.C. (2010). Service life design - SELICON modelling of concrete performance, relatório parcial WP1, Guimarães.

Marchand, J. ; Samson, E. (2009). Predicting the service life of concrete structures - limitations of simplified models. *Cement and Concrete Composites*.No.31:515 -521.

Moreira, N.; Couto, J.P; Bastos, A.C. (2007). Reabilitação de estruturas de betão com argamassas de retracção controlada. *Congresso Nacional de Argamassas de Construção*. Lisboa.

- Moreira, P.M.J. (2006). *Contribuição dos Revestimentos Poliméricos para a Durabilidade de Betões em Ambientes Agressivos*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Guimarães.
- Nanukuttan, S; Póvoa, A. (2010). Guia para reparação e reabilitação de infra-estruturas de transporte em betão armado (ISTB). Acedido a 30 de Abril de 2011.URL:[http://www-ext.lnec.pt/LNEC/duratinet/pdf/SS/Presentation\\_APovoa.pdf](http://www-ext.lnec.pt/LNEC/duratinet/pdf/SS/Presentation_APovoa.pdf).
- Nepomuceno, M. (2005). *Metodologia para a Composição de Betões Auto-Compactáveis*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Neves, L.A.C. ;Cruz, P.J.S. (2001). Introdução à análise probabilística simplificada da segurança estrutural. *Engenharia Civil da Universidade do Minho*.No.12.
- Neville, A.M. (2005). *Properties of concrete*, fourth and final edition, ISBN:0-582-2370-5
- NP EN 1008 (2003). *Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem. Ensaio e avaliação da aptidão da água recuperada nos processos de indústria do betão, para o fabrico do betão*. Instituto Português da Qualidade. Lisboa.
- NP EN 12390-8 (2003). *Ensaio do betão endurecido parte 8: profundidade da penetração de água sobre pressão*, Instituto Português da Qualidade. Lisboa.
- NP ENV 206 (1993). *Betão: comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*. Instituto Português da Qualidade. Lisboa.
- Nunes, S.C.B. (2001). *Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Okamura, H. e Ouchi, M.(2003). Self compacting-concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. No.1:p.5 -15.
- Oliveira, M.J.E. (2006). Agregado reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo. *Exacta*. No.especial:p.15 - 25.
- Oyamada, G.P.G. (s.d).Desgaste Superficial Acedido a 2 de Maio de 2011. URL:<http://ms.oyamada.sites.uol.com.br/pdf/Desgastedoconcreto.pdf>.
- Pereira, V.G.A. (2001). *Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos em Concretos: Influência do Tipo de Cimento, da Relação a/c, da Temperatura e do Tempo de Cura*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Persson, B. (2003). Resistance of Self-Compacting-Concrete. *Cement and Concrete Research*. No.33:1933-1938.
- Rangel, M. (2010). *Propriedades do Betão Auto-Compactável com Incorporação de Agregados Grossos Reciclados*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade da Beira Interior, Covilhã.

- Reis, C.M.R. (2010). *Processos de Reutilização e Valorização de Resíduos da Construção e Demolição*. Tese de Mestrado em Engenharia Sanitária. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Abril 2010, ISBN:978-972-0-01183-1
- Santo, H.M.I.E. (2010). *Procedimentos para uma Certificação da Construção Sustentável*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica.
- Sarja, A.(2000). Durability design of concrete structures - committee report 130-CSL. *Materials and Structures*.No.33:14 - 20.
- Schutter, D.G.(2008).Final Report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete.*Materials and Structures*.No.41: 225-233.
- Silva, P.; Brito J. (2009). Betão auto-compactável (BAC) - estado actual do conhecimento. *Engenharia Civil da Universidade do Minho*.No.35.
- Simas, M.S.P. (2007). *Sistemas de Protecção do Betão face à Carbonatação*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Sousa, H.; Sousa Coutinho,J.; Faria,J.; Figueiredo,F.; Sousa,R.(2004).Construction and demolition waste in region of Porto - Portugal: Management and survey. *Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*. RILEM, Spain.226-234. ISBN: 2-912143-53-5.
- Su, N.;Hsu, K.C;Chai,H.W.(2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*.No.31:1779-1807.
- Swamy,R.N. (2003). *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Blackie and Son Ltd.London
- Tasdemir, C. (2003). Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cement and Concrete Research*.No.33:1637 - 1642
- Torgal, F.P. ; Jalali, S. (2007). Construção sustentável. O caso dos materiais de construção. 3º *Congresso Construção na Universidade de Coimbra*, Coimbra
- Torgal, F.P.; Jalali, S. (2008a). A Durabilidade do betão de acordo com a norma NP EN 206 - 1:2007.*Betão*.No.20:pp.45 - 53.
- Torgal, F.P. ; Jalali, S.(2008b). Contributos do betão para a sustentabilidade da construção. *Betão*.No.21:pp.37 - 42.
- Vieira, G.L. et al. (2004). Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. *Engenharia Civil da Universidade do Minho*.No.19.
- Zhu, W ; Bartos, P.J.M. (2003). Permeation properties of self compacting concrete. *Cement and Concrete Research*.No.33:921-926.

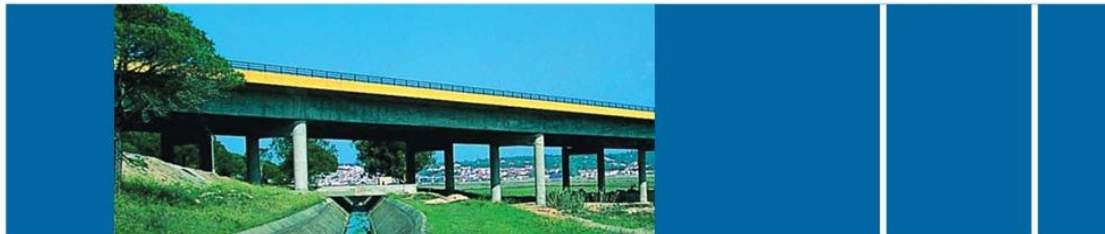


# **Anexo A**

Fichas técnicas

# 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% Clínquer 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 <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

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

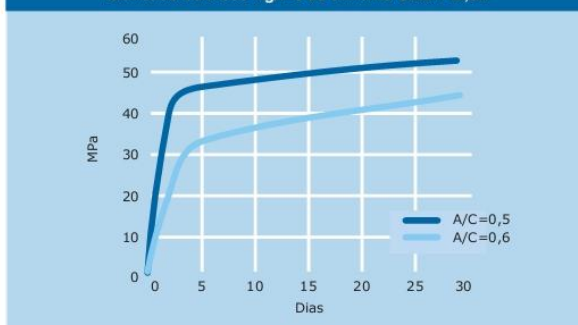
### Características Mecânicas

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

### 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/m<sup>3</sup> 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

**Ficha de Produto**  
 Edição de Dezembro 2009  
 N° de identificação: 1.28  
 Versão nº 5  
 Sika® ViscoCrete® 3005



## Sika® ViscoCrete® 3005

Superplastificante de alto desempenho

<b>Descrição do produto</b>	Sika® ViscoCrete® 3005 é um superplastificante da terceira geração para betão e argamassa. Cumprir os requisitos da norma NP EN 934-2: T 3.1/3.2, como superplastificante ou forte redutor de água para betão.
<b>Utilizações</b>	Sika® ViscoCrete® 3005 permite obter uma muito forte plastificação e uma boa manutenção de consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.  Sika® ViscoCrete® 3005 é especialmente adequado para os seguintes casos: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Betões de Classe igual ou superior a C 30/37, com qualquer consistência, nos quais se pretenda obter uma economia grande de cimento.</li> <li>■ Betões plásticos com descofragem rápida ou solicitados numa idade curta.</li> <li>■ Betão muito plástico, fluido ou mesmo autocompactável (BAC) com resistências iniciais melhoradas e com menor custo.</li> <li>■ Betonagens mais rápidas em época fria.</li> <li>■ Préfabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ.</li> </ul>
<b>Características / Vantagens</b>	Sika® ViscoCrete® 3005 actua sobre as partículas do ligante por dois mecanismos principais: adsorção superficial e efeito espacial. Ambos concorrem para um efeito dispersante muito intenso, permitindo uma elevada redução da água de amassadura ou um aumento marcado da trabalhabilidade. A combinação de vários polímeros permite atingir uma eficácia elevada com qualquer tipo de cimento.  Consegue-se assim: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Um nível de redução de água muito elevado, podendo atingir 20% a 30% conforme a dosagem e a composição; daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compacidade elevada e de permeabilidade muito baixa.</li> <li>■ Um efeito plastificante intenso, permitindo obter, mesmo com forte redução de água, consistências favoráveis para uma colocação fácil.</li> <li>■ Uma boa manutenção de consistência, que pode atingir as 2 horas a 20°C, dependendo do tipo de cimento, da consistência inicial e da dosagem de adjuvante.</li> <li>■ Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em préfabricação, com bom desenvolvimento de resistências.</li> <li>■ Um comportamento mais favorável quanto à retracção e quanto à fluência.</li> </ul> Sika® ViscoCrete® 3005 é isento de clareos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.
<b>Certificados / Boletins de ensaio</b>	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.
<b>Dados do produto</b>	
<b>Aspecto / Cor</b>	Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.
<b>Fornecimento</b>	210 kg (200 litros); 1.050 kg (1 m <sup>3</sup> ); granel



**Ficha de Produto**  
 Edição de Dezembro 2009  
 N° de identificação: 1.28  
 Versão nº 5  
 Sika® ViscoCrete® 3005



## Sika® ViscoCrete® 3005

Superplastificante de alto desempenho

<b>Descrição do produto</b>	Sika® ViscoCrete® 3005 é um superplastificante da terceira geração para betão e argamassa. Cumprir os requisitos da norma NP EN 934-2: T 3.1/3.2, como superplastificante ou forte redutor de água para betão.
<b>Utilizações</b>	Sika® ViscoCrete® 3005 permite obter uma muito forte plastificação e uma boa manutenção de consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.  Sika® ViscoCrete® 3005 é especialmente adequado para os seguintes casos: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Betões de Classe igual ou superior a C 30/37, com qualquer consistência, nos quais se pretenda obter uma economia grande de cimento.</li> <li>■ Betões plásticos com descofragem rápida ou solicitados numa idade curta.</li> <li>■ Betão muito plástico, fluido ou mesmo autocompactável (BAC) com resistências iniciais melhoradas e com menor custo.</li> <li>■ Betonagens mais rápidas em época fria.</li> <li>■ Préfabricação de betão estrutural, em fábrica ou in-situ.</li> </ul>
<b>Características / Vantagens</b>	Sika® ViscoCrete® 3005 actua sobre as partículas do ligante por dois mecanismos principais: adsorção superficial e efeito espacial. Ambos concorrem para um efeito dispersante muito intenso, permitindo uma elevada redução da água de amassadura ou um aumento marcado da trabalhabilidade. A combinação de vários polímeros permite atingir uma eficácia elevada com qualquer tipo de cimento.  Consegue-se assim: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Um nível de redução de água muito elevado, podendo atingir 20% a 30% conforme a dosagem e a composição; daqui resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compacidade elevada e de permeabilidade muito baixa.</li> <li>■ Um efeito plastificante intenso, permitindo obter, mesmo com forte redução de água, consistências favoráveis para uma colocação fácil.</li> <li>■ Uma boa manutenção de consistência, que pode atingir as 2 horas a 20°C, dependendo do tipo de cimento, da consistência inicial e da dosagem de adjuvante.</li> <li>■ Composições adequadas para betão autocompactável (BAC) em obra ou em préfabricação, com bom desenvolvimento de resistências.</li> <li>■ Um comportamento mais favorável quanto à retracção e quanto à fluência.</li> </ul> Sika® ViscoCrete® 3005 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.
<b>Certificados / Boletins de ensaio</b>	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.
<b>Dados do produto</b>	
<b>Aspecto / Cor</b>	Líquido castanho claro, levemente turvo; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.
<b>Fornecimento</b>	210 kg (200 litros); 1.050 kg (1 m <sup>3</sup> ); granel



## **Anexo B**

# **Análise granulométrica dos agregados**

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Agregado:	Proveniência:
Areia Fina	Betão Liz

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,20	0,04	99,96	0,04
(*) 1/2"	(*)12,70	0,00	0,00	99,96	0,04
3/8"	9,52	0,00	0,00	99,96	0,04
n° 4	4,76	0,00	0,00	99,96	0,04
n° 8	2,38	0,60	0,11	99,85	0,15
n° 16	1,190	2,40	0,44	99,42	0,58
n° 30	0,590	88,70	16,13	83,28	16,72
n° 50	0,297	341,60	62,13	21,15	78,85
n° 100	0,149	107,90	19,63	1,53	98,47
n° 200	0,074	7,30	1,33	0,20	99,80
Resíduo		1,10	0,20	0,00	100,00
Totais		549,80	100,00		

(\*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do agregado: 1,949

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Agregado:	Proveniência:
Areia Grossa	Betão Liz

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8"	9,52	0,00	0,00	100,00	0,00
nº 4	4,76	2,70	0,49	99,51	0,49
nº 8	2,38	136,10	24,91	74,59	25,41
nº 16	1,190	130,00	23,80	50,80	49,20
nº 30	0,590	109,00	19,95	30,84	69,16
nº 50	0,297	94,90	17,37	13,47	86,53
nº 100	0,149	51,80	9,48	3,99	96,01
nº 200	0,074	14,50	2,65	1,34	98,66
Resíduo		7,30	1,34	0,00	100,00
Totais		546,30	100,00		

(\*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do agregado: 3,268

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Agregado:	Proveniência:
Brita 1	Pedreira Bartolomeu

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	0,60	0,02	99,98	0,02
3/8"	9,52	0,70	0,03	99,95	0,05
n° 4	4,76	1152,60	46,13	53,82	46,18
n° 8	2,38	1096,90	43,90	9,92	90,08
n° 16	1,190	133,80	5,35	4,57	95,43
n° 30	0,590	53,40	2,14	2,43	97,57
n° 50	0,297	26,30	1,05	1,38	98,62
n° 100	0,149	13,90	0,56	0,82	99,18
n° 200	0,074	11,00	0,44	0,38	99,62
Resíduo		9,60	0,38	0,00	100,00
Totais		2498,80	100,00		

(\*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do agregado: 5,271

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Agregado:	Proveniência:
Brita 2	Pedreira Bartolomeu

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	1915,50	63,85	36,15	63,85
3/8"	9,52	600,90	20,03	16,11	83,89
n° 4	4,76	457,20	15,24	0,87	99,13
n° 8	2,38	20,30	0,68	0,20	99,80
n° 16	1,190	1,90	0,06	0,13	99,87
n° 30	0,590	1,20	0,04	0,09	99,91
n° 50	0,297	0,50	0,02	0,08	99,92
n° 100	0,149	0,50	0,02	0,06	99,94
n° 200	0,074	0,90	0,03	0,03	99,97
Resíduo		0,90	0,03	0,00	100,00
Totais		2999,80	100,00		

(\*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do agregado: 6,825

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Agregado:	Proveniência:
Brita Reciclada 1	Reciclagem

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1/2"	(*)12,70	0,60	0,02	99,98	0,02
3/8"	9,52	14,40	0,58	99,40	0,60
n° 4	4,76	2012,30	80,51	18,89	81,11
n° 8	2,38	423,70	16,95	1,94	98,06
n° 16	1,190	27,10	1,08	0,85	99,15
n° 30	0,590	9,30	0,37	0,48	99,52
n° 50	0,297	4,40	0,18	0,30	99,70
n° 100	0,149	2,40	0,10	0,21	99,79
n° 200	0,074	1,90	0,08	0,13	99,87
Resíduo		3,30	0,13	0,00	100,00
Totais		2499,40	100,00		

(\*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do agregado: 5,779

**ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Agregado:	Proveniência:
Brita Reciclagem 2	Reciclagem

Peneiro	Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Percentagens acumuladas	
		(g)	%	Passados (%)	Retidos (%)
3"	76,20	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 2"	(*)50,80	0,00	0,00	100,00	0,00
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00	0,00
(*) 1"	(*)25,40	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,10	40,20	1,34	98,66	1,34
(*) 1/2"	(*)12,70	1852,10	61,73	36,93	63,07
3/8"	9,52	816,90	27,23	9,71	90,29
n° 4	4,76	288,40	9,61	0,09	99,91
n° 8	2,38	1,00	0,03	0,06	99,94
n° 16	1,190	0,10	0,00	0,06	99,94
n° 30	0,590	-0,10	0,00	0,06	99,94
n° 50	0,297	0,50	0,02	0,04	99,96
n° 100	0,149	0,40	0,01	0,03	99,97
n° 200	0,074	0,50	0,02	0,01	99,99
Resíduo		0,40	0,01	0,00	100,00
Totais		3000,40	100,00		

(\*) Série secundária

Peneiros para o cálculo do módulo de finura

Módulo de finura do agregado: 6,913

# **Anexo C**

Estudo dos betões

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS**

<b>Identificação do betão</b>
BRF

<b>Identificação da mistura de finos</b>
40C1+60FC

<b>Data</b>
22-03-2011

Parâmetros da composição				
Vm/Vg	Vv (m <sup>3</sup> )	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m <sup>3</sup>					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m <sup>3</sup>				
δs1	δs2	δg1	δg2	δg3
2570	2610	2710	2700	0

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m <sup>3</sup>				
δsp1	---	---	---	---
1050	---	---	---	---

δp=	2888,00 kg/m <sup>3</sup>
Vsp/vp=	0,010314
Vg=	0,298462 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Vm=	0,671538 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Vp=	0,226847 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Vw=	0,158793 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Vsp=	0,00234 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Vs=	0,283559 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Vs/Vm=	0,422252

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
Percentagem de passados			
9,520	99,96	100,00	99,97
4,760	99,96	99,51	99,88
2,380	99,85	74,59	95,30
1,190	99,42	50,80	90,67
0,590	83,28	30,84	73,84
0,297	21,15	13,47	19,77
0,149	1,53	3,99	1,97
0,074	0,20	1,34	0,41
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,949	3,268	2,186

Abertura da malha (mm)	Brita 3/6 g1	Brita 6/15 g2	0,000	Mistura (Curva Real)
	g1	g2	0,000	
Percentagem de passados				
38,100	100,00	100,00	0,00	100,00
25,400	100,00	100,00	0,00	100,00
19,100	100,00	100,00	0,00	100,00
12,700	99,98	36,15	0,00	79,55
9,520	99,95	16,11	0,00	73,12
4,760	53,82	0,87	0,00	36,88
2,380	9,92	0,20	0,00	6,81
1,190	4,57	0,13	0,00	3,15
0,590	2,43	0,09	0,00	1,68
0,297	1,38	0,08	0,00	0,96
0,149	0,82	0,06	0,00	0,58
0,074	0,38	0,03	0,00	0,27
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura				
	5,271	6,825	0,000	5,768

Quantidades para uma amassadura de: 1000,00 litros	
C1=	284,92 kg
C2=	0,00 kg
CV=	0,00 kg
MS=	0,00 kg
FC=	370,21 kg
FG=	0,00 kg
W=	158,79 litros
Sp=	2,34 litros
S1=	597,57 kg
S2=	133,22 kg
G1=	550,00 kg
G2=	257,87 kg
G3=	0,00 kg
<u>Massa total, em kg</u>	
2355,0	
<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>	
0,557	
<u>Razão água/cimento</u>	
0,557	
<u>Razão água/finos</u>	
0,242	

Quantidades para uma amassadura de: 25,00 litros	
C1=	7,123 kg
C2=	0,000 kg
CV=	0,000 kg
MS=	0,000 kg
FC=	9,255 kg
FG=	0,000 kg
W=	3,970 litros
Sp=	0,058 litros
S1=	14,939 kg
S2=	3,330 kg
G1=	13,750 kg
G2=	6,447 kg
G3=	0,000 kg
<u>Massa total, em kg</u>	
58,88	
<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>	
0,557	
<u>Razão água/cimento</u>	
0,557	
<u>Razão água/finos</u>	
0,242	

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS**

<b>Identificação do betão</b>
BRC20

<b>Identificação da mistura de finos</b>
40C1+60FC

<b>Data</b>
22-03-2011

Parâmetros da composição				
<b>Vm/Vg</b>	<b>Vv (m³)</b>	<b>Vp/Vs</b>	<b>Vw/Vp</b>	<b>Sp/P%</b>
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Composição da mistura de finos					
<b>fc1</b>	<b>fc2</b>	<b>fcv</b>	<b>fms</b>	<b>ffc</b>	<b>ffg</b>
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³					
<b>δc1</b>	<b>δc2</b>	<b>δcv</b>	<b>δms</b>	<b>δfc</b>	<b>δfg</b>
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³					
<b>δs1</b>	<b>δs2</b>	<b>δg1</b>	<b>δg2</b>	<b>δg3</b>	<b>δg4</b>
2570	2610	2710	2700	2509	2485

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³					
<b>δsp1</b>	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---

δp=	2888,00 kg/m³
Vsp/vp=	0,010314286
Vg=	0,298461538 m³/m³
Vm=	0,671538462 m³/m³
Vp=	0,226847016 m³/m³
Vw=	0,158792911 m³/m³
Vsp=	0,002339765 m³/m³
Vs=	0,28355877 m³/m³
Vs/Vm=	0,422252464

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,82	0,18	
Percentagem de passados			
9,520	99,96	100,00	99,97
4,760	99,96	99,51	99,88
2,380	99,85	74,59	95,30
1,190	99,42	50,80	90,67
0,590	83,28	30,84	73,84
0,297	21,15	13,47	19,77
0,149	1,53	3,99	1,97
0,074	0,20	1,34	0,41
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,949	3,268	2,186

Abertura da malha (mm)	Brita 1	Brita 2	BR1	BR2	Mistura (Curva Real)
	g1	g2	g3	g4	
	0,54	0,26	0,18	0,02	
Percentagem de passados					
38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,400	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,100	100,00	100,00	100,00	98,66	99,97
12,700	99,98	36,15	99,98	36,93	82,38
9,520	99,95	16,11	99,40	9,71	76,58
4,760	53,82	0,87	18,89	0,09	32,90
2,380	9,92	0,20	1,94	0,06	5,80
1,190	4,57	0,13	0,85	0,06	2,67
0,590	2,43	0,09	0,48	0,06	1,43
0,297	1,38	0,08	0,30	0,04	0,83
0,149	0,82	0,06	0,21	0,03	0,50
0,074	0,38	0,03	0,13	0,01	0,24
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de Finura					
	5,271	6,825	5,779	6,913	5,793

<b>Quantidades para uma amassadura de:</b>		1000,00 litros
C1=	284,92 kg	
C2=	0,00 kg	
CV=	0,00 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS=	0,00 kg	<b>2328,3</b>
FC=	370,21 kg	
FG=	0,00 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W=	158,79 litros	<b>0,557</b>
Sp=	2,34 litros	
S1=	597,57 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2=	133,22 kg	<b>0,557</b>
G1=	440,00 kg	
G2=	206,30 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3=	134,79 kg	<b>0,242</b>
G4=	14,83 kg	

<b>Quantidades para uma amassadura de:</b>		25,00 litros
C1=	7,123 kg	
C2=	0,000 kg	
CV=	0,000 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS=	0,000 kg	<b>58,21</b>
FC=	9,255 kg	
FG=	0,000 kg	<u>Razão água/(mat. cimentíceos)</u>
W=	3,970 litros	<b>0,557</b>
Sp=	0,058 litros	
S1=	14,939 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2=	3,330 kg	<b>0,557</b>
G1=	11,000 kg	
G2=	5,157 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3=	3,370 kg	<b>0,242</b>
G4=	0,371 kg	

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS**

<b>Identificação do betão</b>
BRC40

<b>Identificação da mistura de finos</b>
40C1+60FC

<b>Data</b>
22-03-2011

Parâmetros da composição				
Vm/Vg	Vv (m³)	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	ffg
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δfg
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³					
δs1	δs2	δg1	δg2	δg3	δg4
2570	2610	2710	2700	2509	2485

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³					
δsp1	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---

δp=	2888,00 kg/m³
Vsp/vp=	0,010314286
Vg=	0,298461538 m³/m³
Vm=	0,671538462 m³/m³
Vp=	0,226847016 m³/m³
Vw=	0,158792911 m³/m³
Vsp=	0,002339765 m³/m³
Vs=	0,28355877 m³/m³
Vs/Vm=	0,422252464

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,82	0,18	
Percentagem de passados			
9,520	99,96	100,00	99,97
4,760	99,96	99,51	99,88
2,380	99,85	74,59	95,30
1,190	99,42	50,80	90,67
0,590	83,28	30,84	73,84
0,297	21,15	13,47	19,77
0,149	1,53	3,99	1,97
0,074	0,20	1,34	0,41
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,949	3,268	2,186

Abertura da malha (mm)	Brita 1	Brita 2	BR1	BR2	Mistura (Curva Real)
	g1	g2	g3	g4	
	0,41	0,19	0,36	0,04	
Percentagem de passados					
38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,400	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,100	100,00	100,00	100,00	98,66	99,95
12,700	99,98	36,15	99,98	36,93	85,20
9,520	99,95	16,11	99,40	9,71	80,05
4,760	53,82	0,87	18,89	0,09	28,93
2,380	9,92	0,20	1,94	0,06	4,78
1,190	4,57	0,13	0,85	0,06	2,20
0,590	2,43	0,09	0,48	0,06	1,18
0,297	1,38	0,08	0,30	0,04	0,69
0,149	0,82	0,06	0,21	0,03	0,42
0,074	0,38	0,03	0,13	0,01	0,21
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de Finura					
	5,271	6,825	5,779	6,913	5,818

Quantidades para uma amassadura de:		1000,00 litros
C1=	284,92 kg	
C2=	0,00 kg	
CV=	0,00 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS=	0,00 kg	2301,5
FC=	370,21 kg	
FG=	0,00 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>
W=	158,79 litros	0,557
Sp=	2,34 litros	
S1=	597,57 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2=	133,22 kg	0,557
G1=	330,00 kg	
G2=	154,72 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3=	269,58 kg	0,242
G4=	29,67 kg	

Quantidades para uma amassadura de:		25,00 litros
C1=	7,123 kg	
C2=	0,000 kg	
CV=	0,000 kg	<u>Massa total, em kg</u>
MS=	0,000 kg	57,54
FC=	9,255 kg	
FG=	0,000 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>
W=	3,970 litros	0,557
Sp=	0,058 litros	
S1=	14,939 kg	<u>Razão água/cimento</u>
S2=	3,330 kg	0,557
G1=	8,250 kg	
G2=	3,868 kg	<u>Razão água/finos</u>
G3=	6,740 kg	0,242
G4=	0,742 kg	

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS**

<b>Identificação do betão</b>
BR100

<b>Identificação da mistura de finos</b>
40C1+60FC

<b>Data</b>
06-04-2011

Parâmetros da composição				
<b>Vm/Vg</b>	<b>Vv (m³)</b>	<b>Vp/Vs</b>	<b>Vw/Vp</b>	<b>Sp/P%</b>
2,250	0,030	0,800	0,700	0,375

Composição da mistura de finos					
<b>fc1</b>	<b>fc2</b>	<b>fcv</b>	<b>fms</b>	<b>ffc</b>	<b>ffg</b>
0,400	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000

Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m³					
<b>δc1</b>	<b>δc2</b>	<b>δcv</b>	<b>δms</b>	<b>δfc</b>	<b>δfg</b>
3140	0	0	0	2720	0

Massas volúmicas dos agregados, em kg/m³				
<b>δs1</b>	<b>δs2</b>	<b>δg1</b>	<b>δg2</b>	<b>δg3</b>
2570	2610	2710	2700	0

Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m³				
<b>δsp1</b>	---	---	---	---
1050	---	---	---	---

δp= 2888,00 kg/m³
Vsp/vp= 0,010314
Vg= 0,298462 m³/m³
Vm= 0,671538 m³/m³
Vp= 0,226847 m³/m³
Vw= 0,158793 m³/m³
Vsp= 0,00234 m³/m³
Vs= 0,283559 m³/m³
Vs/Vm= 0,422252

Abertura da malha (mm)	Areia 0/1	Areia 0/5	Mistura (Curva Real)
	a1	a2	
	0,82	0,18	
Percentagem de passados			
9,520	99,96	100,00	99,97
4,760	99,96	99,51	99,88
2,380	99,85	74,59	95,30
1,190	99,42	50,80	90,67
0,590	83,28	30,84	73,84
0,297	21,15	13,47	19,77
0,149	1,53	3,99	1,97
0,074	0,20	1,34	0,41
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura			
	1,949	3,268	2,186

Abertura da malha (mm)	Brita 3/6	Brita 6/15	--	Mistura (Curva Real)
	BR1	BR2	--	
	0,90	0,10	0,00	
Percentagem de passados				
38,100	100,00	100,00	0,00	100,00
25,400	100,00	100,00	0,00	100,00
19,100	100,00	98,66	0,00	99,87
12,700	99,98	36,93	0,00	93,67
9,520	99,40	9,71	0,00	90,43
4,760	18,89	0,09	0,00	17,01
2,380	1,94	0,06	0,00	1,75
1,190	0,85	0,06	0,00	0,77
0,590	0,48	0,06	0,00	0,44
0,297	0,30	0,04	0,00	0,28
0,149	0,21	0,03	0,00	0,19
0,074	0,13	0,01	0,00	0,12
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura				
	5,779	6,913	0,000	5,893

<p><b>Quantidades para uma amassadura de: 1000,00 litros</b></p> <p>C1= 284,92 kg                  C2= 0,00 kg                  CV= 0,00 kg                  MS= 0,00 kg                  FC= 370,21 kg                  FG= 0,00 kg                  W= 158,79 litros                  Sp= 2,34 litros                  S1= 597,57 kg                  S2= 133,22 kg                  G1= 727,95 kg                  G2= 80,58 kg                  G3= 0,00 kg</p> <p align="right"><u>Massa total, em kg</u> 2355,7</p> <p align="right"><u>Razão água/(mat. cimentícios)</u> 0,557</p> <p align="right"><u>Razão água/cimento</u> 0,557</p> <p align="right"><u>Razão água/finos</u> 0,242</p>	<p><b>Quantidades para uma amassadura de: 25,00 litros</b></p> <p>C1= 7,123 kg                  C2= 0,000 kg                  CV= 0,000 kg                  MS= 0,000 kg                  FC= 9,255 kg                  FG= 0,000 kg                  W= 3,970 litros                  Sp= 0,058 litros                  S1= 14,939 kg                  S2= 3,330 kg                  G1= 18,199 kg                  G2= 2,015 kg                  G3= 0,000 kg</p> <p align="right"><u>Massa total, em kg</u> 58,89</p> <p align="right"><u>Razão água/(mat. cimentícios)</u> 0,557</p> <p align="right"><u>Razão água/cimento</u> 0,557</p> <p align="right"><u>Razão água/finos</u> 0,242</p>
---	--

## **Anexo D**

Ensaio de durabilidade - permeabilidade à água

Ensaio de Permeabilidade à Água para os Betões BRF de Referência sem Pré Condicionamento										
Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>entra</sub> [bar]	t <sub>estabil</sub> [min]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	δ	k <sub>w</sub> [m/s]	K [m <sup>2</sup> ]
BRF A1	3,8	4,9	0,0019	2,51	60	1	0,833	10	3,76E-11	4,89E-18
BRF B3	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,9				
BRF C2	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,7				
BRF A4	4,0	4,9	0,0019	2,51	60	0,8				
BRF B5	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,8				
BRF C6	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,8				

Ensaio de Permeabilidade à Água para os Betões BRC 20 sem Pré Condicionamento										
Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>entra</sub> [bar]	t <sub>estabil</sub> [min]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	δ	k <sub>w</sub> [m/s]	K [m <sup>2</sup> ]
BRC20 A2	4	4,9	0,0019	2,51	60	0,6	0,683	10	2,53E-11	3,29E-18
BRC20 B3	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC20 C4	4	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC20 A5	4	5,0	0,0020	2,51	60	0,7				
BRC20 B6	4	5,0	0,0020	2,51	60	0,7				
BRC20 C1	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,9				

Ensaio de Permeabilidade á Água para os Betões BRC 40 sem Pré Condicionamento										
Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>entra</sub> [bar]	t <sub>estabil</sub> [min]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	δ	k <sub>w</sub> [m/s]	K [m <sup>2</sup> ]
BRC40 A2	3,9	4,9	0,0019	2,51	60	0,6	0,617	10	2,06E-11	2,68E-18
BRC40 B3	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC40 C1	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,7				
BRC40 A5	3,8	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC40 B4	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC40 C6	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				

Ensaio de Permeabilidade á Água para os Betões BRC 100 sem Pré Condicionamento										
Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>entra</sub> [bar]	t <sub>estabil</sub> [min]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	δ	k <sub>w</sub> [m/s]	K [m <sup>2</sup> ]
BRC100 A1	3,9	5,0	0,001963495	2,51	60	1,6	0,917	10	4,56E-11	5,92E-18
BRC100 B2	3,9	5,0	0,001963495	2,51	60	1				
BRC100 C3	3,8	5,0	0,196349541	2,51	60	0,8				
BRC100 A4	4,0	5,0	0,001963495	2,51	0	0,8				
BRC100 B5	3,9	5,0	0,001963495	2,51	60	0,6				
BRC100 C6	3,9	5,0	0,002010902	2,51	60	0,7				

Ensaio de Permeabilidade à Água para os Betões BRF com Pré Condicionamento										
Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>entra</sub> [bar]	t <sub>estabil</sub> [min]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	δ	k <sub>w</sub> [m/s]	K [m <sup>2</sup> ]
BRF A1	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,7	0,775	10	3,26E-11	4,23E-18
BRF A2	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,75				
BRF B1	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	1,3				
BRF B2	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,65				
BRF B3	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,65				
BRF B4	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				

Ensaio de Permeabilidade à Água para os Betões BRC 20 com Pré Condicionamento										
Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>entra</sub> [bar]	t <sub>estabil</sub> [min]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	δ	k <sub>w</sub> [m/s]	K [m <sup>2</sup> ]
BRC20 A3	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,6	0,617	10	2,01E-11	2,61E-18
BRC20 B4	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC20 B1	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,65				
BRC20 B2	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,7				
BRC20 B5	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC20 B6	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,55				

Ensaio de Permeabilidade á Água para os Betões BRC 40 com Pré Condicionamento										
Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>entra</sub> [bar]	t <sub>estabil</sub> [min]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	δ	k <sub>w</sub> [m/s]	K [m <sup>2</sup> ]
BRC40 B1	3,9	4,9	0,0019	2,51	60	0,65	0,633	10	2,17E-11	2,83E-18
BRC40 B2	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC40 B3	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,65				
BRC40 B4	3,8	5,0	0,0020	2,51	60	0,6				
BRC40 B5	4,0	5,0	0,0020	2,51	60	0,55				
BRC40 B6	3,9	5,0,	0,0020	2,51	60	0,75				

Ensaio de Permeabilidade á Água para os Betões BRC 100 com Pré Condicionamento										
Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>entra</sub> [bar]	t <sub>estabil</sub> [min]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	δ	k <sub>w</sub> [m/s]	K [m <sup>2</sup> ]
BRC100 C1	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,55	0,717	10	2,78E-11	3,62E-18
BRC100 C2	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	1				
BRC100 B3	3,8	50,0	0,1963	2,51	60	0,9				
BRC100 B4	4,0	5,0	0,0020	2,51	0	0,6				
BRC100 B5	3,9	5,0	0,0020	2,51	60	0,7				
BRC100 B6	3,9	5,06	0,0020	2,51	60	0,55				

## **Anexo E**

Ensaio de durabilidade - absorção capilar

**Ensaio de Absorção Capilar (Corpos de Prova sem Pré Condicionamento)**

Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>prismático</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	M <sub>0</sub> [g]	t <sub>i</sub> [s]			
						M <sub>3h</sub> [g]	M <sub>6h</sub> [g]	M <sub>24h</sub> [g]	M <sub>72h</sub> [g]
						A [mm <sup>2</sup> ]	K <sub>3h</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>6h</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>24h</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]
BRFAB1	99	112	--	9852,03	1946,30	1951,2	1952,0	1955,3	1960,3
BRFAB2	97	112	--	9852,03	1935,10	1940,0	1941,0	1943,8	1948,9
BRC20AB1	98	112	--	9852,03	1914,40	1919,9	1921,3	1924,5	1929,9
BRC20AB2	98	112	--	9852,03	1932,80	1937,6	1938,6	1941,1	1946,2
BRC40AB1	98	112	--	9852,03	1939,10	1943,9	1944,9	1947,8	1952,9
BRC40AB2	100	112	--	9852,03	1948,80	1953,7	1954,5	1957,5	1962,6
BR100AB1	99	112	--	9852,03	1925,80	1930,8	1931,7	1934,6	1939,6
BR100AB2	97	112	--	9852,03	1909,30	1914,4	1915,3	1917,8	1923,1
BRFAB1	9852,03	0,0005	0,0006	0,0009	0,0014	4,97E-04	5,89E-04	8,98E-04	1,41E-03
BRFAB2	9852,03	0,0005	0,0006	0,0009	0,0014				
BRC20AB1	9852,03	0,0006	0,0007	0,0010	0,0016	5,23E-04	6,45E-04	9,34E-04	1,47E-03
BRC20AB2	9852,03	0,0005	0,0006	0,0008	0,0014				
BRC40AB1	9852,03	0,0005	0,0006	0,0009	0,0014	4,92E-04	5,84E-04	8,83E-04	1,40E-03
BRC40AB2	9852,03	0,0005	0,0006	0,0009	0,0014				
BR100AB1	9852,03	0,0005	0,0006	0,0009	0,0014	5,13E-04	6,04E-04	8,78E-04	1,40E-03
BR100AB2	9852,03	0,0005	0,0006	0,0009	0,0014				

**Ensaio de Absorção Capilar (Corpos de Prova com Pré Condicionamento)**

Provete	H [mm]	Ø [mm]	A <sub>prismático</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>cilindrico</sub> [mm <sup>2</sup> ]	M <sub>0</sub> [g]	t <sub>i</sub> [s]			
						M <sub>3h</sub> [g]	M <sub>6h</sub> [g]	M <sub>24h</sub> [g]	M <sub>72h</sub> [g]
BRFAB1	98	112	--	9852,03	1919,00	1922,6	1923,3	1926,7	1930
BRFAB2	96	112	--	9852,03	1870,60	1874,3	1874,7	1877,9	1881,3
BRC20AB1	97	112	--	9852,03	1916,90	1920,2	1920,7	1924,2	1927,2
BRC20AB2	96	112	--	9852,03	1868,60	1871,7	1872,1	1875,1	1878,3
BRC40AB1	96	112	--	9852,03	1923,00	1925,9	1926,6	1929,8	1932,7
BRC40AB2	95	112	--	9852,03	1892,90	1895,9	1896,3	1899,4	1902,6
BR100AB1	96	112	--	9852,03	1887,10	1890,4	1890,8	1893,6	1896,6
BR100AB2	98	112	--	9852,03	1908,50	1911,9	1912,3	1915,3	1918,1
	A [mm <sup>2</sup> ]	K <sub>3h</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>6h</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>24h</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>72h</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>3h,médio</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>6h,médio</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>24h,médio</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>72h,médio</sub> [g/mm <sup>2</sup> ]
BRFAB1	9852,03	0,0004	0,0004	0,0008	0,0011	3,70E-04	4,26E-04	7,61E-04	1,10E-03
BRFAB2	9852,03	0,0004	0,0004	0,0007	0,0011				
BRC20AB1	9852,03	0,0003	0,0004	0,0007	0,0010	3,25E-04	3,70E-04	7,00E-04	1,02E-03
BRC20AB2	9852,03	0,0003	0,0004	0,0007	0,0010				
BRC40AB1	9852,03	0,0003	0,0004	0,0007	0,0010	2,99E-04	3,55E-04	6,75E-04	9,85E-04
BRC40AB2	9852,03	0,0003	0,0003	0,0007	0,0010				
BR100AB1	9852,03	0,0003	0,0004	0,0007	0,0010	3,40E-04	3,81E-04	6,75E-04	9,69E-04
BR100AB2	9852,03	0,0003	0,0004	0,0007	0,0010				

## **Anexo F**

Ensaio de durabilidade - profundidade de penetração de água sobre pressão

Ensaio de Profundidade de Penetração de Água						
Provete	H [mm]	L [mm]	P <sub>entra</sub> [bar]	Penetração [cm]	Penetração <sub>média</sub> [cm]	Penetração <sub>média final</sub> [cm]
BRF B1	150	150	5	1,7	1,5	1,4
				1,7		
				1,3		
				1,4		
				1,6		
BRF B2	150	150	5	1,7	1,2	
				0,8		
				1,9		
				1,1		
				0,7		
BRC20 B1	150	150	5	1,9	1,7	
				2,3		
				1,5		
				1,2		
				1,5		
BRC20 A2	150	150	5	1,8	1,7	
				2,1		
				1,5		
				1,3		
				1,7		
BRC40 B1	150	150	5	0	0,9	
				1,4		
				2,1		
				1,1		
				0		
BRC40 B2	150	150	5	0	1,0	
				1,2		
				2,1		
				1,9		
				0		
BRC100 B1	150	150	5	0	1,0	
				1,6		
				2,1		
				1,4		
				0		
BRC100 B2	150	150	5	0	1,1	
				1,6		
				2,4		
				1,5		
				0		

