



## **Estudo da Resistência Mecânica do Betão com Agregado Cerâmico Vermelho**

**ULISSES EMANUEL DOS SANTOS DUARTE**

Outubro de 2015

# Estudo da Resistência Mecânica do Betão com Agregado Cerâmico Vermelho

Ulisses Emanuel dos Santos Duarte

Outubro 2015



Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil — Ramo de Construções**

Orientador: Eng<sup>a</sup> Maria da Luz do Vale Garcia



# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Índice de Texto .....	ix
Índice de Figuras .....	xi
Índice de Quadros .....	xii
1 Introdução .....	1
2 Estado da Arte .....	3
3 Estudo experimental .....	14
4 Resultados da fase experimental .....	36
5 Conclusões .....	54
6 Desenvolvimentos futuros .....	55
7 Bibliografia .....	56



## RESUMO

Os sectores da construção e demolição de edifícios são responsáveis por um elevado volume de produção de resíduos. Estes resíduos são normalmente direccionados para aterros, que se encontram, neste momento, sobrelotados. Esta falta de capacidade de receção de resíduos tem como consequência imediata o aumento dos valores monetários associados ao depósito destes materiais excedentários. Com a elevada produção destes resíduos torna-se importante a sua reciclagem e reutilização. No caso da Engenharia Civil, uma grande produtora de resíduos, seria ainda mais interessante o seu reaproveitamento imediato na área.

Nesta investigação, pretendeu-se avaliar o desempenho mecânico de betões com diferentes percentagens de agregados cerâmicos vermelhos. Essa investigação passou numa fase inicial pelo estado fresco do betão, de forma a analisar a sua trabalhabilidade. Na fase seguinte, analisou-se no estado endurecido, a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral.

Para concretização deste objetivo produziram-se três tipos de betões: um de referência (areia fina e brita fina), um betão com incorporação de agregados finos e grossos de cerâmica vermelha, juntamente com a areia fina e a brita fina, e o terceiro, um betão com a substituição total da areia fina por cerâmica fina.

A realização desta investigação, demonstrou que os betões com a incorporação de agregado cerâmico vermelho apresentam resultados de boa qualidade, sendo plausível a sua utilização em estruturas.

**Palavras-chave:** agregado cerâmico vermelho; betão; resíduo; desempenho mecânico



## **ABSTRACT**

The sectors of construction and buildings demolition are responsible for the production of a large volume of waste. These residues are usually conducted to landfills that are starting to run out of storage capacity. The reduction of space availability on the landfills, increases, of course, the monetary values invested to ensure this practice. Recycling and reuse are becoming more and more important in order to minimize the landfill usage. Civil Engineering as a major residue production industry has a priority interest in reutilizing immediately some of its own leavings.

In this study, it was intended to evaluate the mechanical performance of concrete with different percentages of red ceramic aggregates. In an earliest stage, this research began to study concrete at its fresh status in order to analyse its workability. In the following phase, concrete was analysed also in its hardened condition by measuring the compressive strength and tensile strength by diametrical compression.

To achieve this proposed goal, it was produced three different types of concrete: a reference one (with fine sand and pea gravel), other concrete incorporating fine and coarse aggregates of red ceramic (together with fine sand and pea gravel), and a third one with total replacement of sand for fine ceramics.

The realization of this research verified that concretes that incorporate red ceramic aggregates present good quality testing results and they are plausible to be used in structures.

**Keywords:** red ceramic aggregates; concrete; waste; mechanical performance



# ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução .....	1
1.1	Considerações Gerais .....	1
1.2	Objetivos e Organização da Dissertação.....	2
2	Estado da Arte .....	3
2.1	Introdução.....	3
2.2	Resíduos da construção e demolição .....	3
2.3	Gestão dos RCD em Portugal.....	6
2.4	Campanhas experimentais existentes .....	8
2.4.1	Campanha de Mansur et al.....	8
2.4.2	Campanha de Khatib (2004) .....	9
2.4.3	Campanha de Poon et al. (2006) .....	10
2.4.4	Campanha de Debieb e Kenai (2007).....	11
2.4.5	Campanha de Torgal e Jalali (2009).....	12
2.4.6	Conclusões das campanhas .....	13
3	Estudo experimental .....	14
3.1	Primeira fase experimental .....	14
3.2	Segunda Fase experimental.....	15
3.3	Terceira fase experimental .....	15
3.4	Ensaio caracterização dos agregados .....	15
3.4.1	Análise granulométrica .....	17
3.4.2	Índice de Forma – Cerâmica grossa .....	19
3.4.3	Índice de achatamento .....	21
3.5	Elaboração dos betões .....	23
3.5.1	Constituintes utilizados .....	24
3.5.2	Constituição dos betões .....	25
3.6	Ensaio betão fresco .....	28
3.6.1	Ensaio de abaixamento (cone de Abrams).....	28
3.7	Ensaio betão endurecido .....	31
3.7.1	Ensaio à compressão .....	31
3.7.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	33
4	Resultados da fase experimental .....	36

4.1	Introdução .....	36
4.2	Ensaio de caracterização dos agregados .....	36
4.2.1	Areia Fina – análise granulométrica.....	37
4.2.2	Brita Fina – análise granulométrica .....	38
4.2.3	Cerâmica fina – análise granulométrica.....	39
4.2.4	Cerâmica grossa – análise granulométrica .....	40
4.2.5	Índice de forma – cerâmica grossa .....	41
4.2.6	Índice de achatamento – cerâmica grossa.....	42
4.3	Ensaio de betão em estado fresco – Ensaio de abaixamento (cone de Abrams) .....	42
4.4	Ensaio ao betão em estado endurecido .....	44
4.4.1	Resistência à compressão .....	44
5	Conclusões .....	54
6	Desenvolvimentos futuros .....	55
7	Bibliografia .....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de vida dos RCD .....	4
Figura 2 – Material cerâmico recolhido.....	16
Figura 3 – Máquina de desgaste de Los Angeles e resultado do seu uso .....	16
Figura 4 – Máquina de peneirar, peneiros e balança .....	18
Figura 5 - Paquímetro.....	20
Figura 6 - Peneiro de barras .....	22
Figura 7 – Amassadura dos elementos na betoneira de eixo vertical .....	27
Figura 8 – Moldes cheios com pasta de betão .....	27
Figura 9 – Provetes de betão; 1 – BRF; 2 – BC1; 3 – BC2 .....	28
Figura 10 - Molde troncocónico, placa e varão de compactação .....	29
Figura 11 – Prensa hidráulica de 4 colunas .....	32
Figura 12 – Prensa hidráulica de 4 colunas .....	34
Figura 13 – Frações da areia fina resultantes da peneiração .....	37
Figura 14 – Curva granulométrica da areia fina.....	37
Figura 15 - Frações da brita fina resultantes da peneiração.....	38
Figura 16 – Curva granulométrica da brita fina .....	38
Figura 17 - Frações da cerâmica fina resultantes da peneiração.....	39
Figura 18 – Curva granulométrica da cerâmica fina .....	39
Figura 19 - Frações de cerâmica grossa resultante da peneiração .....	40
Figura 20 – Curva granulométrica da cerâmica grossa.....	40
Figura 21 – Medição do abaixamento .....	42
Figura 22 – Ensaio à compressão .....	44
Figura 23 – Resultados da resistência à compressão do BRF .....	46
Figura 24 - Resultados da resistência à compressão do BC1 .....	47
Figura 25 - Resultados da resistência à compressão do BC2 .....	47
Figura 26 – Comparação das resistências á compressão dos betões ao longo do tempo .....	48
Figura 27 – Provete após ensaio de compressão .....	48
Figura 28 – Ensaio à tração por compressão diametral.....	49
Figura 29 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral do BRF.....	51
Figura 30 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral do BC1 .....	51
Figura 31 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral do BC2 .....	52
Figura 32 - Comparação das resistências dos betões ao longo do tempo .....	52
Figura 33 – Provetes após ensaio de tração à compressão diametral.....	53

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Composição dos Resíduos de Construção e Demolição (UEST, 2006) .....	5
Quadro 2 – Valores relativos à produção de RCD em Portugal (Amoêda, 2009) .....	6
Quadro 3 – Composição dos RCD em Portugal (Coelho, 2010) .....	6
Quadro 4 – Taxa de Reciclagem de RCD de alguns países europeus (Sonigo, Hestin, & MIMID, 2010) .....	7
Quadro 5 – Composição dos betões realizados .....	9
Quadro 6 – Composição dos betões realizados .....	10
Quadro 7 – Composição dos betões realizados .....	11
Quadro 8 – Composição dos betões realizados .....	12
Quadro 9 – Composição dos betões realizados .....	13
Quadro 10 - Composição Química do Cimento CEM I 42.5 R (CEMBUREAU, 1999) .....	24
Quadro 11 – Composição química da cerâmica vermelha (Vieira, 2000) .....	25
Quadro 12 – Percentagem de agregado em cada betão .....	26
Quadro 13 – Quantidade de material usado em cada betão .....	26
Quadro 14 – Análise granulométrica da areia fina .....	37
Quadro 15 - Análise granulométrica da brita fina .....	38
Quadro 16 - Análise granulométrica da cerâmica fina .....	39
Quadro 17 – Análise granulométrica da cerâmica grossa .....	40
Quadro 18 – Resultados do ensaio relativos ao índice de forma .....	41
Quadro 19 – Resultado do ensaio relativo ao índice de achatamento .....	42
Quadro 20 – Resultado do ensaio de abaixamento .....	42
Quadro 21 – Condições favoráveis de aplicação (Garcia, M.L., 2015) .....	43
Quadro 22 – Classificação do ensaio de abaixamento (Garcia, M.L., 2015) .....	43
Quadro 23 – Resultado dos valores do ensaio à compressão, 16 dias .....	45
Quadro 24 - Resultado dos valores do ensaio à compressão, 27 dias .....	45
Quadro 25 - Resultado dos valores do ensaio à compressão, 58 dias .....	46
Quadro 26 - Resultado dos valores do ensaio à tração por compressão diametral, 27 dias .....	49
Quadro 27 - Resultado dos valores do ensaio à tração por compressão diametral, 44 dias .....	50
Quadro 28 - Resultado dos valores do ensaio à tração por compressão diametral, 58 dias .....	50

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os sectores da Indústria Cerâmica e da Construção e Demolição são responsáveis pela geração de grandes quantidades de subprodutos e resíduos de barro vermelho provenientes do processo de fabrico e aplicação em obra e da reabilitação e demolição de edifícios. O problema destes RCD (Resíduos da Construção e Demolição) é de grande importância, pois são resíduos sólidos o que provocam agressão no meio ambiente, tornam-se um desperdício energético porque deixam de ter utilidade, e outro aspeto negativo é na área económica, pois estes resíduos vão para aterros, que são cada vez mais dispendiosos, e é necessário pagar bastante para fazer estes depósitos. O potencial de valorização deste tipo de material em usos menores é considerável, pois evitam aquilo enunciado anteriormente.

A maioria dos resíduos cerâmicos da construção e demolição em Portugal é proveniente do fabrico e aplicação de tijolos, telhas e azulejas de barro vermelho cozido. As principais fontes destes resíduos são:

- Indústria cerâmica
- Estaleiro de construção
- Demolição de edifícios
- Catástrofes naturais

De forma a valorizar este tipo de RCD (Resíduo da Construção e Demolição), uma das áreas possíveis de explorar seria a incorporação no betão, ainda que as suas características mecânicas possam não ser as mais favoráveis, no entanto, pode ser viável a sua aplicação como agregado. Quer seja substituição parcial do agregado corrente (natural), quer seja substituição total.

É por este pensamento, que esta tese demonstra resultados obtidos em laboratório, de forma a entender se as suas características seriam uma mais-valia para a construção.

## **1.2 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Objetivo deste trabalho é a comparação da resistência mecânica entre um betão corrente com dois betões que contêm na sua composição parte das areia e da brita substituída por resíduos da construção civil de origem barro vermelho (tijolo e telha), de forma a perceber a possibilidade da sua utilização em estruturas.

A dissertação divide-se em 5 capítulos.

O capítulo I (Introdução) apresenta o motivo da elaboração deste estudo, sobre os objetivos pretendidos e sobre como está organizado este trabalho.

O capítulo II (Estado da Arte) fala sobre a produção de resíduos de construção e demolição (RCD), que cada vez mais atinge valores demasiado elevados. Aborda também a forma como estes RCD são geridos em Portugal. E retrata também algumas campanhas experimentais realizadas por outros autores.

No capítulo III (Estudo Experimental) está demonstrado todo o tipo de ensaios recorridos para dar seguimento a este estudo. Em todos os ensaios é explicado quais os objetivos de cada um deles, a norma que regem, o material necessário e o procedimento.

O capítulo IV (Resultados da Fase Experimental) mostra todos os resultados obtidos nos ensaios e conclusões sobre esses mesmos ensaios.

Por último, o capítulo V (Conclusões) faz-se o apanhado geral do estudo experimental, onde se conclui se os objetivos foram cumpridos.

## **2 ESTADO DA ARTE**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A indústria da construção é considerada como a atividade humana mais poluidora. É uma atividade que utiliza grandes quantidades de recursos naturais, como a água, o solo, a energia e materiais, produzindo também grandes quantidades de resíduos que não são reciclados nem controlados.

A construção civil é a maior consumidora de recursos naturais e também a que mais gera resíduos sólidos (John, 2000). De acordo com as estimativas, este tipo de atividade gera uma quantidade de resíduos da construção e demolição (RCD) de cerca de 100 milhões de toneladas por ano, sendo dos sectores que mais resíduo produz na Europa (APA, 2008).

Grande parte dos RCD pode ser muito importante para o desenvolvimento sustentável. Devido a este ponto de vista, a utilização de agregados reciclados em betão tem sido objeto de estudo ao longo dos últimos anos, podendo tirar-se assim o maior proveito económico e energético dos RCD (Gonçalves, 2008).

De forma a obter a sustentabilidade na construção, a necessidade de minimizar o consumo de recursos naturais torna-se o fator-chave. A incorporação dos resíduos nos materiais da construção torna-se uma opção mais eficiente para atingir esse fator. Os RCD têm um grande potencial de recuperação, podendo ser reciclados 80% destes resíduos (Ortiz, 2010), desde que gerida de forma correta.

### **2.2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Ao longo dos últimos anos, devido ao crescimento da urbanização, a construção civil foi um dos sectores que sofreu o maior desenvolvimento. Com esta evolução, a produção de RCD aumentou e passou a ser mais complicado gerir este aumento. As técnicas e os materiais de construção utilizados estão diretamente relacionados com a natureza destes resíduos, sendo umas das suas principais fontes a demolição de edifícios em fim de vida (Silva, 2004).

A melhoria do desempenho do sector da construção deve ser uma prioridade, pois na sua produção apresenta importantes impactes ambientais. Os RCD contribuem para agravar esses

problemas ambientais, nomeadamente no que diz respeito ao seu transporte e deposição. Estas atividades podem originar agressões ambientais como por exemplo:

- Deterioração da qualidade do ar (libertação de poeiras e odores);
- Deterioração da qualidade do solo (compactação e alteração da composição);
- Contaminação das águas superficiais e subterrâneas;
- Agressão à paisagem.

Uma das soluções encontradas para que a quantidade de resíduos gerados deixasse de ser um dos principais problemas para as sociedades desenvolvidas, foi considerar que grande parte desses resíduos poderiam ter uma segunda vida. Se esses resíduos fossem devidamente tratados, tornar-se-iam uma mais-valia, tanto em termos económicos como em termos ambientais (Veiga & Ruivo, 2004).

A reciclagem dos RCD permite diminuir a quantidade de RCD depositados em aterro e diminuir assim a extração de agregados naturais e os respetivos impactes ambientais (Martins, et al., 2008). Após o fabrico do betão, procede-se à construção de edifícios ou infraestruturas. Quando o seu tempo de vida termina, recorre-se à demolição, voltando a gerar-se resíduos, onde se voltará a utilizar o processo de reciclagem de modo a que possam ser reutilizados no fabrico de materiais, como é possível verificar na figura 1.

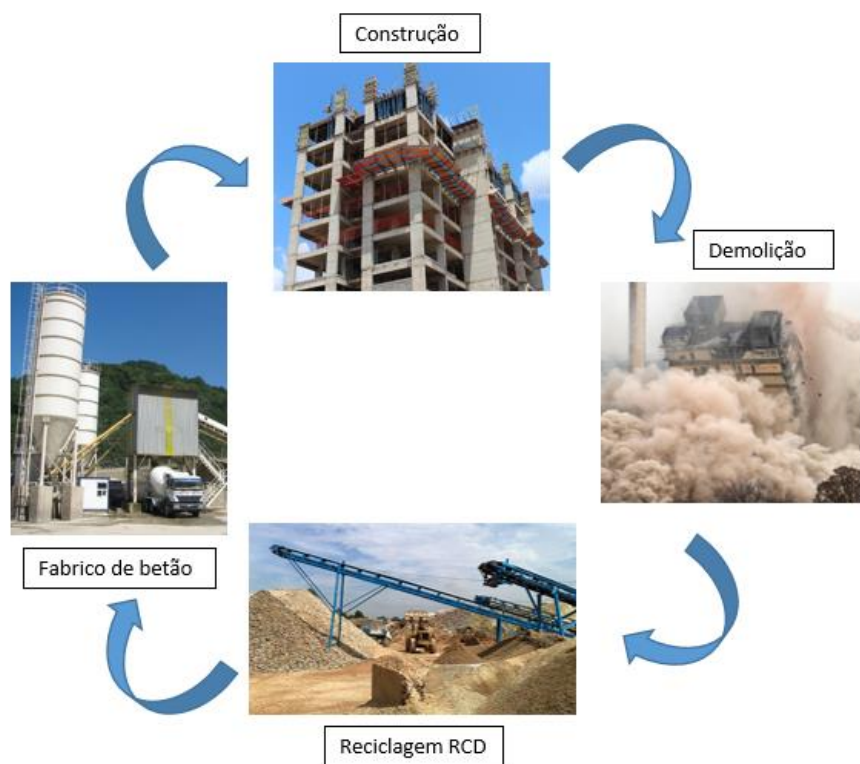


Figura 1 - Ciclo de vida dos RCD

Em termos gerais, os RCD são gerados através das seguintes atividades (UEST, 2006):

- Atividades de construção:
- Construção de edifícios novos;
- Demolição de edifícios antigos;
- Reparação de edifícios existentes.

Desenvolvimento de obras de infraestruturas:

- Construção e reparação de estradas;
- Pontes;
- Passeios.

Catástrofes naturais ou tecnológicas:

- Terramotos;
- Inundações;
- Deslizamentos.

Independentemente da causa, os RCD podem ser constituídos por estes materiais:

**Quadro 1 – Composição dos Resíduos de Construção e Demolição (UEST, 2006)**

Substância	Porcentagem (%)	
	Resíduos de demolição	Resíduos de construção
Asfalto	1.61	0.13
Betão	19.99	9.27
Betão armado	33.11	8.25
Impurezas, solo e lamas	11.91	30.55
Pedras	6.83	9.74
Brita	4.95	14.13
Madeira	7.46	10.95
Tijolo para cimento	1.11	0.90
Tijolo	6.33	5.00
Vidro	0.20	0.56
Outros orgânicos	1.30	3.05
Tubos de plástico	0.61	1.13
Areia	1.44	1.70
Acessórios	0.04	0.03
Outros itens	0.07	0.24
Metais	3.41	4.36
Total	100	100

## 2.3 GESTÃO DOS RCD EM PORTUGAL

Em Portugal, a área dos RCD não tem tido a importância devida ao longo dos últimos anos, pelo que não existem dados reais referentes às quantidades geradas. E os dados que existem referem-se apenas a estimativas, baseadas em diferentes pressupostos, que indicam uma diversidade de resultados (Veiga & Ruivo, 2004).

A deposição dos RCD tem passado despercebida aos olhos das entidades competentes e da opinião pública, por causa da sua baixa interação física, química e biológica com o meio ambiente. E devido ao seu elevado volume, quando os resíduos são colocados em aterros, a sua vida útil diminui, sendo necessário encontrar soluções para esta deposição em aterros, de forma a desencorajar a deposição ilegal.

O crescimento global de RCD em Portugal é praticamente inevitável, o que fará que Portugal se aproxime dos valores gerados pela média dos restantes países da CE. Existem alguns valores para a produção de RCD em Portugal, em determinados anos, apresentados no quadro 2.

Quadro 2 – Valores relativos à produção de RCD em Portugal (Amoêda, 2009)

Ano	Produção de RCD (ton/ano)
1999	320 000
2001	769 100
2002	640 000
2007	440 000
2009	455 500

Segundo um estudo de Coelho (Coelho, 2010) sobre a gestão de RCD em Portugal, tendo em conta a tipologia de materiais. Os dados percentuais relativamente à composição de resíduos em Portugal são apresentados no quadro 3.

Quadro 3 – Composição dos RCD em Portugal (Coelho, 2010)

Composição dos RCD	
Betão, tijolos, alvenarias	73.6 %
Plásticos	0.1 %
Asfalto, betuminosos	13.5 %
Madeira	3.2 %
Metais	2.2 %
Outros resíduos	7.4 %

A legislação que regula a gestão de RCD em Portugal está disposta no Decreto-Lei nº46/2008, de 12 de Março, que estabelece o regime das operações de gestão dos RCD, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação (APA, 2008).

O que não estiver especificamente regulado no Decreto-Lei mencionado, em matéria de gestão de RCD aplica-se o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, que institui o Regime Geral de Gestão de Resíduos (APA, 2008). Em relação à reutilização de RCD e a sua aplicação em Portugal, foram publicadas quatro especificações técnicas:

- E 471 - 2009 - Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos;
- E 472 - 2009 - Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central;
- E 473 - 2009 - Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos;
- E 474 - 2009 - Guia para a utilização de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte.

De forma a termos um meio de comparação, com alguns países europeus, em relação à taxa de reciclagem de RCD, estarão apresentados esses valores no quadro 4.

**Quadro 4 – Taxa de Reciclagem de RCD de alguns países europeus (Sonigo, Hestin, & MIMID, 2010)**

<b>Países Europeus</b>	<b>Taxa de reciclagem</b>
Dinamarca, Estónia, Alemanha, Irlanda e Holanda	> 90 %
Áustria, Bélgica, França Reino Unido e Lituânia	60% - 70%
Letónia, Luxemburgo e Eslovénia	40% - 60%
Portugal, Espanha, Grécia, Polónia, Finlândia, Hungria, Chipre e República Checa	< 40%
Média Europeia	47%

## 2.4 CAMPANHAS EXPERIMENTAIS EXISTENTES

### 2.4.1 Campanha de Mansur et al.

(Mansur, 1999) produziram betão com a incorporação de tijolo britado como agregado grosso, cuja resistência à compressão resultou em valores entre 30 e 60 MPa, e compararam as suas propriedades com as do betão convencional.

Realizaram vários ensaios durante todo este processo, que se encontram numerados a seguir.

Agregados:

- Análise granulométrica;
- Massa volúmica;
- Absorção de água;
- Desgaste de Los Angeles

Betão fresco:

- Trabalhabilidade

Betão endurecido:

- Resistência à compressão;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Retração e expansão;
- Módulo de elasticidade dinâmico;
- Fluência.

Os agregados grossos reciclados foram obtidos através de resíduos de tijolo de barro vermelho cozido, (densidade média de 2100 kg/m<sup>3</sup>) com auxílio de uma britadeira de mandíbulas e separação de vários tamanhos.

Os autores criaram quatro tipos de betões de referência, de forma a variarem as resistências entre 30 e 60 MPa. De forma a aplicarem o estudo que queriam, foram modificando as quantidades dos agregados nos novos betões de forma a obter resistências na mesma categoria dos de betão de referência, mantendo-se apenas um elemento constante, a água. A relação água / cimento (a/c) aparente, foi mantida para cada tipo de mistura.

As composições das diferentes misturas são apresentadas no quadro 5.

Quadro 5 – Composição dos betões realizados

Mistura	Resistência pretendida	a/c	Peso por m3 de betão (kg)				Super-plastificante (ml/kg)
			Cimento	Areia	Agregados grossos		
					Granito	Tijolo	
A	60	0,3	633	583	968	848	5
B	50	0,4	475	740	940	823	5
C	40	0,5	380	830	930	815	5
D	30	0,6	320	870	940	823	5

Em todas as misturas adicionou-se um super-plastificante, apesar do agregado grosso de tijolo ter sido pré-saturado em água, de forma a precaver e conseguir uma melhor trabalhabilidade.

#### 2.4.2 Campanha de Khatib (2004)

Na campanha de (Khatib, 2004), foi realizado um estudo relativo às propriedades de betões que sofreram incorporação de agregados finos reciclados (betão e tijolo).

Os betões produzidos com estes agregados reciclados passaram por alguns ensaios laboratoriais, descritos a seguir.

##### Agregados:

- Análise granulométrica;
- Massa volúmica;
- Absorção de água;

##### Betão fresco:

- Trabalhabilidade;
- Massa volúmica;

##### Betão endurecido:

- Resistência à compressão;
- Velocidade de propagação de ultra-sons;
- Retração e expansão;
- Módulo de elasticidade dinâmico;
- Massa volúmica.

Foram realizadas diferentes misturas de forma a comparar a influência dos agregados reciclados nas propriedades do betão.

Nas várias misturas houve alteração dos agregados finos naturais em 25, 50, 75 e 100% por agregados finos reciclados de tijolo.

As composições podem ser analisadas no quadro 6.

Quadro 6 – Composição dos betões realizados

Mistura	% de substituição de agregados finos naturais por agregados finos de tijolo	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino de tijolo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregados grossos (kg/m <sup>3</sup> )
Referência	0	325	162	649	0	1298
A	25	319	159	478	159	1275
B	50	314	156	314	314	1253
C	75	308	154	154	462	1232
D	100	303	151	0	606	1211

O objetivo desta campanha foi analisar o comportamento dos betões com agregados finos reciclados incorporados

#### 2.4.3 Campanha de Poon et al. (2006)

Nesta campanha (Poon, 2006), também foi testado o comportamento de tijolos e telhas como parte dos agregados finos em betão.

Os ensaios realizados estão descritos a seguir.

##### **Agregados:**

- Análise granulométrica;
- Massa volúmica;
- Absorção de água;

##### **Betão fresco:**

- Trabalhabilidade;
- Massa volúmica;

##### **Betão endurecido:**

- Resistência à compressão;
- Retração;
- Módulo de elasticidade.

Foram realizadas apenas duas composições, e o objetivo de manter a mesma relação de água/cimento igual a 0,55 e com resistência à compressão de 45 MPa.

O quadro 7 mostra as composições dos betões realizados.

Quadro 7 – Composição dos betões realizados

Mistura	% de substituição	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino de tijolo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregados grossos (kg/m <sup>3</sup> )
Referência	0	410	225	0,55	642	0	1043
A	20	410	225	0,55	514	128	1043

#### 2.4.4 Campanha de Debieb e Kenai (2007)

Na campanha de (Kenai, 2007) analisou-se o uso de tijolo como agregado grosso e fino em betão.

Os ensaios realizados estão descritos a seguir.

##### Agregados:

- Análise granulométrica;
- Massa volúmica;
- Absorção de água;
- Desgaste de Los Angeles;
- Baridade;
- Micro-deval.

##### Betão fresco:

- Trabalhabilidade;

##### Betão endurecido:

- Resistência à compressão;
- Resistência à tração por flexão;
- Retração;
- Módulo de elasticidade;
- Permeabilidade da água;
- Absorção de água por capilaridade.

Foram realizadas algumas composições, onde a areia natural e os agregados grossos naturais foram substituídos (25, 50, 75 e 100%) por agregados de tijolos britados.

Os autores mantiveram a quantidade de cimento para todas as misturas.

**Quadro 8 – Composição dos betões realizados**

Mistura	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino de tijolo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregados grossos (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grosso de tijolo (kg/m <sup>3</sup> )
A	350	0,61	100	0	100	0
B	350	0,69	75	25	100	0
C	350	0,77	50	50	100	0
D	350	0,85	25	75	100	0
E	350	0,93	0	100	100	0

#### 2.4.5 Campanha de Torgal e Jalali (2009)

Estes autores, (Torgal, 2009), para além do estudo da substituição de agregados naturais por agregados reciclados cerâmicos tanto na fração fina como na grossa na produção de betão, realizaram também um estudo da substituição do cimento por agregados de cerâmica fina.

##### **Agregados:**

- Análise granulométrica;
- Massa volúmica;
- Absorção de água;

##### **Betão fresco:**

- Trabalhabilidade;
- Massa volúmica;

##### **Betão endurecido:**

- Resistência à compressão;
- Absorção de água por imersão;
- Absorção de água por capilaridade;
- Permeabilidade ao oxigénio;
- Resistência à penetração de cloretos;
- Permeabilidade à água;
- Envelhecimento acelerado.

Nesta investigação realizaram três tipos de betão. Betão de referência apenas com agregados naturais, betão com agregados naturais grossos e com agregados finos reciclados, e um betão com agregados finos naturais e agregados grossos reciclados.

**Quadro 9 – Composição dos betões realizados**

Mistura	% de substituição	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino de tijolo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregados grossos (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grosso de tijolo (kg/m <sup>3</sup> )
Referência	0	350	175	0,5	861	0	958	0
A	100	350	175	0,5	0	729	928	0
B	100	350	175	0,5	861	0	0	820

#### **2.4.6 Conclusões das campanhas**

A presença destas campanhas, serve para demonstrar a vontade de tentar reutilizar este resíduo que é tão comum na construção, principalmente na incorporação no betão.

Cada um com a sua ideologia na preferência, da percentagem de substituição, do tipo de agregado (grosso ou fino), o rácio de água/cimento e até mesmo os valores de resistência pretendidos.

Estas campanhas mostram como esta tese continua com uma vertente atual, e que é possível a utilização destes resíduos na composição de betões estruturais.

### 3 ESTUDO EXPERIMENTAL

Este estudo experimental tem como objetivo a comparação da resistência mecânica entre um betão de características correntes, usado de forma mais comum na construção e dois betões que contêm na sua composição diferentes percentagem de agregado reciclado, agregado este de origem barro vermelho (tijolo e telha). Estes agregados foram modificados mecanicamente através de moagem na máquina de desgaste Los Angeles e seguinte peneiração.

A intenção passa por tentar perceber até que ponto estes novos elementos alteram o comportamento mecânico de betões estruturais, se numa vertente positiva ou negativa.

A planificação dos ensaios foi constituída por três fases. A primeira fase destinou-se à caracterização dos agregados, quer os naturais quer os resíduos (telhas e tijolos). A segunda fase acontece depois da produção dos betões, que baseia-se no ensaio destes, no estado fresco. E na terceira e última fase, os ensaios servem para analisar os betões no estado endurecido

#### 3.1 PRIMEIRA FASE EXPERIMENTAL

A primeira fase tem como objetivo a análise e caracterização dos agregados naturais e dos resíduos cerâmicos vermelhos. Pretendeu-se com esta fase avaliar algumas características dos agregados que se iriam utilizar, para assim se obter uma fórmula mais estruturada da composição do betão de acordo com o método de Faury.

Nesta fase experimental procedeu-se aos seguintes ensaios:

**Agregados naturais** (areia fina e grossa, brita fina e grossa):

- Análise granulométrica, de acordo com as normas (NP EN 933-1, 2000) e (NP EN 933-2, 1999)

**Agregados reciclados** (cerâmica fina e grossa):

- Análise granulométrica, de acordo com as normas (NP EN 933-1, 2000) e (NP EN 933-2, 1999);
- Índice de forma, de acordo com a norma (NP EN 933-4, 2002);
- Índice de achatamento, de acordo com a norma (NP EN 933-3, 2002).

### **3.2 SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL**

Nesta fase só se realizou um tipo de ensaio, o objetivo era avaliar a consistência do betão de forma a caracterizar o aspeto mecânico do betão.

#### **Betão em estado fresco:**

- Ensaio de abaixamento (Cone de Abrams), de acordo com a norma (NP EN 12350-2, 2009)

### **3.3 TERCEIRA FASE EXPERIMENTAL**

Na última fase, os ensaios servem para perceber o comportamento mecânico do betão no estado endurecido.

#### **Betão em estado endurecido:**

- Resistência à compressão dos provetes de ensaio, de acordo com a norma (NP EN 12390-3, 2003);
- Resistência à tração por compressão dos provetes, de acordo com a norma (NP EN 12390-6, 2003).

### **3.4 ENSAIOS CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS**

As características físicas dos agregados são de grande importância, pois são elas que definem as propriedades mecânicas dos betões, e tendo isto em conta, serão apresentadas neste capítulo, métodos regulamentares utilizados para definir algumas dessas características.

Na realização destes estudos, primeiro foi feita a recolha dos vários agregados necessários para a produção dos betões a estudar.

Os agregados naturais (areia fina, areia grossa, brita fina e brita grossa) e o cimento foram fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Os agregados de cerâmica vermelha (essencialmente tijolo e telha) foram recolhidos em uma obra de reabilitação de uma moradia no grande Porto, chegando ao laboratório nas condições ilustradas na figura 2.



**Figura 2 – Material cerâmico recolhido**

O material tal como chegou, sofreu em primeiro lugar um tratamento mecânico, isto é, foi moído na máquina de desgaste Los Angeles.

Em cada operação moeu-se 10 kg de resíduo cerâmico juntamente com 11 esferas de aço que apresentavam um valor de 4678 g, realizou-se 500 voltas em que no fim das quais, constatou-se o material ficava bastante moído como se pode ver na figura 3.

Repetiu-se este processo 10 vezes.



**Figura 3 – Máquina de desgaste de Los Angeles e resultado do seu uso**

Ao material cerâmico obtido após o processo sofrido na máquina de desgaste Los Angeles, fez-se a separação em duas frações utilizando a peneiração:

- A primeira fração é constituída por partículas com dimensões inferiores ou iguais ao do peneiro de abertura de 4 mm.
- A segunda fração é constituída por partículas com dimensões superiores a 4 mm e inferiores ou iguais a 31,5 mm.

### **3.4.1 Análise granulométrica**

Este ensaio pretende fazer uma análise da distribuição das partículas ao longo dos peneiros de modo a poder classificar cada agregado segundo a NP EN 12620. A forma de demonstrar os resultados é a partir de curvas granulométricas, essenciais para determinar as quantidades recomendadas de cada agregado a incorporar no fabrico do betão, de forma a maximizar a sua compactidade.

A determinação da distribuição granulométrica de material é fundamental não só por permitir avaliar o efeito empacotamento das partículas no sistema cimentícios como também na influência que tem nas diferentes fases da hidratação.

Este ensaio realizou-se em seis tipos de materiais: areia fina, areia grossa, brita fina, brita grossa, cerâmica fina e cerâmica grossa.

O ensaio segue as especificações descritas na norma Portuguesa (NP EN 933-1, 2000): “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica; Método de peneiração”, a qual contempla a metodologia e os princípios a serem cumpridos no presente ensaio. Esta norma está associada, entre outras, à norma (NP EN 933-2, 1999), que define as malhas dos peneiros a utilizar para a análise granulométrica.

#### **3.4.1.1 Aparelhos e utensílios**

Para a realização do ensaio, foi necessário o seguinte equipamento:

- peneiros de ensaio, conforme especificado na norma (NP EN 933-2, 1999);
- tampa e recipiente de fundo adaptados aos peneiros;
- estufa ventilada à temperatura de  $100 \pm 5$  °C;
- equipamento de lavagem;
- balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa do provete;
- tabuleiros e escovas;
- máquina de peneirar.

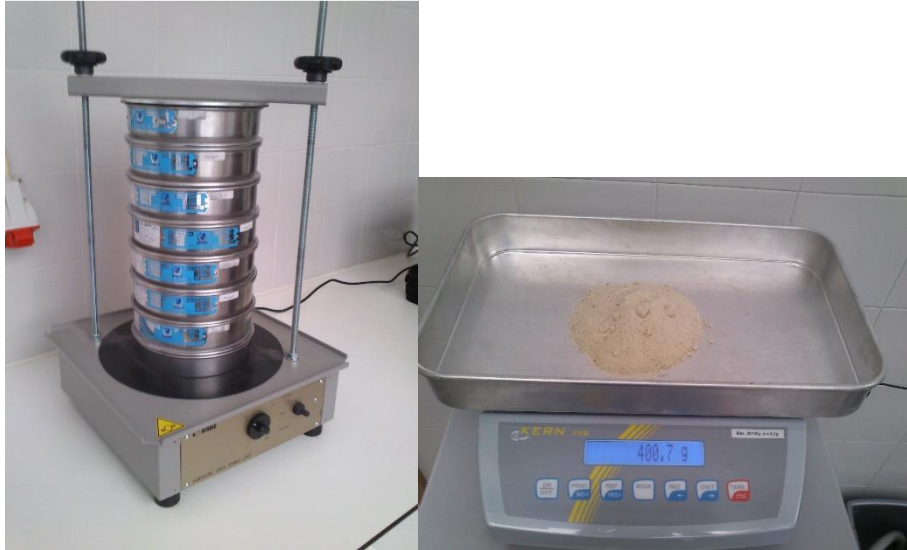


Figura 4 – Máquina de peneirar, peneiros e balança

#### 3.4.1.2 Procedimento de ensaio

O ensaio foi executado de acordo com o seguinte procedimento:

Despejou-se o material seco na coluna de peneiros. Esta coluna é constituída por um certo número de peneiros encaixados, e dispostos de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com o fundo e a tampa.

Agitou-se a coluna de peneiros mecanicamente, e retirou-se depois os peneiros um a um. Começando pelo de maior abertura, agita-se cada peneiro manualmente garantindo que não exista perda de material.

Pesou-se o material retido em cada peneiro e no fundo e registou-se.

#### 3.4.1.3 Resultados

Anotou-se a massa retida em cada peneiro e calculou-se como percentagem da massa da amostra inicial através da seguinte equação:

$$R_{i\%} = 100 \times \frac{R_i}{M_1}$$

Onde:

- $R_{i\%}$  é a percentagem de material retido no peneiro  $i$  (%);
- $R_i$  é a massa retido no peneiro  $i$  (g);
- $M_1$  é a massa total da amostra seca (g).

A percentagem de finos que passa no peneiro 0.063 mm é calculada a partir da seguinte equação:

$$f = 100 \times \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1}$$

Onde:

- f é a percentagem de finos que passa pelo peneiro 0.063 mm (%);
- M1 é a massa total da amostra (g);
- M2 é a massa da amostra, após lavagem e secagem (g);
- P é a massa de material retido no fundo da coluna de peneiros (g).

Após o cálculo individual de cada peneiro, pode-se traçar a curva granulométrica do material, conseguindo assim ter uma melhor perspectiva das características dos agregados.

Através destes resultados, pode-se também ainda calcular o módulo de finura, que é a soma das percentagens totais que ficam retidas em cada peneiro da série normal. Sendo que a série normal, corresponde ao conjunto de peneiros com abertura da malha e com progressão geométrica de razão 2, começada no peneiro 0.0125 mm até à máxima dimensão do agregado.

### **3.4.2 Índice de Forma – Cerâmica grossa**

O índice de forma permite caracterizar a geometria das partículas que constituem o agregado. A forma dos agregados influencia bastante a forma como as partículas se arrumam no meio da mistura cimentícia. A forma mais arredondada, ou mais, angulosa, vai determinar o arranjo das partículas e assim influenciar a massa volúmica, a consistência e a compacidade do betão, fatores que condicionam as suas características mecânicas.

Este índice avalia a quantidade de partículas não cúbicas presentes no agregado. De facto são as partículas cúbicas as mais desejadas para conferir as melhores propriedades ao betão/argamassa, pois embora interessa ter partículas com forma aproximadamente esférica para um betão/argamassa compacto e trabalhável, também interessa que a pasta de cimento adira muito bem ao agregado o que é consumado pela existência de arestas vivas.

Este índice é caracterizado pela simbologia SI (Shape Index).

A metodologia e os princípios a adotar na determinação da forma das partículas encontram-se na norma (NP EN 933-4, 2002): “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de forma”.

#### 3.4.2.1 *Aparelhos e utensílios*

Para a realização do ensaio, foi necessário o seguinte equipamento:

- Balança de precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa a determinar;
- Estufa de secagem, ventilada, à temperatura de  $110 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Agitador mecânico;
- Paquímetro (figura 5);
- Peneiros, conforme especificado na norma NP EN 933-2 (2002).



Figura 5 - Paquímetro

#### 3.4.2.2 *Procedimentos do ensaio*

O ensaio foi executado seguindo o procedimento seguinte:

- Preparar os provetes;
- Registrar a massa de cada fração granulométrica ( $M_{1i}$ ) e determinar a percentagem, em massa, de cada fração granulométrica ( $V_i$ ) relativamente à massa da amostra ( $M_0$ );
- Desprezar todas as frações, cuja percentagem em massa seja inferior a 10% de  $M_0$ ;
- Medir a dimensão máxima ( $L$ ) e a dimensão mínima ( $E$ ) de cada partícula, recorrendo à utilização do paquímetro, e recolher todas as partículas que apresentem uma relação dimensional  $L/E > 3$ , também conhecidas por partículas não cúbicas;
- Registrar a massa das partículas recolhidas de cada fração granulométrica, ou seja, a massa das partículas não-cúbicas ( $M_{2i}$ ).

### 3.4.2.3 Resultados

Calculou-se o índice de forma (SI) de cada agregado através da seguinte expressão:

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100$$

Onde:

- $SI$ : índice de forma de cada agregado (%);
- $M_{1i}$ : soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas (g);
- $M_{2i}$ : soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas (g).

O valor do índice geral de forma (SI) é arredondado à unidade.

### 3.4.3 Índice de achatamento

O índice de achatamento dá-nos a indicação da existência de partículas lamelares, as quais são responsáveis pela baixa aderência pasta de cimento ao agregado causado por formação de uma película de água entre as partículas enquanto o betão/argamassa está ainda no estado fresco.

Este índice é caracterizado pela simbologia FI (Flakiness Index).

A metodologia e os princípios a adotar na determinação da forma das partículas encontram-se na norma (NP EN 933-3, 2002): “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento”.

#### 3.4.3.1 Aparelhos e utensílios

Para a realização do ensaio, foi necessário o seguinte equipamento:

- Balança de precisão de  $\pm 0,1$  % da massa a determinar;
- Estufa de secagem, ventilada, à temperatura de  $110 \pm 5$  °C;
- Peneiros, conforme especificado na norma NP EN 933-2, com as seguintes aberturas: 100mm, 80 mm, 63 mm, 50 mm, 31.5 mm, 25 mm, 16 mm, 12.5mm, 10 mm, 8 mm, 6.3 mm, 5 mm e 4 mm;
- Peneiros de barras correspondentes;



Figura 6 - Peneiro de barras

### 3.4.3.2 Procedimentos

O ensaio foi executado seguindo o procedimento seguinte:

- Rejeitar as partículas com dimensões superiores a 100  $\mu\text{m}$  e inferiores a 4  $\mu\text{m}$  em cada um dos provetes analisados;
- Em seguida executar dos tipos de peneiração:
  - 1ª Peneiração executados com os peneiros de malha quadrada, separando em frações granulométrica  $d_i/D_i$  e registando a sua massa;
  - 2ª Peneiração executada com os peneiros de barras, seguido da pesagem de cada fração granulométrica que passa pelo peneiro de barras correspondente.

### 3.4.3.3 Resultados

Calculou-se o índice de achatamento (FI) de cada agregado através da seguinte expressão:

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \times 100$$

Onde:

- FI: índice de achatamento de cada agregado (%);
- $M_1$  é a soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas  $d_i/D_i$  (g);
- $M_2$  é a soma das massas das partículas de cada uma das frações granulométricas que passa pelo peneiro de barras correspondente, com ranhura de largura  $D_i/2$ .

O valor do índice geral de achatamento (FI) é arredondado à unidade.

Determinou-se o índice de forma e de achatamento dos resíduos cerâmicos, uma vez que o ideal é ter partículas com a forma mais cúbica possível mas também rugosa, evitando assim a necessidade de uma maior quantidade de água, de forma a obter-se uma boa trabalhabilidade. Por consequência, iremos obter um betão mais permeável e com valores de tensão de rotura baixos, sobretudo à tração.

Isto é, nas primeiras horas de cura forma-se uma película de água por exsudação, que conforme a temperatura ambiente, pode ter dois comportamentos. O primeiro seria a sua evaporação e criação de vazios. O segundo, no caso de temperaturas inferiores a zero, seria a sua congelação, provocando assim roturas no betão.

### **3.5 ELABORAÇÃO DOS BETÕES**

Nesta etapa, já após o estudo dos agregados, pretendia-se elaborar quais seriam as composições que os três betões iriam ter para se poder fazer o estudo.

Um dos betões necessários seria um de referência, ou seja, um modelo padrão do que é um betão estrutural corrente. Os outros dois betões já seriam com a incorporação de resíduos cerâmicos vermelhos.

Os resíduos cerâmicos vermelhos recolhidos foram alterados mecanicamente através da moagem na máquina de “LOS ANGELES” em seguida foram separados em frações granulométricas por peneiração. Percebeu-se que as quantidades de material disponível para elaboração deste estudo não eram abundantes, o que fez com que fosse necessário tomar algumas decisões relativas às composições possíveis de se realizar. Tendo isto em conta, uma das versões que se tornou quase indispensável foi a vontade de testar a utilização de todo o tipo de agregados. O segundo betão com incorporação de agregado cerâmico vermelho foi noutra linha de pensamento, isto é, perceber o comportamento mecânico do betão, após a substituição total da areia fina por cerâmica fina.

#### **Composições pretendidas:**

- Betão de referência (BRF): Areia Fina e Brita Fina
- Betão alterado 1 (BC1): Areia Fina, Brita Fina, Cerâmica Fina e Cerâmica Grossa
- Betão alterado 2 (BC2): Brita Fina e Cerâmica Fina.

### 3.5.1 Constituintes utilizados

Os elementos utilizados para a produção dos vários betões foram:

- Água;
- Cimento;
- Areia Fina;
- Brita Fina;
- Cerâmica Fina;
- Cerâmica Grossa.

Dos vários constituintes utilizados, alguns requerem maior atenção, isto é, foi feita uma investigação bibliográfica sobre o cimento e a cerâmica vermelha acerca da sua composição química, o mesmo já não se realizou a água utilizada porque era do sistema de abastecimento de Águas do Porto, a areia é do tipo marítima, e a brita foi obtida após processo mecânica de britagem.

#### Cimento

O cimento utilizado foi o Portland CEM I 42,5 R da Secil. É um cimento muito utilizado para fabricação de betão, pois é bom elemento quando as resistências necessárias são elevadas.

Sem a possibilidade de fazer análise química do cimento, houve a necessidade de pesquisa bibliográfica sobre a sua composição. Alguns dados obtidos encontram-se no quadro 10. Para analisar a sua compatibilidade com os outros constituintes

Quadro 10 - Composição Química do Cimento CEM I 42.5 R (CEMBUREAU, 1999)

Constituintes	Símbolo Químico	Percentagem por massa (%)
Óxido de Cálcio	CaO	60 – 70
Sílica	SiO <sub>2</sub>	20 – 25
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 – 9
Óxido de Ferro (III)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 – 6
Óxido de Magnésio	MgO	0 – 2

### Cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha utilizada, foi obtida em obra de reabilitação, era resíduo que posteriormente iria ser enviada para aterro, essencialmente constituída por telha e tijolo.

Na cerâmica, tal como no cimento, não houve a possibilidade de fazer uma análise química. E tal como no cimento, fez-se uma pesquisa bibliográfica da sua composição química. Num dos estudos encontrados, a constituição da cerâmica vermelha representava-se como mostra o quadro 11.

Quadro 11 – Composição química da cerâmica vermelha (Vieira, 2000)

Constituintes	Símbolo Químico	Percentagem por massa (%)
Óxido de Cálcio	CaO	0,32
Sílica	SiO <sub>2</sub>	40,31
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,15
Óxido de Ferro (III)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,83
Óxido de Magnésio	MgO	0,78

Após análise dos quadros, percebe-se que há uma clara alteração do elemento dominante nas composições químicas, mas que de qualquer forma, ambos possuem iguais constituintes. O elemento que se destaca mais é a percentagem de sílica nos dois casos, o que pode permitir aferir que a cerâmica vermelha poderá ter um comportamento de ligante, como tem o cimento, podendo notar-se um aumento das resistências, tanto à compressão como à tração e talvez de durabilidade.

#### **3.5.2 Constituição dos betões**

Após decisão dos betões a realizar, recorreu-se a um programa de formulação de betões chamado SIKACOMP cedido pela empresa SIKA, baseado no método de Faury o que permitiu concluir a quantidade necessária ideal de cada elemento do betão. Impondo como condições a mesma razão água/ligante e o mesmo tipo de trabalhabilidade, daí no BC2 ter sido necessário adicionar um adjuvante.

Quadro 12 – Percentagem de agregado em cada betão

Betão	Percentagem de agregado (%)			
	Areia Fina	Brita Fina	Cerâmica Fina	Cerâmica Grossa
BRF	42,5	57,5	0	0
BC1	30,8	44,5	11,4	13,4
BC2	47,3	0	0	52,7

Quadro 13 – Quantidade de material usado em cada betão

	Unid.	Betão		
		BRF	BC1	BC2
Cimento	Kg/m <sup>3</sup>	460	460	460
Areia Fina	Kg/m <sup>3</sup>	705	511	-
Brita Fina	Kg/m <sup>3</sup>	956	738	1035
Cerâmica Fina	Kg/m <sup>3</sup>	-	103	343
Cerâmica Grossa	Kg/m <sup>3</sup>	-	122	-
Água	l/m <sup>3</sup>	205	205	205
Adjuvante	l/m <sup>3</sup>	-	-	4
A/C	-	0,45	0,45	0,45

### **Processo de fabrico**

O processo de amassadura utilizado para o fabrico dos betões após as pesagens dos vários constituintes, seguiu os seguintes passos:

- Coloca-se a areia fina e o cimento na betoneira de eixo vertical;
- Liga-se a betoneira durante 1 minuto e desliga-se;
- Coloca-se a água;
- Liga-se a betoneira durante 5 minutos;
- Coloca-se a brita fina aos poucos, com a betoneira ligada;
- Passado 2 minutos desliga-se a betoneira;
- Aguarda-se 1 minuto para repouso;
- Liga-se durante meio minuto e volta-se a desligar, concluindo assim o processo de amassadura.

Note-se que este processo varia consoante a composição que se está a criar, mas mantem-se os padrões, no sentido em que se coloca os agregados finos numa fase, e os agregados grossos noutra fase.



**Figura 7 – Amassadura dos elementos na betoneira de eixo vertical**

Após o processo de amassadura, colocou-se o betão nos moldes cúbicos e cilíndricos. Depois do preenchimento dos moldes de forma a completar todo o espaço, colocou-se numa mesa vibratória, de forma a ocupar todo o espaço disponível do molde, diminuindo assim os espaços vazios.



**Figura 8 – Moldes cheios com pasta de betão**

A cura dos provetes foi feita num tanque de cura a uma temperatura  $20 \pm 2$  °C.



Figura 9 – Provetes de betão; 1 – BRF; 2 – BC1; 3 – BC2

### 3.6 ENSAIO BETÃO FRESCO

Os ensaios a betão fresco têm como objetivo verificar a sua conformidade com as necessidades mínimas indicadas, de forma a garantir a sua boa aplicação em obra. Estes ensaios permitem também recolher informação que poderá indicar como será o seu comportamento no estado endurecido.

Apenas se realizou um ensaio para este estado do betão, ensaio de abaixamento, através do cone de Abrams.

#### 3.6.1 Ensaio de abaixamento (cone de Abrams)

O objetivo deste ensaio é medir de uma forma indireta a trabalhabilidade do betão a partir de um ensaio de consistência.

De acordo com (Coutinho, 1988) que baseando no trabalho de Ritchie (1968) refere que algumas das propriedades físicas que definem a trabalhabilidade são: o ângulo de atrito interno, a coesão e viscosidade (mobilidade da massa), a massa volúmica (compactação) e a segregação e exsudação (estabilidade da mistura).

Esta trabalhabilidade do betão demonstra a possível dificuldade da sua utilização em obra, tanto no seu transporte como na compactação e acabamento do betão.

### 3.6.1.1 Normas de ensaio

A metodologia seguida neste ensaio está definida pela norma (NP EN 12350-2, 2009) "Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento".

### 3.6.1.2 Aparelhos e utensílios

Os materiais necessários para a realização deste ensaio, são os seguintes:

- Molde troncocónico, feito de metal não facilmente atacável pela pasta de cimento, com um diâmetro interno na base de 200 mm, diâmetro interno no topo de 100 mm e uma altura de 300 mm.
- Varão de compactação, de secção transversal circular e com as extremidades arredondadas;
- Escala, com precisão maior ou igual a 5 mm;
- Placa, não absorvente, rígida e plana, sobre a qual é colocado o molde;
- Colher de pedreiro;
- Pano molhado;
- Cronómetro.



Figura 10 - Molde troncocónico, placa e varão de compactação

### 3.6.1.3 *Amostras*

A amostra deve ser constituída por um número de tomas repartidas pelo volume de betão fresco e deverá estar protegida de qualquer contaminação (ganho ou perda de água, variações bruscas de temperatura, oxidação do metal do contentor). A amostra de betão deve ser obtida de acordo com a (NP EN 12350-1, 2002).

### 3.6.1.4 *Procedimentos do ensaio*

O ensaio foi executado seguindo o procedimento seguinte:

- Humedecer o molde e a placa e colocar o molde na placa;
- Durante o enchimento do molde, manteve-se o molde fixo contra a placa através da colocação dos pés sobre as asas do molde;
- Encheu-se o molde em três camadas, sendo cada uma aproximadamente um terço da altura do molde;
- Compactou-se cada camada com 25 pancadas através do varão de compactação, sendo que estas foram dadas uniformemente pela área de contacto;
- Depois de compactada a camada superior, rasou-se a superfície de betão através de movimentos de rolamento com o varão de compactação;
- Removeu-se o molde na vertical;
- Por fim mediu-se o abaixamento.

### 3.6.1.5 *Resultados*

O resultado do ensaio de abaixamento do cone de Abrams (h) é determinado através da diferença entre a altura do molde, 300 mm, e o ponto mais alto da amostra que registou o abaixamento.

A validade do ensaio depende também da conformidade da deformada da amostra.

Para o ensaio ser válido, o betão deve permanecer substancialmente intacto e simétrico. Se esta deformada não se confirmar, o ensaio deve ser repetido imediatamente a seguir.

## **3.7 ENSAIO BETÃO ENDURECIDO**

Os ensaios ao betão endurecido têm como objetivo prever como será o comportamento do betão em condições de serviço, ou seja, perceber de que forma efetuar a sua função, para a qual foi criado.

Os ensaios realizados foram o de resistência à compressão e o de resistência à tração por compressão diametral.

### **3.7.1 Ensaio à compressão**

Este ensaio tem como objetivo determinar a capacidade do betão resistir a uma tensão uniforme de compressão. E para isso, colocam-se os provetes de betão numa máquina de compressão para obter-se o valor máximo de resistência do provete.

#### **3.7.1.1 Norma do ensaio**

A norma seguida para este ensaio foi a NP EN 12390-3 (2011) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio". Para a realização deste ensaio foi necessário seguir anteriormente outras duas normas, NP EN 12390-1 (2011) "Ensaaios ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensão e outros requisitos para o ensaio de provetes e para moldes", para entender a geometria e dimensões dos provetes necessárias e a norma NP EN 12390-2 (2003) "Ensaaios ao betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica" para proceder ao método de execução e de cura dos provetes.

#### **3.7.1.2 Aparelhos e utensílios**

- Prensa hidráulica de 4 colunas e com velocidade de carregamento controlável, respeitando a norma (NP EN 12390-3, 2003);
- Balança.



Figura 11 – Prensa hidráulica de 4 columnas

### 3.7.1.3 Procedimento do ensaio

Procedimento de ensaio foi o seguinte:

- Recolher o provete do ambiente escolhido para cura, quando este atinga a idade pretendida;
- Retirar alguma humidade que possa existir;
- Pesar o provete, e registar a sua massa;
- Limpar as superfícies da máquina usada para o ensaio;
- Colocar o provete numa posição centrada, em que a face de acabamento do provete não esteja em contacto com as superfícies da máquina;
- Aplicar a carga a uma velocidade constante, visto que a calibração desta carga era manual, o pretendido foi entre 10 kN/s e 12 kN/s;
- Registar a carga máxima.

### 3.7.1.4 Resultados

Após o ensaio, deve-se inspecionar se a rotura de cada provete foi satisfatória ou não satisfatória, conforme estipulado na (NP EN 12390-3, 2003).

A resistência à compressão de cada provete é dada pela expressão:

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

Onde:

- $f_c$  é a resistência à compressão do provete (MPa ou N/mm<sup>2</sup>)
- $F$  é a carga máxima (N);
- $A_c$  é a área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm<sup>2</sup>).

Para cada idade, a resistência à compressão dos vários betões é dada pela média simples dos resultados dos provetes ensaiados.

### **3.7.2 Resistência à tração por compressão diametral**

A resistência à tração pode ser obtida por tração pura, flexão simples ou por compressão diametral. Para este estudo optamos pela compressão diametral que consiste em submeter o provete cilíndrico a uma carga do estilo faca, aplicada ao longo da sua geratriz, de forma a gerar forças ortogonais ao plano da carga, dando-se assim a rotura do provete por tração.

#### **3.7.2.1 Norma do ensaio**

A metodologia de ensaio seguida é descrita na NP EN 12390-6 "Ensaio ao betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão dos provetes". A geometria e dimensão dos provetes de ensaio podem ser consultadas na NP EN 12390-1 (2003) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensão e outros requisitos para o ensaio de provetes e para moldes".

As condições de execução e cura dos provetes de ensaio e os métodos encontram-se especificados na NP EN 12390-2 (2003) "Ensaio ao betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes de ensaio de resistência mecânica".

#### **3.7.2.2 Aparelhos e utensílios**

Os aparelhos e utensílios usados neste ensaio são os seguintes:

- prensa hidráulica de 4 colunas e com velocidade de carregamento controlável, respeitando a norma (NP EN 12390-4, 2003);
- peça de carga, em aço;
- faixas de cartão prensado;
- pano de limpeza dos provetes.



Figura 12 – Prensa hidráulica de 4 colunas

### 3.7.2.3 Procedimentos do ensaio

O procedimento do ensaio é o seguinte:

- Recolher o provete do ambiente escolhido para cura, quando este atinga a idade pretendida;
- Retirar alguma humidade que possa existir;
- Pesar o provete, e registar a sua massa;
- Posicionar as faixas de cartão prensado nas geratrizes de basa e de topo e, na segunda geratriz, sobrepor a peça de carga
- Aplicar a carga a uma velocidade constante, visto que a calibração desta carga era manual, o pretendido foi entre 10 kN/s e 12 kN/s;
- Registar a carga máxima.

### 3.7.2.4 Resultados

A resistência à tração por compressão diametral de cada provete é dada pela expressão:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

Onde:

- $f_{ct}$  é a resistência à tração por compressão diametral (MPa ou N/mm<sup>2</sup>);
- $F$  é a carga máxima (N);
- $L$  é o comprimento da linha de contacto do provete (mm);
- $d$  é a dimensão da secção transversal (mm).

A resistência à tração por compressão diametral dos vários betões é dada pela média simples dos resultados dos provetes respetivos.

## **4 RESULTADOS DA FASE EXPERIMENTAL**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo serão analisados e comparados os resultados obtidos nos ensaios realizados, descritos no capítulo 3.

Inicialmente começa-se por mostrar os valores obtidos para os agregados, identificando assim algumas diferenças entre os agregados naturais e os agregados reciclados. É a partir dos resultados obtidos nesta primeira fase, que se torna possível definir melhor as composições dos betões a produzir.

Depois expõe-se os resultados obtidos no ensaio ao betão no estado fresco, que permite até certo ponto, estimar o seu desempenho no estado endurecido.

Por último, apresenta-se os resultados dos ensaios realizados ao betão em estado endurecido, de forma a analisar o seu comportamento mecânico consoante a percentagem de agregado reciclado.

### **4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS**

Como referido anteriormente, nesta fase serão apresentados os valores que caracterizam os agregados selecionados, de forma a prosseguir com a investigação.

#### 4.2.1 Areia Fina – análise granulométrica

Massa da amostra: 516.8 g

Quadro 14 – Análise granulométrica da areia fina

Agregado	Areia Fina			
Peneiros (mm)	Retidos (gr)	Valor médio retido (%)	Valor médio acumulado (%)	Valor médio passado (%)
5,6	0,0	0	0	100
4	11,1	2	2	98
2	56,8	11	13	87
1	209,5	41	54	46
0,5	126	24	78	22
0,25	74,8	14	93	7
0,125	36,3	7	100	0
0,063	2,3	0	100	0
Fundo	0	-	-	-



Figura 13 – Frações da areia fina resultantes da peneiração

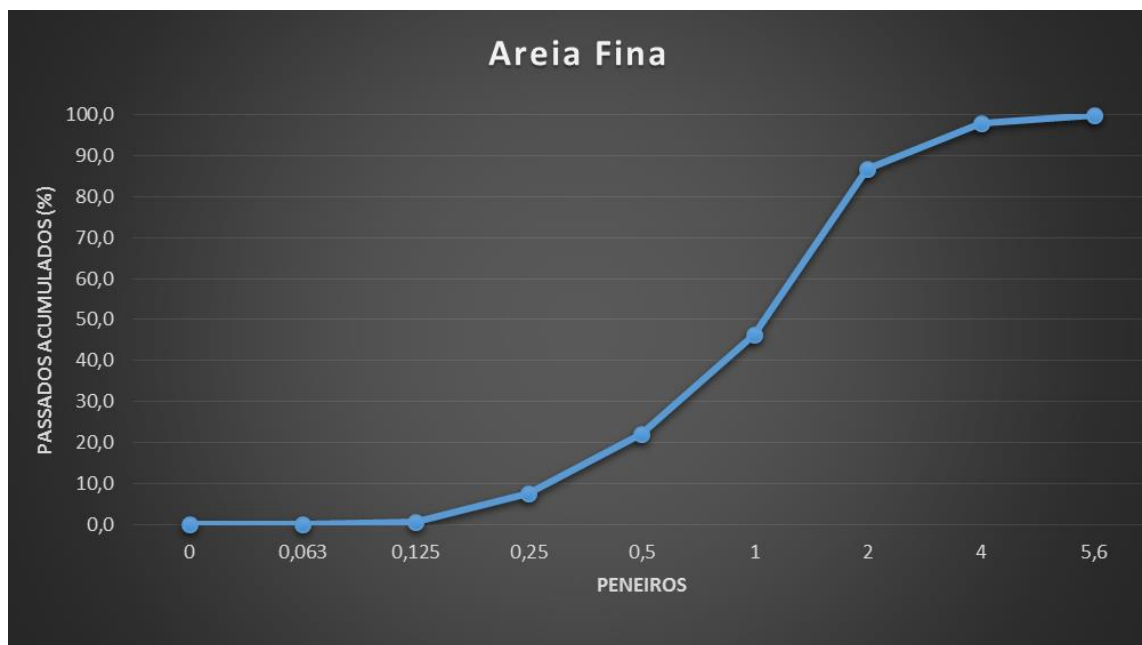


Figura 14 – Curva granulométrica da areia fina

Agregado de origem mineral com partículas de dimensões inferior ou igual a 4 mm. Apresentando uma granulometria típica de um agregado fino em que  $D \leq 4$  mm e  $d = 0$ , pertencendo assim à categoria **G<sub>F</sub>85** de acordo com o quadro 2 do capítulo de Requisitos Geométricos da norma NP EN 12620:2002+A1:2010.

#### 4.2.2 Brita Fina – análise granulométrica

Massa da amostra: 755.8 g

Quadro 15 - Análise granulométrica da brita fina

Agregado	Brita Fina			
Peneiros (mm)	Retidos (gr)	Valor médio retido (%)	Valor médio acumulado (%)	Valor médio passado (%)
11,2	0	0	0	100
8	125,9	17	17	83
5,6	421,7	56	72	28
4	186,8	25	97	3
2	12,4	2	99	1
1	0	0	99	1
Fundo	9	1	100	0



Figura 15 - Frações da brita fina resultantes da peneiração

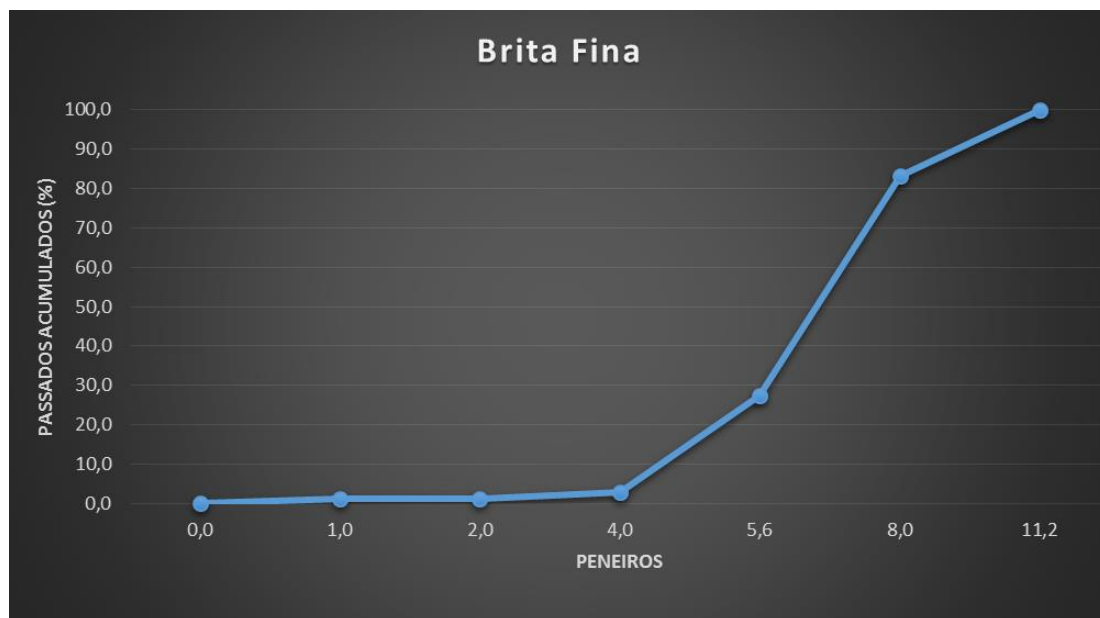


Figura 16 – Curva granulométrica da brita fina

Agregado natural grosso sujeito a um processamento mecânico, isto é, britado mecanicamente.

Apresentando uma granulometria em que  $D \leq 11,2$  ou  $D/d \leq 2$  e respeitando o resto dos requisitos, este agregado é classificado pela categoria **G<sub>c</sub>80/20** de acordo com o quadro 2 do capítulo de Requisitos Geométricos da norma NP EN 12620:2002+A1:2010.

### 4.2.3 Cerâmica fina – análise granulométrica

Massa da amostra: 195.94 g

Quadro 16 - Análise granulométrica da cerâmica fina

Agregado	Cerâmica Fina			
Peneiros (mm)	Retidos (gr)	Valor médio retido (%)	Valor médio acumulado (%)	Valor médio passado (%)
5,6	0,00	0.0	0.0	100
4	3,23	2	2	98
2	24,43	12	14	86
1	27,03	14	28	72
0,5	40,46	21	49	51
0,25	47,6	24	73	27
0,125	38,64	20	93	7
0,063	11,93	6	99	1
Fundo	2,62	1	100	0



Figura 17 - Frações da cerâmica fina resultantes da peneiração



Figura 18 – Curva granulométrica da cerâmica fina

Agregado fino reciclado de origem cerâmica vermelha (telha e tijolo) utilizados anteriormente na construção de edifícios. Este material, como já referido anteriormente, foi sujeito a um processo mecânico (máquina de desgaste Los Angeles) e dividido em frações através da peneiração.

Apresentando uma granulometria em que  $D \leq 4 \text{ mm}$  e  $d = 0$ , pertencendo assim à categoria GF85 de acordo com o quadro 2 do capítulo de Requisitos Geométricos da norma NP EN 12620:2002+A1:2010.

#### 4.2.4 Cerâmica grossa – análise granulométrica

Massa do provete: 797.32 g

Quadro 17 – Análise granulométrica da cerâmica grossa

Agregado	Cerâmica Grossa			
Peneiros (mm)	Retidos (gr)	Valor médio retido (%)	Valor médio acumulado (%)	Valor médio passado (%)
45	0	0	0	100
31,5	8	1	1	99
22,4	87,26	11	12	88
16	102,1	13	25	75
11,2	69.75	9	34	66
8	209.27	26	60	40
5,6	161,53	20	80	20
4	145,08	18	98	2
2	5,91	1	99	1
Fundo	8,42	1	100	0



Figura 19 - Frações de cerâmica grossa resultante da peneiração

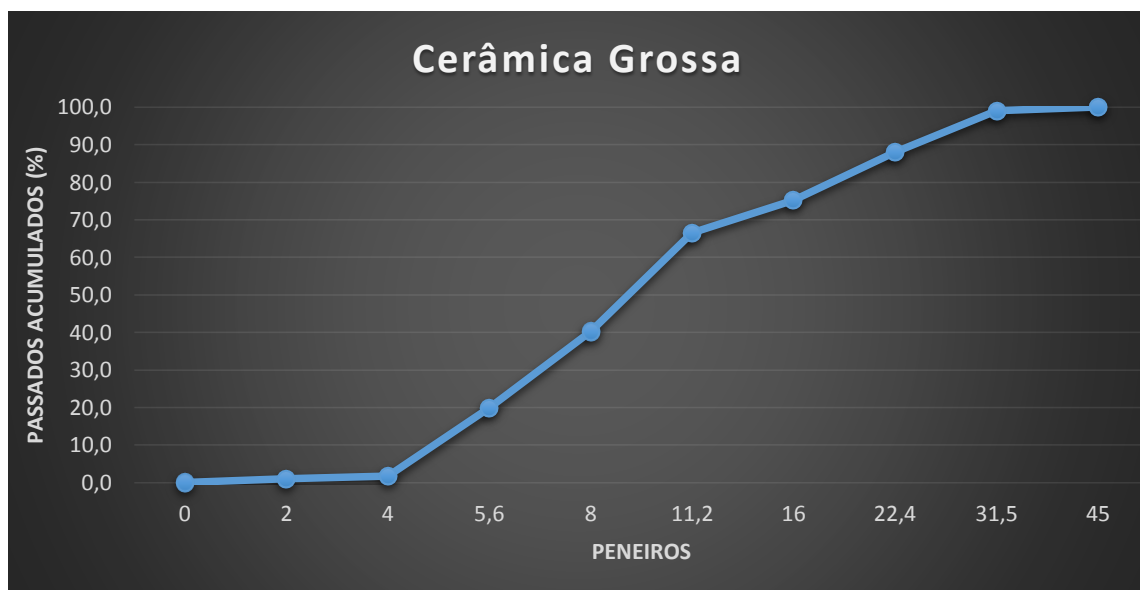


Figura 20 – Curva granulométrica da cerâmica grossa

Agregado grosso reciclado de origem cerâmica vermelha (telha e tijolo) utilizados anteriormente na construção de edifícios. Este material, como já referido anteriormente, foi sujeito a um

processo mecânico (máquina de desgaste Los Angeles) e dividido em frações através da peneiração.

Apresentando uma granulometria em que  $D/d > 2$  e  $D > 11,2$  e respeitando o resto dos requisitos, este agregado é classificado pela categoria **G<sub>c</sub>90/15** de acordo com o quadro 2 do capítulo de Requisitos Geométricos da norma NP EN 12620:2002+A1:2010.

Para agregados grossos em que  $D > 11,2$  e  $D/d > 2$  é necessário declarar a granulometria típica que passa no peneiro intermédio. Dito isto,  $D/d \geq 4$  faz com que o peneiro intermédio seja o de 16 mm, e analisando a tabela verifica-se que cumpre os limites gerais com o acréscimo de tolerâncias, sendo assim classificado pela categoria G<sub>T</sub>17,5 de acordo com o quadro 3 do capítulo de Requisitos Geométricos da norma NP EN 12620:2002+A1:2010.

#### 4.2.5 Índice de forma – cerâmica grossa

Quadro 18 – Resultados do ensaio relativos ao índice de forma

	Mi	Vi	L/E < 3	L/E > 3	M2i	SI
Peneiros	massa (g)	massa (%)	cúbicas (nº)	não cúbicas (nº)	não cúbicas (g)	parcial (%)
22,5 / 31,5	95,26	12,2	5	0	0	0,0
16 / 22,5	102,10	13,0	15	1	7,934	7,8
12,5 / 16	69,75	8,9	18	6	15,621	22,4
10 / 12,5	99,95	12,8	62	5	9,575	9,6
8 / 10	109,32	14,0	126	13	11,541	10,6
5,6 / 8	161,53	20,6	518	30	7,225	4,5
4 / 5,6	145,08	18,5	1102	72	4,49	3,1

$$SI (\%) = 7$$

Segundo o quadro 9 da NP EN 12620, é classificado pela categoria  $SI_{15}$ .

#### 4.2.6 Índice de achatamento – cerâmica grossa

Quadro 19 – Resultado do ensaio relativo ao índice de achatamento

	Retidos (g)	Largura Peneiro de barras	Passados (g)
25 / 31,5	31,75	16	2,90
20 / 25	63,51	12,5	5,79
16 / 20	102,10	10	22,96
12,5 / 16	69,75	8	22,75
10 / 12,5	99,95	6,3	22,28
8 / 10	109,32	5	14,31
6 / 8	100,66	4	14,21
5,6 / 6	41,55	3,15	4,61

$$FI (\%) = 18$$

Segundo o quadro 9 da NP EN 12620, é classificado pela categoria  $Fl_{20}$ .

#### 4.3 ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO FRESCO – ENSAIO DE ABAIXAMENTO (CONE DE ABRAMS)

Na análise do betão no estado fresco, só se realizou um ensaio, o de abaixamento, de forma a avaliar a sua trabalhabilidade.

Quadro 20 – Resultado do ensaio de abaixamento

Betão	Abaixamento (mm)
BRF	11
BC1	12
BC2	11



Figura 21 – Medição do abaixamento

Segundo o quadro 3 da norma (NP EN 206-1, 2007), a classe de abaixamento obtida para as três composições de betão foi S1, ou seja, abaixamento entre os 10 e 40mm.

Na elaboração das composições, os resultados esperados seriam valores de abaixamento da classe S2 (entre 50 a 90mm), no entanto a classe obtida foi a S1, o que nos permite concluir que talvez fosse necessário maior quantidade de água, ou colocação de um adjuvante.

No quadro 21 podemos ver algumas conclusões referentes a alguns ensaios, e concluir que para os betões realizados, o grau de trabalhabilidade está entre o médio e alto.

**Quadro 21 – Condições favoráveis de aplicação (Garcia, M.L., 2015)**

		Ensaio de Abaixamento ou Slump	Ensaio de VêBê	Ensaio da Mesa de Espalhamento	Grau de Compactabilidade
D <sub>máx</sub> do agregado		D <sub>máx</sub> ≤ 40 mm	D <sub>máx</sub> ≤ 63 mm	D <sub>máx</sub> ≤ 63 mm	D <sub>máx</sub> ≤ 63 mm
Intervalo de valores		10 mm ≤ S ≤ 200 mm	5 seg. ≤ V ≤ 30 seg.	340 mm. ≤ F ≤ 600 mm	1,04 ≥ C ≥ 1,46
Trabalhabilidade	Muito Baixa		X		
	Baixa		X		X
	Média	X			X
	Alta	X		X	X
	Muito Alta			X	
Obs.		Se após 1 minuto da desmoldagem continuar haver abaixamento, o ensaio não é válido.			

No quadro 22, temos conclusões de várias fontes, em que classificam o betão consoante a classe de abaixamento.

**Quadro 22 – Classificação do ensaio de abaixamento (Garcia, M.L., 2015)**

Classe	NP EN 12350-2 Abaixamento	A. Sousa Coutinho (ACI 211)		CEB 1978		NF P 18 – 305
		plástica	0 a 4 cm	plástica	0 a 5 cm	
S1	10 a 40 mm	plástica	0 a 4 cm	plástica	0 a 5 cm	F - "firme"
S2	50 a 99 mm	mole	4 a 15 cm	Mole (muito plástica)	5 a 16 cm	P – "plástico"
S3	100 a 151 mm					TP - " muito plástico"
S4	151 a 211 mm	fluida	> 15 cm	fluida	> 16 cm	FI - "fluida"
S5	≥ 221 mm					

## 4.4 ENSAIO AO BETÃO EM ESTADO ENDURECIDO

Nesta fase, será apresentado os valores referentes ao comportamento mecânico do betão no estado endurecido.

### 4.4.1 Resistência à compressão

Este ensaio considerou para 3 etapas da vida do betão, aos 16, 27 e 58 dias, pois foi os dias possíveis para elaboração deste ensaio.



Figura 22 – Ensaio à compressão

Quadro 23 – Resultado dos valores do ensaio à compressão, 16 dias

		16 Dias		
		BRF	BC1	BC2
Provete 1	massa (g)	7,876	7,900	7,900
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2333,6	2331,3	2356,5
	F (kN)	777	893,4	727
	fc (MPa)	34,5	39,7	32,5
Provete 2	massa (g)	8,000	7,900	7,780
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2379,3	2336,6	2352,2
	F (kN)	820,6	977,3	778
	fc (MPa)	36,5	43,4	35,3
Provete 3	massa (g)	-	8,000	7,752
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	-	2357,3	2312,3
	F (kN)	-	905,4	900,2
	fc (MPa)	-	40,2	40,3
Massa volúmica média (kg/m <sup>3</sup> )		2356,5	2341,7	2340,3
Tensão de compressão média (MPa)		35,5	41,1	36,0
Desvio Padrão (MPa)		1,4	2,0	4,0

Quadro 24 - Resultado dos valores do ensaio à compressão, 27 dias

		27 Dias		
		BRF	BC1	BC2
Provete 1	massa (g)	8,000	7,800	7,898
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2375,7	2307,6	2340,1
	F (kN)	956,5	1047,4	1056,5
	fc (MPa)	42,5	46,6	47
Provete 2	massa (g)	7,100	7,900	7,902
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2103,1	2332,4	2341,3
	F (kN)	1043,3	963,9	794,7
	fc (MPa)	46,4	42,8	35,3
Provete 3	massa (g)	7,100	7,800	7,744
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2102,5	2319,4	2294,5
	F (kN)	935,8	1249,3	947,3
	fc (MPa)	41,6	55,5	42,1
Massa volúmica média (kg/m <sup>3</sup> )		2193,767	2319,8	2325,3
Tensão de compressão média (MPa)		43,5	48,3	41,5
Desvio Padrão (MPa)		2,6	6,5	5,9

Quadro 25 - Resultado dos valores do ensaio à compressão, 58 dias

		58 Dias		
		BRF	BC1	BC2
Provete 1	massa (g)	8,190	7,894	7,834
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2394,7	2339	2321,2
	F (kN)	1097,1	1300,4	1655,7
	fc (MPa)	48,1	57,8	73,6
Provete 2	massa (g)	8,006	7,746	7,936
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2372,1	2295,1	2351,4
	F (kN)	1033,7	1279,3	1651,4
	fc (MPa)	45,9	56,9	73,4
Provete 3	massa (g)	8,050	7,886	7,770
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2385,2	2336,6	2302,2
	F (kN)	1220,5	1336,5	1599
	fc (MPa)	54,2	59,4	71,1
Massa volúmica média (kg/m <sup>3</sup> )		2384,0	2323,6	2324,9
Tensão de compressão média (MPa)		49,4	58,0	72,7
Desvio Padrão (MPa)		4,3	1,3	1,4

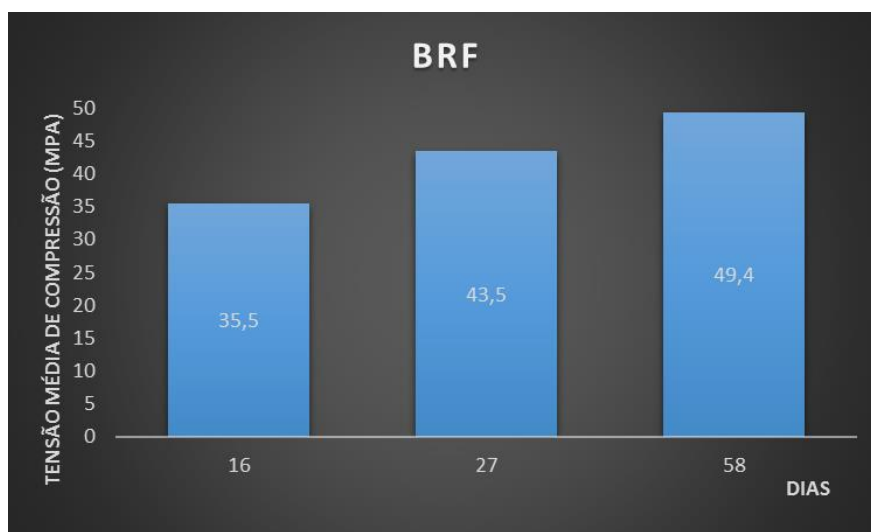


Figura 23 – Resultados da resistência à compressão do BRF

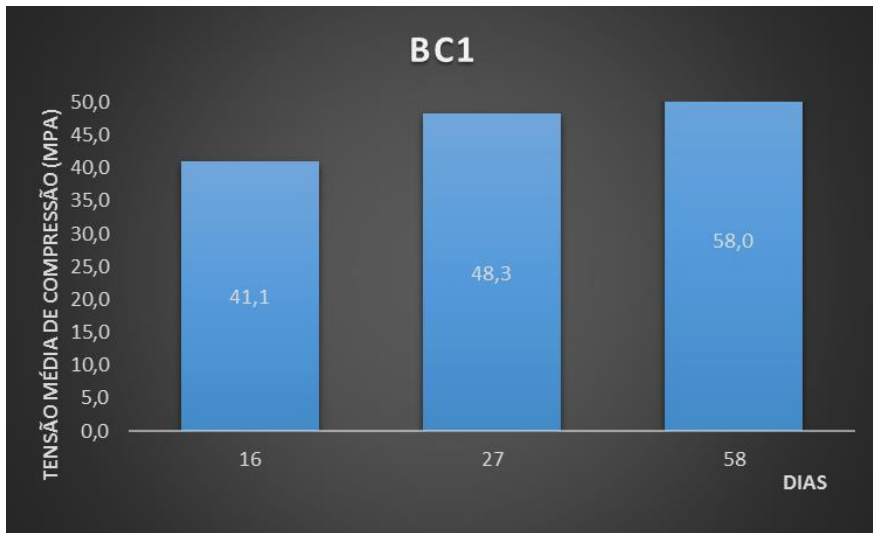


Figura 24 - Resultados da resistência à compressão do BC1

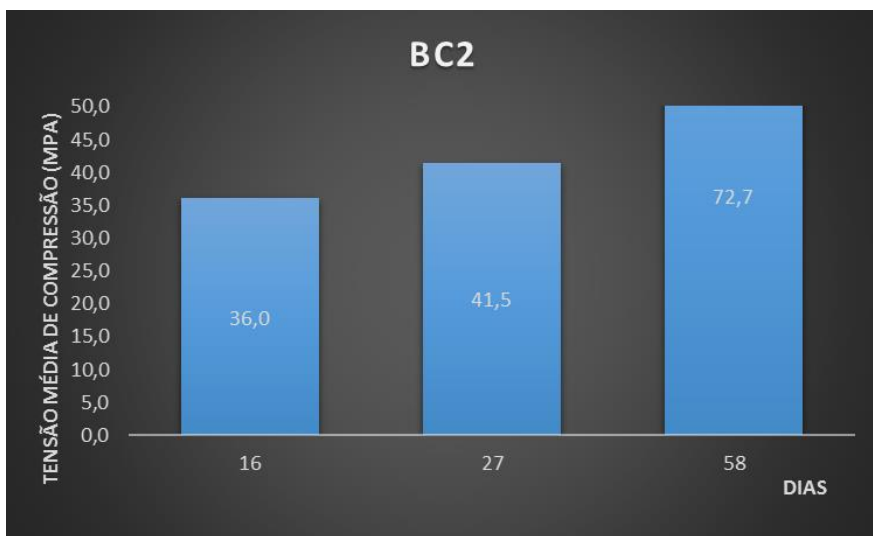
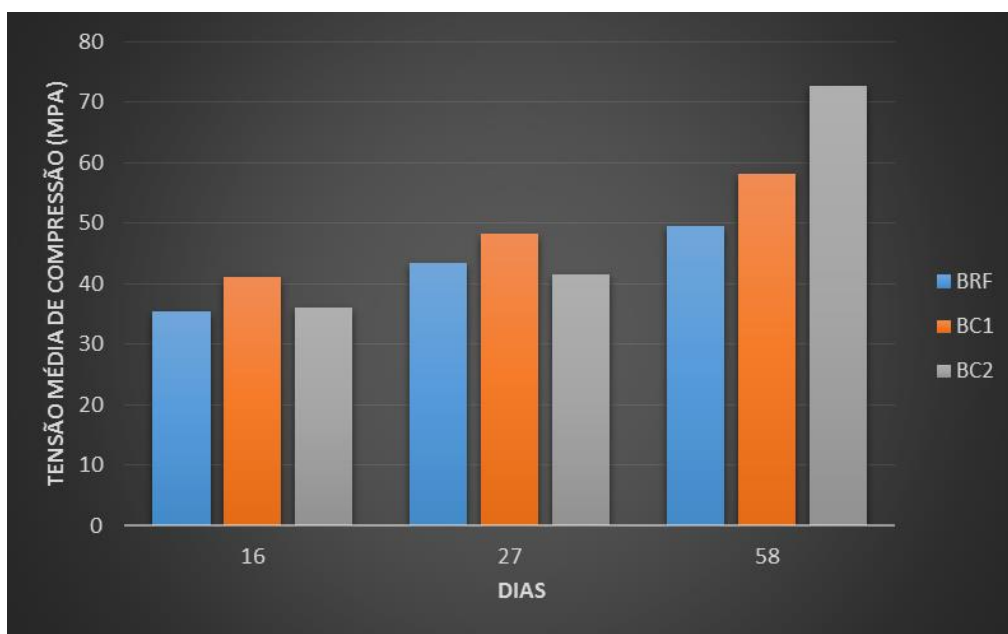


Figura 25 - Resultados da resistência à compressão do BC2



**Figura 26 – Comparação das resistências á compressão dos betões ao longo do tempo**

A partir da figura 26, podemos concluir que o BRF e o BC1 têm um comportamento praticamente linear ao longo da idade, mostrando que a sua resistência à compressão vai aumentando. Já o BC2, no início tem um comportamento linear idêntico aos outros dois, mas depois do dia 27 até ao dia 58, tem um aumento abrupto quando comparado com os outros dois, o que prevê que no aumento da sua idade possa ter valores de resistência bastante superiores.



**Figura 27 – Provete após ensaio de compressão**

#### 4.4.1.1 Resistência à tração por compressão diametral



Figura 28 – Ensaio à tração por compressão diametral

Quadro 26 - Resultado dos valores do ensaio à tração por compressão diametral, 27 dias

		27 Dias		
		BRF	BC1	BC2
Provete 1	massa (g)	-	12,330	12,262
	diâmetro médio (mm)	-	150	150
	altura média (mm)	-	310	298
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	-	2234,61	2329,662
	F (kN)	-	283,8	377,2
	fct (MPa)	-	3,89	5,37
Provete 2	massa (g)	-	12,410	12,300
	diâmetro médio (mm)	-	150	150
	altura média (mm)	-	330	299
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	-	2129,49	2336,76
	F (kN)	-	176,6	378,0
	fct (MPa)	-	2,27	5,37
Massa volúmica média (kg/m <sup>3</sup> )		-	2182,05	2333,21
Tensão média (MPa)		-	3,1	5,4
Desvio Padrão (MPa)		-	1,1	0,0

Quadro 27 - Resultado dos valores do ensaio à tração por compressão diametral, 44 dias

		44 Dias		
		BRF	BC1	BC2
Provete 1	massa (g)	12,386	12,332	12,314
	diâmetro médio (mm)	150	150	150
	altura média (mm)	300	304	300
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2337,5	2298,6	2323,9
	F (kN)	240,1	316,9	382,6
	fct (MPa)	3,40	4,42	5,41
Provete 2	massa (g)	12,414	-	-
	diâmetro médio (mm)	150	-	-
	altura média (mm)	300	-	-
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2342,8	-	-
	F (kN)	275,1	-	-
	fct (Mpa)	3,89	-	-
Massa volúmica média (kg/m <sup>3</sup> )		2340,2	2298,6	2323,9
Tensão média (Mpa)		3,6	4,4	5,4
Desvio Padrão (Mpa)		0,4	-	-

Quadro 28 - Resultado dos valores do ensaio à tração por compressão diametral, 58 dias

		58 Dias		
		BRF	BC1	BC2
Provete 1	massa (g)	11,142	12,394	12,236
	diâmetro médio (mm)	150	150	150
	altura média (mm)	270	302	300
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2336,4	2323,6	2309,2
	F (kN)	235,0	314,2	386,7
	fct (MPa)	3,69	4,42	5,47
Provete 2	massa (g)	12,458	12,376	-
	diâmetro médio (mm)	150	150	-
	altura média (mm)	300	302	-
	massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2351,1	2320,2	-
	F (kN)	317,6	316,3	-
	fct (MPa)	4,49	4,45	-
Massa volúmica média (kg/m <sup>3</sup> )		2343,8	2321,9	2309,2
Tensão média (MPa)		4,1	4,4	5,5
Desvio Padrão (MPa)		0,6	0,0	-

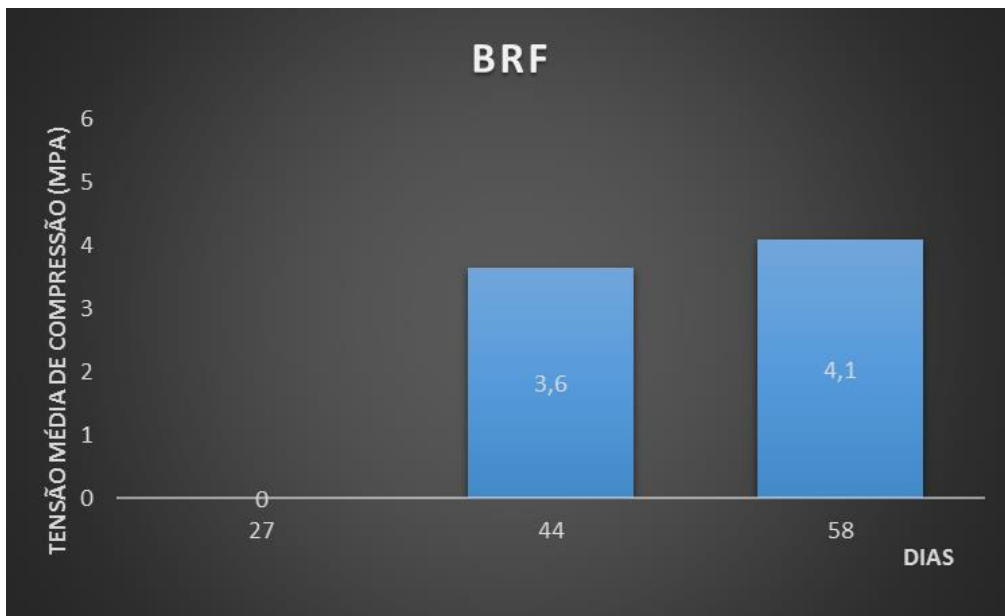


Figura 29 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral do BRF

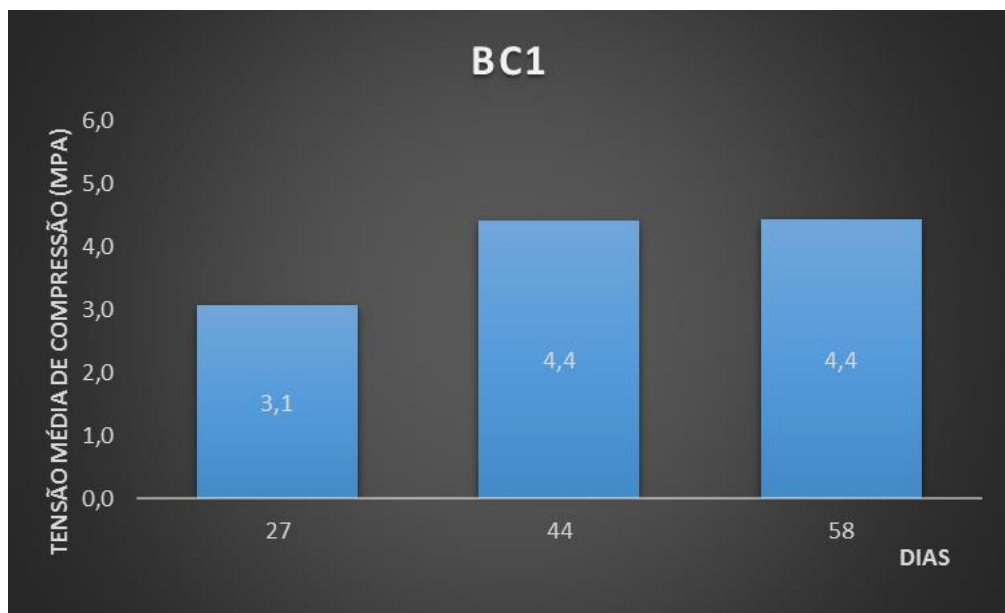


Figura 30 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral do BC1

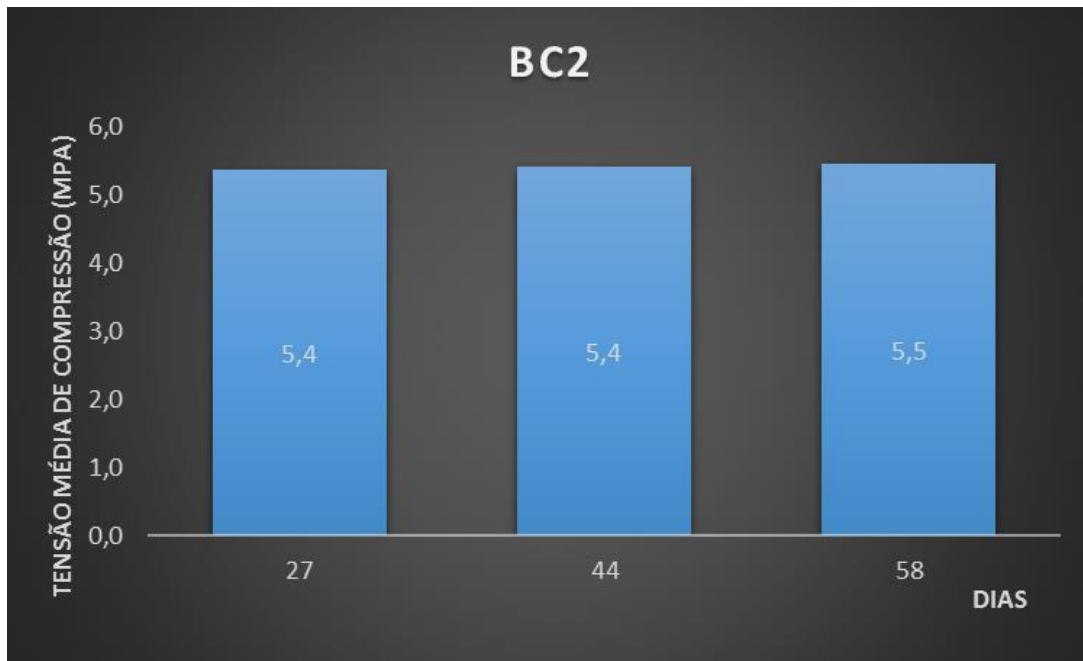


Figura 31 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral do BC2

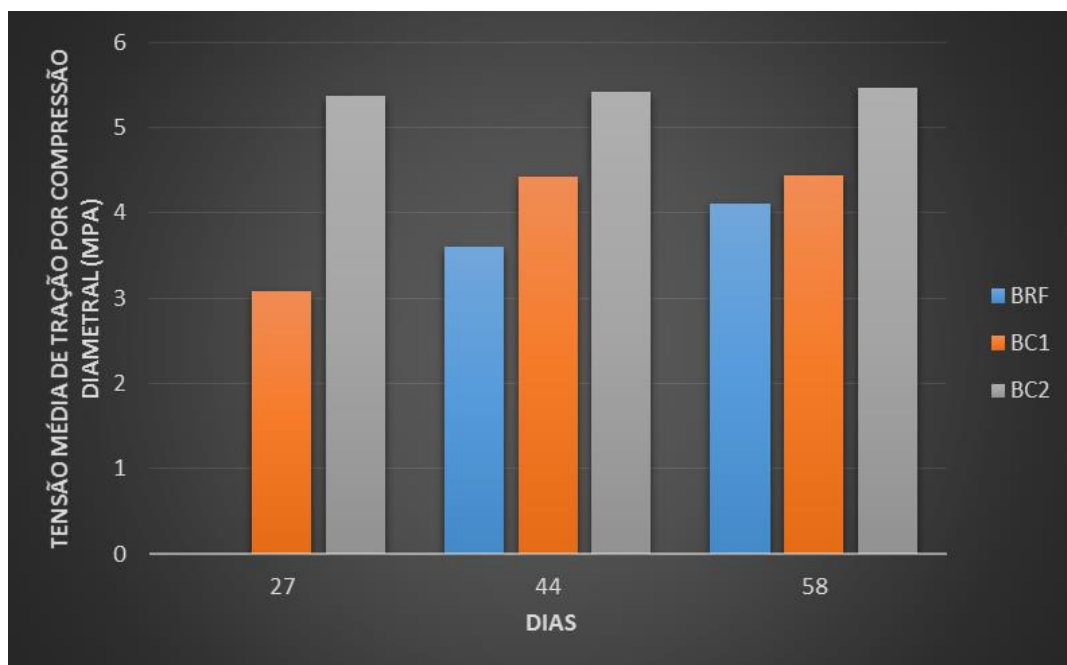


Figura 32 - Comparação das resistências dos betões ao longo do tempo

A partir da figura 32, conclui-se que todos os betões têm um aumento quase linear nos seus valores de resistência. Apesar de no BRF e no BC1 esse aumento seja um pouco mais significativo, todas as composições resultam em valores de resistência à tração por compressão diametral interessantes. O betão BC2 a partir dos 27 dias mantém praticamente o mesmo valor,

temos de ter em conta apenas ensaiamos um provete em cada idade, logo amostra não é suficiente, no mínimo devíamos ter 3 provetes por idade.



**Figura 33 – Provetes após ensaio de tração à compressão diametral**

## 5 CONCLUSÕES

Após a análise de todo o estudo experimental realizado, conseguiu-se retirar algumas conclusões.

Em primeiro lugar, referir que o objetivo de incorporar resíduos de agregados cerâmicos vermelhos no betão foi cumprido. Constatando que a composição química da cerâmica vermelha tem elementos óxidos comuns, apesar de percentagens diferentes. Além disso, o comportamento mecânico obtido foi positivo. Como verificamos no capítulo anterior, os resultados quer para os de resistência à compressão, quer para os de resistência à tração por compressão diametral, foram valores superiores aos do betão de referência. E esses valores seguiram um aumento ao longo do tempo de cura, dando assim bons indicativos para o seu comportamento a longo prazo.

Por fim, conclui-se que este estudo teve um balanço positivo, pois apesar de ser necessário mais alguns estudos, verificou-se a sua viabilidade. Sendo este um passo para a reciclagem dos RCD, diminuindo assim o volume de material para aterro, e aproveitando o valor energético destes materiais.

## 6 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A realização desta tese permitiu analisar algumas propriedades mecânicas dos betões com agregados reciclados cerâmicos vermelhos. Mas não foi possível analisar tudo o que pretendíamos, devido a falta de material para elaboração desses ensaios.

Os estudos que seriam oportunos desenvolver no futuro, seriam os seguintes.

Nas propriedades dos agregados:

- Absorção de água;
- Composição química pela norma NP EN 196-2.

Nas propriedades do betão no estado fresco:

- Massa volúmica.

Nas propriedades do betão no estado endurecido:

- Absorção de água;
- Retração;
- Módulo de elasticidade;
- Resistência à tração;
- Durabilidade.

No início deste estudo, o objetivo passava pela produção de mais composições, alterando as percentagens de agregados reciclados cerâmicos, para melhor comparação de resultados. Um dos betões que se pensou criar, foi num que houvesse substituição total da areia fina e brita fina, por cerâmica fina e cerâmica grossa.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Amoêda, R. (2009). *Projectar para a desconstrução, ciclo 3R*. Porto: Ordem dos Arquitectos SNR, Green Lines Instituto.
- APA, A. P. (2008). *Resíduos de Construção e Demolição*. Lisboa: Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- CEMBUREAU. (1999). *BEST AVAILABLE TECHNIQUES FOR THE CEMENT INDUSTRY*. Brussels.
- Coelho, A. (2010). *Análise de viabilidade de implantação de centrais de reciclagem de resíduos da construção e demolição em Portugal, Parte I: Estimativa da geração de resíduos de construção e demolição*. Lisboa: IST.
- Coutinho, A. (1988). *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa: LNEC.
- Garcia, M. d. (2015). *Textos de apoio de Materiais de construção*. Porto.
- Gonçalves, P. &. (2008). *Utilização de agregados reciclados em betão: análise comentada da regulamentação existente*. Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- John, V. (2000). *Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- Kenai, S. D. (2007). *The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate*. Construction and Building Materials.
- Khatib, J. (2004). *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. Cement and Concrete Research.
- Mansur, M. A. (1999). *Crushed bricks as coarse aggregate*. ACI Materials Journal.
- Martins, I., Antunes, A., Freire, A., Batista, F., Fortunato, E., & Roque, A. (2008). *Utilização de RCD em Betão*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- NP EN 12350-1. (2002). *Ensaio do betão fresco: Amostragem*. Lisboa : IPQ.
- NP EN 12350-2. (2009). *Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento*. Lisboa: IPQ.
- NP EN 12390-3. (2003). *Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*. Lisboa: IPQ.
- NP EN 12390-4. (2003). *Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão, características das máquinas de ensaio*. Lisboa: IPQ.
- NP EN 12390-6. (2003). *Ensaio do betão endurecido: Resistência à tração por compressão dos provetes*. Lisboa: IPQ.
- NP EN 206-1. (2007). *Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Lisboa: IPQ.

- NP EN 933-1. (2000). *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise*. Lisboa: IPQ.
- NP EN 933-2. (1999). *Ensaio para a determinação das características geométricas dos agregados: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas*. Lisboa: IPQ.
- NP EN 933-3. (2002). *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas, Índice de achatamento*. Lisboa: IPQ.
- NP EN 933-4. (2002). *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas. Índice de forma*. Lisboa: IPQ.
- Ortiz, O. P. (2010). Environmental performance of construction waste: Comparing three scenarios from a case study in Catalonia,. *Journal of Waste Management*,, 646-654.
- Poon, C. C. (2006). *The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong*. Resources, Conservation and Recycling.
- Silva, C. (2004). *A problemática dos Resíduos de Construção e Demolição: custos e benefícios da triagem*. Lisboa: Trabalho realizado no âmbito de um estágio curricular, CEIFA ambiente.
- Sonigo, P., Hestin, M., & MIMID, S. (2010). *Management of construction and demolition waste in the EU*. Brussels: Bio Intelligence Service.
- Torgal, F. P. (2009). *Reusing ceramic wastes in concrete*. Construction and Building Materials.
- UEST, U. o. (2006). Development of the best management system for high priority waste streams in Cyprus. roject LIFE 03 TCY/CY/018, chapter 1.
- Veiga, J., & Ruivo, J. (2004). *Resíduos de construção e demolição: estratégia para um modelo de gestão*. Lisboa: Licenciatura em Engenharia do Ambiente, IST.
- Vieira, C. M. (2000). *Characterization of red ceramic body used in the production of bricks in the region of Campos dos Goytacazes*.