



SUSTENTABILIDADE DO BETÃO

COMPORTAMENTO DE BETÕES COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND POR ADIÇÕES QUASE INERTES

Ana Cristina Rodrigues Galhardo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professora Doutora Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves

Outubro de 2009

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri

Sustentabilidade do betão

**Comportamento de betões com substituição parcial de cimento Portland por
adições quase inertes**

Autor: Ana Cristina Rodrigues Galhardo

Orientador: Professora Doutora Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves



171 338

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri.

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã e agradeço todo o apoio e disponibilidade que me dedicaram. Obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

A todos os que me apoiaram incondicionalmente ao longo desta jornada e que deram o seu contributo para que esta tese fosse realizada, os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço em especial à minha Orientadora de tese, a Prof.^a Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves pela forma como orientou o meu trabalho e pela disponibilidade e apoio prestados.

Agradeço também ao Prof. António Bettencourt Ribeiro pelo contributo prestado para o desenvolvimento desta tese.

Aos meus colegas Nuno Ferreira e António Monteiro e ao meu Pai pelo apoio prestado na realização dos ensaios experimentais.

Aos Srs. Luís Nunes e Luís Bento pela cooperação neste trabalho.

À Sandra Velez pelo acompanhamento e orientação durante a elaboração do ensaio experimental para a determinação da análise granulométrica dos agregados.

Agradeço à Britobetão, Ferbritas e Alandromar pela sua disponibilidade e fornecimento de materiais para a realização dos ensaios experimentais.

Finalmente agradeço aos meus Pais que tornaram possível a minha formação académica e à minha irmã pelo apoio e cooperação neste trabalho.

RESUMO

Os betões actuais são materiais com custos extremamente competitivos devido ao baixo custo do cimento Portland. Contudo, os elevados níveis de emissões de CO₂ gerados na sua produção provocam o aumento do custo final do produto, tanto económico como ambiental.

Devido a esta situação algumas adições têm sido estudadas como alternativas para substituir parcialmente os conteúdos de cimento no fabrico de betão.

Uma vez que existem grandes quantidades de pó de mármore inutilizadas na região de Évora decidiu-se avaliar o seu comportamento.

O pó de mármore foi adicionado em certas percentagens de forma a reduzir os conteúdos de cimento, permitindo avaliar se este iria manter e/ou melhorar as características de resistência à compressão e trabalhabilidade do betão.

Além de avaliado o comportamento desta adição, o mesmo foi também comparado com a adição de filer calcário nas mesmas percentagens.

Os resultados obtidos demonstraram a exequibilidade da utilização de ambas as adições.

Palavras-chave: *Betão sustentável; pó de mármore, filer calcário.*

ABSTRACT**Concrete Behavior with Partial Replacement of Portland Cement by Nearly Inert Additions**

Concretes currently used in construction are materials with very competitive costs due to the low cost of Portland cement. However, high levels of CO₂ emissions generated in its production cause an increase of the final cost of the product, both economically and environmentally.

Due to this situation, some additions have been studied as alternatives to replace partially cement contents in concrete production.

Since there are large quantities of marble dust in the region of Évora, it was decided to evaluate his behavior.

The marble dust was added in known percentages so the cement contents could be reduced, allowing evaluating if it will maintain and/or improve the characteristics of the compressive strength and workability of the concrete.

In addition to evaluating the behavior of marble dust, this addition was also compared with the addition of limestone filler in the same percentages.

The results demonstrated the feasibility of using both additions.

Keywords: *Sustainable concrete, marble dust, limestone filler.*

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS DOS ANEXOS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
1.4. Processo de pesquisa implementado	3
2. ESTADO DO CONHECIMENTO.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Betão.....	5
2.3. Materiais constituintes do betão	8
2.3.1. Cimento	8
2.3.2. Agregados	13
2.3.2.1. Agregados grossos	14
2.3.2.2. Agregados finos	14
2.3.3. Adjuvantes	15
2.3.4. Água	16
2.3.5. Adições	17
2.3.5.1. Adições correntes.....	18
2.3.5.1.1. Sílica de fumo	18
2.3.5.1.2. Pozolanas	20
2.3.5.1.3. Sílica activa	21
2.3.5.1.4. Cinzas volantes.....	22
2.3.5.1.5. Escória de alto-forno.....	23
2.3.5.1.6. Cal hidratada.....	23
2.3.5.1.7. Cal aérea	24
2.3.5.2. Adições utilizadas na tese.....	24
2.3.5.2.1. Pó de Mármore	24
2.3.5.2.1.1. Estudos realizados sobre adições de pó de mármore	25
2.3.5.2.1.2. Conclusão.....	27
2.3.5.2.2. Filer calcário.....	28
2.3.5.2.2.1. Estudos realizados sobre adições de filer calcário	29

2.3.5.2.2.1.1. Filer calcário em betões correntes	29
2.3.5.2.2.1.2. Filer calcário em betões autocompactáveis	31
2.3.5.2.2.1.3. Filer calcário em argamassas	34
2.3.5.2.2.2 Conclusão	34
2.4. Soluções técnicas já existentes para o aproveitamento dos resíduos das pedreiras	35
2.4.1. Indústria do cimento	36
2.4.2. Tijolos e Telhas de Cerâmica Vermelha.....	37
2.4.3. Pavimentos	37
2.4.4. Terraplenagens.....	37
2.4.5. Aglomerados de Mármore	38
2.4.6. Indústria do Papel.....	38
2.4.7. Indústria da Cerâmica	38
2.4.8. Correção de Solos Agrícolas	39
2.4.9. Tratamento de Águas Ácidas	40
2.4.10. Selagem de Aterros.....	40
2.4.11. Outras Aplicações.....	40
2.5. Conclusão	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. Materiais.....	43
3.1.1. Cimento Portland.....	43
3.1.2. Agregados	44
3.1.3. Pó de mármore	46
3.1.4. Filer calcário	47
3.1.5. Adjuvante.....	48
3.1.6. Água	48
3.2. Métodos	48
3.2.1. Análise granulométrica	49
3.2.2. Determinação da massa volúmica	50
3.2.3. Método de Blaine.....	52
3.2.4. Abaixamento do Cone de Abrams.....	53
3.2.5. Determinação da resistência à compressão	55
4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	57
5. RESULTADOS OBTIDOS	61
5.1. Resultados dos ensaios realizados em betão fresco	61
5.2. Resultados dos ensaios realizados em betão endurecido	62
5.2.1. Resultados das composições base e de referência.....	62
5.2.2. Resultados das composições com adição de filer calcário.....	64
5.2.3. Resultados das composições com adição de pó de mármore.....	65
5.2.4. Análise comparativa de resultados.....	66
5.3. Verificação da conformidade dos resultados com a NP EN 206-1:2007.....	70

5.4. Análise dos resultados	72
6. CONCLUSÃO.....	75
6.1. Conclusões Finais.....	75
6.2. Trabalhos futuros	76
BIBLIOGRAFIA.....	77
ANEXOS.....	A.1
ANEXO I – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	A.2
ANEXO II – RESULTADOS DAS AMOSTRAS NO ESTADO ENDURECIDO	A.3
ANEXO III – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DAS AMOSTRAS	A.12

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Aqueduto da Ponte du Gard em Nimes.....	5
Figura 2.2 – Panteon de Roma.	6
Figura 2.3 – Barco em ferrocimento construído por Jean-Louis Lambot em 1848.....	7
Figura 2.4 – Ponte da Arrábida projectada pelo Prof. Edgar Cardoso.	7
Figura 2.5 – Influência da percentagem de substituição de cimento por sílica de fumo na água de amassadura da argamassa normal e de betão.....	19
Figura 2.6 – Influência da percentagem de substituição de cimento por sílica de fumo na resistência à compressão do betão, em diferentes idades.	20
Figura 3.1 – Volumenómetro de Le Châtelier.	51
Figura 3.2 – Manómetro de vidro utilizado no método de Blaine.....	52
Figura 3.3 – Cone de Abrams – esquema do molde.	53
Figura 3.4 – Cone de Abrams – medição do abaixamento obtido.	54
Figura 3.5 – Prensa utilizada na medição da resistência à compressão das amostras	55
Figura 4.1 – Aspecto das amostras após colocação e vibração no respectivo molde.	60
Figura 5.1 – Ensaio do Cone de Abrams – medição do abaixamento da amassadura.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Os 27 produtos das famílias de betões correntes	12
Tabela 3.1 – Composição química do cimento.....	43
Tabela 3.2 – Teor de humidade dos agregados.....	45
Tabela 3.3 – Propriedades físicas do pó de mármore.....	46
Tabela 4.1 – Características da composição base.....	57
Tabela 4.2 – Composições utilizadas	59
Tabela 5.1 – Características das amassaduras em betão fresco	61
Tabela 5.2 – Valores médios da resistência à compressão das amostras C310, C350 e C400	63
Tabela 5.3 – Valores médios da resistência à compressão das amostras F10, F20 e F30	64
Tabela 5.4 – Valores médios da resistência à compressão das amostras M10, M20 e M30	65
Tabela 5.5 – Classificação mais desfavorável da classe de resistência das amostras	71
Tabela 5.6 – Classificação real da classe de resistência das amostras	71
Tabela 5.7 – Classificação da classe de resistência das amostras base e de referência	72
Tabela 5.8 – Análise comparativa do consumo de recursos naturais e produção de CO ₂ por uma tonelada de cimento produzido	74

ÍNDICE DE TABELAS DOS ANEXOS

Tabela A.1 – Análise granulométrica dos agregados.....	A.2
Tabela A.2 – Resultados das amostras C310.....	A.3
Tabela A.3 – Resultados das amostras C350.....	A.4
Tabela A.4 – Resultados das amostras C400.....	A.5
Tabela A.5 – Resultados das amostras F10.....	A.6
Tabela A.6 – Resultados das amostras F20.....	A.7
Tabela A.7 – Resultados das amostras F30.....	A.8
Tabela A.8 – Resultados das amostras M10.....	A.9
Tabela A.9 – Resultados das amostras M20.....	A.10
Tabela A.10 – Resultados das amostras M30.....	A.11
Tabela A.11 – Resultados estatísticos das amostras.....	A.12

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Curva granulométrica dos agregados	45
Gráfico 4.1 – Curva granulométrica do C310.....	58
Gráfico 5.1 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras C310, C350 e C400	63
Gráfico 5.2 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras F10, F20 e F30... 65	
Gráfico 5.3 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras M10, M20 e M30 66	
Gráfico 5.4 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras F10, F20, F30, C310, C350 e C400.....	67
Gráfico 5.5 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras C310, C350, C400, F10 e M10	68
Gráfico 5.6 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras C310, C350, C400, F20 e M20	69
Gráfico 5.7 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras C310, C350, C400, F30 e M30	70

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Actualmente, um dos materiais mais utilizados na construção civil é o betão armado. A sua versatilidade e facilidade de obtenção da matéria-prima têm levado à sua grande utilização.

Um betão quando é fabricado, obrigatoriamente tem de conter água, agregados e cimento. No caso dos dois últimos, é necessária a extracção da matéria-prima, o que é penalizante sob o ponto de vista ambiental.

O actual ritmo da construção leva a que os recursos naturais sejam rapidamente destruídos e esgotados, não sendo capaz a humanidade de suportar este crescimento e comportamento.

Além dos recursos naturais, o processo de produção de cimento é altamente intensivo no consumo de combustíveis. Cerca de 7% das emissões de CO₂ no planeta são decorrentes da sua produção e em média, 50% das emissões de CO₂ resultam da descarbonatação, 40% da combustão no forno de clínquer, 5% do transporte de matéria-prima e os outros 5% da electricidade [1].

Para produzir 1 tonelada de cimento Portland são necessários 1500 kg de recursos naturais como calcário, argila e gesso; consomem-se 4800 MJ de combustíveis fósseis como o carvão, óleo e gás, o que corresponde à emissão de 900 kg de CO₂. Segundo estes valores, verificou-se que em 2006 foram emitidos 2.287 milhões de toneladas de CO₂, devido só à produção mundial de cimento [2].

Com o acordo de Quioto [3], em 11 de Dezembro de 1997, as indústrias que ultrapassem os limites estabelecidos de emissões de CO₂ terão de pagar elevadas taxas, fazendo com que o produto final fique mais caro e menos sustentável.

Perante esta situação, fica evidenciado que cada vez mais tem que ser feita a gestão de resíduos, reutilizando e reciclando materiais já disponíveis que não têm qualquer destino.

De maneira a resolver estas situações, têm-se procurado outras soluções alternativas que possam efectivamente reduzir o uso de cimento no fabrico de betão, em favor de outras substâncias economicamente mais sustentáveis, sem obviamente, perderem as suas propriedades.

Torna-se necessário desenvolver novos betões, capazes de incorporar outro tipo de agregados artificiais, subprodutos ou resíduos provenientes de indústrias, com o fim de reduzir a extracção de mais recursos naturais.

Um exemplo de resíduos que actualmente existem, dizem respeito às indústrias de extracção e processamento de pedra natural. Existem grandes quantidades destes resíduos que são continuamente acumulados em aterros ao ar livre e que constituem um problema ambiental por resolver. A título de exemplo, a quantidade total de resíduos de pedreiras acumulada em cada ano, em Portugal, atinge cerca de 600.000 toneladas [4].

A região do Alto Alentejo é uma zona muito rica em Mármore o qual tem sido frequentemente utilizado como material de construção desde tempos imemoriais. Devido à existência desta matéria prima existem muitas indústrias de transformação. Nestas indústrias de transformação de mármore são produzidas grandes quantidades de resíduos, nomeadamente o resíduo de pó de mármore que aparece devido ao corte dos grandes blocos de pedras.

De maneira a aproveitar estes resíduos, neste trabalho foi feito um estudo sobre a incorporação desse mesmo pó no fabrico de betão, como adição, afim de se avaliar o seu comportamento.

1.2. Objectivos

Tendo em conta os factores ambientais na produção de cimento e considerando principalmente as emissões de CO₂, extracção de matéria prima e o consumo de energia, este trabalho tem como principal objectivo o aproveitamento de um resíduo que existe actualmente na região do Alto Alentejo, o pó de mármore.

Devido ao corte dos blocos de pedra de mármore sobram sempre grandes quantidades de pó, o qual poderá ser utilizado no fabrico de betão, já que se trata de uma adição quase inerte.

Para tal, foram elaborados vários betões, uns cujas composições incluíam a adição de pó de mármore e outros com adição de filer calcário. Estes betões foram comparados em termos de resistências à compressão e face aos resultados obtidos foi avaliada a sua exequibilidade de aplicação em obra.

1.3. Estrutura da dissertação

O trabalho aqui apresentado está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO: Abordagem à temática deste estudo, descrição do objectivo principal e justificação da realização deste estudo. Apresentação da organização da dissertação e do processo de pesquisa implementado.

Capítulo 2 – ESTADO DO CONHECIMENTO: Descrição dos materiais constituintes do betão. Estudos realizados sobre adições de filer calcário e pó de mármore à constituição de betões e argamassas. Breve história sobre o fabrico do betão.

Capítulo 3 – MATERIAIS E MÉTODOS: Descrição dos materiais e métodos usados no trabalho prático.

Capítulo 4 – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL: Breve exposição do desenvolvimento experimental adoptado neste estudo prático.

Capítulo 5 – RESULTADOS OBTIDOS: Apresentação e discussão dos resultados obtidos no trabalho experimental.

Capítulo 6 – CONCLUSÕES: Apresentação das conclusões finais do estudo feito e abordagem a trabalhos futuros.

1.4. Processo de pesquisa implementado

Quando se desenvolve um trabalho de investigação, é necessário adquirir conhecimentos acerca do tema em estudo. Esta tomada de conhecimentos deve ser efectuada antes da pesquisa bibliográfica para que esta se processe de uma forma organizada e objectiva.

A pesquisa bibliográfica relativa a este estudo teve como base o recurso a palavras-chave relacionadas com a sustentabilidade do betão, comportamento de betões e adições quase inertes. Esta procura foi realizada em:

- Revistas de referência e artigos do sistema de base de dados da biblioteca da Universidade de Évora;
- Artigos, estudos e trabalhos já efectuados nesta área, acessíveis na base de dados <http://www.sciencedirect.com>;
- Livros técnicos existentes relacionados com o tema em estudo.

Obtidos os artigos, estudos e trabalhos de interesse para o trabalho em questão, foi efectuada uma leitura e identificação dos estudos de interesse na área em estudo, para uma posterior análise e determinação de relações entre os mesmos e a evolução que esta área tem vindo a sofrer.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Introdução

Este capítulo apresenta uma pequena abordagem ao conceito de betão e também dos seus constituintes, tais como, o cimento, agregados, adjuvantes e água. O betão e o cimento foram tratados de forma mais completa e como tal apresenta-se também uma breve exposição sobre a sua história e fabrico. Apresenta-se também uma breve introdução ao tipo de adições vulgarmente utilizadas na composição de betões e argamassas, assim como alguns estudos realizados sobre adições de filler calcário e pó de mármore em betões e argamassas.

2.2. Betão

O material mais usado na construção de estruturas, é o betão. O betão é utilizado como material de construção há milhares de anos.

Nas antigas civilizações o betão era essencialmente utilizado em pavimentos, paredes e fundações. Os Romanos exploraram as possibilidades da utilização deste material com mestria em diversas obras, tais como, casas, templos, pontes e aquedutos, muitos dos quais chegaram aos nossos dias e são exemplos do elevado nível atingido pelos construtores Romanos. Como exemplo podem referir-se o Aqueduto da Ponte du Gard em Nimes (Figura 2.1) e o Panteon de Roma (Figura 2.2).



Figura 2.1 – Aqueduto da Ponte du Gard em Nimes.



Figura 2.2 – Panteon de Roma.

Existem registos de que os Romanos fizeram tentativas para produzirem betão armado, utilizando como armaduras cabos de bronze. No entanto, estas experiências não foram bem sucedidas uma vez que não foi tido em conta os diferentes coeficientes de dilatação térmica do bronze e do betão.

A partir dos Romanos e até ao século XVIII o betão teve uma utilização bastante reduzida, que se limitou quase exclusivamente à construção de fundações e do interior de paredes de alvenaria.

Tendo em conta o início do desenvolvimento da produção e o estudo das propriedades do cimento (Smeaton em 1758, James Parker em 1776, Louis Vicat em 1818) a utilização do betão ganhou uma nova dinâmica, não só na execução de fundações mas também na construção de pavimentos térreos e paredes.

O barco construído por Jean-Louis Lambot em 1848 é reconhecido como a obra mais antiga de betão armado ainda existente (Figura 2.3), apesar das primeiras referências ao betão armado datarem de 1830.



Figura 2.3 – Barco em ferrocimento construído por Jean-Louis Lambot em 1848.

O princípio do século XX caracteriza-se pelo enorme desenvolvimento na utilização e compreensão do funcionamento e possibilidades do betão armado estando este desenvolvimento associado à realização de numerosas patentes onde se indicam as bases de cálculo e as disposições de armaduras adoptadas para diversos elementos estruturais.

Durante a primeira metade do século XX realizaram-se muitas construções em betão armado, em Portugal, que merecem destaque tais como o Canal do Tejo (onde foi utilizada a vibração mecânica pela primeira vez no nosso país), o Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa e as instalações do Instituto Superior Técnico em Lisboa. Já durante a segunda metade deste século podem destacar-se a Ponte da Arrábida projectada pelo Prof. Edgar Cardoso (Figura 2.4) e a barragem de abóbada do Cabril no Rio Zêzere.



Figura 2.4 – Ponte da Arrábida projectada pelo Prof. Edgar Cardoso.

A primeira construção portuguesa de betão armado e pré-esforçado data de 1951 e é representada pela cobertura de vários armazéns para algodão na Avenida Meneses em Matosinhos. De destacar também a construção da primeira ponte em betão armado e pré-esforçado em 1954. Esta é a Ponte de Vala Nova em Benavente e apresenta 3 vãos de 36 m simplesmente apoiados.

Como se pode ver, a utilização do betão remonta a tempos muito antigos e apresenta uma grande versatilidade. A razão para que o betão seja tão intensamente utilizado assiste nos seguintes aspectos: é facilmente moldável, económico, está facilmente disponível nos locais das obras, os componentes existem na maior parte do mundo, a sua utilização exige um reduzido consumo de energia quando comparado com materiais alternativos e não tem problemas graves de conservação dos recursos naturais.

2.3. Materiais constituintes do betão

2.3.1. Cimento

A utilização de materiais à base de cimento é muito antiga. Os antigos Egípcios utilizavam gesso impuro calcinado. Os Gregos e os Romanos utilizavam calcário calcinado e mais tarde aprenderam a adicionar areia e pedra triturada à cal e à água. Este foi o primeiro tipo de betão produzido em toda a história. A argamassa de cal não endurece quando imersa em água e como tal, para construções debaixo de água os Romanos utilizavam um preparado de cal e cinzas vulcânicas. A sílica activa e alumina presentes nas cinzas vulcânicas juntamente com a cal originaram o que se tornou conhecido como cimento pozolânico, derivado do nome da vila de Pozzuoli, perto do Vesúvio, onde as cinzas vulcânicas foram primeiramente encontradas. O nome “cimento pozolânico” é utilizado até aos dias de hoje para descrever cimentos obtidos simplesmente da moagem de materiais naturais a temperaturas normais.

A Idade Média trouxe uma diminuição geral da qualidade e da utilização de cimento e foi só no século XVIII que se avançou no conhecimento dos cimentos. John Smeaton foi convidado no ano de 1756 para reconstruir o Farol de Eddystone, da Costa Cornish, descobriu que as melhores argamassas eram produzidas quando se misturavam pozolanas com calcário contendo uma proporção considerável de material argiloso. Ao

reconhecer o papel da argila, até então considerada indesejável, Smeaton foi o primeiro a compreender as propriedades químicas da cal hidráulica [5].

Seguiu-se o desenvolvimento de outros cimentos hidráulicos, tais como o "cimento Romano" obtido por James Parker através da calcinação de nódulos de calcário argiloso, culminando com a patente de "cimento Portland" atribuída por Joseph Aspdin, um pedreiro e construtor de Leeds, em 1824. Este cimento foi preparado pelo aquecimento de uma mistura de calcário e argila finamente moída num forno até que o dióxido de carbono fosse totalmente libertado. A temperatura necessária no processo anterior é muito inferior à necessária para a produção de clínquer.

O nome "cimento Portland", originalmente atribuído devido à semelhança de cor e qualidade do cimento endurecido da pedra Portland – uma pedra extraída em Dorset – manteve-se em todo o mundo até hoje para descrever um cimento obtido pela mistura de materiais calcários e argilosos ou outros, tal como sílica, alumina e óxido de ferro, que são depois cozidos a altas temperaturas (1450°C) [5].

A elevada temperatura das matérias-primas faz com que estas reajam entre si. Em virtude destes fenómenos químicos e físicos, os produtos da reacção, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis, geralmente entre 2 mm e 20 mm, chamados clínquer.

Há dois processos de fabrico do cimento, um em que a matéria-prima é moída e homogeneizada dentro de água (via húmida) e outro em que a moagem e homogeneização se realizam a seco (via seca). O processo de fabrico por via húmida é o mais antigo e o mais evidente para obter homogeneização de materiais sólidos. Nos dias de hoje caiu em desuso pois requer maior consumo de energia, por ser necessário eliminar a água do cru, por aquecimento. No entanto, a via seca tornou-se possível graças às técnicas de fluidificação gasosa [6].

As reacções químicas promovidas pela acção da temperatura entre os componentes da matéria-prima são essencialmente reacções no estado sólido. Para activar as reacções entre fases sólidas, devido à lenta difusão dos átomos e moléculas nos sólidos, é necessário elevar a temperatura e a área das superfícies dos reagentes. A velocidade da reacção entre fases sólidas é portanto função do grau de finura, da natureza química dos materiais e da duração do aquecimento.

As reacções em fase líquida são muito mais rápidas e os produtos da reacção só dependem da temperatura e da composição química das fases líquidas, resultando daí a importância da preparação das matérias-primas para o cimento.

A matéria-prima depois de moída é levada a silos ou tanques de homogeneização (respectivamente na via seca e na húmida) onde é sujeita a uma análise química, automática e instantânea, por meio dos raios X, ligados a um computador que calcula as correcções a fazer e comanda os silos de aditivos, correctores, em calcário, sílica, ferro ou alumina. Após esta correcção, o cru entra para os silos alimentadores do forno.

A cozedura em via húmida utiliza fornos rotativos longos, equipados com grinaldas de cadeias internas, barragens, entre outros, com o fim de demorar o mais possível a progressão da pasta, obrigando-a a secar. Em via semi-húmida a cozedura é feita em fornos mais curtos e precedidos de pré-aquecedores verticais e horizontais (tambores rotativos), onde o teor de água da pasta desce para 10% a 15%. Na via semi-seca utilizam-se secadores de grelha móvel, onde os grânulos de cru, aglomerados, se depositam e recebem os gases da combustão. Finalmente, na via seca utilizam-se hoje em dia nas fábricas de maior produção, pré-aquecedores de ciclones.

À saída do forno o clínquer deve ser arrefecido rapidamente, pois o silicato tricálcico é instável a temperaturas inferiores a 1250 °C, ou seja, há que conservar a sua estrutura, arrefecendo-o rapidamente desde temperaturas superiores a 1250 °C até à temperatura ambiente.

Para efectuar o arrefecimento do clínquer há diferentes dispositivos, nomeadamente o arrefecedor de grelha, constituído por grelhas metálicas, e o planetário constituído por vários tubos arrefecedores que envolvem o forno. O clínquer é arrefecido pelo ar (comburente) que em contra corrente o atravessa, chegando quente à zona de combustão. Após a saída do arrefecedor, a cerca de 125-180 °C o clínquer é armazenado, terminando o seu arrefecimento e entrando depois nos moinhos, em geral moinhos de bolas, onde é moído juntamente com adjuvantes para facilitar a moagem. Adiciona-se também gesso para regular o tempo de presa e outros constituintes para modificar as propriedades, como as pozolanas, escórias de alto-forno, entre outros.

Dentro da família dos cimentos, existem cinco tipos principais de cimento que se subdividem em 27 tipos de cimento corrente. Os cinco tipos principais de cimento são respectivamente, CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV e CEM V. O quadro resumo dos tipos

de cimento existentes, a sua notação e os seus constituintes principais estão representados na tabela 2.1, que se apresenta de seguida:

Tabela 2.1 – Os 27 produtos das famílias de betões correntes.

Tipos principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa)										Constituintes adicionais minoritários	
			Constituintes principais											
			Clinker K	Escória de alto-forno S	Sílica de fumo D	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido T	Calcário			
natural P	natural calcinada Q	siliciosa V				calcária W	L	LL						
CEM I	Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de Sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de pozolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de Calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cimento Portland composto	CEM II/A-M	80-94	6-20										0-5
CEM II/B-M		65-79	21-35										0-5	
CEM III	Cimento de alto forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cimento pozolânico	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Cimento composto	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50		-	-	-	-	-	0-5	

2.3.2. Agregados

A norma EN 206-1:2007 [7] define agregados como material mineral granular adequado para utilização no betão. Os agregados podem ser naturais, artificiais ou reciclados de materiais previamente usados na construção.

O agregado é constituído por partículas de rochas com dimensões que variam geralmente entre cerca de 20 cm e 0,1 mm, dispersas pela pasta de cimento, e cujo volume constitui cerca de 70 a 80% do do betão. O seu emprego deve-se a razões técnicas e económicas, mas é necessário tomar em conta que as características do agregado afectam profundamente o comportamento do betão [8].

As propriedades essenciais que se exigem aos agregados são de natureza geométrica, física e química:

- Adequada forma e dimensões proporcionadas, segundo determinadas regras;
- Adequada resistência às forças;
- Adequadas propriedades térmicas;
- Adequadas propriedades químicas relativamente ao ligante e às acções exteriores;
- Isenção de substâncias prejudiciais.

Agregados com massa volúmica normal devem ser conformes com a EN 12620:2004 [9] e cumprir os requisitos de durabilidade da EN 206-1:2007 [7].

A forma e a distribuição do tamanho das partículas são aspectos bastante importantes, afectando a compacidade e o índice de vazios do betão [10].

Os agregados devem ser controlados de forma minuciosa, tendo em consideração o teor de humidade, a absorção de água e a sua curva granulométrica, de forma a se produzir um betão com qualidade.

A melhor informação que se pode obter sobre a qualidade de um agregado é a observação do comportamento feito com ele. Quando se pretenda aplicar agregados até então inexplorados, com comportamento desconhecido, e quando se procede ao controle diário do inerte proveniente de várias origens, devem realizar-se ensaios para determinar

quais as características desses agregados, tal como, a sua massa volúmica, baridade, entre outros [8].

2.3.2.1. Agregados grossos

São considerados agregados grossos, todas as partículas com dimensão superior a 5 mm. A máxima dimensão do agregado grosso é um parâmetro importante em todas as metodologias de composição do betão. No entanto, a compacidade da mistura é tida em consideração em algumas metodologias. Por exemplo, no Método Geral proposto pelo Professor Okamura [11], a dimensão máxima recomendada para os agregados grossos é de 20 mm, e o volume de agregado grosso é 50% do volume aparente compactado do mesmo. O método proposto pela Japan Society of Civil Engineers, recomenda que a máxima dimensão do agregado grosso deve estar entre 20 a 25 mm.

O espaçamento entre as armaduras é o factor principal na determinação do tamanho máximo dos agregados grossos. A granulometria e a forma dos agregados influenciam directamente a fluidez, a capacidade de passagem do betão e a quantidade da pasta do betão. Quanto mais esféricos forem os agregados menor será a probabilidade de ocorrerem bloqueios dos agregados. A forma esférica dos agregados aumenta também a fluidez do betão, pois reduz o atrito interno entre as partículas [10].

Em síntese, verifica-se que o betão perde capacidade de atravessar os obstáculos quando se aumenta o volume e a máxima dimensão dos agregados [12].

2.3.2.2. Agregados finos

Os agregados finos são definidos como partículas cuja dimensão está entre 0,125 mm e 5 mm. Todas as partículas de agregado fino inferiores a 0,125 mm são consideradas como materiais pertencentes à fracção de materiais finos, e devem ser contabilizados na relação água/cimento do betão [10].

A influência das características dos agregados finos (distribuição granulométrica, forma das partículas e quantidade) nas propriedades no estado fresco do betão é superior à dos agregados grossos.

Se a quantidade de agregados finos for elevada, a quantidade de pasta entre as partículas diminui resultando numa redução da fluidez do betão. Por outro lado, se esta quantidade for demasiado baixa, pode dar origem a segregação e/ou exsudação. Por estas razões é necessário definir a quantidade certa de agregados finos na composição de um betão [10].

Por exemplo, o método proposto por Okamura [11] defende que a quantidade de agregados finos deve ser fixada em 40% do volume de argamassa, excluindo o ar.

2.3.3. Adjuvantes

A norma EN 206-1:2007 [7] define como adjuvante, o material adicionado durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, cerca de 5%, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido.

É aconselhável verificar-se a compatibilidade entre os adjuvantes e os outros constituintes do betão. A escolha ideal do adjuvante deve ter em conta as propriedades químicas e físicas dos componentes do betão.

A classificação racional dos adjuvantes é dificultada por estes apresentarem uma multiplicidade de efeitos sobre o betão e como tal torna-se necessário classificar os adjuvantes segundo a sua natureza físico-química do que segundo as propriedades tecnológicas em que interferem.

Resumidamente, pode dizer-se que os efeitos que se procura alcançar com os adjuvantes são [8]:

- Melhorar a trabalhabilidade;
- Acelerar a presa;
- Retardar a presa;
- Acelerara o endurecimento nas primeiras idades;
- Aumentar as tensões de rotura pelo menos nos primeiros meses;
- Aumentar a resistência aos ciclos de congelação e descongelação;
- Diminuir a permeabilidade aos líquidos;
- Impedir a segregação e a sedimentação do cimento nas caldas de injeção;

- Criar uma ligeira expansão no betão ou argamassa – utilizados por exemplo nas injecções, nos enchimentos dos cabos do betão pré-esforçado por ancoragem, dos vazios no inerte pré-colocado ou ainda no preenchimento de cavidades;
- Aumentar a aderência ao inerte e às argamassas e betões endurecidos;
- Produzir betão ou argamassa coloridos;
- Produzir argamassa leve, celular;
- Produzir propriedades fungicidas, germicidas e insecticidas;
- Inibir a corrosão das armaduras;
- Ajudar a bombagem dos betões pobres.

Quanto à classificação dos tipos de adjuvantes apresenta-se a que se segue, conforme a sua acção principal [8]:

- Reologia das argamassas e betões frescos;
- Teor de ar das argamassas e betões;
- Presa e endurecimento;
- Expansão;
- Resistência a acções físicas;
- Resistência a acções químicas;
- Resistência a acções biológicas;
- Cor.

2.3.4. Água

Todas as águas potáveis e ainda as que não o sendo não tenham cheiro nem sabor podem ser utilizadas na amassadura do betão. Esta lei, dizia Sousa Coutinho [8], perfeitamente geral, permite que não haja preocupações quando se usa água da distribuição para consumo público.

No entanto, existe uma lei específica para o uso de água na amassadura do betão que deve ser respeitada, sendo esta respectivamente a EN 1008:2003 [13].

Efectivamente, a água de amassadura influi nas propriedades do betão através das substâncias dissolvidas e em suspensão. As substâncias dissolvidas podem afectar a resistência mecânica e a resistência química do betão e das armaduras. As substâncias

em suspensão podem afectar a compacidade e especialmente o crescimento cristalino dos produtos da hidratação do cimento [8].

A água tem como principal objectivo a hidratação do cimento, permitindo alterar a viscosidade e a deformabilidade do betão fresco. Um aumento da quantidade de água na mistura de betão traduz-se no aumento da deformabilidade e na redução da viscosidade da mistura. A redução da viscosidade incrementa a segregação da mistura.

2.3.5. Adições

No século XX verificou-se um aumento substancial na utilização de adições e adjuvantes por parte das indústrias de cimento e betão, estimando-se que a taxa de consumo continue a aumentar, devido sobretudo ao desenvolvimento de superplastificantes e superpozolanas.

As adições vulgarmente utilizadas são:

- Sílica de fumo;
- Cinzas de casca de arroz;
- Fibras de nylon ou de polipropileno;
- Pigmentos;
- Fibras de aço;
- Sílica activa;
- Metacaulino;
- Cal aérea;
- Cal hidratada;
- Cinzas volantes;
- Escórias de alto-forno;
- Filer calcário.

Sendo que as principais razões que levam ao aumento do consumo de adições são várias. Sabe-se que a utilização das mesmas provoca uma redução substancial do consumo de energia e portanto, reduzem-se os custos do fabrico de betão.

Além da redução de custos, o uso de certas adições, tais como as cinzas volantes ou as escórias de alto-forno também possibilita uma melhoria significativa da trabalhabilidade e durabilidade, assim como uma redução da permeabilidade do betão [14].

O aproveitamento destas adições no fabrico do betão é sem qualquer dúvida uma forma muito útil de aproveitar resíduos já existentes, os quais não tinham qualquer fim, servindo apenas para poluir o meio ambiente.

Em virtude de muitas das adições anteriormente referidas estarem a chegar ao seu fim, torna-se imperativo encontrar outras soluções alternativas.

De maneira a encontrar outras soluções, decidiu-se analisar o comportamento do pó de mármore como adição no fabrico de betão, sendo também, comparada com o filer calcário.

Na pesquisa bibliográfica efectuada verificou-se a existência de várias possibilidades técnicas de produção de betão e argamassas contendo resíduos de pedra, tendo obtido resultados positivos em vários países [15].

Investigações efectuadas em Portugal [16,17] chegaram a conclusões semelhantes, demonstrando melhorias em diversas propriedades.

2.3.5.1. Adições correntes

2.3.5.1.1. Sílica de fumo

A sílica de fumo é um subproduto da preparação do silício ou de ligas de silício, especialmente de ferro-silício, em fornos eléctricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão, a elevadas temperaturas.

Este material é constituído fundamentalmente por dióxido de silício, cuja percentagem é superior a 90% no caso da produção do silício, e por pequenas quantidades de óxido de alumínio, ferro, cálcio, magnésio, entre outros, em percentagens normalmente inferiores a 1%. A proporção relativa destes compostos varia de acordo com a liga metálica que se está a produzir, podendo a percentagem de dióxido de silício diminuir para cerca de 80%,

na fabricação de algumas ligas de ferro silício, ou para 50%, quando se produz cálcio-silício [8].

O diâmetro das partículas varia entre 0,01 e 0,5 μm , com um valor médio próximo de 0,1 μm , o qual é cerca de 100 vezes inferior ao do cimento portland. A superfície específica é elevada, chegando a atingir 200.000 cm^2/g , medida por adsorção do nitrogénio [18].

A massa volúmica é da ordem dos 2,2 g/cm^3 , podendo no entanto aumentar para 3,0 g/cm^3 , no caso do fabrico de ligas de silício e manganês. A baridade da sílica de fumo proveniente da preparação do silício é cerca de 250 kg/m^3 , o que origina dificuldades no seu transporte e manuseamento.

No betão fresco, regra geral, a introdução de sílica de fumo diminui a exsudação e a tendência para o betão segregar, embora faça aumentar a dosagem de água para manter a trabalhabilidade constante.

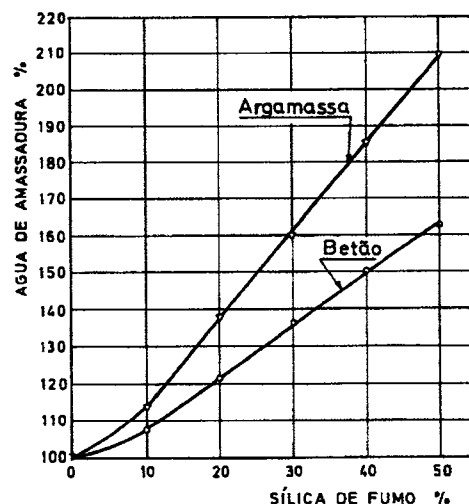


Figura 2.5 – Influência da percentagem de substituição de cimento por sílica de fumo na água de amassadura da argamassa normal e de betão [8].

No betão endurecido podem conseguir-se aumentos na resistência à compressão com percentagens de substituição adequadas (Figura 2.6), não se observando redução das tensões de rotura nas primeiras idades, como sucede com as cinzas volantes. A percentagem de substituição ideal depende da dosagem de cimento, podendo as misturas mais pobres suportar maiores quantidades de sílica de fumo, sem redução de

resistência. Na EN 197-1:2001 [19] a percentagem em massa de utilização deste material está limitada a 10%.

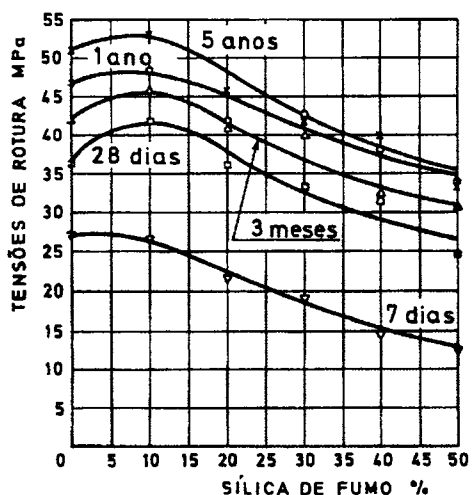


Figura 2.6 – Influência da percentagem de substituição de cimento por sílica de fumo na resistência à compressão do betão, em diferentes idades [8].

Em relação a outras pozolanas, a sílica de fumo, reage mais rapidamente com o hidróxido de cálcio libertado na hidratação do cimento para formar C-S-H, no entanto, tem um custo muito mais elevado e só é usada em geral quando se pretende obter betões de elevado desempenho.

2.3.5.1.2. Pozolanas

As pozolanas são produtos naturais ou artificiais constituídos essencialmente por sílica e alumina que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que a temperaturas normais se combinam, em presença da água, com hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, originando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. São substâncias dotadas de grande reactividade para o hidróxido de cálcio mas insolúveis e inertes na água [8].

As pozolanas podem ser naturais (rochas lávicas alteradas por meteorização), artificiais ou ainda subprodutos industriais.

As pozolanas naturais derivam de rochas lávicas alteradas enquanto que as pozolanas artificiais são obtidas pela criação de uma instabilidade da estrutura interna à custa da

saída de iões OH^- da rede cristalina dos minerais argilosos, pela acção da temperatura (geralmente entre 500 e 900 °C) o que aumenta a porosidade da partícula e portanto a superfície activa.

Tanto o cimento portland como o cimento pozolânico, constituído por clínquer e pozolanas, produzem silicatos de cálcio hidratados (CSH) que conferem resistência ao material. Existem no entanto várias vantagens associadas ao uso de pozolanas, nomeadamente:

- Contribui mais para o abaixamento do calor de hidratação do cimento do que para o abaixamento da tensão de rotura, o que torna o cimento pozolânico ou o betão com pozolana bastante vantajoso na construção de grandes massas de betão;
- Baixo custo;
- Quando se utilizam no fabrico do cimento pozolânico reduzem o custo da moagem.

2.3.5.1.3. Sílica activa

A sílica activa é uma adição muito utilizada em betões de alto desempenho em todo o mundo. A sua contribuição, para o betão, consiste na sua alta reacção aos primeiros dias, introduzindo um aumento nas resistências mecânicas iniciais e finais do betão.

Esta pozolana, em contacto com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento, resulta na formação de um silicato de cálcio hidratado. A sua acção pozolânica e de microfíler provoca a redução considerável do tamanho dos poros e, ocasionalmente, também a sua obstrução, impedindo a passagem de fluidos.

A adição de altos teores de sílica activa é no entanto desvantajosa no que se refere à carbonatação, uma vez que o consumo de hidróxido de cálcio na reacção pozolânica é bastante elevado. Esse alto consumo de hidrocarbonetos (CH) diminui a quantidade de produtos carbonatáveis e leva à redução do pH da água dos poros, aumentando as taxas de carbonatação.

A sua adição produz, no betão fresco, uma baixa exsudação e o aumento da coesão. No betão endurecido, produz alta resistência inicial e baixa permeabilidade. Os seus efeitos benéficos não se limitam à reacção pozolânica, pois há um efeito físico das partículas

finas, que se posicionam na interface agregado-pasta, que é a região mais porosa do betão, obstruindo esses poros [5].

O uso de pozolanas no betão é mais relevante no aspecto da durabilidade do que no da resistência, uma vez que embora a resistência do betão aumente com a utilização da sílica activa, a absorção de água reduz-se de forma mais significativa.

2.3.5.1.4. Cinzas volantes

Segundo a EN 450:2005 [20], as cinzas volantes são um pó fino constituído por partículas esféricas e vítreas provenientes da queima de carvão pulverizado que é arrastado nos gases de combustão das centrais térmicas, com propriedades pozolânicas, constituídas principalmente por SiO_2 e Al_2O_3 .

A composição química das cinzas volantes é condicionada fundamentalmente pelo tipo de carvão utilizado, embora as condições de combustão sejam também importantes, nomeadamente no que se refere á quantidade de carvão por queimar existente nas cinzas.

Existem dois tipos de cinza volante: a cinza volante siliciosa que é principalmente constituída por sílica e alumina, com um baixo teor de óxido de cálcio reactivo (<10%) e a cinza volante calcária que é constituída também por sílica e alumina, mas com um teor de óxido de cálcio reactivo elevado (>10 %). Esta divisão corresponde aproximadamente à preconizada pela ASTM C618:2008 [21], que estabelece duas classes, F e C.

A classe F, normalmente obtida a partir de antracites ou de carvões betuminosos, deverá apresentar um somatório dos óxidos de silício, alumínio e ferro não inferior a 70%. A classe C, resultante de lenhites e de carvões sub-betuminosos, deverá conter pelo menos 50% desses óxidos. A classe F só tem propriedades pozolânicas, enquanto a C poderá apresentar também propriedades ligantes hidráulicas.

As cinzas volantes podem ser usadas no betão como substituto parcial do cimento, como correcção da granulometria do inerte fino ou nas duas funções em simultâneo. Regra geral, a primeira aplicação é a mais interessante, por permitir economia de cimento.

2.3.5.1.5. Escória de alto-forno

A escória de alto-forno é um sub-produto da indústria siderúrgica. É um material que é obtido pela combinação da ganga dos minérios dos metais com fundentes apropriados e cinzas de carvão, que quando arrefecido bruscamente e finamente moído adquire propriedades ligantes [8].

A finura da escória depende do grau de moagem que se implementar, podendo ser superior à dos cimentos portland. No entanto, a escória normalmente necessita de uma maior energia na moagem.

Este material é constituído principalmente por cal, sílica e alumina, que se encontram num estado vítreo. As percentagens usuais dos óxidos que o constituem são as seguintes:

SiO_2 – 25 a 34 %

Al_2O_3 – 2 a 20 %

CaO – 42 a 50 %

A escória pode ter variadas aplicações, tal como:

- Inerte para betão ou para estradas;
- Matéria-prima para a produção de inerte leve para betão;
- Lã de escória para isolamentos térmicos;
- Indústria do cimento, não só como matéria-prima para a sua fabricação mas também como adição ao cimento.

2.3.5.1.6. Cal hidratada

O uso de adição da cal hidratada no betão tem como objectivo repor parcialmente ou totalmente as reservas de hidróxido de cálcio para as reacções pozolânicas e, ainda, restabelecer a reserva alcalina do betão, a qual sofre decréscimo variável dependendo da reactividade e teor de cada adição. Além de ser um aglomerante aéreo, apresenta elevada alcalinidade, com alto teor de óxido de cálcio (CaO), possibilitando a sua utilização em betões com altos teores de adições minerais.

A adição de cal hidratada diminui a porosidade total com a formação de uma estrutura mais densa e acelera a taxa de hidratação do cimento. O efeito da adição de cal é de ordem física e química. Física, pois a finura do material funciona como filler e química, porque as reacções com a fase aluminato produzem carboaluminato. As pozolanas reagem com a cal adicionada, formando C-S-H adicional, aumentando a resistência à compressão [22].

2.3.5.1.7. Cal aérea

A cal aérea é o ligante que resulta da decomposição, pela acção da temperatura, duma rocha com percentagem não inferior a 95% de carbonato de cálcio, ou de cálcio e magnésio [8].

Quanto ao teor de impurezas, as cals aéreas dividem-se em gordas e magras. As cals aéreas gordas derivam de calcários quase puros com teores de carbonato não inferiores a 99%. As cals aéreas magras derivam de calcários com teores de argila e de outras impurezas compreendidos entre 1 e 5% [23].

2.3.5.2. Adições utilizadas na tese

2.3.5.2.1. Pó de Mármore

A rocha que está na origem da formação do mármore é o calcário. Esta resulta de um processo lento de deposição de materiais, em solução de ambiente marinho [24].

Devido a processos tectónicos complexos, os calcários foram submetidos a condições distintas das da sua génese, sofrendo um processo de recristalização que deu origem ao mármore [24].

Ao longo de milhões de anos, o processo erosivo contínuo levou ao aparecimento dos mármore soterrados a grandes profundidades [24].

A utilização mais comum do mármore é sobre a forma ornamental, em revestimentos de paredes e pavimentos, bancadas, entre outros.

O pó de mármore resultante do corte da rocha nas pedreiras. Apresenta poucas utilizações viáveis o que leva a que se tentem arranjar outras soluções para estes resíduos.

Os Estados Unidos, Bélgica, França, Espanha, Suécia, Itália, Egito, Portugal e Grécia estão entre os países com consideráveis reservas de pó de mármore [25], sendo o seu armazenamento inviável [24].

Este tipo de resíduos sólidos deve ser devidamente inactivado sem poluir o meio ambiente. O método mais adequado de inactivação actualmente, é a reciclagem. A reciclagem proporciona algumas vantagens tais como, protecção dos recursos naturais, poupança de energia, contribuir para a economia e reduzir os resíduos de materiais investindo no futuro.

2.3.5.2.1.1. Estudos realizados sobre adições de pó de mármore

Na bibliografia consultada foram encontrados três estudos sobre a adição de pó de mármore à composição de betões, sendo todos eles autocompactáveis.

1º estudo realizado em betões autocompactáveis

O primeiro caso vai estudar o efeito do pó de mármore, adicionado como filler, em betões autocompactáveis. O pó de mármore foi adicionado directamente ao betão sem qualquer processamento, nas proporções de 0, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 kg/m³. Realizaram vários ensaios em betão fresco para medir a sua consistência e ensaios de resistência à compressão e flexão em betão endurecido. Os ensaios em betão endurecido foram realizados aos 28 dias (prismas de 100x100x350 mm). A resistência à compressão aos 28 dias variou entre valores de 58 e 30 MPa, para as concentrações de pó de mármore de respectivamente 0 e 300 kg/m³. A resistência à flexão aos 28 dias variou entre valores de 10 e 5 MPa, para as concentrações de pó de mármore de respectivamente 0 e 300 kg/m³ [26].

Para determinar a trabalhabilidade do betão fresco utilizou-se o Slump Flow test. Os valores obtidos variaram entre os 820 e 620 mm, para as concentrações de pó de mármore de respectivamente 0 e 300 kg/m³.



Os resultados obtidos revelaram que quando comparado com o betão normal, o betão autocompactável apresenta valores mais elevados de resistência à compressão e flexão. Em relação à sua trabalhabilidade, obtiveram-se bons resultados até à adição de pó de mármore de 200 kg/m³.

2º estudo realizado em betões autocompactáveis

O segundo caso vai também estudar o efeito do pó de mármore, adicionado como filler, em betões autocompactáveis. O pó de mármore foi adicionado directamente ao betão sem qualquer processamento, na proporção de 70 kg/m³ e utilizou-se uma proporção a/c = 0,4. Realizaram vários ensaios em betão fresco para medir a sua consistência e ensaios de resistência à compressão e flexão em betão endurecido. Os ensaios em betão endurecido foram realizados aos 28 e 56 dias (cubos de 150 mm). A resistência à compressão aos 28 dias variou entre valores de 44,4 e 58,9 MPa e a resistência à compressão aos 46 dias variou entre valores de 52,7 e 63,2 MPa. A resistência à flexão aos 56 dias variou entre valores de 3,6 e 5,1 MPa [27].

Para determinar a trabalhabilidade do betão fresco utilizou-se o Slump Flow test. Os valores obtidos variaram entre os 615 e 745 mm.

Os resultados obtidos revelaram que é possível comportar a auto compactação com inclusões de cerca de 60 kg/m³ de pó de mármore. No entanto os resultados obtidos em algumas das misturas excedem os limites totais sugeridos pela European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC). Todas as misturas tinham uma boa trabalhabilidade e continham propriedades de auto compactação.

3º estudo realizado em betões autocompactáveis

O terceiro caso vai também estudar o uso de pó de mármore em betões autocompactáveis. Para tal consideraram-se três pós de mármore, um rosado, um amarelado e outro branco. Realizaram vários ensaios para medir a consistência do betão fresco e ensaios de resistência à compressão (cubos de 150 mm) e flexão ao betão endurecido a 7, 28 e 90 dias. Para o betão com adição de pó de mármore branco, a resistência à compressão aos 28 dias variou entre valores de 34 e 63,9 MPa, para concentrações de cimento de respectivamente 300 e 500 kg/m³. A resistência à flexão

aos 28 dias variou entre valores de 2,72 e 4,92 MPa, para as concentrações de cimento de respectivamente 300 e 500 kg/m³. Os pós de mármore que obtiveram melhores resultados foram o branco e o amarelado [28].

Para determinar a trabalhabilidade do betão fresco utilizou-se o Slump Flow test. Os valores obtidos variaram entre 30 e 77 cm, para as concentrações de pó de mármore de respectivamente 300 e 500 kg/m³ e para uma relação a/c = 0,55.

Os resultados obtidos neste estudo revelaram que apesar de o mármore ser utilizado há já muito tempo como um material de construção, este pode também ser utilizado como adição, sob a forma de filler, em betões autocompactáveis. As relações pó/cimento estudadas foram de 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1 e tendo em conta os resultados de resistência à compressão obtidos, pode dizer-se que com estas misturas estudadas está-se perante a produção de betões autocompactáveis económicos.

2.3.5.2.1.2. Conclusão

O uso de pó de mármore não é tão corrente como o de filler calcário, no entanto já começam a aparecer alguns estudos sobre a adição de pó de mármore tanto no fabrico de betões como de argamassas.

Os resultados obtidos revelaram que o uso pó de mármore em betões autocompactáveis é viável para determinadas utilizações, assim como a sua utilização sem qualquer tipo de processamento, ou seja, no seu estado puro e também na utilização de diferentes pós de mármore no que respeita à sua constituição.

Relativamente às características do betão, os resultados obtidos mostram que quando comparado com o betão normal, o betão autocompactável apresenta valores mais elevados de resistência à compressão e flexão. Os betões estudados apresentam também uma boa trabalhabilidade. Tendo em conta os valores da relação a/c utilizados nos estudos apresentados pode dizer-se que estamos perante a produção de betões autocompactáveis económicos.

2.3.5.2.2. Filer calcário

O filer calcário é um material finamente moído, cuja finura é muito semelhante à do cimento Portland que, devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do betão, tais como: trabalhabilidade, densidade, exsudação, permeabilidade e capilaridade [5].

Embora não seja muito utilizado como adição mineral para a produção do betão de alto desempenho, o filer calcário pode ser utilizado para produzir betões convencionais.

Este material difere das restantes adições por ser praticamente inerte quimicamente, isto é, pouco reage com a água e com compostos do cimento hidratado. Isto significa que não possui actividade pozolânica, produzindo apenas efeitos físicos de tamponamento dos poros e complemento de granulometria [29].

É importante que o filer tenha uniformidade das propriedades e, especialmente, da finura.

Os filers podem ser matérias-primas naturais ou então materiais de minerais inorgânicos processados. O essencial é que eles tenham propriedades uniformes, especialmente a finura. Não aumentam a adição de água quando utilizados em betões, a não ser que sejam usados juntamente com uma mistura redutora de água. Também não afectam a resistência do betão quando exposto a condições adversas ou a protecção contra a corrosão das armaduras, que é proporcionada pelo betão. Claramente, a adição de filer calcário não deve levar a um retrocesso a longo prazo da resistência do betão, no entanto, tal problema ainda não foi encontrado [5].

Uma vez que a acção do filer calcário é predominantemente física, este tem de ser fisicamente compatível com o cimento ao qual vai ser adicionado. Por exemplo, para adições de filer muito elevadas, o cimento tem que ter um módulo de finura muito superior ao habitual.

Embora a norma EN 197-1:2000 [30] limite o teor de adição de filer calcário até 5%, esta permite a adição de material calcário até um teor de 35%, desde que o restante material à base de cimento seja apenas cimento Portland. Como o calcário é de facto um tipo de filer, quando se utiliza cimento calcário, a adição de filer pode ir até os 35% [5].

Furquim [31], chega a afirmar que seria muito bom que num futuro mais próximo o uso de filers fosse mais popular e conseguisse atingir níveis de 15 ou 20% de adição ao cimento.

2.3.5.2.2.1. Estudos realizados sobre adições de filer calcário

Com base na bibliografia consultada foram encontrados sete estudos sobre a adição de filer calcário à composição de betões, sendo três dos estudos sobre betões “correntes”, três sobre betões autocompactáveis e um sobre argamassas.

2.3.5.2.2.1.1. Filer calcário em betões correntes

1º estudo realizado em betões correntes

Este estudo vai estudar a adição de filer calcário em betões com relação a/c (água/cimento) baixa. Foram considerados três tipos de cimento, com 0%, 9,3% e 18,1% de adição de filer calcário. As relações a/c utilizadas na composição do betão foram de 0,30 e 0,34. Realizaram vários ensaios para medir a hidratação do betão e ensaios de resistência à compressão (cilindros de 100x200 mm). Para o betão com uma relação a/c de 0,30, a resistência à compressão aos 28 dias variou entre valores de 43 e 56 MPa, enquanto para o betão com uma relação a/c de 0,34, a resistência à compressão aos 28 dias variou entre valores de 13 e 57 MPa [32].

Os resultados obtidos revelaram que para uma relação a/c baixa, mais de 35% do cimento Portland fica desidratado. O uso de filer calcário nestas misturas é uma opção mais racional do ponto de vista económico, de consumo de energia e de redução de emissões.

2º estudo realizado em betões correntes

O segundo caso vai estudar o efeito do filer calcário nas propriedades reológicas e mecânicas de diferentes tipos de betões arenosos. Para tal consideraram-se três tipos de areias, areia de dunas, areia de rio e uma mistura das duas anteriores. Realizaram vários ensaios para medir a consistência e trabalhabilidade do betão fresco e ensaios de

resistência à compressão (prismas de 160x40x40 mm) e flexão ao betão endurecido a 28 dias. As adições de filer variaram entre valores de 0 e 600 kg/m³ nos ensaios de consistência, entre 0 e 350 kg/m³ nos ensaios de trabalhabilidade, entre 0 e 400 kg/m³ nos ensaios de resistência à compressão e entre 0 e 300 kg/m³ nos ensaios de resistência à flexão. O betão com o tipo de mistura entre areia do rio e areia da duna foi o que obteve melhores resultados para os ensaios de resistência à flexão e à compressão, sendo os seu valores de 6 MPa para uma adição de filer de 125 kg/m³ e de 25 MPa para uma adição de filer de 100 kg/m³, respectivamente [33].

Para determinar a trabalhabilidade do betão fresco utilizou-se o teste da máquina VÊBÊ. Para o betão com areia de dunas e para uma relação a/c = 0,7, os valores do ensaio foram de 32, 37, 45, 40, 25 e 15 para adições de filer de respectivamente, 0, 100, 150, 200, 250 e 300 kg/m³.

Os resultados obtidos revelaram que o uso de filer calcário em betões arenosos é viável para determinadas utilizações.

3º estudo realizado em betões correntes

O terceiro caso estudou o efeito do óxido de cromo e do filer calcário sobre as características de desgaste de argamassas e betões feitos com cimento Portland branco. Realizaram ensaios para medir a perda por desgaste e a resistência à flexão (prismas de 160x40x40 mm) ao betão endurecido a 28 dias. Foram considerados cinco tipos de amostras com a adição de 18, 20, 23, 25 e 73% de filer calcário por peso de amostra. Os valores de perda por desgaste variaram entre 38,78 e 14,83 cm³/50cm², para adições de filer calcário de 73 e 18%, respectivamente. Os valores de resistência à flexão variaram entre 5,03 e 8,28 MPa, para adições de filer calcário de 73 e 18%, respectivamente [34].

Os resultados obtidos revelaram que uma grande concentração de filer calcário proporciona o aumento da susceptibilidade ao desgaste das argamassas e dos betões produzidos com cimento Portland branco.

2.3.5.2.2 1.2 Filer calcário em betões autocompactáveis

Além do uso do filer calcário em betões correntes o mesmo tem vindo a ser aplicado em betões autocompactáveis.

Um betão autocompactável (BAC) é considerado como um dos desenvolvimentos mais importantes na técnica da construção com betão e entende-se por betão autocompactável o betão capaz de se mover sob a acção do seu peso e encher completamente a cofragem, mesmo na presença de grande quantidade de armadura, sem necessidade de vibração e mantendo sempre a homogeneidade.

Este betão aparece inicialmente no Japão por ter sido aí que surgiram, mais cedo, os superplastificantes fortemente redutores da água de amassadura.

Entre as vantagens deste tipo de betão podem enumerar-se:

- Facilidade de colocação;
- Rapidez de construção;
- Redução de mão-de-obra;
- Diminuição do ruído;
- Liberdade na forma da cofragem.

Os constituintes usados na composição do BAC devem obedecer ao disposto na EN 206:2007 [35], tal como para a generalidade dos outros betões.

O ligante pode ser constituído por cimento e adições do tipo I (por exemplo: filer) ou do tipo II (por exemplo: cinzas volantes, fumo de sílica, escórias); é ainda possível a adição de pigmentos.

Os agregados devem estar conforme a EN 12620:2004 [9]. A dimensão máxima do agregado depende da geometria e densidade de armadura da peça a betonar, mas geralmente não ultrapassa 20 mm.

Os adjuvantes – superplastificantes – são um constituinte imprescindível do BAC; podem ainda empregar-se agentes de viscosidade, introdutores de ar, retardadores, etc.

A trabalhabilidade do BAC é muito maior que a correspondente à classe mais alta de consistência definida na EN 206:2007 [35] e pode ser caracterizada pelas seguintes propriedades:

- Facilidade de passagem;
- Facilidade de enchimento;
- Ausência de segregação.

Apenas um betão que cumpra os requisitos relativos às três características anteriores pode ser denominado de autocompactável.

De seguida indicam-se alguns casos de estudo em que foi utilizado filer calcário no fabrico de BAC.

1º estudo realizado em betões autocompactáveis

O primeiro caso estudou a influência do filer calcário nas propriedades de betão fresco e nas características mecânicas do betão. Para tal consideraram-se dois tipos de filer calcário, um é constituído por cal finamente moída e o outro é constituído por pó calcário. Realizaram vários ensaios para medir a consistência do betão fresco, ensaios de resistência à compressão (3 cubos de 150 mm e 3 cilindros de 150x300 mm) e flexão ao betão endurecido a 28 dias e ensaios de compressão em provetes de betão armado. Foram considerados cinco tipos de amostras com a adição de 339, 343, 345, 348 e 360 kg/m³ de filer calcário. Os valores de resistência à flexão variaram entre 3,15 e 4,62 MPa, para adições de filer calcário de 339 e 345 kg/m³ respectivamente. Os valores de resistência à compressão variaram entre 50,3 e 67,6 MPa, para adições de filer calcário de 339 e 360 kg/m³ respectivamente [36].

Para determinar a trabalhabilidade do betão fresco utilizou-se o Slump Flow test. Os valores obtidos variaram entre 765 e 693 mm, para adições de filer calcário de 339 e 360 kg/m³ respectivamente.

Os resultados obtidos revelaram que a adição de filer calcário melhora a resistência de compressão do betão autocompactável aos 28 dias, comparado com betões normais sem adição de filer. Por outro lado, a adição de filer calcário não melhorou a consistência do betão fresco, quando comparado com amostras de controlo.

2º estudo realizado em betões autocompactáveis

O segundo caso estudou o uso de filer calcário com diferentes áreas específicas e o seu efeito nas propriedades do betão autocompactável. Consideraram dois tipos de amostras, uma com adição de filer calcário e outra com adição de filer calcário e água adicional. Realizaram vários ensaios para medir a consistência do betão fresco e ensaios de resistência à compressão (cubos de 150 mm) ao betão endurecido a 28 dias. A resistência à compressão mostrou uma tendência linear crescente com adição de filer calcário. Pelo contrário com adição adicional de água verificou-se uma diminuição da resistência à compressão [37].

Para determinar a trabalhabilidade do betão fresco utilizou-se o Slump Flow test. Os valores obtidos mostraram uma tendência linear e variaram entre os 580 e 380 mm, para adições crescentes de filer calcário.

Os resultados obtidos mostraram que a adição de filer resulta num aumento da retracção do betão, diminuição da evaporação, baixa tendência para a fissuração e um aumento da resistência à compressão.

3º estudo realizado em betões autocompactáveis

Neste estudo, a microestrutura do cimento autocompactável é investigada em comparação com cimentos de alto desempenho e cimentos tradicionais. Fizeram-se duas amostras sem adição de filer calcário e outras duas que incluem filer calcário na sua composição. Nas amostras que incluem filer calcário a quantidade de cimento foi mantida constante nos 400 kg, enquanto as quantidades de filer calcário foram de 200 e 300 kg para proporções a/c de 0,41 e 0,48 respectivamente. Apenas nas duas amostras que contêm adição de filer calcário foi adicionado adjuvante, Glenium 51. Foram realizados ensaios para medição da evolução da taxa de calor, distribuição do tamanho dos poros, determinação da microestrutura e da fase de distribuição das amostras e por fim uma análise térmica das amostras [38].

Os resultados do ensaio de medição da evolução da taxa de calor mostram que a hidratação é influenciada pela presença do filer calcário nas amostras. A libertação de calor contido nas amostras de pasta de cimento autocompactável com adição de filer calcário é superior à libertação de calor contido nas amostras de pasta de cimento

tradicional. O facto do filer calcário não participar na reacção química pode ser confirmado tanto pela análise térmica como pela análise de aquisição de imagens (BSE) No entanto, o filer calcário actua como um acelerador durante a hidratação primária da pasta de cimento.

2.3.5.2.2.1.3. Filer calcário em argamassas

A título de exemplo apresentam-se alguns casos de estudo sobre o uso de filer calcário em argamassas.

1º estudo realizado em argamassas

Este estudo vai estudar amostras de pasta de cimento e argamassas que contêm na sua constituição cinzas volantes e filer calcário. Efectuaram-se estudos de resistência à compressão aos 2, 7 e 28 dias (prismas de 160x40x40 mm). Efectuaram-se três amostras que contêm filer calcário na sua constituição, com percentagens de 5, 10 e 15% para percentagens de água de 27,9, 28,1 e 28,1, respectivamente. A resistência à compressão aos 2 dias, das amostras com 5, 10 e 15% de adição de filer calcário apresentou valores de 20, 19 e 22 MPa, respectivamente. A resistência à compressão aos 7 dias, das amostras com 5, 10 e 15% de adição de filer calcário apresentou valores de 31, 33 e 35 MPa, respectivamente. A resistência à compressão aos 28 dias, das amostras com 5, 10 e 15% de adição de filer calcário apresentou valores de 43, 42 e 41 MPa, respectivamente [39].

Os resultados obtidos permitem concluir que a resistência à compressão da argamassa diminui com o aumento da adição de cinzas volantes. No entanto, a adição de filer calcário resulta num aumento da resistência à compressão da argamassa comparativamente com a adição de cinzas volantes.

2.3.5.2.2.2 Conclusão

Tal como referenciado anteriormente, pode-se concluir que o uso do filer calcário é viável no fabrico de betões correntes, betões autocompactáveis e argamassas.

Os resultados obtidos em betões correntes revelaram que o uso de filer calcário é viável em betões arenosos mas apenas em determinadas utilizações. Conclui-se também que uma grande concentração de filer calcário proporciona o aumento da susceptibilidade ao desgaste das argamassas e dos betões produzidos com cimento Portland branco.

Os resultados obtidos em betões autocompactáveis revelaram que a adição de filer calcário é viável neste tipo de betões e melhora a resistência à compressão do betão aos 28 dias, comparado com betões normais sem adição de filer calcário. Por outro lado, a adição de filer calcário não melhora a consistência do betão fresco, quando comparado com amostras de controlo.

Em relação à adição de filer calcário á composição de argamassas pode concluir-se que esta resulta num aumento da resistência à compressão da argamassa comparativamente com outras adições, tal como as cinzas volantes por exemplo.

2.4. Soluções técnicas já existentes para o aproveitamento dos resíduos das pedreiras

Existem registos sobre a utilização de pedra natural desde a era do Paleolítico. De facto, na história da humanidade, independentemente das diferentes civilizações o uso de pedra natural em construções importantes foi vastamente detectado. Tal como em outras actividades, a industrialização da actividade de processamento de pedra natural foi inevitável, culminando o seu crescimento a partir dos anos 50.

Existe uma enorme variedade de pedra natural, que pode ser agrupada de acordo com a sua geologia e constituição mineralógica. Os resíduos gerados a partir das actividades extractivas e transformadoras são quase exclusivamente dependentes do desgaste e de pequenos destroços derivados do processamento dos grandes blocos de pedras. Estes resíduos podem ser constituídos por carbonato de cálcio ou aluminato de sílica quando o material originário é mármore ou granito, respectivamente.

Existem dois tipos de resíduos de transformação da pedra natural: sólidos e semi-líquidos. Os resíduos sólidos são constituídos por fragmentos de pedra com dimensão variável que apresentam fracturas, dimensão insuficiente, baixo valor comercial ou qualquer outro factor que não se encaixa no seu uso a nível tecnológico ou económico.

Os resíduos de pedra natural resultam de processos físicos, tais como extracção, serragem e polimento.

Os equipamentos utilizados na transformação da pedra necessitam de grandes quantidades de água, a qual desempenha um papel importante na refrigeração, lubrificação e limpeza das pequenas partículas. Esta mistura de água com partículas muito pequenas produz uma substância semi-líquida que é geralmente conhecida como lama de pedra natural, devido à sua aparência. Devido à sua composição, esta mistura apresenta um grande potencial para ser utilizada como um subproduto de indústrias consumidoras de minerais, reduzindo assim o impacto ambiental das pedreiras a céu aberto.

Como tal, de seguida apresentam-se várias soluções para a utilização destes desperdícios de pedra existentes nas pedreiras, uns sob a forma de pequenos resíduos de pedra e ou outros sob a forma de lamas resultantes do corte de blocos de pedra.

2.4.1. Indústria do cimento

A indústria do cimento é das principais consumidoras de matéria-prima. Tomando como exemplo a indústria de produção de cimento em Portugal, esta é responsável pelo consumo de cerca de 12 milhões de toneladas de matéria-prima todos os anos, sendo cerca de 10 toneladas filer calcário [40]. É até possível referir que os resíduos de pedra natural produzidos em Portugal representam apenas 3,5% do total de matérias-primas calcárias necessárias para a indústria cimenteira nacional.

Estudos realizados sobre a caracterização e aplicabilidade na indústria dos cimentos de lamas de rochas ornamentais [40,15] concluíram que existe viabilidade técnica de incorporação de quantidades maciças destas lamas como matéria-prima na produção de clínquer, sem quaisquer tratamentos complexos primários, uma vez que a natureza da principal matéria-prima utilizada pela indústria cimenteira é semelhante à destes resíduos de pedra natural. No entanto, a solução ainda não foi geralmente adoptada.

2.4.2. Tijolos e Telhas de Cerâmica Vermelha

A produção de cerâmica vermelha é uma actividade que tem a sua base em argilas e depende de algumas características que são determinadas pela sua plasticidade, capacidade de absorção e libertação de água, capacidade aglutinante, índice de trabalhabilidade e retracção na secagem. Durante a queima, a mistura é submetida a altas temperaturas que lhe atribuem rigidez e resistência mediante a fusão de certos componentes da massa.

Um projecto europeu de investigação sobre a reciclagem de resíduos originados no processo de corte de pedra natural concluiu que é possível incorporar grandes quantidades de pó de pedra natural em substituição do carbonato de cálcio convencional utilizado na produção de tijolos e telhas de cerâmica vermelha, sem comprometer o comportamento do produto final obtido [41]. A presença deste resíduo numa percentagem de 2 a 3% resolveu os problemas de expansão normalmente associados a materiais de estrutura cerâmica [42]. Para além disso, dependendo do tipo base de matéria-prima utilizada, é possível utilizar uma percentagem de até 25% deste resíduo na produção de tijolos e telhas de cerâmica vermelha [43].

2.4.3. Pavimentos

As lamas resultantes da serração de grandes blocos de pedra não são considerados adequados para utilização na pavimentação, mas alguns exames laboratoriais sobre aproveitamento de resíduos de serragem de mármore em aplicações geotécnicas demonstraram que é possível incorporar esse subproduto em misturas asfálticas como um substituto comercial de filler [44]. A utilização de lamas em obras rodoviárias não é consensual. Na verdade, há pesquisas sobre a utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (mármore e granito) na construção civil que atestam que é possível a utilização de resíduos de mármore nas camadas de estrada [15].

2.4.4. Terraplenagens

Como já foi demonstrado no exemplo dos pavimentos, os pareceres sobre o uso de resíduos de pedra em terraplenagens não são unânimes uma vez que vários autores demonstram a possibilidade da utilização destes resíduos em terraplenagens [45], tirando vantagem da capacidade de isolamento dos resíduos de pedra, ou misturando estes

mesmos resíduos numa percentagem de 25% com solo [46], mas por outro lado, há também vários estudos referentes aos impactos ambientais relacionados com a presença desses resíduos industriais no solo [16].

2.4.5. Aglomerados de Mármore

Aglomerado de mármore é a designação utilizada para os produtos que resultam de pedaços de mármore natural, juntamente com resina de poliéster especialmente formulada. Este processo permite a reconstrução de grandes blocos de mármore reciclados, semelhantes aos extraídos de pedreiras, tanto em qualidade e aspectos visuais, que podem ser submetidos às mesmas actividades de processamento que a pedra natural. Uma investigação sobre a reutilização de resíduos de mármore como um substituto do carbonato de cálcio foi desenvolvida para a fabricação de blocos de mármore, concluindo que para um valor total de adição de lamas resultantes do processamento de blocos de mármore que atingiu 6% do total de compostos, era tecnicamente possível adoptar este procedimento [47].

2.4.6. Indústria do Papel

Há referências que revelam a possibilidade de reciclar resíduos de pedra na produção de polpa, substituindo as matérias-primas vegetais normalmente utilizadas na indústria do papel [48]. Investigações sobre aplicações industriais de natas resultantes da indústria transformadora de rochas ornamentais carbonatadas mostraram evidência de oportunidades para incorporar calcário e suspensões de mármore substituindo-se cerca de 30% do caulino geralmente usado como um pigmento mineral. Este estudo demonstrou também a viabilidade da reciclagem dos resíduos nesta indústria, com melhores resultados relativos às propriedades físicas, no entanto, as propriedades visuais mostraram piores resultados [47].

2.4.7. Indústria da Cerâmica

A indústria cerâmica é responsável pelo fabrico de pavimentos, azulejos, revestimentos, tijolos, lajes, e telhas, entre outros, de larga aplicação na construção civil. As principais matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica são feldspatos (particularmente os potássicos), sílicas, calcite e argilas. Além destes principais componentes, as cerâmicas

podem apresentar também aditivos para o melhoramento do seu processamento ou das suas propriedades finais. Após submetida a uma secagem lenta à sombra para retirar a maior parte da água, a peça moldada é submetida a altas temperaturas que lhe atribuem rigidez e resistência mediante a fusão de certos componentes da massa, fixando os esmaltes das superfícies.

Estudos realizados sobre a reciclagem de resíduos de granito para uso na indústria de revestimentos cerâmicos mostram que os resíduos de granito resultantes da actividade transformadora das pedreiras podem substituir, sob a forma de pó, até 50% da matéria-prima normalmente utilizada na produção de pavimentos cerâmicos [48,49]. Um outro estudo sobre aplicações industriais de natas resultantes da indústria transformadora de rochas ornamentais carbonatadas confirmou a possibilidade de substituir a calcite utilizada como matéria-prima na indústria cerâmica por resíduos de mármore e pedra calcária, sob a forma de lamas, numa proporção de 12% em relação ao total dos materiais empregues sem repercussões negativas sobre as diferentes fases de produção, bem como para a qualidade do produto final [47]. A principal vantagem deste procedimento foi a de reduzir a necessidade da areia especial utilizada como matéria-prima, que é um dos materiais mais caros da mistura.

2.4.8. Correção de Solos Agrícolas

Uma das aplicações descobertas para os resíduos de pedra, já testadas a um nível experimental, foi a correção e melhoria do desempenho dos solos dedicado à exploração agrícola, aumentando o nível de pH desses solos [50].

No entanto, alguns autores [40] afirmam que o processo de secagem dos resíduos de pedra induzem a formação de blocos sólidos que são nocivos para fins agrícolas e, com o propósito do processo ser válido, é necessário submeter o resíduo de pedra a tratamentos preliminares que são economicamente inaceitáveis, quando comparados com as soluções tradicionais. Para além disso, a possibilidade de contaminação do ar decorrente do revolvimento do solo durante a actividade agrícola é uma realidade que pode suscitar preocupações relacionadas com a saúde humana [40].

2.4.9. Tratamento de Águas Ácidas

A Drenagem Ácida de Minas representa um dos mais severos problemas ambientais da indústria da mineração a nível mundial, com a poluição de águas e solos. A Drenagem Ácida de Minas é gerada pela oxidação da pirite e a formação de ácido sulfúrico, sulfato e iões ferroso e férrico. O tratamento convencional da Drenagem Ácida de Minas consiste basicamente na neutralização – precipitação dos metais pesados e separação sólido – líquido, dos sólidos formados. A remoção de iões sulfato, em baixas concentrações, é muito difícil e todos os processos necessários tornam-se muito onerosos.

Tirando vantagem da capacidade dos resíduos de pedra sob a forma de lamas em aumentar o nível de pH, Soares [40] refere a possibilidade do tratamento de águas ácidas com utilização de resíduos de pedra no processo.

2.4.10. Selagem de Aterros

A indústria transformadora de pedra assume um papel económico e social muito importante em Portugal. Assim sendo desenvolveu-se um projecto inovador acerca da selagem de aterros de resíduos domésticos, utilizando grandes quantidades de resíduos de pedra resultantes da indústria transformadora. Os autores do projecto concluíram que a humidade ideal contida nos resíduos de pedra para a operação de compactação deve ser cerca de 19%. Primeiramente, a construção das células deve ser precedida de uma camada estanque bem compactada com 20 cm, com a função de evitar a infiltração de substâncias ácidas. Depois, de acordo com o estudo, deve colocar-se uma camada de resíduos de pedra, que fica abaixo do depósito de resíduos domésticos, que vão acumulando até ao preenchimento total da célula. Após o preenchimento, a célula é selada com outra camada de resíduo de pedra bem compactada. O resultado final do projecto foi positivo e os resíduos de pedra, responderam positivamente às propriedades exigidas, promovendo impermeabilidade, minimizando a infiltração de água nas células e reduzindo a permanência de insectos e outras ocorrências indesejadas [51].

2.4.11. Outras Aplicações

Tendo em conta que as partículas muito finas de resíduos de calcário e mármore apresentam natureza química e mineral semelhante ao solo de pedras carbonatadas

(carbonato de cálcio) utilizada em diversos fins industriais, existe uma vasta gama de potenciais aplicações para os resíduos de pedra.

Um estudo independente realizado em Espanha centrado sobre o facto de ser possível inserir resíduos de mármore e calcário no mercado como carbonato de cálcio para serem utilizados em sectores como cimento, tintas, plásticos e polímeros, papel, cerâmica e vidro [43]. De acordo com outros autores, estes referem que é possível aplicar estes resíduos noutros mercados, tais como, plásticos [45], borracha, tintas, siderurgia, açúcar, farmacêuticos, têxteis ou em artigos, tais como sabonetes e velas [40].

2.5. Conclusão

Ao longo deste capítulo fez-se uma breve exposição acerca da história do betão e das suas propriedades em estado fresco e endurecido e ainda, das características dos seus principais constituintes.

Apresentaram-se vários estudos sobre adições do Tipo I (fíler calcário e pó de mármore) à constituição de betões comuns, betões autocompactáveis e argamassas. Em relação à adição de fíler calcário, os resultados obtidos revelaram que a sua utilização é viável tanto para os dois tipos de betão como para as argamassas, verificando-se um aumento da resistência à compressão das amostras. Em relação à adição de pó de mármore, apenas foram apresentados estudos feitos em betões autocompactáveis. Os resultados obtidos revelaram que quando comparado com o betão normal, o betão autocompactável apresenta valores mais elevados de resistência à compressão e flexão.

Apresentaram-se várias soluções técnicas para a incorporação dos resíduos resultantes das pedreiras, no sector dos materiais de construção, tais como o cimento, tijolos e telhas de cerâmica vermelha, argamassas e betões, aglomerado de mármore e também através de outras soluções construtivas que vão desde pavimentações a terraplenagens em obras rodoviárias.

Com esta primeira apreciação, pode então concluir-se que o betão é um material que apresenta inúmeras características e aplicações que resultam das propriedades dos seus constituintes e também das metodologias de fabrico a ele associadas.

Em relação aos resíduos de pedra natural, estes, podem ser consumidos através de várias actividades industriais, como um subproduto e podem também ser especificamente utilizados como um agregado fino e/ou microfíler em misturas de betão, induzindo benefícios nas suas propriedades mecânicas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Nos pontos seguintes faz-se uma pequena descrição dos materiais utilizados no desenvolvimento experimental deste trabalho.

3.1.1. Cimento Portland

Neste estudo foi utilizado cimento Portland CEM II/A-L 42,5R. Este cimento teve a sua origem nas fábricas Secil-Outão e Maceira-Liz.

A composição química do CEM II/A-L 42,5R é a que se indica na tabela seguinte:

Tabela 3.1 – Composição química do cimento

Constituinte químico	Percentagem
Clínquer Portland	80 a 94 %
Calcário	6 a 20 %
Outros constituintes	0 a 5 %

Este cimento é um produto de grande versatilidade, conjugando uma boa trabalhabilidade e elevadas resistências.

Propriedades químicas

Teor de sulfatos (SO_3) \leq 4,0%

Teor de cloretos \leq 0,10%

Propriedades mecânicas

Resistência à compressão aos 2 dias	≥	20 MPa
Resistência à compressão aos 7 dias	≥	30 MPa
Resistência à compressão aos 28 dias	≥	42,5 ≤ 62,5 MPa

Propriedades físicas

Princípio de presa	≥	60 min
Expansibilidade	≥	10 mm
Massa volúmica	=	3100 kg/m ³

Pelo facto deste cimento ser o mais utilizado nesta região, levou a que se escolhesse o mesmo neste estudo.

3.1.2. Agregados

Na formulação dos diferentes betões foram considerados quatro agregados. Dois agregados grossos, Brita 1 e 2 e, dois agregados finos, Areia fina, Areia grossa. Os agregados tiveram como origem a pedreira do Monte das Flores em Évora.

Determinou-se a análise granulométrica dos agregados para elaboração da curva granulométrica do betão utilizado neste estudo.

A curva granulométrica dos agregados é a seguinte:

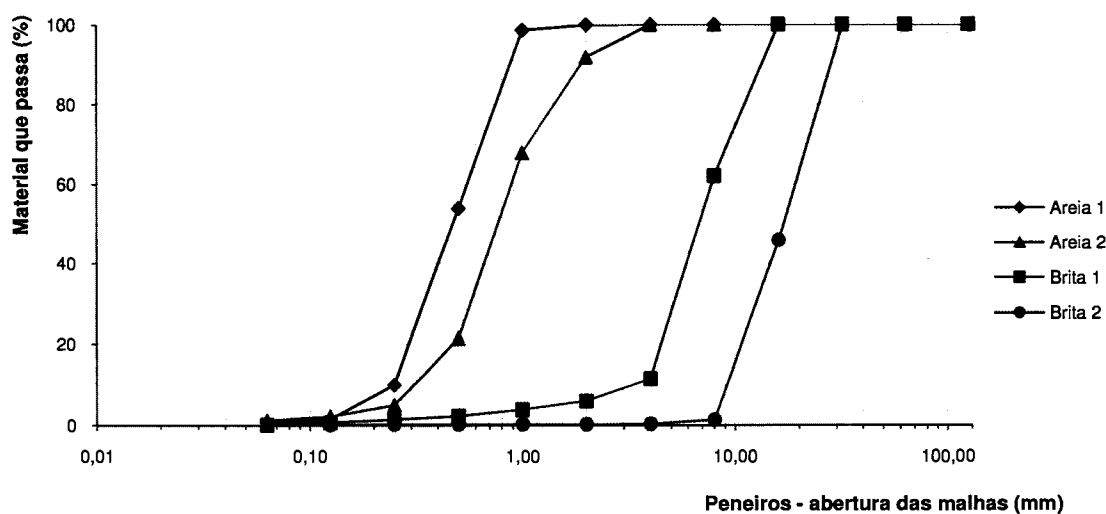


Gráfico 3.1 – Curva granulométrica dos agregados.

A tabela que deu origem ao gráfico anterior apresenta-se em anexo (Tabela A.1).

O teor de humidade dos agregados foi previamente determinado, tendo sido deduzido o seu valor na formulação das diferentes composições de betões. O valor do teor de humidade dos vários agregados apresenta-se na seguinte tabela:

Tabela 3.2 – Teor de humidade dos agregados.

Agregado	Teor de humidade (%)
Brita 2	0,43
Brita 1	0,40
Areia 2	0,14
Areia 1	0,10

3.1.3. Pó de mármore

O pó de mármore utilizado neste estudo teve a sua origem numa empresa de transformação de mármore situada no Alandroal, distrito de Évora. Este pó de mármore está de acordo com a EN 12620:2004 [52].

Este pó é o produto que resulta da serração de grandes blocos de pedra. A serração destes blocos é continuamente acompanhada por um jacto de água, para arrefecimento das correntes de corte. O pó resultante da serração juntamente com o jacto de água forma uma lama que é drenada para um depósito. Aquando da limpeza dos depósitos a lama é transportada e depositada num monte a céu aberto. Essa lama depois de seca resulta num pó de dimensões muito finas, ao qual chamamos pó de mármore.

Os mármore utilizados nesta empresa de transformação procedem de várias pedreiras, pelo que os blocos de pedra não têm todos a mesma origem. Como para o corte dos diferentes blocos de pedra foi utilizado sempre o mesmo equipamento, o pó resultante é uma mistura de vários tipos de mármore. Assim sendo, não é possível saber com precisão qual a composição química de todo o pó de mármore utilizado neste estudo.

Quando se procedeu à recolha das amostras de pó de mármore, foram recolhidas aquelas que: apresentavam uma cor mais branca (as que continham menos impurezas) e as que se encontravam mais secas.

Quando foram calculadas as composições dos betões teve-se em consideração o grau de humidade dos agregados e do pó de mármore (1,59%).

Propriedades físicas

Tabela 3.3 – Propriedades físicas do pó de mármore.

	Mármore com água	Mármore sem água
Massa volúmica [kg/m ³]	2720	2770
Blaine [m ² /kg]	872	249

3.1.4. Filer calcário

O filer calcário utilizado neste estudo é do tipo Carbonato de Cálcio Cristalino e tem a sua origem numa pedra de Rio Maior, distrito de Santarém. Este filer, está de acordo com a norma EN 12620:2004 [52].

Propriedades químicas

CaO = 53,9%

MgO = 0,54%

Fe₂O = 30,05%

SiO = 21,19%

Al₂O = 30,31%

TiO = 20,18%

K₂O = 0,03%

Na₂O = 0,01%

Propriedades físicas

Ph = 8,6

Densidade aparente = 0,90 g/ml

Dureza Mohs = 3

Índice de refração = 1,49

Peso específico = 2,45 g/ml

Partículas com diâmetro inferior a 75 µm = 70%

Massa Volúmica = 2720 kg/m³

Blaine = 550 m²/kg

O Filer calcário é constituído por partículas muito finas, com superfície específica de Blaine de 550 m²/kg.

3.1.5. Adjuvante

O adjuvante utilizado neste trabalho foi o Glenium SKY 511. É um aditivo superplastificante baseado em éteres de policarboxílico de nova geração, especificamente desenhado para betão pronto.

Este aditivo apresenta como principais propriedades:

- Grande poder reductor na utilização de água e plastificante;
- Permite confeccionar todos os tipos de betão só com um aditivo, variando apenas a dosagem;
- Aumenta as resistências iniciais e finais do betão;
- Melhora a impermeabilidade e durabilidade do betão ao diminuir a porosidade do mesmo;
- Permite obter betão fluido com baixa relação água/cimento;
- Melhora o aspecto e a trabalhabilidade do betão;
- Reduz a aderência do betão, facilitando a sua bombagem;
- Apresenta um bom mantimento de consistência, sem retardamento de presa.

Foi devido às características anteriormente indicadas que se justificou o uso deste adjuvante.

3.1.6. Água

A água utilizada na elaboração das diferentes composições de betão foi água da torneira a qual está segundo a EN 1008:2003 [13].

3.2. Métodos

Para a determinação das características dos constituintes do betão, tiveram de ser determinadas: curvas granulométricas dos agregados; massa volúmica do pó de mármore e filer calcário; superfície específica de Blaine do pó de mármore e do filer calcário; e a composição química do pó de mármore.

Para estudar as características do betão no estado fresco e endurecido, realizaram-se ensaios de abaixamento pelo Cone de Abrams e determinaram-se as resistências à compressão, respectivamente.

3.2.1. Análise granulométrica

A determinação da composição granulométrica de um agregado, expressa pela respectiva curva granulométrica, é essencial para a previsão das características fundamentais do seu comportamento. A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras e no tratamento estatístico dessa informação.

De uma forma geral, a parte sólida dos solos é composta por um grande número de partículas que possuem diferentes dimensões. A granulometria ou análise granulométrica dos solos é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem em peso que cada fracção possui em relação à massa total da amostra em análise. A análise granulométrica pode ser realizada por peneiramento, quando temos solos granulares como as areias e os pedregulhos, por sedimentação, no caso de solos argilosos, ou pela combinação de ambos os processos.

Para a aplicação do método das curvas de referência começa-se por obter experimentalmente a curva granulométrica de cada classe dos inertes disponíveis determinando a máxima dimensão do inerte mais grosso, D . calculam-se então as coordenadas dos pontos que definem a curva granulométrica de referência do inerte do betão, depois de lhe ter atribuído o valor adequado dos parâmetros que a definem, como máxima dimensão do inerte e trabalhabilidade requerida [53].

Por meio de cálculo ou de uma construção gráfica faz-se o ajustamento da granulometria dos inertes a esta curva, determinando a percentagem de cada um, de modo que, no conjunto, a sua combinação se adapte o melhor possível á curva de referência [53].

Num gráfico em que as abcissas são proporcionais ao logaritmo da abertura dos peneiros, a curva granulométrica da combinação nos inertes disponíveis deve cortar a de referência de tal sorte que a soma das áreas compreendidas entre estas duas curvas e que ficam acima da curva de referência seja igual à soma das áreas que ficam abaixo

dela. Esta condição equivale a impor a igualdade entre os módulos de finura da curva dos inertes disponíveis e da de referência, sendo portanto um bom auxiliar para determinar a composição granulométrica mais próxima da curva de referência [53].

A determinação da análise granulométrica dos agregados foi feita por via húmida, segundo a norma EN 933-2:1999 [54] e está representada pela Tabela A.1 em anexo.

Tendo em conta os dados obtidos através da análise granulométrica efectuada elaborou-se a curva granulométrica dos agregados, representada anteriormente no gráfico 3.1.

Foi considerado que tanto o pó de mármore como o filer calcário estão inseridos nas adições do tipo I, ou seja, consideradas como quase inertes. Por este facto, para as soluções estudadas foi considerado que a única parcela ligante era a que dizia respeito à quantidade de cimento.

Para além da análise granulométrica dos agregados, determinou-se a massa volúmica e a superfície específica do filer calcário e do pó de mármore.

3.2.2. Determinação da massa volúmica

A massa volúmica do cimento é uma propriedade que se torna necessário conhecer para medir a superfície específica e calcular correctamente a composição de um betão. A mesma foi determinada através da norma LNEC E-64:1979 [55].

O objectivo deste ensaio reside na detecção da existência de material inerte no cimento, uma vez que sendo a massa volúmica do cimento superior a 3,0 e a do inerte da ordem de 2,6 a 2,7, um valor da massa volúmica inferior a 3,05 indica um cimento adulterado, mal cozido, ou ainda parcialmente hidratado.

A massa volúmica, é determinada pela maneira usual de medir a massa volúmica de qualquer sólido, conhecendo a sua massa e medindo o seu volume a partir do deslocamento de um líquido num volumínmetro apropriado, designado por “densímetro” de Le Châtelier. O líquido que se utiliza neste ensaio é a gasolina ou o petróleo em uma quantidade de cerca de 300cm³ [5].

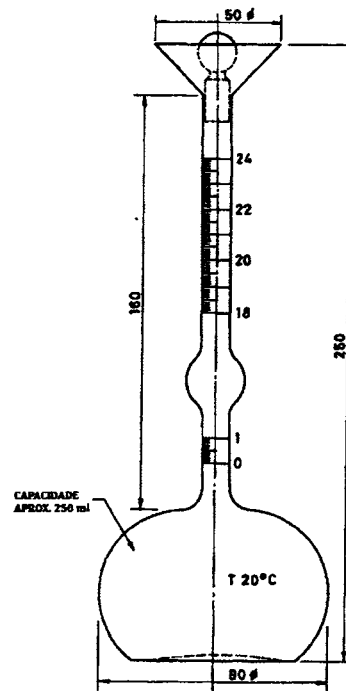


Figura 3.1 – Volumenómetro de Le Châtelier [8].

O provete deve ser preparado em ambiente a $22 \pm 5^{\circ} \text{C}$, devendo o material a utilizar estar também a esta temperatura.

Seca-se em estufa cerca de 100 g do cimento ($105\text{-}110^{\circ} \text{C}$) até massa constante e tomam-se 65g do cimento seco pesado num copo de vidro. Com um funil comprido enche-se o voluminómetro (seco em tufa) com o líquido até um nível compreendido entre as graduações zero e um da escala, evitando molhar as paredes e lê-se o valor da escala correspondente ao nível do líquido com aproximação à meia divisão.

Com um funil curto, introduz-se o cimento pesado anteriormente com cuidado e seca-se novamente em estufa cerca de 100g do cimento ($105\text{-}110^{\circ} \text{C}$) até massa constante.

Tomam-se 65g do cimento seco pesado num copo de vidro, inclina-se ligeiramente o voluminómetro e roda-se alternadamente num sentido e no outro para favorecer a libertação de bolhas de ar aderentes às partículas de cimento. Por fim, lê-se o valor da escala correspondente ao nível do líquido com aproximação à meia divisão.

A massa volúmica é o quociente de 65 g pelo volume do líquido deslocado.

3.2.3. Método de Blaine

A superfície específica do pó de mármore e do filler calcário utilizado neste estudo foi determinada através do ensaio de Blaine. Este ensaio realizou-se tendo em conta a norma EN 196-6:1996 [56].

Na indústria de cimento o método mais usual para a determinação da área superficial é o chamado Método de Blaine. Este método mede o tempo necessário para um fluxo específico de ar passar através de um volume conhecido de pó compactado e em conjunto com a densidade da substância, calcula-se a superfície específica da amostra.

As principais vantagens desta técnica são o facto de ser um método simples e rápido. No entanto, esta técnica não é muito precisa e sofre de uma série de lacunas, como por exemplo, uma forma variável das partículas e instabilidade na base do depósito do pó [57] e torna-se extremamente imprecisa em áreas superficiais superiores a 500 m²/kg [58,59].

Este método foi desenvolvido independentemente por R. L. Blaine da American National Bureau of Standards e utiliza um pequeno manómetro de vidro com querosina para aplicar sucção à base do depósito do pó [60].



Figura 3.2 – Manómetro de vidro utilizado no método de Blaine.

Devido à incerteza das dimensões do tubo de manómetro, os resultados absolutos não pode ser calculado a partir da equação de Carman. Em vez disso, o aparelho deve ser calibrado, utilizando um material padrão conhecido. As normas originais, fornecidas pela

National Bureau of Standards (NBS), foram certificadas utilizando o método de Lea e Nurse. Apesar desta lacuna, o método de Blaine agora, é de longe o mais utilizado, principalmente por causa da facilidade de manutenção do aparelho e da simplicidade do procedimento.

3.2.4. Abaixamento do Cone de Abrams

Para a determinação da trabalhabilidade do betão foi realizado o ensaio de abaixamento pelo Cone de Abrams (Slump Test), segundo a norma EN 12350-2:2008 [61].

O ensaio de abaixamento do cone de Abrams é o mais universalmente usado. Pode dizer-se que não há estaleiro em qualquer país do mundo onde não exista um cone de Abrams. Este consiste num molde tronco-cónico com as dimensões de 20 cm de diâmetro na base, 10 cm de diâmetro no topo e 30 cm de altura. Deve ter pegas laterais para colocar as mãos e apoios na base que permitam a sua fixação, por exemplo, com os pés do operador. O interior deve ser liso e sem saliências [53].

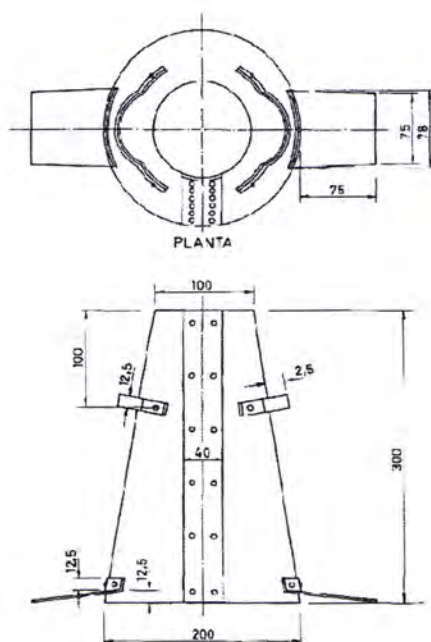


Figura 3.3 – Cone de Abrams – esquema do molde [53].

A amostra do betão é colocada no molde em três posições. A primeira até encher um terço da sua altura, é apiloada com 25 pancadas de um varão com 50 a 60 cm de comprimento e secção transversal de 2 a 3 cm². No apiloamento desta primeira camada é

necessário inclinar o varão ligeiramente, dando cerca de metade das pancadas próximo do perímetro e progredindo depois com pancadas verticais até ao centro. A segunda porção deve encher o outro terço do volume do cone, e é apiloado com 25 pancadas através de toda a sua espessura, mas de modo que o varão penetre apenas na camada subjacente. Ao encher e apiloar a camada superior deve-se conservar o betão acima do molde, de modo a manter um excesso sobre um topo. Depois de terminado o apiloamento acaba-se bem a superfície rasando o topo por meio de um movimento adequado do varão. Retira-se o molde logo a seguir, não demorando nesta operação mais de 10 segundos nem menos de 5 segundos. A operação total de enchimento e retirada do molde não deve ultrapassar 2 minutos e 30 segundos [53].

O abaixamento do cone é medido pela diferença entre a altura do molde e a altura do centro do topo superior do cone de betão, eventualmente deformado [53].

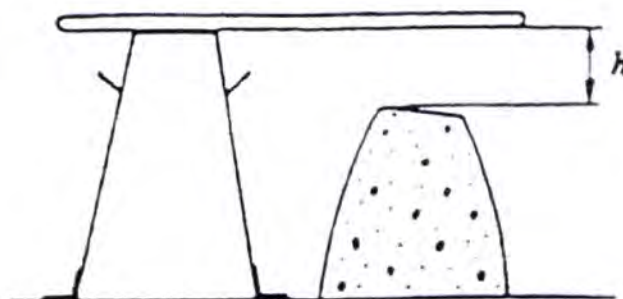


Figura 3.4 – Cone de Abrams – medição do abaixamento obtido.

Quando se verificar a queda de parte do cone, ou inclinação do seu topo, repete-se o ensaio. Se este facto se verificar em dois ensaios consecutivos poder-se-á concluir que o betão não tem nem a necessária plasticidade nem a coesão suficiente para permitir este tipo de ensaio [53].

Pode obter-se uma indicação suplementar da coesão e da capacidade para segregar batendo na massa moldada com a vara que serviu para compactação. Se o betão está bem proporcionado o cone deve cair sem que os componentes se separem, ao passo que se está mal composto os elementos desligam-se desagregando a massa de betão [53].

Este ensaio é muito útil no estaleiro para detectar variações acidentais da composição do betão. Um brusco aumento no abaixamento pode significar, por exemplo, que o teor de

humidade do inerte aumentou inesperadamente; a diminuição no abaixamento, ou alteração no aspecto do cone, podem ser devidas a uma variação inesperada na granulometria do inerte, como por exemplo, deficiência no teor de areia ou aumento do seu módulo de finura. As variações bruscas no abaixamento e no aspecto do cone podem portanto fornecer avisos úteis ao pessoal que precede á amassadura [53].

A simplicidade da aplicação do cone de Abrams é uma causa da sua enorme popularidade. Todavia, há muitos observadores que notam dispersões grandes nos resultados obtidos. Assim, Duriez [62,63] refere desvios quadráticos médios relativos, obtidos numa série de ensaios, da ordem de 70% [53].

3.2.5. Determinação da resistência à compressão

Para a determinação das resistências à compressão foram elaborados cubos de 15 cm segundo as normas EN 12390-1:2008 [64], EN 12390-2:2008 [65] e EN 12390-3:2008 [66]. A prensa utilizada foi uma Impact CT315, a qual está de acordo com a norma EN 12390-4:2008 [67].



Figura 3.5 – Prensa utilizada na medição da resistência à compressão das amostras.

A cura dos betões foi feita recorrendo à imersão dos provetes em água num tanque com circulação de água e temperatura controlada, segundo a norma EN 12390-2:2008 [65].

4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

De maneira a estudar a viabilidade da adição de pó de mármore ao cimento Portland no fabrico de betão, foi considerada em primeiro lugar uma composição base de betão.

A composição adoptada como base é a mesma que se está a utilizar na região de Évora para a construção de moradias. Apresentando a mesma as seguintes características:

Tabela 4.1 – Características da composição base.

Componentes	Dosagem [kg/m ³]	Massa volúmica [kg/m ³]	
Brita 2	378	2680	
Brita 1	566	2650	
Areia 2	651	2620	
Areia 1	279	2620	
Água	165	1000	
Cimento CEM II - 42,5R	310	3100	
Adjuvante Glenium SKY 511	0,43	-	
Relação a/c	0,53	Curva de referência	Faury
		A	36
Classe de Abaixamento	S3	B	2
		R/D	1

Tendo em conta as características dos vários constituintes da composição base e tomando como modelo a Curva de Faury, determinou-se a curva granulométrica do betão, ver gráfico 4.1.

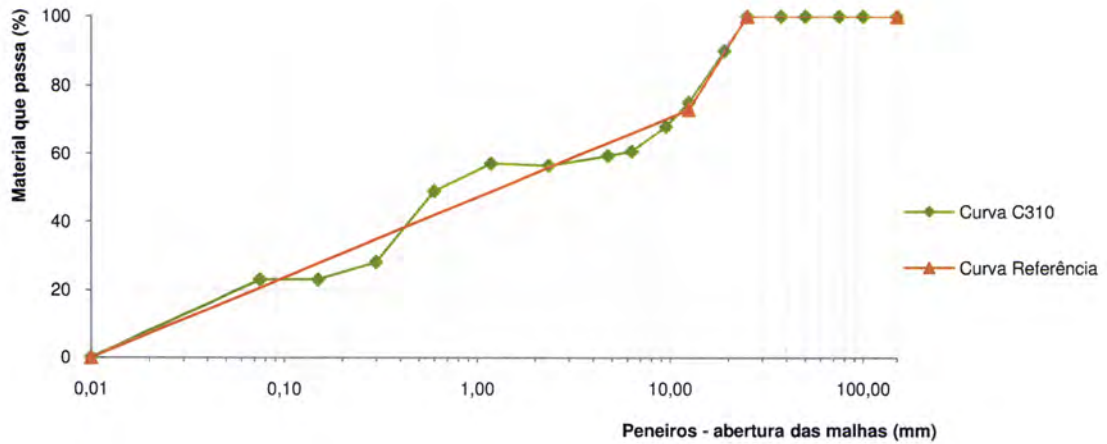


Gráfico 4.1 – Curva granulométrica do C310.

Além da composição base (310 kg/m^3) foram elaboradas as seguintes:

- Duas composições de referência de: 350 kg/m^3 e 400 kg/m^3 ;
- Três composições com adições de pó de mármore à composição base nas proporções de 10%, 20% e 30%;
- Três composições com adições de filer calcário à composição base nas proporções de 10%, 20% e 30%.

Na tabela seguinte estão representadas as nove composições anteriormente referidas:

Tabela 4.2 – Composições utilizadas.

Componente [kg/m ³]	Base	Referência		Pó de Mármore			Filer Calcário		
	C310	C350	C400	M10	M20	M30	F10	F20	F30
Cimento	310	350	400	310	310	310	310	310	310
Mármore	-	-	-	31	62	93	-	-	-
Filer	-	-	-	-	-	-	31	62	93
Brita 2	378	378	378	378	378	378	378	378	378
Brita 1	566	566	566	566	566	566	566	566	566
Areia média	651	651	651	651	651	651	651	651	651
Areia fina	279	279	279	279	279	279	279	279	279
Adjuvante	0,43	0,62	0,76	4,33	5,20	7,30	4,02	4,34	6,99
Água	165	186	212	165	165	165	165	165	165
Relação a/c	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53

A principal finalidade destas amostras C310, C350, C400 é a de servirem de referência para comparação com as de adição de filer calcário e de pó de mármore, F10, F20, F30, M10, M20 e M30, respectivamente.

Ao contrário do que acontece com as adições do Tipo II, as adições do Tipo I são consideradas praticamente inertes, pelo que os seus conteúdos não foram contabilizados como material ligante na formulação das diferentes composições de betão.

Para todas as composições foi considerada a mesma relação a/c da composição base, 0,53. Foi também estabelecido que todas as composições deveriam ter a mesma trabalhabilidade, um S3 (abaixamento entre 100 e 150 mm).

Para alcançar a mesma relação a/c e trabalhabilidade da composição base foram necessárias várias composições experimentais antes de se conseguir chegar às composições apresentadas na Tabela 4.2.

Para conseguir manter a mesma relação a/c em todas as composições teve de ser adicionado mais adjuvante. Devido a este facto, chegaram-se a ultrapassar os limites estabelecidos pelo fabricante (dosagem recomendada ia de 0,6 a 1,2% sobre o peso de cimento). Apesar de ter sido ultrapassado este limite, observou-se que o incremento de

adjuvante continuou a reagir bem com a pasta cimentícia, alcançando-se o resultado pretendido.

Para cada composição, os períodos de ensaio considerados foram de 1, 3, 7, 14, 28 e 56 dias. Para cada situação foram consideradas duas amostras, fazendo um total de 108 cubos.



Figura 4.1 – Aspecto das amostras após colocação e vibração no respectivo molde.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Neste estudo foram realizados ensaios quando o betão se encontrava em estado fresco e estado endurecido. Para o betão no estado fresco foi realizado o ensaio de abaixamento pelo Cone de Abrams, sendo que no betão endurecido foi realizado o ensaio de resistência à compressão.

5.1. Resultados dos ensaios realizados em betão fresco

Para todas as amassaduras (ver Tabela 5.1) foi medido o abaixamento pelo Cone de Abrams com o fim de determinar qual a classe de abaixamento que apresentavam.

Todos os abaixamentos obtidos estavam dentro dos parâmetros pretendidos, uma vez que se encontram dentro do intervalo 100 a 150 mm que corresponde à classe de abaixamento S3, tal como se pode ver na tabela seguinte:

Tabela 5.1 – Características das amassaduras em betão fresco.

Parâmetro	Base	Referência		Pó de Mármore			Filer Calcário		
	C310	C350	C400	M10	M20	M30	F10	F20	F30
Relação a/c	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
Abaixamento [mm]	144	120	145	125	139	142	140	127	136

Apesar de todas as amostras estarem no intervalo desejado a que teve um abaixamento menor foi a C350, com um valor de 120 mm.



Figura 5.1 – Ensaio do Cone de Abrams – medição do abaixamento da amassadura.

5.2. Resultados dos ensaios realizados em betão endurecido

Para as diferentes composições realizadas foram determinadas as resistências à compressão nos períodos considerados anteriormente (1, 3, 7, 14, 28 e 56 dias).

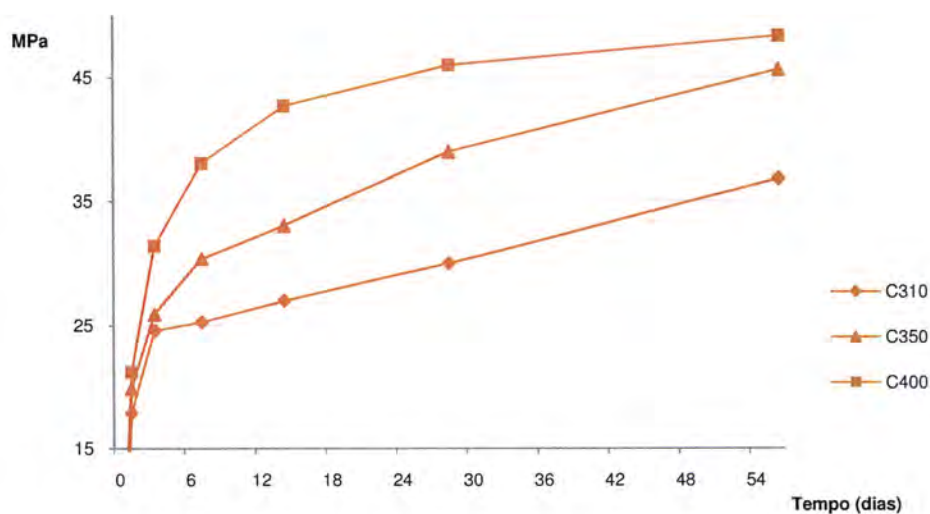
Os resultados obtidos para a resistência à compressão das amostras mostraram ser bastante positivos, apresentando-se de seguida as médias dos resultados das composições base e de referência; das adições de pó de mármore; e das adições de filer calcário.

5.2.1. Resultados das composições base e de referência

Os resultados de resistência à compressão das amostras base, C310 e, de referência, C350 e C400 estão indicados na tabela seguinte e no gráfico 5.1.

Tabela 5.2 – Valores médios da resistência à compressão das amostras C310, C350 e C400.

Dias de cura	Resistência à compressão [MPa]		
	C310	C350	C400
1	17,9	19,9	21,2
3	24,6	26,0	31,5
7	25,3	30,5	38,0
14	27,0	33,1	42,7
28	30,1	39,0	46,0
56	36,8	45,6	48,3

**Gráfico 5.1** – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras C310, C350 e C400.

A amostra C400 é a que apresenta resistências mais elevadas e a amostra C310 é a que apresenta resistências mais baixas, como era de esperar, já que a primeira tem uns conteúdos superiores de cimento.

5.2.2. Resultados das composições com adição de filer calcário

Os resultados de resistência à compressão das amostras com adição de filer calcário, F10, F20 e F30, são os que estão indicados na Tabela 5.3 e Gráfico 5.2.

Tabela 5.3 – Valores médios da resistência à compressão das amostras F10, F20 e F30.

Dias de cura	Resistência à compressão [MPa]		
	F10	F20	F30
1	16,9	22,8	23,3
3	31,7	33,6	41,0
7	36,9	38,1	47,1
14	40,8	43,0	51,0
28	43,6	48,1	55,1
56	48,6	49,9	56,8

Através da análise da tabela 5.9 constata-se que a amostra que contém uma maior percentagem de adição de filer calcário, a amostra F30 é a que apresenta melhores resultados e a amostra F10 é a que apresenta resultados mais baixos.

Verifica-se que a resistência no primeiro dia é muito semelhante para as amostras F20 e F30, sendo a F10 ligeiramente inferior.

A partir do dia 3 os valores de resistência das amostras F10 e F20 sofrem uma aproximação que se mantém até ao dia 56, não sendo os valores muito diferentes. A amostra F30 a partir do terceiro dia tem um incremento superior às restantes, conseguindo chegar aos 28 dias a valores de 55 MPa de resistência à compressão, enquanto que as outras duas ficaram-se pelos 43 e 48 MPa, como se viu na tabela 5.3.

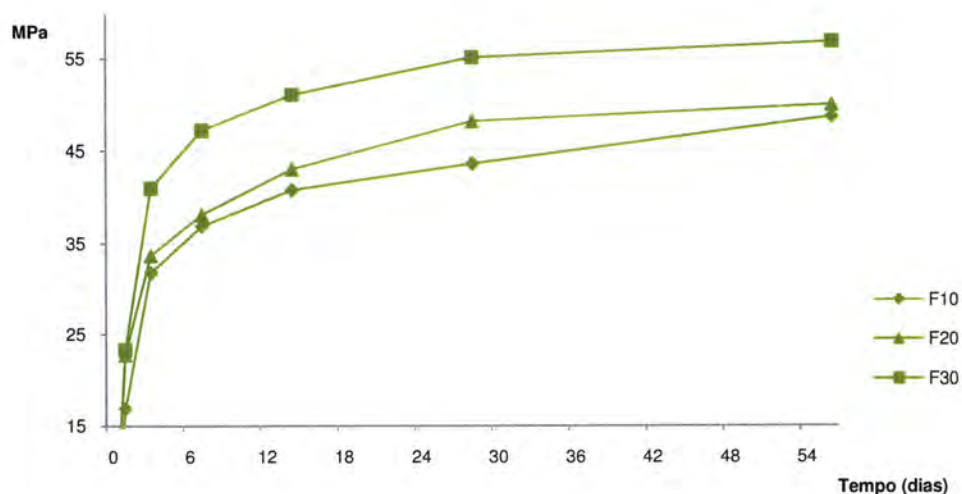


Gráfico 5.2 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras F10, F20 e F30.

A partir destes resultados chega-se à conclusão que quanto maior for a adição de filer calcário maior é a sua resistência, pelo menos até ao valor aqui estudado, 30%.

5.2.3. Resultados das composições com adição de pó de mármore

A mesma substituição que tinha sido feita para o filer calcário, foi também feita para o pó de mármore e os resultados são os que se indicam na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores médios da resistência à compressão das amostras M10, M20 e M30.

Dias de cura	Resistência à compressão [MPa]		
	M10	M20	M30
1	13,6	22,2	23,6
3	16,4	36,3	38,2
7	26,0	39,4	42,9
14	31,5	44,1	45,8
28	39,2	46,6	47,6
56	42,6	48,3	51,8

As amostras com maior substituição foram as que obtiveram melhores resultados de resistência à compressão.

As amostras M20 e M30 tiveram sempre resultados muito próximos, sendo a última a que apresentou melhores resultados.

Ao fim de 28 dias a amostra M30 apresentava valores de resistência na ordem dos 47 MPa, como se pode ver no Gráfico 5.3.

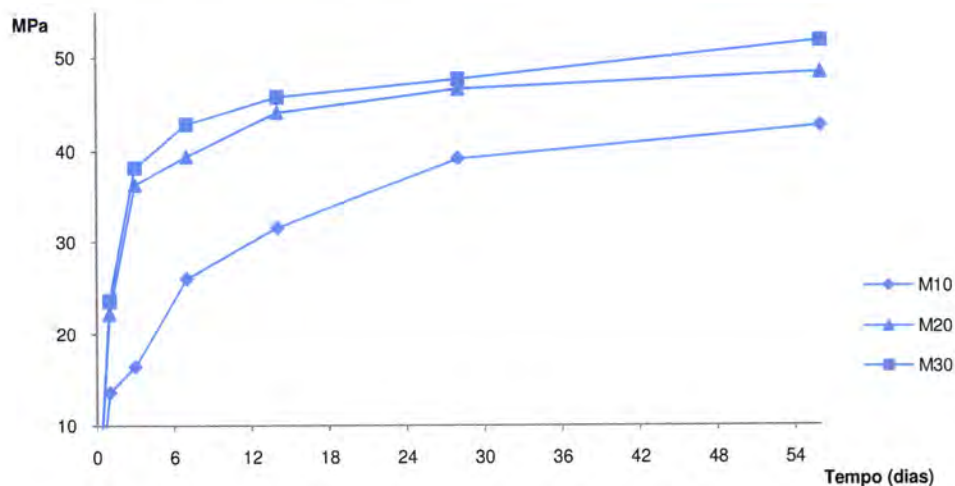


Gráfico 5.3 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras M10, M20 e M30.

5.2.4. Análise comparativa de resultados

Depois de feita uma análise dos resultados individuais para as diferentes amostras nos pontos anteriores, procedeu-se à análise dos resultados em conjunto.

Filer calcário vs pó de mármore

No Gráfico 5.4 estão representados os resultados comparativos das resistências à compressão para as adições de filer calcário e pó mármore nas percentagens de 10%, 20% e 30%.

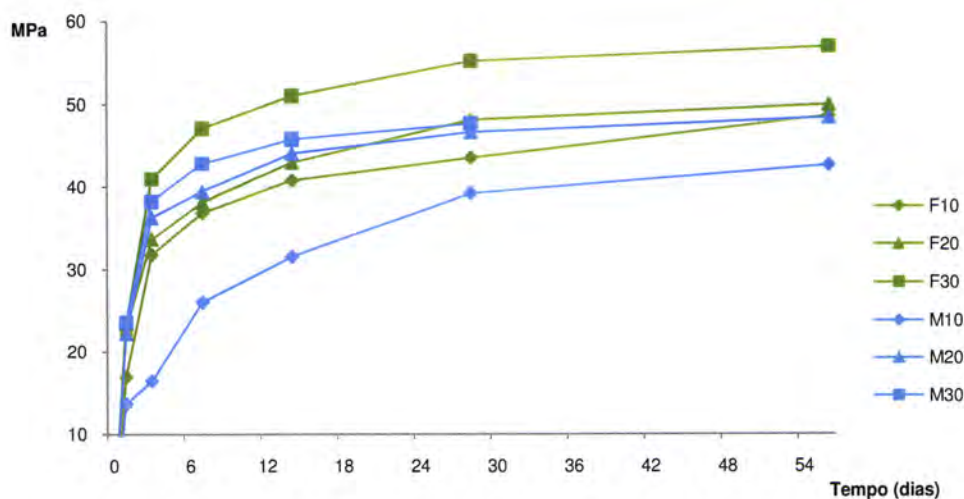


Gráfico 5.4 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras F10, F20, F30, C310, C350 e C400.

Verifica-se que a amostra F30 foi a que melhores valores de resistências apresentou em todos os períodos de ensaio. Para as amostras com a mesma adição, as que contêm menor % de adição são também as que apresentam resultados mais baixos, sendo que a amostra M10 foi a que apresentou piores resultados.

Comparativamente entre o filer calcário e o pó de mármore para as mesmas % de adição, o filer calcário é o que apresenta sempre melhores resultados quando comparado com o pó de mármore, possivelmente devido a que o filer calcário tenha uma superfície específica maior, provocando assim uma reacção mais rápida.

Base/Referência vs F10 e M10

No Gráfico 5.5 pode-se ver que as amostras de base e de referência foram as que tiveram maiores valores de resistências iniciais quando comparadas com as F10 e M10.

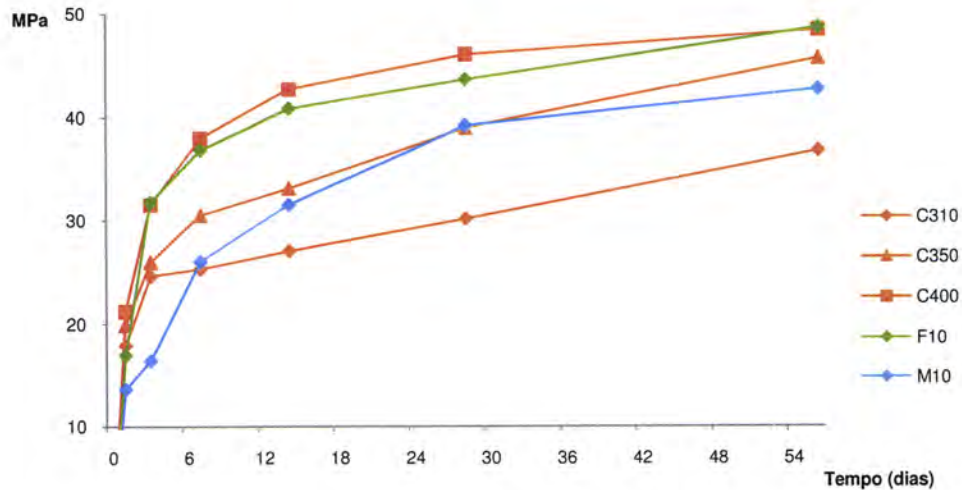


Gráfico 5.5 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras C310, C350, C400, F10 e M10.

Ao fim de 28 dias a amostra C310 é a que apresenta resistências mais baixas, como era de esperar. Nesse mesmo período, a amostra com 10% de mármore de adição já apresentava resultados idênticos aos da C350.

A amostra que apresentou melhores resultados foi a C400, no entanto a F10 teve sempre uns resultados muito próximos, chegando mesmo a igualar as resistências ao fim de 56 dias.

Base/Referência vs F20 e M20

Tanto a amostra M20 como a amostra F20 apresentam os melhores valores de resistências à compressão desde o início até ao período dos 28 dias, como indicado no Gráfico 5.6. Embora com valores muito próximos da amostra C400, esta última ao fim de 56 dias apresentava um valor ligeiramente superior à M20.

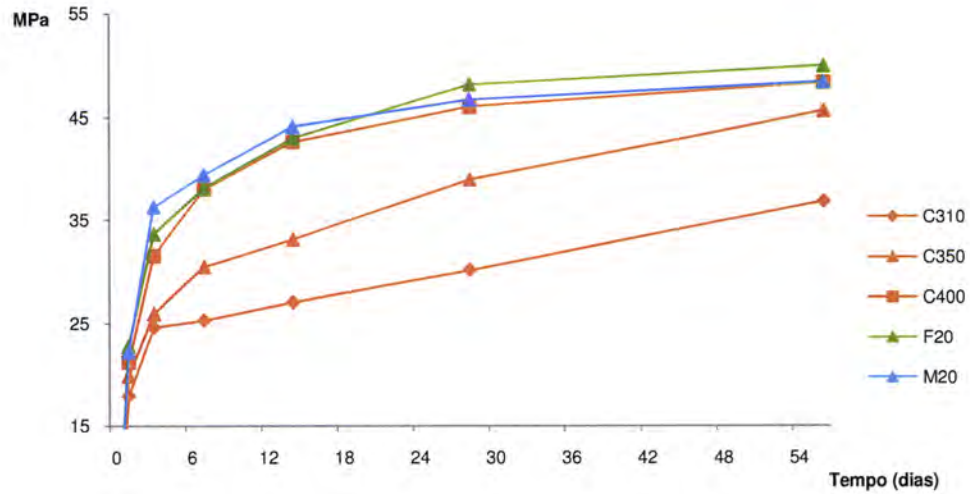


Gráfico 5.6 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras C310, C350, C400, F20 e M20.

A amostra M20 nos primeiros dias apresentou valores de resistências à compressão superiores aos da amostra F20, no entanto, entre os dias 14 e 28 houve uma troca, passando a F20 a ter um valor superior de resistência.

Base/Referência vs F30 e M30

No Gráfico 5.7 fica evidente que qualquer das amostras com a adição de 30% apresentou melhores valores de resistências à compressão do que a melhor das amostras de base/referência, nomeadamente a C400.

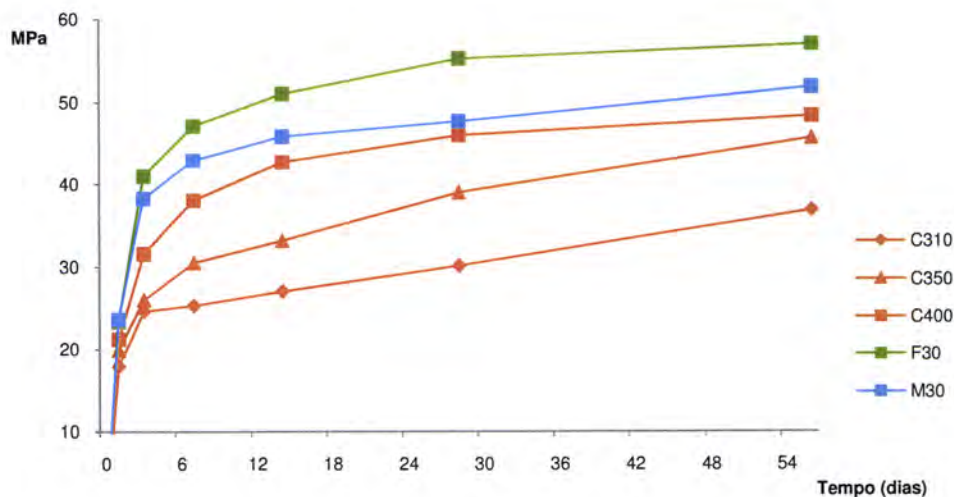


Gráfico 5.7 – Gráfico comparativo da resistência à compressão das amostras C310, C350, C400, F30 e M30.

A amostra F30 foi a que apresentou melhores resultados, conseguindo alcançar os 55 MPa aos 28 dias. Não se pode também, menosprezar o resultado da M30, já que a mesma alcançou no mesmo período os 47 MPa, ficando acima da C400, a qual obteve 46 MPa.

5.3. Verificação da conformidade dos resultados com a NP EN 206-1:2007

Segundo a NP EN 206-1:2007 [7], quando se fabricam novos betões com adições do Tipo I e do Tipo II estas devem ser objecto de alguns ensaios iniciais, os quais já foram efectuados, tal como foi referido anteriormente.

Em primeiro lugar, verificou-se que os resultados dos ensaios individuais não apresentavam um intervalo de variação superior a 15% da média, o que foi confirmado e pode ser visto em anexo (Anexo III).

Em segundo lugar, constatou-se que de acordo com os critérios para aceitação dos ensaios iniciais estipulados na norma anteriormente referida, a resistência à compressão da composição inicial estudada a utilizar em caso real deve exceder em cerca de duas vezes o valor do desvio padrão, o que significa uma margem de uns 6 MPa a 12MPa, ou seja:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 12$$

Assim sendo e, considerando a situação mais desfavorável, apresenta-se de seguida a tabela 5.5 com a verificação da classificação das classes de resistência das amostras estudadas.

Tabela 5.5 – Classificação mais desfavorável da classe de resistência das amostras.

Amostra	f_{cm}	$f_{ck} \leq f_{cm} - 12$	Classe de resistência
M10	39,2	25	C 20/25
M20	46,4	30	C 25/30
M30	47,6	30	C 25/30
F10	43,6	30	C 25/30
F20	48,1	30	C 25/30
F30	55,1	37	C 30/37

Se por outro lado, considerarmos a nossa situação real, a do nosso desvio padrão que é de 2.3, fazendo o dobro do mesmo tal como exigido na norma, seriam 4.6, pelo que considerámos o valor 5. Os valores a obter, seriam:

Tabela 5.6 – Classificação real da classe de resistência das amostras.

Amostra	f_{cm}	$f_{ck} \leq f_{cm} - 5$	Classe de resistência
M10	39,2	30	C 25/30
M20	46,4	37	C 30/37
M30	47,6	37	C 30/37
F10	43,6	37	C 30/37
F20	48,1	37	C 30/37
F30	55,1	50	C 40/50

No caso das amostras de base e de referência não são adoptados os mesmos critérios que foram estabelecidos para os novos betões que são fabricados com adições do Tipo I ou II. De acordo com NP EN 206-1:2007 [7] as classes de resistências das amostras base e de referência são as indicadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Classificação da classe de resistência das amostras base e de referência.

Amostra	f_{cm}	Classe de resistência
C310	30,1	C 25/30
C350	39,0	C 30/37
C400	46,0	C 35/45

Analisando estas tabelas, verifica-se que para a situação real a melhor das situações de pó de mármore iguala a classe de resistência do C350, um C30/37. Já o filer calcário conseguiu ultrapassar a classe de resistência do C400, conseguindo ficar na classe C40/50.

Por outro lado e, devido aos diferentes tipos de betoneiras e procedimentos de amassadura utilizados podem levar a que os valores sejam ligeiramente diferentes de local para local, pelo que foi também considerada a situação mais desfavorável.

Na situação mais desfavorável os resultados são inferiores aos da situação real. A melhor das adições de pó de mármore conseguiu alcançar a classe de resistência de um C310, ficando com um C20/25. No caso do filer calcário, a melhor das adições igualou o C350, com um C30/37.

5.4. Análise dos resultados

Neste estudo foi considerada uma composição inicial, à qual chamámos de composição base C310. Em termos de classe de resistência o C310 situa-se num C25/30. Além

desta, foram também consideradas outras duas de referência, a C350 e C400, as quais estão situadas nas classes de resistência C30/37 e C35/45, respectivamente.

Quando se adicionaram as várias % das duas adições à composição base a finalidade pretendida era a de avaliar a sua exequibilidade, quer em termos de trabalhabilidade quer em termos de resistência à compressão.

Em relação à trabalhabilidade o problema conseguiu-se resolver adicionando mais quantidade de adjuvante à amassadura do que aquela estabelecida pelo fabricante.

No que diz respeito à resistência à compressão os resultados obtidos foram muito bons. Verificou-se que aos 28 dias a amostra M10 consegue obter os mesmos valores de resistência à compressão que a C350, ou seja, $M10 \approx C350$.

Em relação às amostras com 20% de adição, estão ambas situadas na classe C30/37, apresentando valores de resistência muito próximos aos da amostra C400.

A amostra F30 foi a que apresentou valores de resistência à compressão mais elevados em todo o período de tempo considerado. Aos 28 dias apresenta um valor de resistência à compressão de 55,1 MPa e classe de resistência C40/50.

Os resultados da amostra M30 foram inferiores aos da amostra F30, no entanto esta ainda se encontra acima da amostra C400. Aos 28 dias apresenta um valor de resistência à compressão de 47,6 MPa.

Além dos fantásticos valores obtidos para as resistências à compressão e, tendo em consideração o caso real em estudo, a melhor das amostras de pó de mármore conseguiu ficar na classe de resistência C30/37 e a melhor do filer calcário nos C40/50.

Ao substituir-se parcialmente a quantidade de cimento Portland por adições de pó de mármore ou filer calcário consegue reduzir-se o consumo de matéria-prima e energia e as emissões de CO₂. De acordo com os dados apresentados anteriormente na bibliografia, ao fazermos esses cálculos com base no nosso caso de estudo, conseguimos obter os valores da seguinte tabela:

Tabela 5.8 – Análise comparativa do consumo de recursos naturais e produção de CO₂ por uma tonelada de cimento produzido.

Substituição	Produção de CO ₂	Consumo de matéria-prima	Consumo de energia
	[kg]	[kg]	[MJ]
0%	900	1500	4800
10%	810	1350	4320
20%	720	1200	3840
30%	630	1050	3360

Analisando a tabela anterior e tendo em consideração o nosso caso de estudo, pode concluir-se que ao serem utilizadas adições como substituição parcial do cimento na composição do betão, podem reduzir-se as emissões de CO₂ entre valores de 90 até 270 kg. Consequentemente, também os consumos de matéria-prima e energia sofrem um decréscimo. O consumo de matéria-prima sofre uma diminuição de até 450 kg, enquanto o consumo de energia é diminuído em 1440 kg.

6. CONCLUSÃO

Após a elaboração deste trabalho experimental e tendo como base a bibliografia consultada e os resultados alcançados apresenta-se de seguida uma síntese das principais conclusões obtidas, assim como, algumas recomendações e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

6.1. Conclusões Finais

Com base no estudo efectuado é possível extrair as seguintes conclusões:

- A adição de filer calcário apresentou melhores resultados do que a de pó de mármore;
- Tanto a adição de filer calcário como a adição de pó de mármore trazem incremento de resistência às amostras;
- Quanto maior a percentagem de adição, mais elevada é a resistência à compressão obtida, tanto no filer calcário como no pó de mármore;
- Apesar da adição de filer calcário e de pó de mármore, foi possível obter a classe de abaixamento desejada, adicionando para tal mais adjuvante;
- As composições com adição de pó de mármore mostraram que absorvem mais água durante a amassadura relativamente à adição de filer calcário;
- Apesar das adições utilizadas serem consideradas quase inertes, estas reagiram com a pasta cimentícia, já que houve um incremento de resistência das mesmas, possivelmente justificado pelo incremento de finos;
- Mesmo com uma percentagem de adições elevada (30%) as amostras apresentaram bom comportamento tanto no estado fresco como no estado endurecido;

- A adição de pó de mármore e filer calcário provocou uma ligeira diminuição do tempo de presa das amostras;
- As amostras com adição de filer calcário e pó de mármore apresentaram valores de resistência à compressão aos 28 dias bastante superiores ao esperado;
- Com o pó de mármore é possível alcançar uma classe de resistência de C30/37, enquanto que com o filer calcário chega-se a uma extraordinária classe de C40/50;
- A substituição parcial da quantidade de cimento pelas adições de pó de mármore e filer calcário reduz significativamente as emissões de CO₂ e o consumo de energia e matéria-prima utilizada ao produzir cimento Portland;
- O uso destas duas adições é totalmente viável no fabrico de betão.

6.2. Trabalhos futuros

O fabrico de betão é uma área muito abrangente, uma vez que são muitas as variáveis existentes na sua constituição. Assim sendo, para trabalhos futuros propõem-se os seguintes estudos:

- Fabrico de betões autocompactáveis com o uso da adição de pó de mármore;
- Betões com diferentes percentagens de adições de pó de mármore, para o estudo de qual o limite aceitável deste tipo de adições no fabrico de betão;
- Aplicação real do caso estudado numa fábrica de betão pronto;
- Betões de alto desempenho com adições do Tipo II, juntamente com a adição de pó de mármore.

BIBLIOGRAFIA

[1] www.cimentobrasil.com, (Pesquisado em 18 de Novembro de 2008).

[2] www.ces.fgvsp.br, (Pesquisado em 19 de Novembro de 2008).

[3] Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, 1998.

[4] ALMEIDA, N., BRANCO, F., SANTOS, JR., "Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures", Building and Environment, vol. 42, nº 2, pp. 810-819, 2005.

[5] NEVILLE, A., Properties of Concrete, 4th Edition, Pearson Edu Lmt, UK, 2002.

[6] RIBEIRO, A., "Betões de Ligantes Hidráulicos e Seus Componentes", Textos de apoio à cadeira de Materiais de Construção Civil, Universidade de Évora.

[7] EN 206-1:2007: Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.

[8] COUTINHO, A., "Fabrico e Propriedades do Betão", Volume I, 4^a edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2006.

[9] EN 12620:2004: Agregados para betão.

[10] European Project Group; "The European Guidelines for Self Compacting Concrete: Specification, Production and Use", May, 2005.

[11] OKAMURA, H., OUCHI, M., "Self- Compacting Concrete", Journal of Advanced Concrete technology, vol. 1, nº 1, pp. 5-15, April 2003.

[12] FERREIRA, R., "Betão autocompactável: Metodologia de composição", Tese de mestrado, Universidade do Minho – Escola de Engenharia, Guimarães, Julho de 2001.

- [13] EN 1008:2003: Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão.
- [14] AMBROISE, J., MAXIMILLIEN, S., PERA, J., "Properties of Metakaolin blended cements". Advanced Cement Based Materials, vol. 1, pp. 161-168, 1994.
- [15] SINGH, S., VIJAYALAKSHMI, V., "Marble slurry – a new building material", TIFAC News and Views, 2004.
- [16] ALMEIDA, N., "Reutilização de lamas de tratamento de rochas ornamentais em betões", 2004.
- [17] SOEIRO, A., VEIGA, M., R., BRANCO, F., A., "Incorporação de lamas de serração de mármore e calcários em argamassas de cimento e areia", Construlink, vol. 2, nº 5, 2004.
- [18] ACI Committee 266, "Silica fume in concrete", e ACI Mat. J., vol. 84, nº2, pp. 158. Março-Abril 1987.
- [19] EN 197-1: 2001: Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.
- [20] EN 450:1995: Cinzas volantes para betão.
- [21] "Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolans for use in Portland cement concrete", ASTM Designation C 618:2008.
- [22] HEIKAL, M., EL-DIDAMONY, H. MORSY, M.S. "Limestone-filled pozzolanic cement", Cement and Concrete Research, vol. 30, pp. 1827-1834, 2000.
- [23] DURIEZ, M., ARRAMBIDE, J., "Nouveau Traité de Matériaux de Construction", Tomo I, pp. 327, Ed. Dunod, Paris, 1961.
- [24] KÜRSAT, A., RAGIP, I., "A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders", Construction and building materials, vol. 23, nº 3, pp. 1201-1210, 2008.

- [25] ONARGAN, T., KÖSE, H., DELIORMAN, AH., Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects (UCTEA), Chamber of Mining Engineers of Turkey, 4th ed, pp. 1–5, 2006.
- [26] KASEVA, ME., GUPTA, SK., “Recycling – an environmentally friendly and income generating activity – towards sustainable solid wastes management”, pp. 299–309, 1996.
- [27] SAHMARAN, M., YURTSEVEN, A., YAMAN, I., “Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete”, Building and Environment, vol. 40, n^o 12, pp. 1672-1677, 2004.
- [28] TOPÇU, I., BILIR, T., UYGUNOGLU, T., “Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete”, Construction and building materials, awaiting publication.
- [29] MORAES, C., “Efeitos físicos e pozolânicos das adições minerais sobre a resistência mecânica do betão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2001.
- [30] EN 197-1:2000: Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos comuns.
- [31] FURQUIM, P., “Estudo Estatístico de Produção de Betões com Adições Minerais”, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2006.
- [32] BONAVETTI, V., DONZA, H., MENÉNDEZ, G., CABRERA, O., IRASSAR, F., “Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy”, Cement and Concrete Research, vol. 33, n^o 6, pp. 865-871, 2003.
- [33] BÉDÉRINA, M., KHENFER, M., DHEILLY, R., QUÉNEUDEC, M., “Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes”, Cement and Concrete Research, vol. 35, pp. 1172-1179, 2005.
- [34] COLAK, A., “Effects of chrome oxide and limestone filler on the wear characteristics of paste and concretes made with white Portland cement”, Construction and Building Materials, vol. 22, pp. 2276-2280, 2008.

[35] EN 206:2007: Betão.

[36] BOSILJKOV, V., "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1279-1286, 2003.

[37] ESPING, O., "Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 938-944, 2008.

[38] YE, G., LIU, X., SCHUTTER, G., POPPE, A.-M., TAERWE, L., "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes", *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, nº 2, pp. 94-102, 2006.

[39] YILMAZ, B., OLGUN, A., "Studies on cement and mortar containing low-calcium fly-ash, limestone, and dolomitic limestone", *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, nº 3, pp. 194-201, 2007.

[40] SOARES, HLA., "Caracterização e aplicabilidade na indústria dos cimentos de lamas de rochas ornamentais transformadas na Região de Pêro Pinheiro", Aveiro, 1997.

[41] PEREIRA, S., BONITO, N., *Rewastone. ROC MAQUINA Dimension Stone Industry*, vol. 42, pp. 28-31, 2001.

[42] MUNOZ-MONTANO, J., "Recycling of waste originated in the process of cutting natural stone", 2003.

[43] PÉREZ, A., "Natural stone: exploitation of cutting waste originated from the natural stone preparation process", 2003.

[44] Technical Report, "Ensaios de caracterização laboratorial - Subprodutos de Pedra Natural", 2001.

[45] PAREEK, S., "Gainful utilization of marble waste: an effort towards protection of ecology and environment", *Workshop on Marketing & Technical Issues Related to Stone Industry*, 2003.

- [46] MOURA, W., GONÇALVES J., P., “Utilização de Resíduos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (Mármore e Granitos) na Construção Civil”, 2002.
- [47] MARTINS, R., “Aplicações industriais de lutas resultantes da indústria transformadora de rochas ornamentais carbonatadas”, 1996.
- [48] NUNES, R., L., S., FERREIRA, H., S., NEVES, G., A., FERREIRA, H., C., “Reciclagem de Resíduos de Granito para Uso na Indústria de Revestimentos Cerâmicos”, 2002.
- [49] MENEZES, R., R., FERREIRA, H., S., NEVES, G., A., FERREIRA, H., C., “Uso de Rejeitos de Granitos como Matérias-Primas Cerâmicas”, 2006.
- [50] COSTA, C., “Aproveitamento de resíduos de serragem de mármore em aplicações geotécnicas no domínio do Ambiente”, 1995.
- [51] FRANCO, M., F., CUPETO, C., “A utilização de Subprodutos Resultantes da Serragem dos Mármore (“Nata”) para Cobertura de Resíduos Sólidos Urbanos”, 1996.
- [52] EN 12620:2004: Agregados para betão.
- [53] COUTINHO, A., “Fabrico e Propriedades do Betão”, Volume II, 4ª edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.
- [54] EN 933-2:1999: Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 2: Análise granulométrica.
- [55] Especificação LNEC E-64:1979: Cimentos. Determinação da massa volúmica.
- [56] EN 196-6:1996: Métodos de ensaio de cimento. Parte 6: Determinação da finura do cimento.
- [57] MC CABE, W., L., SMITH, J.C., “Unit Operations in Chemical Engineering”, McGraw Hill, pp. 97, 1956.
- [58] South African Bureau of Standards – Standard Method 748, 1995.

- [59] VON BERG, M., Magazine for Concrete Research, vol. 31, pp. 211, 1979.
- [60] POTGIETER, J.H., STRYDOM, C.A., "An Investigation Into The Correlation Between Different Surface Area Determination Techniques Applied To Various Limestone-Related Compounds", Cement and Concrete Research, vol. 26, nº 111, pp. 1613-1617, 1996.
- [61] EN 12350-2:2008: Ensaio de betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento.
- [62] LÉZI, "Controle du béton hydraulique sur les chantiers de bétonnage", Construction, p. 83, Jan. 1960.
- [63] DURIEZ et ARRAMBIDE, "Nouveau traité de matériaux de construction", 2^a ed., Tomo I, pp. 1296, Ed Dunod, Paris, 1961.
- [64] EN 12390-1:2008: Ensaio de betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outras dimensões para o ensaio de provetes e para os moldes.
- [65] EN 12390-2:2008: Ensaio de betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.
- [66] EN 12390-3:2008: Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.
- [67] EN 12390-4:2008: Ensaio do betão endurecido. Parte 4: Especificação para as máquinas de ensaio.

ANEXOS

ANEXO I – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Tabela A.1 – Análise granulométrica dos agregados.

Data de ensaio	Brita 2				Brita 1				Areia 2				Areia 1			
	Massa da amostra [g]		4971,26		Massa da amostra [g]		4919,67		Massa da amostra [g]		804,27		Massa da amostra [g]		1223,24	
	Resíduo	Resíduo	Passado	Retido	Resíduo	Resíduo	Passado	Retido	Resíduo	Resíduo	Passado	Retido	Resíduo	Resíduo	Passado	Retido
Malha [mm]	[g]	[%]	[%]	[g]	[g]	[%]	[%]	[g]	[g]	[%]	[%]	[g]	[g]	[%]	[%]	[%]
125	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00
63	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00
32	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00
16	2690,76	54,13	45,87	54,13	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00
8	2215,65	44,57	1,29	98,71	1867,87	37,97	62,03	37,97	-	-	100,00	0,00	-	-	100,00	0,00
4	48,30	0,97	0,32	99,68	2484,65	50,51	11,52	88,48	-	-	100,00	0,00	0,71	0,06	99,94	0,06
2	4,49	0,09	0,23	99,77	271,17	5,51	6,01	93,99	65,56	8,15	91,85	8,15	0,35	0,03	99,91	0,09
1	0,37	0,01	0,23	99,77	107,36	2,18	3,82	96,18	193,47	24,06	67,78	32,22	15,41	1,27	98,64	1,36
0,500	0,59	0,01	0,21	99,79	73,92	1,50	2,32	97,68	373,03	46,40	21,39	78,61	543,70	44,74	53,90	46,10
0,250	1,52	0,03	0,18	99,82	45,80	0,93	1,39	98,61	132,43	16,47	4,92	95,08	533,82	43,93	9,97	90,03
0,125	2,79	0,06	0,13	99,87	34,21	0,70	0,70	99,30	22,33	2,78	2,14	97,86	104,49	8,60	1,37	98,63
0,063	3,99	0,08	0,05	99,95	30,29	0,62	0,08	99,92	8,10	1,01	1,13	98,87	7,76	0,64	0,73	99,27
Finos	2,30	0,04	-	-	3,91	0,07	-	-	9,11	1,10	-	-	8,93	0,07	-	-
Totais	4970,76	99,99	-	-	4919,18	99,99	-	-	804,03	99,97	-	-	1215,17	99,34	-	-

ANEXO II – RESULTADOS DAS AMOSTRAS NO ESTADO ENDURECIDO

Tabela A.2 – Resultados das amostras C310.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
C310	1	388,70	0,0225	17,3	17,9
C310	1	416,70	0,0225	18,5	
C310	3	548,90	0,0225	24,4	24,6
C310	3	558,20	0,0225	24,8	
C310	7	560,10	0,0225	24,9	25,3
C310	7	578,60	0,0225	25,7	
C310	14	591,40	0,0225	26,3	27,0
C310	14	624,10	0,0225	27,7	
C310	28	684,10	0,0225	30,2	30,1
C310	28	661,30	0,0225	30,0	
C310	56	816,30	0,0225	36,3	36,8
C310	56	839,80	0,0225	37,3	

Tabela A.3 – Resultados das amostras C350.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
C350	1	444,60	0,0225	19,8	19,9
C350	1	449,10	0,0225	20,0	
C350	3	570,20	0,0225	25,3	26,0
C350	3	597,90	0,0225	26,6	
C350	7	698,90	0,0225	31,1	30,5
C350	7	673,10	0,0225	29,9	
C350	14	701,90	0,0225	31,2	33,1
C350	14	788,20	0,0225	35,0	
C350	28	846,40	0,0225	37,6	39,0
C350	28	907,10	0,0225	40,3	
C350	56	1024,40	0,0225	45,5	45,6
C350	56	1028,93	0,0225	45,7	

Tabela A.4 – Resultados das amostras C400.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
C400	1	479,03	0,0225	21,3	21,2
C400	1	474,53	0,0225	21,1	
C400	3	721,40	0,0225	32,1	31,5
C400	3	696,90	0,0225	31,0	
C400	7	839,20	0,0225	37,3	38,0
C400	7	872,10	0,0225	38,8	
C400	14	982,50	0,0225	43,7	42,7
C400	14	937,40	0,0225	41,7	
C400	28	1056,80	0,0225	47,0	46,0
C400	28	1013,10	0,0225	45,0	
C400	56	1089,23	0,0225	48,4	48,3
C400	56	1084,73	0,0225	48,2	

Tabela A.5 – Resultados das amostras F10.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
F10	1	327,20	0,0225	14,5	16,9
F10	1	432,10	0,0225	19,2	
F10	3	724,50	0,0225	32,2	31,7
F10	3	703,90	0,0225	31,3	
F10	7	863,80	0,0225	38,4	36,9
F10	7	794,60	0,0225	35,3	
F10	14	895,80	0,0225	39,8	40,8
F10	14	938,80	0,0225	41,7	
F10	28	1017,00	0,0225	45,2	43,6
F10	28	943,40	0,0225	41,9	
F10	56	1113,70	0,0225	49,5	48,6
F10	56	1071,20	0,0225	47,6	



Tabela A.6 – Resultados das amostras F20.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
F20	1	503,20	0,0225	22,4	22,8
F20	1	520,70	0,0225	23,1	
F20	3	761,40	0,0225	33,8	33,6
F20	3	751,60	0,0225	33,4	
F20	7	872,90	0,0225	38,8	38,1
F20	7	842,00	0,0225	37,4	
F20	14	967,80	0,0225	43,0	43,0
F20	14	967,50	0,0225	43,0	
F20	28	1105,90	0,0225	49,2	48,1
F20	28	1058,80	0,0225	47,1	
F20	56	1126,90	0,0225	50,1	49,9
F20	56	1118,70	0,0225	49,7	

Tabela A.7 – Resultados das amostras F30.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
F30	1	523,20	0,0225	23,3	23,3
F30	1	524,80	0,0225	23,3	
F30	3	943,50	0,0225	41,9	41,0
F30	3	899,70	0,0225	40,0	
F30	7	1062,40	0,0225	47,2	47,1
F30	7	1058,00	0,0225	47,0	
F30	14	1085,40	0,0225	52,0	51,0
F30	14	1117,00	0,0225	50,0	
F30	28	1250,00	0,0225	55,6	55,1
F30	28	1229,10	0,0225	54,6	
F30	56	1285,10	0,0225	57,1	56,8
F30	56	1272,30	0,0225	56,5	

Tabela A.8 – Resultados das amostras M10.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
M10	1	309,30	0,0225	13,7	13,6
M10	1	301,10	0,0225	13,4	
M10	3	321,00	0,0225	14,3	16,4
M10	3	415,30	0,0225	18,5	
M10	7	585,40	0,0225	26,0	26,0
M10	7	583,80	0,0225	25,9	
M10	14	684,70	0,0225	31,0	31,5
M10	14	620,00	0,0225	32,0	
M10	28	851,20	0,0225	37,8	39,2
M10	28	910,70	0,0225	40,5	
M10	56	918,60	0,0225	40,8	42,6
M10	56	999,80	0,0225	44,4	

Tabela A.9 – Resultados das amostras M20.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
M20	1	512,10	0,0225	22,8	22,2
M20	1	486,70	0,0225	21,6	
M20	3	835,30	0,0225	37,1	36,3
M20	3	796,20	0,0225	35,4	
M20	7	883,60	0,0225	39,3	39,4
M20	7	889,90	0,0225	39,6	
M20	14	990,20	0,0225	44,0	44,1
M20	14	995,30	0,0225	44,2	
M20	28	1076,50	0,0225	47,8	46,6
M20	28	1022,00	0,0225	45,4	
M20	56	1085,40	0,0225	48,2	48,3
M20	56	1090,30	0,0225	48,5	

Tabela A.10 – Resultados das amostras M30.

Referência	Dias de cura	Leitura [kN]	Área [m ²]	Resistência compressão [MPa]	Resistência compressão média [MPa]
M30	1	555,00	0,0225	24,7	23,6
M30	1	507,60	0,0225	22,6	
M30	3	853,50	0,0225	37,9	38,2
M30	3	865,30	0,0225	38,5	
M30	7	981,70	0,0225	43,6	42,9
M30	7	947,80	0,0225	42,1	
M30	14	1028,30	0,0225	45,7	45,8
M30	14	1032,50	0,0225	45,9	
M30	28	1064,60	0,0225	47,3	47,6
M30	28	1078,70	0,0225	47,9	
M30	56	1139,80	0,0225	50,7	51,8
M30	56	1190,60	0,0225	52,9	

ANEXO III – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DAS AMOSTRAS

Tabela A.11 – Resultados estatísticos das amostras.

Amostras	Dias de cura	Média [\bar{X}_i]	Desvio padrão [σ_n]	Coefficiente de variação [%]
C310	1	17,9	0,622	3,48
C310	3	24,6	0,207	0,84
C310	7	25,3	0,411	1,62
C310	14	27,0	0,727	2,69
C310	28	30,1	0,100	0,33
C310	56	36,8	0,522	1,42
C350	1	19,9	0,100	0,50
C350	3	26,0	0,616	2,37
C350	7	30,5	0,573	1,88
C350	14	33,1	1,918	5,79
C350	28	39,0	1,349	3,46
C350	56	45,6	0,101	0,22
C400	1	21,2	0,100	0,47
C400	3	31,5	0,544	1,73
C400	7	38,0	0,731	1,92
C400	14	42,7	1,002	2,35
C400	28	46,0	0,971	2,11
C400	56	48,3	0,100	0,21
F10	1	16,9	2,331	13,82
F10	3	31,7	0,458	1,44
F10	7	36,9	1,538	4,17
F10	14	40,8	0,956	2,34

Tabela A.11 – Resultados estatísticos das amostras (continuação).

Amostras	Dias de cura	Média [\bar{X}_i]	Desvio padrão [σ_n]	Coefficiente de variação [%]
F10	28	43,6	1,636	3,75
F10	56	48,6	0,944	1,95
F20	1	22,8	0,389	1,71
F20	3	33,6	0,218	0,65
F20	7	38,1	0,687	1,80
F20	14	43,0	0,007	0,02
F20	28	48,1	1,047	2,18
F20	56	49,9	0,182	0,37
F30	1	23,3	0,036	0,15
F30	3	41,0	0,973	2,38
F30	7	47,1	0,098	0,21
F30	14	51,0	1,000	1,96
F30	28	55,1	0,464	0,84
F30	56	56,8	0,284	0,50
M10	1	13,6	0,182	1,34
M10	3	16,4	2,096	12,81
M10	7	26,0	0,036	0,14
M10	14	31,5	0,500	1,59
M10	28	39,2	1,322	3,38
M10	56	42,6	1,804	4,23
M20	1	22,2	0,564	2,54
M20	3	36,3	0,869	2,40
M20	7	39,4	0,140	0,36
M20	14	44,1	0,113	0,26

Tabela A.11 – Resultados estatísticos das amostras (continuação).

Amostras	Dias de cura	Média [X _i]	Desvio padrão [σ _n]	Coefficiente de variação [%]
M20	28	46,6	1,211	2,60
M20	56	48,3	0,109	0,23
M30	1	23,6	1,053	4,46
M30	3	38,2	0,262	0,69
M30	7	42,9	0,753	1,76
M30	14	45,8	0,093	0,20
M30	28	47,6	0,313	0,66
M30	56	51,8	1,129	2,18