



IPS Instituto
Politécnico de Setúbal

Wilson Rosário Da Cruz Luís

Estudo do desempenho, a curto e longo prazo, da incorporação de resíduos industriais nas composições de argamassa e betões de base cimentícia.

Dissertação apresentada para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Margarida Armada Brás e coorientação do Professor Pedro Faustino Marques.

Janeiro, 2013



Wilson Rosário Da Cruz Luís

Estudo do desempenho, a curto e longo prazo, da incorporação de resíduos industriais nas composições de argamassa e betões de base cimentícia.

Orientador: Doutora Ana Margarida Armada Brás, Professor Adjunto Convidado, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro – Instituto politécnico de Setúbal

Coorientador: Pedro Faustino Marques, Professor Adjunto convidado, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro – Instituto politécnico de Setúbal

Membros do Júri:

Presidente: Doutora Cristina Ferreira de Oliveira, Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro – Instituto politécnico de Setúbal

Vogais:

Doutora Ana Margarida Armada Brás, Professor Adjunto Convidado, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro – Instituto politécnico de Setúbal

Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues, Professora Associada, Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

AGRADECIMENTOS

É já lugar comum, mas sempre devido, que exteriorizemos sentimentos sinceros de gratidão. No entanto, sem querer esquecer todos os que, generosamente, directa ou indirectamente, se esforçaram para que esta dissertação pudesse ter lugar, quero agradecer:

A orientadora científica da ESTBarreiro/IPS, Professora Doutora Ana Brás pela forma como norteou o meu trabalho, pela disponibilidade demonstrada no trabalho de laboratório e pela transmissão de conhecimentos e recomendações de bibliografia.

Ao Professor Pedro Marques da ESTBarreiro/IPS, um agradecimento pelo seu interesse, pela confiança depositada em mim, pelos conhecimentos partilhados, e pela motivação que me transmitiu durante o decorrer deste trabalho.

A Eng.^a Civil, Ana Martins da ESTBarreiro/IPS por toda a sua disponibilidade, e ajuda na utilização dos equipamentos da escola.

Ao colega, Bruno das Dores Miguel, por toda a informação cedida nos ensaios referentes a composição base.

Ao senhor João Figueiredo e senhor Carlos Menezes pela ajuda na preparação das amostras e manutenção dos materiais necessários a realização dos ensaios.

Aos Técnicos do Laboratório do Instituto Superior Técnico, Rui Garcia e João Corucho, pela ajuda na preparação de provetes de betão.

À SECIL, na pessoa do Eng.^o Vítor Vermelhudo, pela cedência de cimento.

Aos meus colegas de Mestrado, Nara dias, Dário Coelho, Conceição Costa, pelo companheirismo e motivação durante a fase de elaboração da parte escrita da dissertação.

Um bem haja aos meus irmão que, sinceramente, quiseram ser agentes activos na minha formação. Grato em fim mas não por ultimo, as pessoas que ao longo destes anos foram o meu esteio – João Luís e Maria Teonilia Cruz.

RESUMO

A argamassa e o betão são dos materiais mais utilizados na indústria da construção civil. A sua aplicação está presente em diversas obras, isto deve-se às suas características no estado fresco - trabalhabilidade e no estado endurecido - durabilidade. O cimento é o principal componente para obter as composições de argamassa e betão, constituindo o ligante que manterá coeso todos os materiais. É do conhecimento geral que a produção de cimento é uma das atividades responsáveis pela grande emissão de CO₂ para a atmosfera. Com recurso a adições de Cinzas de Fundo (CF) consegue-se contribuir para minimizar um problema de impacto ambiental e melhorar a economia do projecto. A adição de Cinzas de Fundo permite reduzir a quantidade de cimento utilizado nas composições de argamassa e betões.

A presente dissertação teve como principal objectivo analisar o desempenho de argamassas e betões com substituição de cimento Portland CEM I 42,5R por CF. Proceder-se-á a avaliação da eficiência de adições de Cinzas de Fundo, com substituição de 10%, 15% e 20% , provenientes de uma central termoelétrica, recorrendo a ensaios em provetes prismáticos para as composições de argamassa, e para as composições de betão foram feitos provetes cubicos e cilindricos. Realizaram-se ensaios de forma a caracterizar argamassas de base cimentícia quanto ao seu desempenho no estado fresco e no estado endurecido, garantindo a trabalhabilidade das argamassas e dos betões através da introdução de dosagens de superplastificante.

Nos ensaios no estado fresco verifica-se que a inclusão de CF aumenta o volume de pasta de ligante, que será benéfico para as características da argamassa, como a trabalhabilidade, provocando uma melhoria na sua plasticidade e coesão.

Em relação ao estado endurecido, o comportamento mecânico das composições com adição de CF melhora em termos de flexão, mas em relação à compressão verifica-se um decréscimo de resistência – para as argamassas com adição de 10% de CF a resistência á compressão é cerca de 90% de uma argamassa de referência. Em relação as adições de 15 e 20% não se verifica uma variação significativa na resistência o que torna vantajoso a utilização de 20% de CF.

Com este estudo, obteve-se como principal conclusão que a adição de Cinzas de Fundo influencia o comportamento da argamassa e do betão. E verifica-se que é possível em alguns casos substituir até 20% da massa de Cimento por CF.

ABSTRACT

The mortar and concrete are the most widely used materials in the construction industry. Its application is present in several works , this is due to its characteristics in the fresh state - workability and hardened state - durability. Cement is the main component for the compositions of mortar and concrete , forming the cohesive bond that will hold all materials. It is common knowledge that cement production is one of the activity responsible for the vast emission of CO₂ to the atmosphere. Using the additions of ash Fund (CF) is achieved contributing to a problem of minimizing environmental impact and improve the economics of the project . The addition of bottom ash reduces the amount of cement used in mortar and concrete compositions .

This work had as main objective to analyze the performance of mortar and concrete with replacement of Portland cement CEM I 42,5 R for CF . Evaluating the efficiency of additions of ash Fund shall be made - with substitution of 10 % , 15 % and 20 % , from a thermoelectric plant , using tests for compositions prismatic mortar specimens , and the compositions concrete cubic and cylindrical specimens were made . Assays were performed in order to characterize cementitious mortars on their performance in fresh and hardened state , ensuring the workability of mortar and concrete by introducing dosages of superplasticizer .

In the experiments in the fresh state it appears that the inclusion of CF increase the volume of binder folder, which will be beneficial for the characteristics of mortar , as the workability , causing an improvement in their plasticity and cohesion.

Regarding the hardened state , the mechanical compositions with the addition of CF improvement in terms of bending, but in relation to the compression behavior There was a decrease in resistance - for the mortars with addition of 10% CF resistance to compression walks by 90% of a reference mortar . Regarding the additions of 15 and 20% takes place without significant change in resistance which makes advantageous use of 20% CF .

With this study , we obtained the main conclusion that the addition of ash background influences the behavior of mortar and concrete . And it is found that in some cases it is possible to replace up to 20 % by weight of cement per CF .

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivos e motivação.....	1
1.2.	Limitações	2
1.3.	Organização do texto	3
2.	Argamassas e Betões com Adições de Subprodutos da Indústria	4
2.1.	Introdução	4
2.2.	Constituição	4
2.2.1.	Cimento.....	5
2.2.2.	Agregados	6
2.2.3.	Adições “Clássicas” Tipo I e II	9
2.2.4.	Adições Recentes (Inclusão de cinzas de fundo na composição)	14
2.2.5.	Adjuvantes	15
2.3.	Desempenho no Estado Fresco.....	17
2.4.	Desempenho no Estado Endurecido	19
2.4.1.	Resistência mecânica	19
2.4.2.	Durabilidade	20
2.5.	Observações Finais	23
3.	Comportamento, a curto e longo prazo das argamassas e betões com incorporação de Cinzas de Fundo, (CF). 24	
3.1.	Introdução	24
3.2.	Programa experimental	24
3.2.1.	Materiais	24
3.2.2.	Composição das argamassas e betões	25
3.2.3.	Preparação das argamassas e betões.....	27
3.3.	Ensaio no estado fresco	29
3.3.1.	Consistência por espalhamento.....	29
3.3.2.	Massa volúmica.....	31
3.4.	Preparação dos provetes.....	32
3.5.	Ensaio no estado Endurecido	34
3.5.1.	Módulo de elasticidade dinâmico para argamassa e betão	34
3.5.2.	Resistência à flexão - argamassa.....	35
3.5.3.	Resistência à compressão – argamassa	36
3.5.4.	Resistência a compressão de cubos - betão.....	36
3.5.5.	Resistência a compressão diametral - betão.....	37
3.5.6.	Ensaio de Capilaridade - Argamassa	38

3.5.7.	Ensaio de porosidade aberta – argamassa e betões.....	40
3.5.8.	Ensaio de Carbonatação – Argamassa e Betões.....	41
3.6.	Condicionamento dos provetes.....	43
4.	Resultados de Ensaios e Discussão.....	44
4.1.	Estado Fresco	44
4.1.1.	Massa volúmica.....	44
4.1.2.	Espalhamento	45
4.2.	Estado Endurecido.....	47
4.2.1.	Módulo de Elasticidade Dinâmico (Ultrassons)	48
4.2.2.	Resistência Mecânica das composições	49
4.2.3.	Absorção de água por capilaridade - argamassa.....	55
4.2.4.	Porosidade Aberta	56
4.2.5.	Carbonatação Acelerada.....	57
5.	Conclusão	62
5.1.	Considerações finais.....	62
5.2.	Desenvolvimentos Futuros.....	63
	Bibliografia	65
	ANEXO A – Ficha técnica de Cimento Portland CEM I 42,5R	71
	ANEXO b – Ficha técnica do superplastificante MC POWERFLOW 1110.....	73

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema de operação de um alto forno [36].....	12
Figura 2 - Produção de Energia [50]	15
Figura 3 - Ensaio da mesa de espalhamento	17
Figura 4 - Ensaio Plano inclinado	18
Figura 5 - Ensaio compressão cubos	19
Figura 6 - Ensaio compressão e flexão - argamassa	20
Figura 7 - Penetração de CO ₂ [54]	20
Figura 8 - Penetração de Cr [54]	21
Figura 9 - Camada de recobrimento [54]	22
Figura 10 – Equipamentos e utensílios para produção de provetes de argamassa.....	28
Figura 11 - Produção de provetes de betão	29
Figura 12 - Molde para fabrico dos provetes e compactador de argamassa	32
Figura 13 - Provetes de argamassa.....	33
Figura 14 - Produção de provetes de betão	33
Figura 15 - Ensaio do Módulo Elasticidade Dinâmico	34
Figura 16 - Resistência a compressão	37
Figura 17 - Ensaio de compressão diametral	38
Figura 18 - Ensaio de capilaridade	39
Figura 19 - Planeamento das datas dos ensaios de carbonatação	41
Figura 20 - Ensaio de carbonatação de argamassas e betões	42
Figura 21 - Massa volúmica dos provetes de argamassa	44
Figura 22 - Massa volúmica dos provetes de betão.....	45
Figura 23 - Resultado ensaio de espalhamento de argamassa	46
Figura 24 - Resultado ensaio plano inclinado - betão	47
Figura 25 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico - argamassa.....	48
Figura 26 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico - betão.....	49
Figura 27 - Evolução da resistência a compressão com adição de CF - Argamassa.....	50
Figura 28 - Evolução da resistência a compressão com adição de CF - Betão	51
Figura 29 - Variação da resistência à compressão com adição de CF - Argamassa	51
Figura 30 - Variação da resistência à compressão com adição de CF aos 28 dias - Betão.....	52
Figura 31 - Evolução da resistência à flexão com adição de CF - Argamassa	53
Figura 32 - Evolução da compressão diametral com adição de CF - Betão.....	53
Figura 33 - Variação da resistência à flexão com adição de CF - Argamassa.....	54
Figura 34 - variação da resistência à compressão diametral com adição de CF aos 28 dias - Betão.....	54
Figura 35 - Ensaio de Capilaridade.....	56
Figura 36 - Porosidade aberta – argamassa	56
Figura 37 - Porosidade aberta - betão.....	56
Figura 38 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 28 dias	57
Figura 39 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 60 dias	58
Figura 40 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 120 dias	58
Figura 41 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 28 dias	59
Figura 42 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 60 dias	60

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais minerais pertencentes à constituição do cimento Portland [10].....	5
Tabela 2 - Produto de Hidratação do cimento Portland [10].....	6
Tabela 3 - Deposição de resíduos no aterro CEC nos anos 2009 a 2011 [51].	11
Tabela 4 - Produção e valorização de cinzas volantes de carvão entre 2009 – 2011 [50].....	12
Tabela 5 - Propriedades principais do cimento Portland CEM I [8].....	25
Tabela 6 - Composição química Cinza de fundo [24].....	25
Tabela 7 - Dosagens das Componentes da Argamassa.....	26
Tabela 8 - Dosagens das Componentes do Betão	27
Tabela 9 - Valores assintóticos e coeficiente de capilaridade	55
Tabela 10 - Resultados da carbonatação acelerada k, e resistência a carbonatação RC65 -argamassa. 58	
Tabela 11 - Resultados da carbonatação acelerada k, e resistência a carbonatação RC65 - betão.	60

1. Introdução

O despertar da sociedade para os problemas relacionados com a exploração do cimento e os recursos naturais não renováveis utilizados na construção, a grande emissão de gases para a atmosfera, como o dióxido de carbono, têm incentivado a investigação de novos materiais.

Para satisfazer as suas necessidades o homem tem vindo a consumir, a um ritmo cada vez mais acelerado, os recursos naturais disponíveis na Natureza. Este consumo intenso tem provocado um grande impacto a nível ambiental.

Esta realidade resulta da consciencialização para as questões ambientais, pelo que a nossa sociedade já se encontra desperta para esta problemática. Assim, a presente dissertação pretende contribuir para a diminuição da dependência do consumo de cimento através do estudo da utilização de subprodutos industriais, designados por Cinzas de Fundo utilizando uma mistura binária para tornar o betão e argamassas menos dependentes do cimento.

A utilização de subprodutos que atuam como ligantes na construção civil está relacionada, em grande medida, com a construção de estradas ou de infraestruturas relacionadas com os transportes rodoviários [1]. Na Europa, a utilização deste tipo de subprodutos tem abrangido um conjunto relativamente mais vasto de aplicações.

1.1. Objetivos e motivação

Com este trabalho pretende-se realizar o estudo do desempenho, a curto e a longo prazo, da incorporação de resíduos industriais em argamassas e betões de base cimentícia. Proceder-se-á à avaliação da eficiência de adições de cinzas de fundo, provenientes de uma central termoelétrica, aquando da substituição parcial de cimento Portland nas percentagens de 10%, 15% e 20%, como ligante hidráulico. Essa avaliação implica a otimização da sua composição recorrendo à produção de argamassas e betões, caracterizando o seu comportamento no estado fresco e no estado endurecido.

Para caracterizar as argamassas no estado fresco: realizam-se ensaios na mesa de espalhamento e ensaios de massa volúmica. Relativamente ao estado endurecido: foram feitos provetes prismáticos com 160x40x40mm com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade

dinâmico, para ensaiar a resistência à flexão e à compressão, a porosidade aberta e a carbonatação.

Para caracterizar o betão produzido no estado fresco foram feitos ensaios do plano inclinado e ensaio da massa volúmica. No que concerne ao estado endurecido para realizar os ensaios do módulo de elasticidade dinâmico e de compressão, foram produzidos cubos com as dimensões de 150x150x150mm e para os ensaios de carbonatação, de porosidade aberta e de compressão diametral, os provetes produzidos tinham as dimensões de 150mm de diâmetro e 50mm de espessura.

A grande motivação para desenvolver esta dissertação prende-se com a possibilidade de se produzir um betão “mais amigo do ambiente”. Assim poder-se-á verificar a possibilidade de diminuir a utilização do cimento e dar um destino aos produtos resultantes da indústria (cinzas de fundo), contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável. Com esta visão, foi elaborada uma campanha de ensaios que visa contribuir com estudos do desempenho do betão no estado fresco e no estado endurecido, permitindo aumentar os conhecimentos do comportamento do betão com a adição das cinzas de fundo. O modo de fabrico do betão será com recurso aos processos já conhecidos para os betões convencionais e utilizando os materiais correntes.

1.2. Limitações

Apesar dos objetivos empreendidos e de todo o estudo referente ao desempenho dos materiais, este trabalho não possibilita a percepção dos fenómenos químicos que ocorrem com a adição de CF nas composições de argamassas e betões. Isto advém da necessidade de uma caracterização específica para se entender as composições químicas e mineralógica das CF, o que, apesar de complementar o presente trabalho, está fora do âmbito da presente dissertação.

Tendo como base algumas referências bibliográficas que defendem que as cinzas produzidas em diferentes centrais podem apresentar diferentes composições, isso poderá conduzir a comportamentos diferentes nas misturas. Como neste trabalho apenas se realizaram ensaios com CF de uma central, não se pode concluir que o comportamento das argamassas e betões com adição de CF tenha sempre os resultados semelhantes aos obtidos neste estudo. Ainda assim, a informação aqui obtida é relevante e complementar ao que atualmente é do domínio técnico.

1.3. Organização do texto

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução – Enquadramento geral do estudo, motivação para elaborar a presente dissertação, descrição dos índices base e parâmetros a ter em conta na sua caracterização.

Capítulo 2 – Argamassas e Betões com Adições de Subprodutos da Indústria - Pesquisa Bibliográfica - Temas relacionados com a produção de argamassas e betões com destaque para composições que procuram um melhor desempenho ambiental, isto é, com recurso a subprodutos que permitem diminuir a quantidade de cimento utilizado nas composições tradicionais.

Capítulo 3 – Comportamento, a Curto e Longo Prazo, das Argamassas e Betões com Incorporação de Cinzas de Fundo (CF) – Campo experimental para obtenção de dados, para a análise da viabilidade da utilização dos resíduos industriais. Inclui a pesquisa de ensaios relevantes e respetivos procedimentos normalizados que garantam credibilidade aos resultados dos valores obtidos.

Capítulo 4 – Resultado de Ensaio e Discussão - Nesta fase são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios, no estado fresco e no estado endurecido.

Capítulo 5 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros – Este ponto inclui as conclusões relevantes, para o tema em causa, bem como outros desenvolvimentos que se poderão retirar na presente dissertação.

2. Argamassas e Betões com Adições de Subprodutos da Indústria

2.1. Introdução

Neste capítulo, pretende-se abordar o conhecimento relacionado com o tema da dissertação. Para isso, foi analisada uma pesquisa bibliográfica extensa a fim de se obter toda a informação mais relevante.

Desta forma, pretende-se realizar uma síntese dos trabalhos desenvolvidos ao longo dos últimos anos tendo em consideração a crescente preocupação que a exploração de cimento provoca no meio ambiente. A análise dos vários resultados obtidos no âmbito desta primeira investigação permite, entre outros aspetos, prever propriedades do betão a produzir, tornando-se indispensável para uma melhor compreensão do seu comportamento físico e químico, com implicações a nível de resistência mecânica assim como de durabilidade.

A substituição de cinzas volantes por percentagens de cimento não é novidade na indústria do betão, sendo esta utilizada para diminuir o consumo de cimento e, conseqüentemente, o custo de produção do cimento. Deve-se ainda salientar as mais-valias que esta substituição oferece ao comportamento global do betão a longo prazo [6]. Há, todavia, para esta adição, muitas questões pendentes quanto ao desempenho, a longo prazo, quando usada em betões e argamassas.

Tendo em conta a existência de diferenças evidentes entre cinzas volantes e cinzas de fundo- apesar da mesma proveniência e os aspetos ainda por conhecer quanto ao desempenho de ambas, pretende-se elaborar um estudo do comportamento do betão, onde se fará a substituição de diferentes percentagens de cimento, por cinzas de fundo provenientes de uma central termoelétrica.

2.2. Constituição

Para se obter uma composição a mais compacta possível é necessário conhecer as propriedades do material. No presente caso de estudo os materiais utilizados foram: Cimento Portland CM I 42,5R Cinzas de Fundo e Agregados pétreos (areia e brita 1). É necessário ter em conta o tipo de cimento, mas também para cada percentagem de substituição de CF por Cimento Portland é preciso estabelecer, na constituição do betão, valores mínimos de dosagem de cimento, valores máximos de razão água/ligante e mínima classe de resistência à compressão.

2.2.1. Cimento

Os cimentos, nomeadamente o **Cimento Portland**, constituem-se como os ligantes hidráulicos mais importantes a nível mundial. Segundo a NP EN 197-1: “Cimento é um ligante hidráulico, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água” [55].

O cimento é o elemento fundamental na produção de betão e argamassa, pois é este que tem as características de ligante que manterá coeso todos os componentes do betão. A capacidade que permite o betão ser moldado, e que se apresenta como uma das características mais importantes no betão, é a sua trabalhabilidade, a qual, quando expressa em termos de fluidez, é otimizada com o recurso de adjuvantes na composição do betão. Os adjuvantes com maior eficácia são os superplastificantes, que são substâncias fluidificantes que permitem a redução da quantidade de água numa mistura, mantendo a trabalhabilidade e melhorando outras características, tais como a resistência à compressão. No entanto, a eficácia dos adjuvantes depende não só das suas características e dosagem, mas também da forma como interagem com o cimento [12].

A origem do Cimento Portland resulta da combinação dos óxidos de cálcio, de silício, de alumínio, de ferro e de pequenas quantidades de óxidos de potássio, de sódio, de magnésio, de enxofre e gesso. A tabela 1 apresenta os quatro principais minerais que fazem parte da constituição do cimento

Tabela 1 - Principais minerais pertencentes à constituição do cimento Portland [10]

Minerais		Abreviatura
Alite – Tricálcio Silicato impuro	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Belite – Dicálcio silicato impuro	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrato tetracálcio	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}_3$	C_4AF

Estes quatro principais minerais, constituintes do cimento, reagem com água dando origem a uma variedade de produtos de hidratação. Na tabela 2 é possível verificar os produtos de hidratação resultantes.

Tabela 2 - Produto de Hidratação do cimento Portland [10]

Mineral	Reagente	Produto de Hidratação	Abreviatura
Silicato de cálcio (C3S e C2S)	H ₂ O	Hidróxido de cálcio Ca(OH) ₂	CH
		Silicato de cálcio hidratados	C-S-H
Aluminato tricálcio e Aluminoferato Tetracálcio (C3A e C4AF)	H ₂ O + Gesso	Sulfoaluminato de cálcio - Etringite	AFt
		Monosulfoaluminato de cálcio - Monosulfato	AFm

Quando a água reage com os minerais ocorrem uma série de fenómenos muito complexos. O C3S e o C2S são compostos idênticos contudo, o composto que apresenta uma taxa de reação de hidratação mais alta é o C3S. Assim sendo é este que domina as reações de hidratação com uma percentagem que ronda os 50% [35]. Nos primeiros instantes de hidratação do cimento o Aluminato tricálcio (C3A) e o Aluminoferato Tetracálcio (C4AF) assumem um papel importante devido à elevada velocidade de hidratação que estes apresentam nos instantes iniciais.

2.2.2. Agregados

Os agregados podem ser classificados como grossos ou finos.

Agregados Finos: As areias são consideradas materiais granulados finos. Fazem parte da estrutura base da composição das misturas e são provenientes da desagregação natural, ou então podem ser produzidas por britagem de rochas. Do ponto de vista químico podem-se distinguir dois grupos principais:

- Areias siliciosas
- Areias calcárias.

As areias siliciosas são geralmente de rio ou de areeiro, as areias calcárias resultam do processamento de desperdícios de pedreiras de rocha calcária, Rodrigues [12].

De acordo com Aitcin, 1998 [49] não parece haver qualquer mais valia ou inconveniente particular na escolha de determinado tipo de areia para se utilizar na produção das misturas, inclusivamente a britada, esta tem de estar preparada para a utilização considerando-se preparada quando se encontra limpa e isenta de partículas de silte e argila. O mesmo autor considera que em areias de origem natural é recomendado limitar o teor em partículas grossas, com dimensão superiores a 5 mm para argamassas e betões porque, de um modo geral, estas

partículas podem apresentar menor resistência, o que ao se verificar torna este componente no elo mais fraco.

Azhar *et al*, 2000 [45] avaliou a influência que o tipo de areia exerce nas propriedades físicas do betão fresco e nas características mecânicas do betão endurecido. Fixando a composição do betão, e alterando a utilização do tipo de areia, areias britadas calcárias e de grés e de uma areia natural rolada foi possível avaliar o desempenho das misturas. Mantendo a relação água/ligante de 0.28 e uma quantidade de superplastificante de 2% relativamente a massa de cimento, a trabalhabilidade das misturas, que foi avaliada recorrendo ao ensaio de abaixamento, apresentou variações marginais relativamente ao tipo de areia utilizada. Sendo que foi possível verificar uma tendência muito ligeira para uma menor consistência das composições que tinham na sua composição areia de grés. Relativamente a resistência à compressão, determinada em diversos dias, não foi afetada pela presença de areia calcária ao passo que, sistematicamente para todas as idades, as amassaduras realizadas com areia britada de grés registaram-se decréscimo de resistências à compressão do betão de controlo em cerca de 21% aos 60 dias de idade. Através do estudo dos resultados obtidos que apontam para uma variação da resistência à flexão e do módulo de elasticidade de acordo com a areia utilizada. Os piores desempenhos foram os utilizados com areia de grés. O recurso a areia de grés provocou uma redução média da resistência à flexão à volta de 24%, comparando com o valor semelhante de uma areia calcária. O módulo de elasticidade, também avaliado, comportou uma decréscimo de cerca de 8% quando se utiliza areia calcária e o valor de 13% em misturas com areia de grés, comparativamente ao tipo de betão de controlo que foi produzido com areia rolada [37].

Agregados Grossos: Possuem máximas dimensões superiores a 5mm, contudo não são estabelecidos limites para a dimensão máxima do agregado. As características do agregado grosso podem ser fundamentais para as propriedades do betão. Quando se utilizam agregados de maiores dimensões, estes tornam-se vantajosos quando são requeridas algumas propriedades em especial, por exemplo: módulo de elasticidade, reduzir o volume da pasta e, conseqüentemente, diminuir as variações dimensionais relacionadas com a fluência e a retração [37]. Mas o recurso a agregados com máxima dimensão elevada acarreta alguns inconvenientes, pelo que se deve ter em atenção na escolha do agregado a utilizar: dificulta a colocação em obra, aumenta o risco de segregação e contribui para o acréscimo da possibilidade de existirem partículas com menor capacidade resistente nos agregados.

De acordo com Neville e Aïtcin, 1998 [19] [49], existem vantagens inerentes à utilização de agregados com máxima dimensão da ordem dos 10 mm a 15 mm, destacando-se dois motivos: A redução da concentração de tensões na interface agregado-pasta (provocada pelas diferenças entre os módulos de elasticidade da pasta e dos agregados) que podem originar microfissuração (o ACI Committee 363, 1992, também refere este aspeto) e a maior resistência apresentada pelos agregados de menor dimensão.

Pelos números de estudos realizados é possível apontar como máxima dimensão ótima dos agregados valores de 9.5 mm a 12.7 mm. Contudo, são conhecidos dados em que a utilização de dimensões de 19.0 mm e 25.4 mm foram utilizados com sucesso, dados da ACI Committee 363, 1992 [37]. Almeida, 1993 [48] que estudou o efeito da variação da máxima dimensão do agregado na resistência à compressão de betões de elevado desempenho e os resultados deste estudo refutam parte da literatura consultada, indicando ser mais fácil obter resistências à compressão elevadas com agregados de maior dimensão. A variação da resistência medida em betões com máxima dimensão de 25.4 mm e 19.1 mm foi marginal. Para máximas dimensões inferiores a essas, as quedas de resistência foram substanciais. A alteração da máxima dimensão de 25.4 mm para 9.53 mm provocou diminuições de resistência à compressão de 13.5% a 23.9%, e essa diferença aumentou para máximas dimensões de 4.76 mm.[37]

Quanto à forma do agregado, esta também tem influência na qualidade do betão. De acordo com a Norma NP EN 933-3: 2002 [57] os agregados podem classificar-se como lamelados ou cúbicos. Para que sejam considerados adequados estes têm de possuir uma boa aderência à pasta. No caso dos agregados britados geralmente possuem uma rugosidade superior aos agregados rolados, o que irá ser benéfico na aderência entre a pasta e os agregados. Daqui resulta uma melhor aderência em termos mecânicos e que se fará refletir nos resultados da resistência. Contudo, a trabalhabilidade é afetada negativamente podendo implicar a introdução de uma maior quantidade de água na mistura e contribuir para o indesejável aumento da relação água/ligante, baixando os valores da resistência.

2.2.3. Adições “Clássicas” Tipo I e II

Através das adições é possível obter modificações importantes das propriedades do cimento. Podem-se definir **adições** como materiais inorgânicos que se adicionam ao cimento Portland, substituindo parte do clínquer, com o objetivo de melhorar as suas características e justificado por razões ambientais e económicas. Estas adições têm finura menor ou igual que a do cimento e podem ser adições do Tipo I ou adições do Tipo II, de acordo com a norma (NP EN 197-1) [55]

- **Tipo I** - materiais quase inertes (pode haver alguma reação); utilizam-se quando se pretende aumentar a trabalhabilidade e a compacidade da mistura – FILER CALCÁRIO.
- **Tipo II** - materiais que na presença da água sobressaturada com hidróxido de cálcio, e à temperatura ambiente, ou por si só, podem formar compostos semelhantes aos originados na hidratação do clínquer Portland:

Adições hidráulicas latentes - têm na composição óxido de cálcio – escória de alto forno;

Adições com propriedades pozolânicas - não têm na sua composição óxido de cálcio logo precisam do óxido de cálcio presente no ligante para formar o hidróxido de cálcio – pozolana natural, cinza volante, sílica de fumo.

Fíler calcário

O recurso ao fíler calcário tem sido uma das soluções mais recorrentes para aumentar o volume de finos ao cimento. Adicionando-se o fíler calcário também se melhora o controle da segregação e da deformabilidade do betão fresco [6]. O uso de fíler calcário, para estruturas de betão com elevada massa, que estão sujeitas ao aparecimento de fissuras devido as variações térmicas, tem vindo a despertar interesse porque o pó de calcário inibe o aumento da temperatura do betão quando este é betonado em grandes massas [2].

Cinzas Volantes

Na norma NP EN 450, pode-se encontrar uma definição de cinzas volantes como sendo um pó fino constituído, principalmente, por partículas esféricas e vítreas oriundas da queima de carvão pulverizado, com propriedades pozolânicas e constituído, essencialmente, por SiO₂ e Al₂O₃, contendo no mínimo 25% em massa de SiO₂ reativo.

As cinzas volantes de carvão são comercializadas como subproduto, na indústria do cimento e do betão, quando as suas características físico-químicas cumprem a normalização requerida neste âmbito. Em 2011, a indústria utilizou 70% das cinzas produzidas, reduzindo desta forma o consumo de outros recursos naturais não renováveis. As restantes 30% das cinzas de fundo foram depositadas no aterro de resíduos da Central [51].

As cinzas volantes, nas suas primeiras adições nas misturas de betão, tinham como principal função a substituição de percentagens de cimento, dado que o cimento era um dos elementos mais dispendiosos do betão. Contudo, a sua utilização foi-se tornando comum na composição do betão e surgiram assim algumas evidências nas vantagens de utilizar as cinzas volantes, verificando-se a melhoria de certas propriedades do betão [6]. As características que apresentaram melhorias foram:

- Trabalhabilidade;
- Redução da permeabilidade;
- Melhoria da durabilidade.

Em Portugal existem duas centrais termoelétricas, situadas em Sines e no Pego. Em seguida são apresentados dados recolhidos nas declarações ambientais destas duas centrais, que são considerados relevantes para o estudo.

Sines:

A Central localizada em Sines tem um aterro utilizado apenas para à deposição de resíduos não perigosos provenientes da combustão do carvão, Cinzas e Escórias de Carvão (CEC) mais concretamente as escórias de carvão e as cinzas volantes não conforme.

Este aterro ocupa uma área de aproximadamente 11 hectares com uma lotação de cerca de 1 253 000 t, sendo que, no final de 2011, encontravam-se depositadas 1 089 771 t de resíduos (escórias de carvão e cinzas de carvão), correspondentes a um volume de igual valor numérico [51]. Derivado à situação económica do País, a valorização de escórias, bem como do subproduto cinzas volantes, sofreu uma redução significativa no seu mercado, não tendo a Central de Sines conseguido, no caso das escórias, valorizar qualquer quantidade e, no caso das cinzas volantes, a quantidade depositada em aterro aumentou significativamente. Estes factos traduziram uma inversão no objetivo praticado nos anos anteriores de redução do passivo ambiental da Central, isto é, redução da quantidade de resíduos depositados no Aterro CEC.

Na tabela 3 apresentam-se os quantitativos de escórias de carvão e cinzas de carvão depositadas no aterro CEC.

Tabela 3 - Deposição de resíduos no aterro CEC nos anos 2009 a 2011 [51].

	2009	2010	2011
	Toneladas (t)		
Deposição - Escórias de Carvão	36 750	25 163	26 378
Deposição - Cinzas Volantes de Carvão	12 980	9 063	39 768
Total Saída do Aterro CEC	41 416	45 532	4 160
Total Depositado Acumulado (Escórias de carvão + Cinzas de carvão)	1 039 091	1 027 784	1 089 771

As cinzas volantes de carvão captadas nos precipitadores eletrostáticos são comercializadas para a indústria do cimento e do betão sempre que as suas características físico-químicas estejam em conformidade com a normalização existente. No tabela 4 apresenta-se a quantidade total e específica de subprodutos vendidos nos anos 2009 a 2011 na central do Pêgo.

De acordo com os dados, a produção e venda de cinzas volantes em 2010 e 2011 regista uma redução em relação a 2009, consentânea com a redução do funcionamento da Central, e para 2011 acresce a redução da procura da cinza volante por parte do mercado [51].

Pêgo:

Salienta-se como política da Central Termoelétrica do Pêgo a redução, sempre que possível, da produção de resíduos e a valorização, preferencialmente, à eliminação dos mesmos. Como resultado das actividades da Central são produzidos resíduos de diversos tipos, sendo a maior quantidade não perigosos [50]. Estes são separados na fonte, armazenados temporariamente na central em locais adequados, antes do seu encaminhamento para destinatários autorizados.

As cinzas volantes de carvão são comercializadas como subproduto na indústria do cimento e do betão, uma vez que as suas características físico-químicas cumprem a normalização requerida neste âmbito.

Na tabela 4 que se segue podemos ver as quantidades de cinzas volantes produzidas, e a sua valorização para os anos compreendidos entre 2009 - 2011.

Tabela 4 - Produção e valorização de cinzas volantes de carvão entre 2009 – 2011 [50]

Cinzas volantes de carvão	2009	2010	2011
Totalidade de cinzas produzidas (kton)	154	64	75
Quantidade específica, t/GWh)	45	35	30
Cinzas depositadas no aterro de resíduos, %	25	9	30
Cinzas usadas na indústria, %	75	91	70

Verifica-se uma redução da venda de cinzas, com conseqüente aumento de deposição das mesmas em aterro, devido a uma redução do seu escoamento causada pela crise no setor da construção civil.

A introdução de cinzas volantes afeta o desempenho do betão, tanto no estado fresco como no estado endurecido, o que se reflete nas características mecânicas e no seu comportamento a longo prazo. Revela-se a importância de se efectuarem estudos que permitam aferir as propriedades do betão para que se normalize os processos de fabrico.

Escórias de Alto Forno

As escórias de Alto Forno pertencem as adições do tipo II (hidráulica latente) e resultam do arrefecimento rápido de uma escória fundida de composição apropriada (é o caso da escória obtida da fusão do minério de ferro no alto forno) [10]. A figura 1 mostra o esquema de operação de um alto forno.

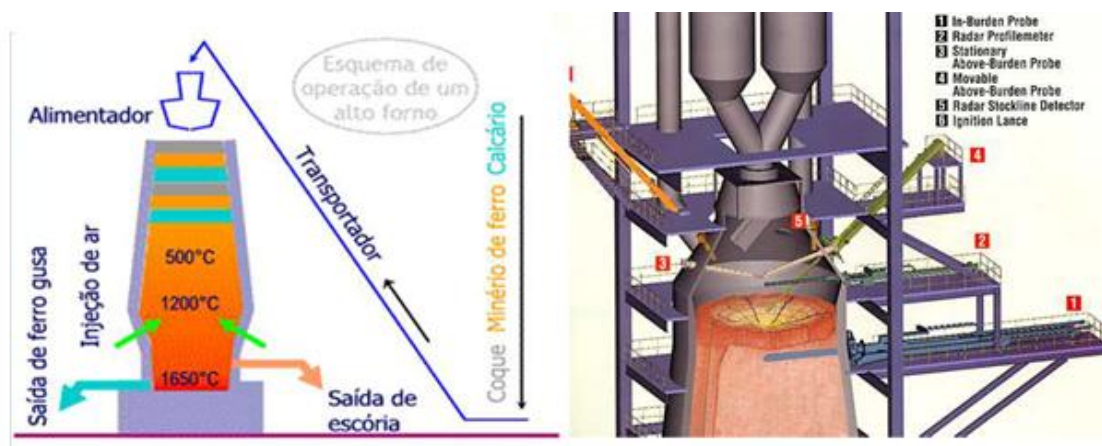


Figura 1 – Esquema de operação de um alto forno [36]

A utilização das escórias de alto forno podem ter diversas aplicações na indústria da construção:

- Em substituição do clínquer na produção de cimento (não assume papel de adição);
- Moída em conjunto com o clínquer;
- Adicionada no fim da moagem do clínquer;
- Como adição ou substituto parcial do cimento (ativador);
- Agregados para betão ou estradas (Escória Bruta de Alto Forno);
- Agregados leves para betão (escória expandida);
- Isolamento térmico (lã de escória).

As vantagens que se obtêm com a utilização das escórias de alto de alto forno são a nível:

- Ambiental;
- Económica;
- Durabilidade.

Sílica de Fumo

A sílica de fumo são adições do tipo II subprodutos da produção de metal silício ou de ligas de silício (ferrosilício), provenientes da **redução de quartzo de elevada pureza pelo carvão em fornos de arco elétrico a elevadas temperaturas** (ex: produção de silicones). A sílica de fumo é muitas vezes utilizada sob a forma de pasta por ser um material difícil de trabalhar na forma de pó, pois tende a aglomerar [33].

A adição de sílica de fumo no cimento provoca:

- Reações pozolânicas aceleradas nos primeiros dias;
- Tem um efeito de filler na pasta de cimento que provoca uma diminuição no volume de vazios e melhora as características da porosidade. Como consequência disto tem-se uma menor permeabilidade, resultando numa melhoria da durabilidade;
- Reduz a exsudação no betão fresco - obriga a cuidados de cura (superfície húmida);
- Aumenta a necessidade de água para igual trabalhabilidade;
- Aumento da resistência à compressão.

Pozolanas

As pozolanas são adições do tipo II, substâncias naturais de composição siliciosa ou sílicoaluminosa ou uma mistura de ambas. Por si só não apresentam propriedades aglomerantes ou hidráulicas mas, quando finamente moídas e em presença da água, reagem à temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio dissolvido, formando compostos similares aos formados no endurecimento dos ligantes hidráulicos (silicatos e aluminatos de cálcio) que desenvolvem resistência.

As pozolanas podem ser de origem natural, ou seja, de proveniência directa do solo. Podem ser materiais vulcânicos provenientes de magmas normalmente ácidos (ricos em sílica) que solidificam rapidamente durante uma erupção e ficam em estado amorfo. Por outro lado, podem ser artificiais, sendo tratados com misturas de materiais de origem vulcânica, argilas caulínicas (metacaulino), xistos (T) ou rochas sedimentares ativadas mediante tratamento térmico.

Um dos efeitos mais evidentes da pozolana numa composição de betão consiste na redução do calor de hidratação, sem que a tensão de rotura desça na mesma proporção. Isto é possível através da substituição de cimento Portland [46].

2.2.4. Adições Recentes (Inclusão de cinzas de fundo na composição)

Cinzas de Fundo

As Cinzas de Fundo são um produto resultante da queima do carvão. Estas são recolhidas no fundo da câmara de combustão. No cinzeiro, são arrefecidas por água e transportadas por camião para o aterro de resíduos da Central.

As CF das centrais de incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são constituídas, sob o ponto de vista mineralógico, por uma mistura de óxidos silico-aluminados de cálcio e de sódio, nos quais se encontram também óxidos de ferro, chumbo, zinco, magnésio e cobre [1].

Nos últimos anos, as escórias têm sido valorizadas na indústria do cimento, reduzindo-se assim o passivo ambiental associado ao aterro de resíduos. Em 2011, valorizaram-se 5 960 toneladas de escórias, que correspondem não só à totalidade das escórias produzidas nesse ano, mas também a algumas que estavam depositadas em aterro. Tal como para as cinzas volantes, a quantidade de cinzas de fundo valorizadas em 2011 foi inferior quando comparada com o ano de 2010, devido à menor procura no setor da construção civil [50].

A exploração de cimentos provoca um enorme impacto ambiental que poderia ser consideravelmente reduzido se fosse possível adicionar as cinzas de fundo de modo viável, como aditivos minerais. Nesse caso, as cinzas de fundo, que são eliminados em grande quantidade em todo o mundo, poderiam ser convertidas num recurso útil para o fabrico de produtos de betão de qualidade.

A figura 2 que se segue, mostra um esquema da produção de energia a partir do carvão. Pode-se observar no ponto 13 as cinzas volantes. No ponto 14 estão as escórias, onde se inclui as CF, que são retiradas do fundo da câmara de combustão são arrefecidas por água e, por fim, transportadas por camião para o aterro.

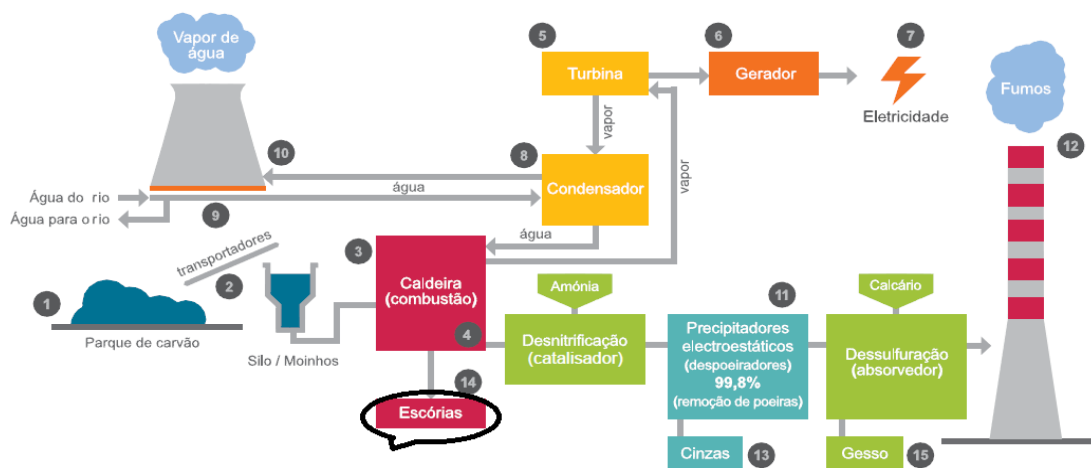


Figura 2 - Produção de Energia [50]

Na Central do Pego utiliza-se como combustível o carvão. Proveniente de várias partes do mundo, predominantemente África do Sul e Colômbia, o carvão chega ao Porto de Sines e daí é transportado por caminho-de-ferro até à Central do Pego.

2.2.5. Adjuvantes

Pode-se definir adjuvante como um material adicionado durante a amassadura do betão em quantidades que não exceda 5% em massa do teor de cimento do betão, para modificar determinada propriedade do mesmo no estado fresco ou endurecido. Segundo o LNEC E-374 existem vários tipos de adjuvantes baseados na sua função principal:

- **Adjuvante redutor de água/plastificante:** adjuvante que, sem afetar a trabalhabilidade, permite a redução da dosagem de água de uma dada amassadura, ou que, sem

modificar a dosagem de água, aumenta a trabalhabilidade, ou que produz simultaneamente os dois efeitos;

- **Adjuvante retentor de água:** adjuvante que reduz a perda de água através da redução da exsudação;
- **Adjuvante introdutor de ar:** adjuvante que permite incorporar durante a operação de amassadura uma quantidade controlada de micro-bolhas de ar uniformemente distribuída e mantê-la após endurecimento;
- **Adjuvante acelerador de presa:** adjuvante que permite diminuir o tempo de transição do estado plástico para o estado rígido do betão;
- **Adjuvante acelerador de endurecimento:** adjuvante que acelera o desenvolvimento das resistências iniciais do betão, afetando ou não o tempo de presa;
- **Adjuvante retardador de presa:** adjuvante que prolonga o tempo de transição do estado plástico para o estado rígido no betão;
- **Adjuvante hidrófugo:** adjuvante que reduz a absorção capilar do betão endurecido.

Os adjuvantes são produtos que quando adicionados ao betão provocam as modificações pretendidas nas características normais, influenciam as propriedades físicas e químicas da superfície mecânica do betão. Estes, quando utilizados de forma criteriosa, são uma mais-valia para o betão. Contudo não se deve descurar a sua utilização e assumir que o emprego de adjuvantes substitui a má formulação de um betão [47].

Nos últimos anos, com o conhecimento das potencialidades dos adjuvantes e tendo em conta o custo do cimento, o recurso a este produto é uma solução mais vantajosa, apesar do baixo custo nem sempre se verificar. Mas existem vantagens associadas à sua utilização como: redução de mão-de-obra para efetuar a compactação/ ou nas melhorias da durabilidade [39].

2.3. Desempenho no Estado Fresco

No desempenho do estado fresco uma das propriedades a considerar é a trabalhabilidade da mistura. Uma característica importante para definir esta propriedade é a granulometria dos agregados adicionados na composição. De um modo geral a adição de CF nas composições de argamassas e betões melhora o seu comportamento.

Argamassa:

Consistência por espalhamento



Figura 3 - Ensaio da mesa de espalhamento

A norma que serviu de guia para a realização dos ensaios da mesa de espalhamento foi a EN 1015-3 [58]. A presente parte dessa norma tem por objetivo definir um método utilizado para determinar a consistência da argamassa produzida no estado fresco.

Com os dados deste ensaio é possível estimar o tempo em que a argamassa se mantém trabalhável desde que se produz a amassadura até à altura que será aplicada em obra. Este ensaio permite, ainda, saber se é necessário alterar algumas das relações que afetam a trabalhabilidade das argamassas, seja através do aumento da relação água/ligante seja pela adição de superplastificantes.

Para garantir as condições mais favoráveis para realizar este ensaio, uma vez que é um ensaio com uma sensibilidade considerável, os procedimentos adotados foram sempre seguidos pela mesma ordem. O modo de mistura dos componentes, o tempo de amassadura, o modo de colocação e compactação da argamassa no molde e o tempo de cadência das pancadas. Para minimizar o erro todos os ensaios foram realizados pelo mesmo operador.

Massa volúmica das argamassas no estado fresco de acordo com EN 1015-6

Para determinar a massa volúmica aparente das composições no estado fresco é especificado o método a utilizar na norma EN 1015-6 [59], que consiste na pesagem de um recipiente rígido (com peso e volume previamente conhecidos). Seguindo as indicações da norma, a argamassa no estado fresco foi compactado dentro de um recipiente rígido e estanque, de volume e massa conhecidos, sendo então pesado.

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{v} \quad (1)$$

Onde :

ρ – Massa volúmica aparente (kg/m³)

m_2 – Massa do recipiente com argamassa (kg)

m_1 – Massa do recipiente vazio (kg)

V – Volume do recipiente (m³)

Betão:

Consistência por espalhamento

Para se proceder à avaliação da mistura do betão no estado fresco, o ensaio realizado será o plano inclinado, sendo também determinada a massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco.



Figura 4 - Ensaio Plano inclinado

A figura 4 mostra o ensaio do plano inclinado realizado durante a campanha de ensaios. Depois da amassadura do betão, é feita uma toma para se realizar este ensaio. O ensaio do plano inclinado consiste em colocar uma amostra de betão num molde cilíndrico, com 120 mm de

diâmetro e altura de 60 mm sobre uma placa horizontal de uma dada aspereza. Depois levanta-se a placa lentamente (ao longo de 10 s) para iniciar o fluxo. Foram feitos ensaios em diferentes períodos de tempo respectivamente 5, 15, 30, 45 e 60 minutos Este ensaio é utilizado para determinar a tensão de cedência estática ($IP\tau$), em Pa, como se indica na expressão seguinte:

$$IP\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

onde:

ρ - massa volúmica do material testado em kg/m^3 ,

g - é a constante gravitacional, que é igual a $9,8 \text{ m/s}^2$,

h - é a altura em, mm,

α - é o ângulo crítico do plano inclinado em, graus

2.4. Desempenho no Estado Endurecido

2.4.1. Resistência mecânica

Para avaliar as argamassas e o betão, com as respetivas percentagens de adição em termos mecânicos, foram realizados ensaios de flexão e compressão, em três idades diferentes. Para realizar os ensaios de flexão e compressão das argamassas foram elaborados provetes prismáticos com $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$. Para os ensaios de resistência mecânica do betão foram realizados provetes cúbicos com $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ para os ensaios de compressão e provetes cilíndricos com 150 mm diâmetro e de 50 mm de espessura para os ensaios de compressão diametral.

As imagens que se seguem mostram os ensaios de resistência mecânica. A figura 5 mostra o provete na prensa para o ensaio de compressão de cubos de betão, na figura 6 pode ver-se a prensa que permite realizar os ensaios de flexão e compressão das argamassas.



Figura 5 - Ensaio compressão cubos



Figura 6 - Ensaio compressão e flexão - argamassa

2.4.2. Durabilidade

Uma das causas dos problemas relacionados com a durabilidade das estruturas é a acção dos agentes atmosféricos. Outro fator relevante é a utilização a que as mesmas estão sujeitas. Quando estes fatores atuam podem afetar o desempenho dos elementos estruturais de betão armado em dois níveis: ao nível do betão – ataque químico sobre os agregados ou sobre os constituintes da pasta cimento – ou ao nível das armaduras de aço – corrosão electroquímica.

Para melhor compreender os fenómenos relacionados com a durabilidade é necessário: identificar as substâncias agressivas, como se movimentam e acumulam relativamente à estrutura; determinar quais os mecanismos de transporte e quais os parâmetros que controlam esses mecanismos; determinar quais as reações envolvidas na deterioração e quais os parâmetros que controlam essas reações [54].

CARBONATAÇÃO

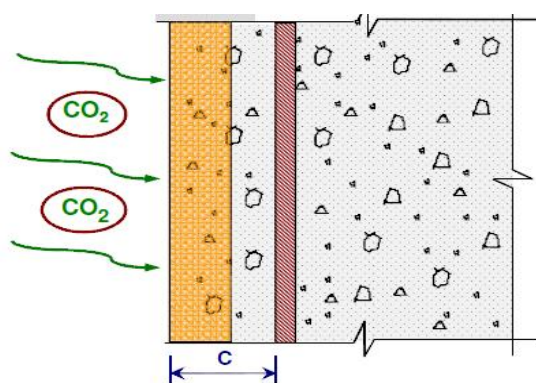


Figura 7 - Penetração de CO2 [54]

Para ocorrer a penetração de CO_2 no interior do betão é preciso que exista um gradiente de concentração deste agente na atmosfera e as propriedades físicas do betão sejam superadas pelo processo de difusão do CO_2 . Os parâmetros principais são: a **qualidade da camada de betão de recobrimento** e este parâmetro determina a resistência do betão à penetração do CO_2 . Para se obter um betão de recobrimento de qualidade é preciso primar na composição, compactação e cura do betão. O outro parâmetro fundamental a ter em conta é o **ambiente de exposição** que irá determinar o teor de humidade do betão e o teor de CO_2 do ar em contacto com o betão. Este é um fator muito relevante na influência da velocidade de carbonatação do betão.

COMPOSIÇÃO DO BETÃO

- Razão água-cimento: Este parâmetro controla a dimensão e continuidade da estrutura porosa do betão;
- Quantidade de cimento: Este parâmetro determina a quantidade de substâncias carbonatáveis do betão;
- Adições: As adições devem ser encaradas como um produto a adicionar ao betão

CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO

- Determinação do teor de humidade do betão de recobrimento: A difusão do CO_2 na água é cerca de 10^4 vezes menor que no ar e necessário uma certa quantidade de água para que se desenvolva a reação de carbonatação.

CLORETOS

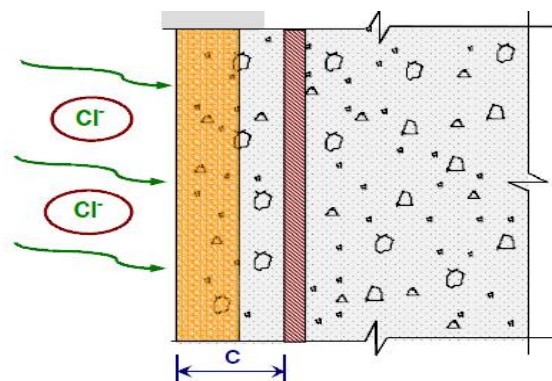


Figura 8 - Penetração de Cr [54]

O aluminato tricálcico (C_3A) e aluminoferrato tetracálcio (C_4AF) são dois elementos do clínquer, compostos pertencentes ao cimento, com capacidade para fixar os cloretos livres. Logo, as adições em quantidades significativas, fazem com que o ligante contenha menor teor de C_3A , o que se reflete na diminuição da capacidade de fixação dos cloretos. As cinzas, escórias e sílica de fumo diminuem a permeabilidade do betão, o que limita a penetração dos cloretos. De acordo com a bibliografia [53] a presença de adições tem interferência positiva no tempo que medeia entre a penetração dos cloretos e a despassivação das armaduras.

CORROSÃO

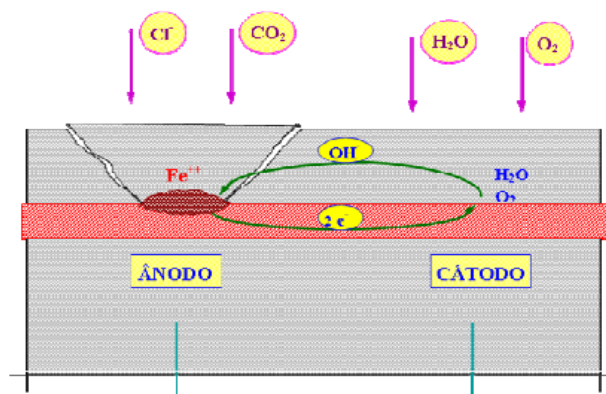


Figura 9 - Camada de recobrimento [54]

O betão possui uma boa proteção ao aço devido à sua constituição, propriedades físicas e químicas. Relativamente às características físicas o betão tem uma baixa permeabilidade e a camada de recobrimento das armaduras confere uma barreira para os agentes agressivos presentes no ambiente .

Em relação às características químicas o betão, após a hidratação do cimento, adquire alguns elementos que lhe proporcionam um ambiente bastante alcalino - são formados os hidróxidos de cálcio de sódio e de potássio. A presença da água nos poros do betão vai provocar a dissolução destes elementos, o que se reflete na produção de uma solução de pH que se situa nos 12,5 e 13,5, de acordo com Bakker 1988 [4]. Com estes valores de alcalinidade é possível formar-se uma fina camada de óxidos e hidróxidos de ferro à volta das armaduras, impedindo que os iões de ferro, Fe^{2+} atuem sobre as armaduras. Assim sendo, apenas quando se der a despassivação das armaduras, é possível ocorrer o mecanismo de corrosão, que só acontece quando há uma rotura da película [3].

2.5. Observações Finais

Devido à evolução exponencial da população e a procura de satisfazer as necessidades do Homem, surgem problemas relacionados com o meio ambiente, pois a exploração dos recursos naturais não renováveis, nomeadamente para a construção das habitações, constitui um problema a ter em conta no dimensionamento das populações. A viabilidade da inclusão das CF, nas incorporações de argamassa e betões, será um contributo significativo para a produção de argamassa e betões mais amigos do ambiente.

Visto que é uma mais-valia aprofundar o conhecimento do comportamento da incorporação de Cinzas de Fundo em argamassas e betões, dado que se verifica uma diminuição na emissão de CO₂ para a atmosfera e dá-se utilidade aos subprodutos da indústria, importa aumentar o conhecimento referente aos produtos que podem ajudar a diminuir o consumo de cimento.

Posto isto, a presente dissertação visa aumentar os conhecimentos que se tem em relação ao desempenho de betões com adição de Cinzas de Fundo. Através de ensaios de caracterização das argamassas e betões no estado fresco e no estado endurecido.

3. Comportamento, a curto e longo prazo das argamassas e betões com incorporação de Cinzas de Fundo, (CF).

3.1. Introdução

O presente capítulo tem como objetivo a exposição do programa experimental, onde se incluem também, os procedimentos para a produção de argamassas e betões com adição de CF dos ensaios experimentais.

As normas e documentação técnica utilizada no âmbito dos ensaios de laboratório visam garantir a fiabilidade dos resultados obtidos garantindo, assim, o cumprimento dos procedimentos adotados na execução de todos os ensaios. Este facto permite comparar os resultados experimentais devidamente parametrizados e padronizados.

3.2. Programa experimental

A finalidade deste programa experimental visa avaliar propriedades a curto e longo prazo das diferentes composições de argamassa e betões com adição de CF, relacionada com a sua resistência mecânica e durabilidade.

De seguida apresenta-se os materiais escolhidos, depois será descrito o modo de preparação e produção das respetivas composições de argamassa e betões, e finalmente, são descritos os ensaios efetuados no laboratório a fim de se obter o seu comportamento no estado fresco e no estado endurecido.

3.2.1. Materiais

“A mistura dos inertes do betão não pode ser arbitrária. Deste muito cedo que se compreendeu que era indispensável fazê-la de modo a obter um sólido o mais compacto possível” [35].

Para se obter uma composição com maior compacidade possível é necessário conhecer as propriedades do material. No presente caso de estudo os materiais utilizados foram:

Ligantes: Cimento Portland CEM I 42,5R (SECIL) e

:Cinzas de Fundo provenientes da central de Sines;

Agregados fino: areia siliciosa;

Agregados grosso: brita 1;

Água potável.

Na tabela 5 e na tabela 6 encontra-se descrito a composição mineralógica presente no cimento e nas cinzas de fundo utilizadas. E para complementar nos anexos A pode-se consultar a ficha técnica do cimento e do superplastificante utilizado no estudo.

Tabela 5 - Propriedades principais do cimento Portland CEM I [8]

Minerais		Abreviatura	Percentagem
Alite – Silicato Tricálcio	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C ₃ S	20% a 80%
Belite – silicato bicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C ₂ S	10% a 55%
Celite - Aluminato Tricálcio	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A	0% a 15%
Felite - Aluminoferrato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF	5% a 15%

Tabela 6 - Composição química Cinza de fundo [24]

Minerais	Composto (%)	Escória EA
Dióxido de silício	SiO ₂	55,9
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	22,6
Óxido de cálcio	CaO	6,9
Óxido de férrico	Fe ₂ O ₃	6,7
Óxido de magnésio	MgO	4,9
Óxido de potássio	K ₂ O	1,4
Dióxido de titânio	TiO ₂	0,8
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	0,3
Manganato	MnO	0,1
Óxido sulfúrico	SO ₃	0,3
Óxidos de cobre	CuO	---

3.2.2. Composição das argamassas e betões

Para esta investigação não foi necessário definir características relativas à formulação das diversas composições, tanto para as argamassas como para os betões, Isto porque estas características e os valores da composição base já foram determinados num trabalho paralelo com o colega da faculdade.

Sendo assim, as argamassas desenvolvidas nesta investigação foram fabricadas tendo em conta a proporção, em massa, de 1:2. Desta proporção resultou uma argamassa efectuada para a composição base (CB), com 2kg de areia para 1kg de ligante (apenas cimento Portland CEM I 42,5R). Tendo em vista o objetivo de substituir igual massa de cimento por CF – composição com adições de 10; 15 e 20 por cento de CF – em percentagens de massa do cimento, parte da massa de cimento é substituída pelas CF, tendo-se sempre a preocupação de manter a proporção do ligante com o agregado.

No que se refere a relação Água/Ligante para as argamassas a razão A/L foi de 0,3, mais concretamente foi utilizado para estas composições 300ml de água potável. Foi feita a opção de adicionar a água na mistura em duas fases. Na primeira foi introduzido 270ml cerca de 90% da água e na segunda fase foi adicionada os restantes 30ml da água.

Foi testado uma composição com 0,4% de superplastificante, tal como a percentagem utilizada para o estudo do betão, mas esta não apresentou uma consistência no espalhamento tendo sido aumentada a percentagem de superplastificante para 4% em relação a massa de ligante onde se verificou uma melhor eficiência da mistura. O superplastificante utilizado foi POWERFLOW 1110 para aumentar a trabalhabilidade da argamassa produzida.

Na tabela 7 encontra-se a dosagem das componentes das argamassas estudadas.

Tabela 7 - Dosagens das Componentes da Argamassa

Composição Argamassas	Cimento (g)	Areia (g)	Água (ml)	Super-Plastificante (g)	Cinzas de fundo (g)
CB	1000	2000	300	40	0
CF – 10%	900	2000	300	40	100
CF – 15%	850	2000	300	40	150
CF – 20%	800	2000	300	40	200

Relativamente as composições de betão desenvolvidas nesta investigação foram fabricada tendo em conta a proporção, em massa, de 1:2:2. Desta proporção resulta um betão produzido para a composição base (CB), com 40kg de brita 1 e 37kg areia para 21kg de ligante (onde o ligante é constituído apenas por cimento Portland CEM I).

Tal como no estudo das argamassas também para o betão mantém-se o objetivo de substituir igual massa de cimento por CF, a massa de cimento é substituída com adições de 10; 15 e 20

porcento de igual massa de CF, tendo-se sempre a preocupação de manter a proporção do ligante com o agregado.

A dosagem de água utilizada para a mistura de betão foi de uma razão Água/Ligante de 0,4. A água na mistura foi adicionada em duas fases. Na primeira foi introduzido cerca de 90% da água e na segunda fase foi adicionada os restantes 10% da água.

A quantidade de superplastificante adicionada nas composições de betão em relação a massa de ligante foi de 0,4%. O superplastificante utilizado foi o MC POWERFLOW 1110 que tem como finalidade melhorar a trabalhabilidade da mistura.

Na tabela 8 encontra-se estruturado a dosagem das componentes de betão estudadas.

Tabela 8 - Dosagens das Componentes do Betão

Composição Betão	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (ml)	Super-Plastificante (kg)	Cinzas de fundo (kg)
CB	21,69	40,24	37,19	9,76	0,08	0
CF – 10%	19,52	40,24	37,19	9,76	0,08	2,17
CF – 15%	18,44	40,24	37,19	9,76	0,08	3,25
CF – 20%	17,35	40,24	37,19	9,76	0,08	4,34

3.2.3. Preparação das argamassas e betões

Para a produção de argamassa os documentos técnicos utilizadas foram as normas NP EN 196-1 [60] e EN 1015-2/A1 [61]. Nestas normas encontram-se descrito os procedimentos a adotar, tendo em vista perceber a influência da substituição do cimento Portland CEM I, por diversas percentagens de Cinzas de fundo. O procedimento adotado, aquando da produção das misturas, foi sempre constante, resultando apenas na alteração das dosagens das misturas.

No presente trabalho identificou-se a ordem pela qual se iria efetuar a mistura dos constituintes, bem como os seus tempos de mistura. Teve-se em consideração o tempo de introdução de constituintes, os equipamentos a utilizar e a técnica adotada. Todos os fatores referidos têm influência nas propriedades das argamassas, no seu estado fresco e no seu estado endurecido [5].

Material utilizado para produção de argamassa:

- Misturadora mecânica;
- Tabuleiros metálicos;
- Proveta para as proporções de água e superplastificante;
- Pá de pedreiro;
- Cronómetro;
- Balança.

Procedimento adotado para amassadura da argamassa:

- Preparar as dosagens dos componentes, e as quantidades de água da amassadura e superplastificante;
- Na cuba colocar os componentes e misturar o ligante com a areia e a respetiva percentagem de cinza de fundo até esta estar homogenia;
- Colocar a cuba na misturadora e adicionar água;
- Ligar a misturadora;
- Passado um minuto após o início da amassadura adicionar o SP;
- Colocar a restante porção de água, três minutos após o início da amassadura;
- Desligar a misturadora, 5 minutos após o início da amassadura.



Figura 10 – Equipamentos e utensílios para produção de provetes de argamassa

Material utilizado para produção de betão:

- Betoneira;
- Recipientes para areia, cimento, CF e brita 1;
- Proveta para as proporções de água e superplastificante;

- Pá;
- Cronómetro;
- Balança.

Procedimento adotado para de amassadura do betão:

- Efectuar as pesagens dos componentes e as quantidades de água da amassadura e super-plastificante;
- Colocar na betoneira os componentes (brita, areia e cimento CMI mais a CF) e misturar até esta estar homogenia;
- Adicionar a maior porção de água, cerca de 80% e ligar o cronómetro;
- Ligar a betoneira;
- Passado um minuto após o início da amassadura adicionar o SP;
- Colocar a restante porção de água, três minutos após o início da amassadura;
- Desligar a betoneira, cinco minutos após o início da amassadura.



Figura 11 - Produção de provetes de betão

3.3. Ensaio no estado fresco

3.3.1. Consistência por espalhamento

A avaliação das propriedades das argamassas e dos betões, produzidos no estado fresco, é realizada pelo ensaio de consistência por espalhamento para as argamassas de acordo com a EN 1015-3 [58] e pelo ensaio do plano inclinado para o betão [38], e foi determinada a massa volúmica pela norma EN 1015-6 [59] para todas as composições.

Material utilizados para argamassa:

- Mesa de espalhamento;
- Molde para a argamassa;
- Pilão de compactação;
- Paquímetro digital;
- Colher de pedreiro;
- Esponja húmida.

Procedimento adotado para o ensaio:

- Humedecer a mesa de espalhamento e Colocar o molde centrado na mesa de espalhamento;
- Depois de centrado o molde Introduzir a argamassa até $\frac{1}{2}$ do molde;
- Compactar através de 15 pancadas com o pilão de compactação, compactar toda a área atingindo a argamassa em toda a sua profundidade;
- Introduzir a argamassa até exceder ligeiramente a totalidade do molde;
- Compactar novamente com 15 pancadas através do pilão de compactação em toda a área e atingindo a argamassa em toda a sua profundidade;
- Com a espátula rasoilar o excesso de argamassa;
- Limpar o exterior do molde e da mesa de espalhamento, com um pano molhado;
- Retirar o molde lentamente, na vertical;
- Rodando a manivela da mesa de espalhamento, a velocidade de uma pancada por segundo perfazendo 20 pancadas durante 20 segundos;
- Medir o diâmetro de espalhamento em três direções, com o paquímetro digital utilizando as marcações assinaladas na mesa de espalhamento.

Para determinar a trabalhabilidade das composições de betão foi utilizado o ensaio do plano inclinado. Este ensaio foi realizado de acordo com o artigo [38] e com o seu resultado é possível saber a tensão de cedência das composições de betão.

Matéria utilizado para betões:

- Molde cilíndrico com 120 mm diâmetro por 60 mm de altura;
- Colher de pedreiro;
- Uma base horizontal;
- Um transferidor;
- Uma régua metálica;
- Um cronómetro.

Procedimento adotado para o ensaio:

- Colocar o molde na base horizontal;
- Introduzir o betão no molde;
- Com a espátula rasoar o excesso de betão;
- Limpar o exterior da base com um pano molhado;
- Retirar o molde lentamente na vertical;
- Colocar o transferidor no centro de rotação e levantar a placa até se iniciar o fluxo;
- Depois regista-se o valor do ângulo em graus, o diâmetro e a altura do provete em mm;
- Repete-se o ensaio para todas as composições de betão diferentes efetuando-se medições aos 5, 15, 30, 45 e 60 minutos.

3.3.2. Massa volúmica

Para a realização deste ensaio utilizou-se a metodologia da norma EN 1015-6 [59]. Esta norma específica o método para a determinação da massa volúmica de uma argamassa realizada com recurso a um recipiente de massa e volume conhecidos.

Utensílios utilizados:

- Balança;
- Recipiente;
- Pá de pedreiro;
- Varão de aço.

Procedimento adotado para realizar o ensaio:

- Pesagem do recipiente (m1);
- Colocação da argamassa no recipiente com auxílio de uma pá de pedreiro;
- Compactação com o varão de aço.
- Pesagem do recipiente com a argamassa (m2).

3.4. Preparação dos provetes

Depois de determinada a caracterização das argamassas e dos betões no estado fresco segue-se a produção de provetes para serem estudadas as características no estado endurecido. De acordo com os ensaios a realizar, para as argamassas será necessário produzir provetes prismáticos e para o betão serão produzidos provetes cúbicos e cilindros.

Os provetes prismáticos foram feitos com recurso aos moldes metálicos previamente limpos e bem lubrificados com óleo descofrante, que permitem obter três provetes prismáticos com dimensões 160x40x40 mm cada. Estes provetes serviram para os ensaios do módulo de elasticidade dinâmico, resistência a flexão por tração, resistência a compressão, ensaio de capilaridade e porosidade aberta. Para o betão foram produzidos provetes cúbicos e cilíndricos com dimensões de 150x150x150 mm e 150x300 mm, respectivamente. Os moldes foram preparados com óleo descofrante para receber o betão.

Depois da amassadura a composição de argamassa foi colocada nos moldes com o auxílio de uma colher de pedreiro e para homogeneizar o espalhamento foram aplicadas 10 pancadas com o pilão de compactação. Seguidamente os provetes são colocados na mesa de compactação e aplicadas 20 pancadas.

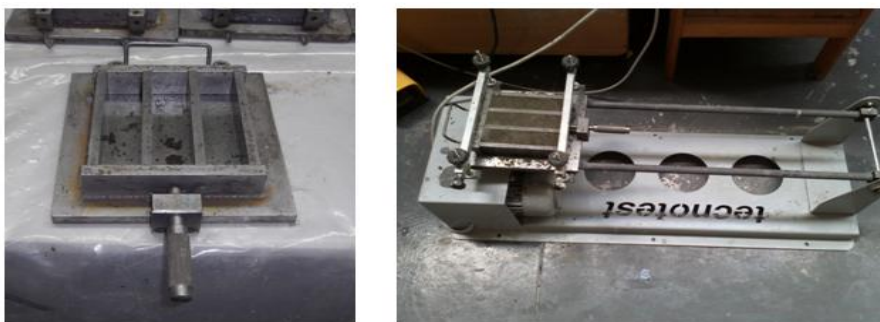


Figura 12 - Molde para fabrico dos provetes e compactador de argamassa

Após a compactação os provetes são colocados numa superfície plana e armazenados com uma película plástica para mediar a diferença de humidade que existe entre o provete e o ambiente. Os provetes serão desmoldados 24 horas após a sua compactação depois são identificados com a data de fabrico e a composição CF.



Figura 13 - Provetes de argamassa

Relativamente aos provetes de betão após a amassadura na betoneira os moldes foram cheios com o betão produzido, e vibrados para retirar o ar existente, este processo é controlado pela libertação de bolhas de ar do seu interior. Depois de compactados os provetes permanecem nos moldes durante 24 horas, sendo então desmoldados e identificados.



Figura 14 - Produção de provetes de betão

3.5. Ensaio no estado Endurecido

Para avaliar as propriedades no estado endurecido das argamassas foram feitos ensaios aos 28, 60 e 120 dias e para os betões foram feitos ensaios aos 28 e 60 dias.

3.5.1. Módulo de elasticidade dinâmico para argamassa e betão

O ensaio módulo de elasticidade dinâmico consiste na determinação da velocidade de propagação de um impulso ultrassónico entre dois pontos de medida. O aparelho de ultrassons que a Escola tem é constituído por um transdutor eletroacústico ligado a um circuito eletrónico, que recebe um estímulo para oscilar mecanicamente. O circuito eletrónico emite pequenos impulsos elétricos ao transdutor excitando-o na sua frequência natural. Esta vibração gera os impulsos, transformados em ondas de energia mecânica pelo transdutor-transmissor, que deve estar em contacto com a superfície do betão. Um transdutor recetor similar é acoplado ao provete a uma distância conhecida do transdutor-emissor e a energia mecânica é novamente convertida em impulsos elétricos da mesma frequência.[23]

Os ensaios devem ser efetuados em superfícies lisas, sendo conveniente usar uma massa de contacto entre os transdutores e a superfície, de modo a melhorar a transmissão acústica. Como se pode ver na figura 15 realizada neste estudo:



Figura 15 - Ensaio do Módulo Elasticidade Dinâmico

A metodologia que se segue para a medição da velocidade de impulsos ultrassónicos encontra-se normalizada na norma NP EN 12504-4 [62].

Material utilizado para o ensaio

- Unidade central, onde se encontra o gerador de impulsos eléctricos;
- Circuito de leitura;
- Dois transdutores.
- Craveira;
- Balança.
- Gel

Procedimento de ensaio

O primeiro passo foi pesar os provetes, seguidamente registou-se o comprimento na direção em que se irá proceder a propagação das ondas. Estes são valores necessários para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.

Colocou-se um gel nas extremidades mais afastadas do provete, antes de se colocar os sensores, assim estes não ficam em contacto direto com o betão/argamassa. Depois carregar na tecla play e obtém-se os valores da velocidade percorrida pelos impulsos ultrassónicos, estes valores são apresentados em m/s.

$$E = \left(\frac{V}{1000} \right) \times \rho \quad (3)$$

Onde:

E – módulo de elasticidade dinâmico, (MPa)

V – impulsos ultrassónicos, (m/s)

ρ – massa volúmica aparente, (kg/m³)

3.5.2. Resistência à flexão - argamassa

O ensaio de resistência à flexão é um ensaio destrutivo, foi executado de acordo com a norma EN 1015-11 [63]. Foram produzidos três provetes de cada composição para que se possa avaliar a evolução da resistência à flexão em diferentes idades, 28, 60 e 120 dias. Os provetes utilizados neste ensaio foram os mesmos provetes utilizados no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

Para se executar este ensaio foi utilizado uma prensa de flexão/compressão, figura 6. A prensa é automática e necessita apenas de se introduzir as dimensões do provete, 40x40x160 mm, a velocidade de ensaio 0,12 MPa/s, a distância entre os apoios sobre o qual o provete é colocado 100mm,

O equipamento utilizado calcula automaticamente a resistência à flexão de cada provete de argamassa, em MPa.

3.5.3. Resistência à compressão – argamassa

Para determinar a resistência a compressão foi utilizado uma das metades do ensaio de flexão. O ensaio da determinação da resistência à compressão da argamassa é um ensaio destrutivo, que é executado segundo a norma 1015-11 [63] e foi realizado com diferentes idades tal como referido no ensaio a flexão.

O equipamento que se utilizou tem capacidade para realizar os ensaios de flexão e compressão das argamassas. É necessário definir os parâmetros do software, nomeadamente, as dimensões da área de contacto do provete com a base do dispositivo e a velocidade de ensaio 1,5 MPa/s. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão numa das faces do provete até que seja atingida a rotura do material. O software do equipamento indica a tensão em que o provete entra em rotura e calcula automaticamente a resistência à compressão em MPa de cada provete.

3.5.4. Resistência a compressão de cubos - betão

O ensaio de resistência à compressão do betão é um ensaio destrutivo. O principal objetivo deste ensaio é aferir a resistência mecânica do betão a compressão. Uma boa resistência mecânica pode não significar uma elevada durabilidade do betão, porque se por exemplo a camada de recobrimento for deficiente, pode afetar a sua durabilidade. A resistência a compressão do betão foi avaliada segunda a norma NP EN 12390-3 [66].

A resistência a compressão foi determinada pela seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Onde:

f_c – resistência a compressão, em MPa;

F – carga final imposta pela prensa ao provete, em N;

A – área do provete em contacto com o prato da prensa, em mm²;

Material e equipamentos

- Prensa;
- Craveira;
- Balança.

Procedimento:

- Garantir que as superfícies da máquina de ensaio estão limpas;
- Colocar os provetes de modo a que a carga seja aplicada perpendicularmente a direção da execução da moldagem;
- Centrar o provete relativamente ao prato inferior;
- Aplicar a carga a velocidade constante de 11,3 kN/s, que corresponde a 0,5 MPa/s;
- Ao atingir a rotura dos provetes registar a carga máxima, F;
- Avaliar o tipo de rotura, com base nos tipos característicos de rotura, de provetes cúbicos, indicados na norma;



Figura 16 - Resistência a compressão

3.5.5. Resistência a compressão diametral - betão

A resistência à tração dos betões pode ser determinada através do ensaio de compressão diametral. Para o ensaio foi utilizado um provete cilíndrico, obtido cortando por via húmida com uma serra adequada, com as dimensões de 150x50 mm. O ensaio da determinação da resistência à compressão diametral dos betões é um ensaio destrutivo. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga uniformemente distribuída ao longo de duas geratrizes opostas do provete cilíndrico até que seja atingida a rotura do material. O software do equipamento indica a força máxima em que o provete entra em rotura. Registada a força de rotura obtém-se a tensão

de tração na direção normal ao plano diametral que contém as forças, resistência à tração por compressão diametral.

Os ensaios foram realizados na prensa existente no laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologias da universidade Nova de Lisboa, em duas idades distintas: aos 28 e aos 60 dias.

Os provetes a ensaiar foram convenientemente centrados na prensa, de forma a fazer com que o eixo de solicitação estivesse contido num plano diametral para que a carga fosse aplicada ao longo de uma geratriz do provete.



Figura 17 - Ensaio de compressão diametral

3.5.6. Ensaio de Capilaridade - Argamassa

Para se realizar este ensaio foram utilizados os provetes ensaiados à flexão. A absorção de água por capilaridade foi determinada seguindo a norma EN 1015-18 [64]. Foi necessário garantir que os provetes estavam secos para se iniciar o ensaio, considerando-se os provetes secos quando não houve uma variação na pesagem superior à 1% com intervalos de 4 horas.

Para se realizar o ensaio os provetes foram colocados nas seguintes condições;

- Foram introduzidos dois tijolos no fundo da caixa plástica;
- A caixa foi preenchida com água até metade da altura da caixa;
- Depois coloca-se um tabuleiro sobre os tijolos;
- Colocação de uma manta geotêxtil, a forrar o tabuleiro, para criar uma película absorvente;
- Colocação de cantoneiras de plástico sobre a forra geotêxtil;

- Preenchimento do fundo do tabuleiro com água até uma altura de 2 mm acima das cantoneiras de plástico, sendo essa a medida a que os provetes se encontrarão submersos;
- Vedou-se a tampa da caixa e manteve-se a mesma fechada registando-se uma humidade relativa (HR) perto dos $95 \pm 5\%$.

Material utilizado para o ensaio de capilaridade em argamassa:

- Balança, com precisão de 0,001 g;
- Tabuleiro;
- Caixa de plástico;
- Cronometro.

Procedimento adotados para o ensaio:

- Verificar se o nível da água esta, 2 mm acima da cantoneira (caso esteja abaixo desse nível, introduzir água até atingi-lo);
- Pesagem e registo do peso do provete na balança;
- Colocação do provete sobre as cantoneiras, com a menor face em contacto com as mesmas;
- Repetição dos dois passos anteriores para todos os provetes;
- Colocação da tampa na caixa;
- Repetição do procedimento de ensaio para os momentos de registo de absorção da água por capilaridade.

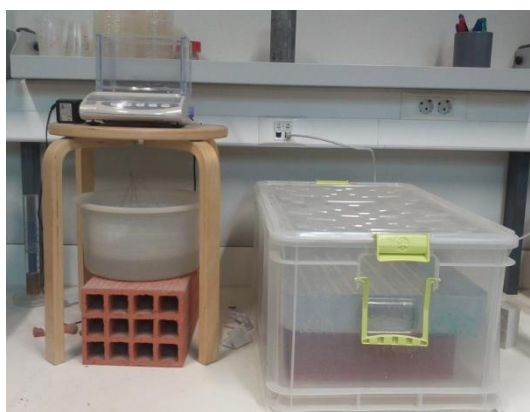


Figura 18 - Ensaio de capilaridade

Relativamente ao tempo que será feita a leitura das várias pesagens será uma pela primeira vez, minuto 0, e após 5, 15, 30, 60 minutos e seguidamente de 24 em 24 horas, até o provete estabilizar, altura em que a absorção de água seja inferior a 1% da massa total do provete.

3.5.7. Ensaio de porosidade aberta – argamassa e betões

O ensaio para determinação da porosidade é um ensaio não destrutivo e foi realizado de acordo com a norma NP EN 1936 [65]. O ensaio tem como objetivo determinar a massa de água que um provete de argamassa no estado endurecido consegue absorver quando imerso durante 48 horas.

Material utilizado para o ensaio:

- Estufa ventilada;
- Balança hidrostática com precisão de 0,001g;
- Exsicador;
- Bomba de vácuo;

Procedimento adotados para o ensaio:

- 0h - Pesar os provetes secos. Colocar os provetes no exsicador e sujeitá-los a vácuo por 24 horas (fechar torneira de admissão de ar e de água; abrir as restantes);
- 24h – fechar a torneira de admissão de vácuo e abrir a torneira de admissão de água até cobrir os provetes completamente. Fechar a torneira de admissão de água e abrir a de vácuo;
- 48h – desligar a bomba, e fechar a torneira de admissão de vácuo, e abrir a torneira de admissão de ar para restituir a pressão atmosférica no exsicador;
- 72h – pesar os provetes saturados.

3.5.8. Ensaio de Carbonatação – Argamassa e Betões

Para realizar os ensaios de carbonatação foram produzidos provetes de argamassa com as dimensões de 40x40x160 mm e para obter os provetes de betão foram produzidos provetes cilíndricos com 150x50 mm obtidos por corte através dos provetes de 150x300 mm.

A figura 19 serve para melhor compreender as datas de ensaio das diferentes composições de argamassa e betões.

Idade de fabrico		28 DIAS	60 DIAS	120 DIAS
		wet cure.: 20°C; 100%RH	wet cure: 20°C; 100%RH	wet cure: 20°C; 100%RH
14		dry cure: 20-25°C; 50%RH		
28.		carbonation test		
		28+7(1) ----- 28+21(2) ----- 28+42(3) ----- 28+56(4)		
45			dry cure: 20-25°C; 50%RH	
60			carbonation test	
			60+7(1) ----- 60+21(2) ----- 60+42(3) ----- 60+56(4)	
105				dry cure: 20-25°C; 50%RH
120				carbonation test
				120+7(1) ----- 120+21(2) ----- 120+42(3) ----- 120+56(4)

Figura 19 - Planeamento das datas dos ensaios de carbonatação

As composições de argamassas foram ensaiadas aos 28, 60 e 120 dias e as composições de betão foram ensaiadas aos 28 e aos 60 dias. Depois de fabricados os provetes vão para a cura emersa, passam depois para a estufa para secar a uma temperatura entre os 20°C e os 25°C e depois vão para uma câmara de carbonatação acelerada até a data do ensaio.

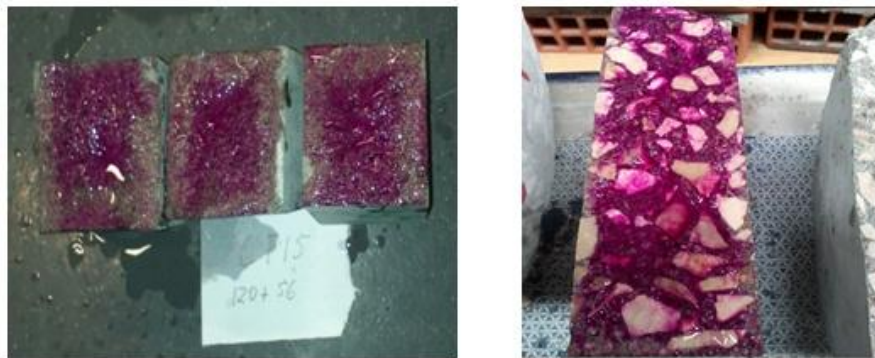


Figura 20 - Ensaio de carbonatação de argamassas e betões

Normalmente, o betão só é capaz de proteger os varões de aço colocados no seu interior enquanto se mantiver alcalino. Em contacto com o CO₂ do ar, a alcalinidade vai-se perdendo, da superfície para o interior pela carbonatação. Isto acontece tanto mais depressa quanto mais poroso for a composição. Perdida a alcalinidade, a penetração do CO₂ inicia-se mais facilmente. É esta a situação que se pretende demonstrar na imagem acima. A zona alcalina da secção, ou seja a zona que se pode observar com um tom cor-de-rosa, vai diminuindo, traduz-se numa diminuição do PH do betão para valores relativamente aos quais a película de proteção é destruída.

Equipamentos utilizados, para o ensaio de carbonatação

- Câmara de carbonatação;
- Escopro;
- Retificadora de betão;
- Martelo;
- Paquímetro;
- Solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1%.

Procedimentos de ensaio

- Depois de secos, colocou-se os provetes na câmara de carbonatação sob a concentração de $5 \pm 1\%$ de CO₂, a $60 \pm 5\%$ de humidade relativa e 23 ± 3 °C de temperatura, por períodos de 7, 21, 42 e 56 dias;
- No final das datas definidas, partiu-se os provetes, recorrendo a um martelo e escopro;
- Segue-se a fase em que se asperge a solução de fenolftaleína numas das superfícies do provete;

- Mede-se a profundidades de carbonatação, definidas pela zona incolor onde a fenolftaleína não desenvolveu reação com o betão.

3.6. Condicionamento dos provetes

Após um período de aproximadamente 24 horas realizou-se a descofragem dos provetes. A descofragem foi efetuada com todos os cuidados necessários para que não se danificassem os provetes. Depois deste procedimento os provetes foram colocados em cura emersa numa sala que permitiu manter as condições adequadas. Foram assim garantidas as mesmas condições de cura para todos os provetes.

4. Resultados de Ensaios e Discussão

Nesta fase são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco e no estado endurecido, assim como uma explicação do porquê de determinados resultados e as decisões efetuadas ao longo dos mesmos.

4.1. Estado Fresco

Os ensaios realizados no estado fresco foram efetuados logo após concluída a amassadura das composições de argamassas e betões. Todas as composições com as respetivas dosagens de CF foram testadas no estado fresco usando os seguintes ensaios:

- Espalhamento, para as argamassas;
- Plano inclinado, para o betão;
- Massas volúmicas no estado fresco para as argamassas e para os betões.

4.1.1. Massa volúmica

Argamassa:

De acordo com os resultados da figura 21, os valores da massa volúmica apresentados pela composição base são superiores às restantes composições. Este facto é uma consequência da menor massa volúmica das cinzas que foram utilizadas para substituir a massa de cimento nas respectivas percentagens. Normalmente, nas composições o volume absoluto de ligante presente numa argamassa com cinzas volantes é superior ao de uma argamassa sem cinzas [6]. Pelos resultados obtidos acontece o mesmo com as cinzas de fundo. Verifica-se um acréscimo do volume de pasta, que será uma mais-valia para as características da argamassa, como a trabalhabilidade, melhorando a sua plasticidade e coesão.

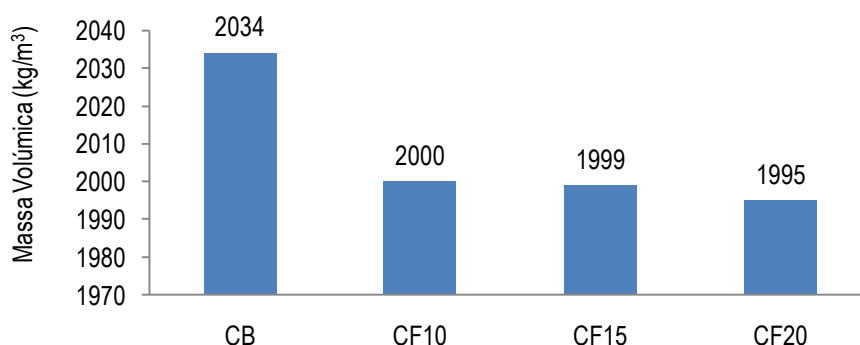


Figura 21 - Massa volúmica dos provetes de argamassa

Betão:

À massa volúmica ou densidade do betão no estado fresco é o resultado da massa volúmica de cada um dos seus componentes e também do grau de compactação. Ao substituir igual volume de cimento Portland por CF verificou-se, de acordo com a figura 22, que a massa volúmica do betão diminui. Este resultado demonstra que as CF apresentam uma massa volúmica inferior ao cimento. À luz deste conhecimento, a diferença de massa volúmica do betão no estado fresco será crescente em conformidade com a substituição de cimento por CF.

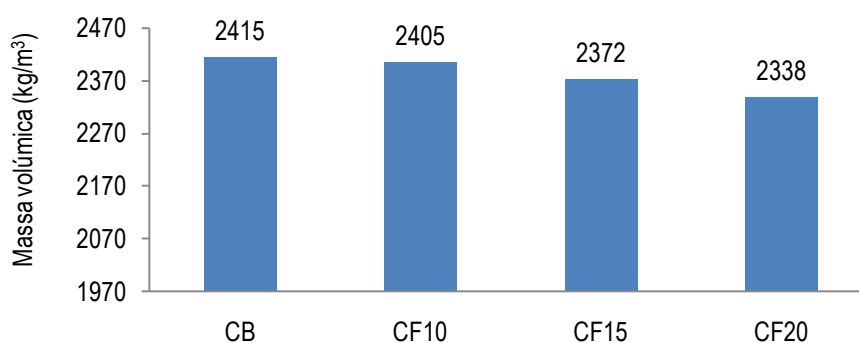


Figura 22 - Massa volúmica dos provetes de betão

4.1.2. Espalhamento

Argamassa:

Tendo como valor de referência de ensaio de espalhamento cerca de 165 mm, para que uma argamassa de cimento apresente uma boa trabalhabilidade e considerando que a relação água ligante foi mantida, verifica-se que a introdução de cinza de fundo (CF) proporciona uma melhoria no desempenho das argamassas no estado fresco (ver figura 23). É possível observar que a inclusão das diferentes percentagens de CF aumentou a trabalhabilidade das argamassas para valores acima do valor de referência da norma. Comparando com a Composição Base, as misturas com CF têm melhor desempenho. Este facto ocorre porque as partículas de CF, devido às suas características geométricas, aproximadamente esféricas e com uma superfície pouco rugosa [6], favorecem o rolamento das partículas de maior dimensão do agregado. Uma segunda hipótese está relacionada com o facto das partículas de CF interagirem com as partículas de cimento, o que retarda a presa tornando a argamassa trabalhável durante mais tempo. Pela

análise dos resultados dos ensaios, é possível ainda verificar que à medida que se aumenta a quantidade de CF nas composições de argamassa, diminui a sua trabalhabilidade. Este facto evidencia que, a partir de certa dosagem, a composição não beneficia com o aumento de CF. De acordo com o valor de espalhamento obtido para as composições de argamassa com 10 e 15% de CF, se não existir necessidade de um espalhamento tão elevado em relação ao determinado pela norma, pode-se diminuir a dosagem de água.

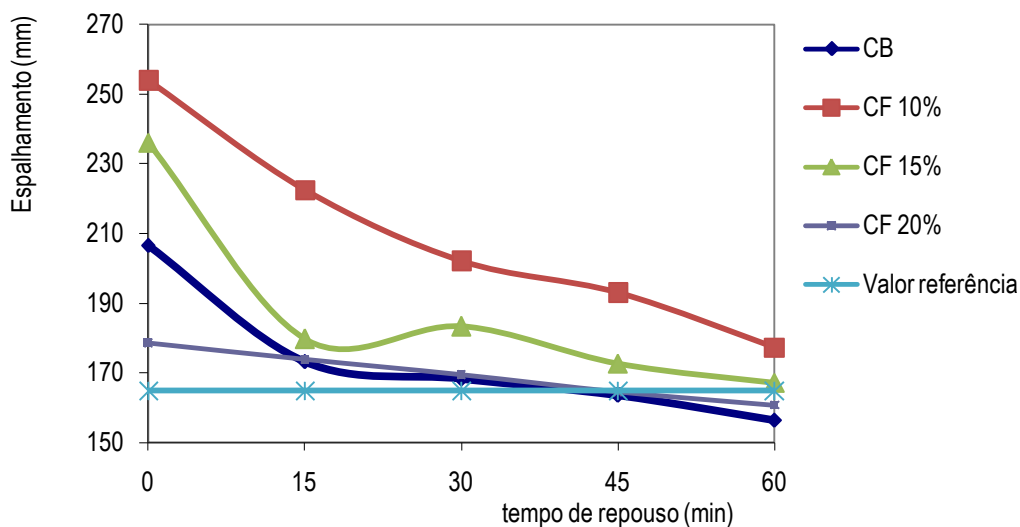


Figura 23 - Resultado ensaio de espalhamento de argamassa

Betão:

De acordo com Aires Camões [6] o betão no estado fresco pode ser visto como uma concentração de partículas de diferentes densidades, tamanhos e composições químicas em suspensão numa solução com PH elevado. Quando ocorre a mistura da água com o cimento ocorrem importantes reacções químicas que vão dar origem a aglomeração da pasta ligante e consequentemente da massa de betão. **As partículas de cinzas de fundo são intervenientes em todo este processo.**

De acordo com a figura 24 pode-se verificar que a composição sem adição de CF tem uma tensão de cedência superior as composições com adição de CF, e quanto maior á tensão de cedência menor a trabalhabilidade. A presença de cinzas, em geral, retarda a presa do betão este aspeto pode estar relacionado com a dosagem, a finura e a composição química das cinzas. [6].

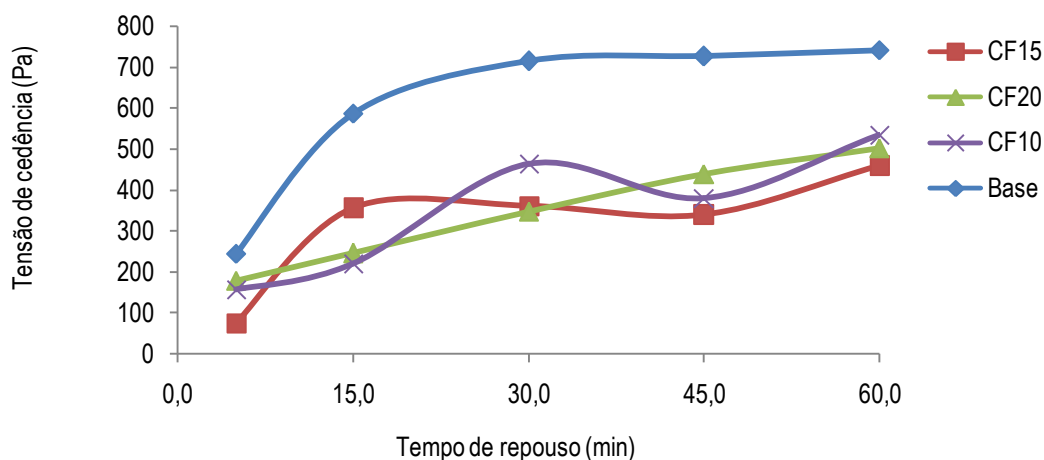


Figura 24 - Resultado ensaio plano inclinado - betão

4.2. Estado Endurecido

Para avaliar as argamassas e os betões no estado endurecido foram produzidos provetes prismáticos com 160x40x40 mm e provetes cúbicos com 150x150x150mm sendo depois cortados para se obter provetes com 150mm de diâmetro e 50mm de altura, respetivamente, para se realizarem os ensaios de compressão e flexão. Relativamente aos ensaios de durabilidade foram feitos ensaios de capilaridade, porosidade e carbonatação. Estes ensaios realizaram-se em idades diferentes. Para as argamassas foram feitos ensaios aos 28, 60 e 120 dias e para os betões foram feitos apenas ensaios aos 28 e 60 dias. Estes ensaios visam analisar o desempenho, a curto e longo prazo, da incorporação de CF nas composições.

Apresenta-se, em baixo os ensaios para avaliar as propriedades no estado endurecido:

- Módulo de Elasticidade Dinâmico (Ultrassons);
- Resistência mecânica das composições;
- Absorção da água por capilaridade;
- Porosidade aberta;
- Carbonatação acelerada.

4.2.1. Módulo de Elasticidade Dinâmico (Ultrassons)

Nas figuras 25 e 26 apresentam-se os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico (E), das composições de argamassa e de betão estudadas. Os provetes que apresentam resultados mais elevados indicam argamassas de maior rigidez.

Na figura 25 são apresentados os resultados do módulo de elasticidade dinâmico das composições de argamassa. Pela observação da figura a adição de CF nas argamassas provoca um aumento do módulo de Elasticidade dinâmico, quando comparados com a CB. O que significa que estas argamassas apresentam uma menor deformabilidade. Esta característica contribui para um menor desempenho das argamassas face à interação com o suporte. No que se refere à análise em diferentes períodos de tempo são identificados dois comportamentos distintos. O primeiro comportamento, período referente aos ensaios dos 28 e 60 dias, verifica-se que o módulo de elasticidade dinâmico das adições aumenta em relação a CB. O segundo comportamento é relativo ao período de tempo compreendido entre os 60 e os 120 dias onde o aumento da adição de CF provoca um decréscimo no módulo de elasticidade dinâmico.

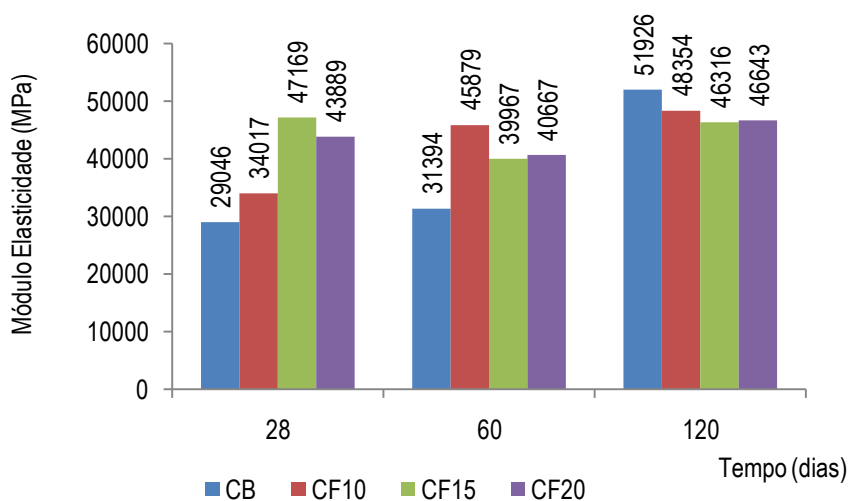


Figura 25 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico - argamassa

Na figura 26, observa-se que a introdução de CF nas composições de betão não provoca grandes variações do módulo de elasticidade dinâmico, mas tende a verificar-se uma diminuição relativamente a esta propriedade em comparação a CB. Significa que em termos gerais, tem-se

uma melhoria no seu módulo de elasticidade dinâmico para os ensaios referentes aos 28 dias. Devido à sensibilidade do ensaio e à proximidade dos valores obtidos não é considerado importante o facto de não se registar um aumento do módulo de elasticidade quando se efetuaram os ensaios aos 60 dias. A alusão a este pormenor é devido a este comportamento não estar de acordo com o espectável uma vez que se esperava um aumento do módulo do betão ao longo o tempo.

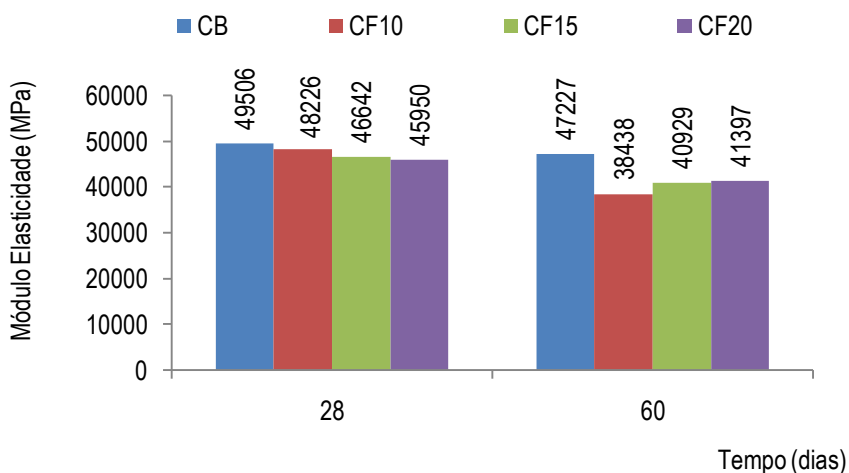


Figura 26 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico - betão

4.2.2. Resistência Mecânica das composições

Dos ensaios de flexão e compressão realizados aos provetes de argamassa e betão é possível fazer uma análise dos resultados obtidos. Assim, de acordo com as dosagens de CF adicionadas às misturas de argamassa e betão, serão apresentados os resultados da evolução da resistência à compressão e à flexão ao longo do tempo, bem como a variação da resistência.

De acordo com os dados expressos nas figuras 27 e 28 é possível analisar os resultados e tecer algumas observações:

- Comparativamente à mesma dosagem de ligante à base exclusivamente de clínquer, a adição de Cinzas de Fundo nas composições de argamassa e betão provoca um decréscimo da resistência à compressão. Para os ensaios aos 28 dias o decréscimo varia entre os 12,5% e os 31,25% para adições de CF10 e CF20. Em relação aos ensaios dos 60 dias verifica-se uma redução de resistência de 18% para adições com CF10 e uma redução de 23,2% para adições com CF20. Por último, nos ensaios de

argamassa aos 120 dias é possível observar uma variação no decréscimo de resistência na ordem dos 12,5% e 26,1% para substituição de CF10 e CF20, respetivamente. Em relação ao betão o decréscimo varia entre os 12% para CF10 e os 23% para CF20.

- Efetuando-se o estudo nas idades definidas, 28, 60 e 120 dias para as argamassas e 28 dias para os betões, é possível observar-se que a tensão de rotura dos provetes tende a aumentar ao longo do tempo, devido à hidratação do ligante.
- A variação da resistência a compressão após os 28 dias tende a estabilizar.
- Nos resultados de compressão em argamassas e betões não se verifica, em qualquer das idades, uma tensão superior à Composição Base, onde a mistura tem como ligante apenas o cimento Portland. Este aspeto confirma a maior hidraulicidade do ligante só com clínquer, cimento Portland, face a um ligante com constituição parcial de cinzas de fundo.
- O valor da tensão de rotura no provete Base de betão aos 60 dias apresenta um valor significativamente baixo. Tal facto pode estar associado a um defeito do provete ou a um erro que não foi identificado. Por esta razão não será considerado este valor para análise na presente dissertação.

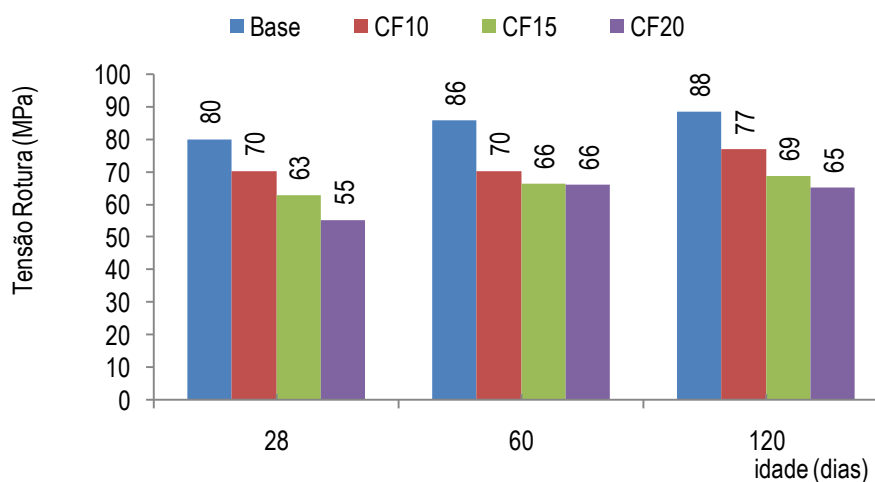


Figura 27 - Evolução da resistência a compressão com adição de CF - Argamassa

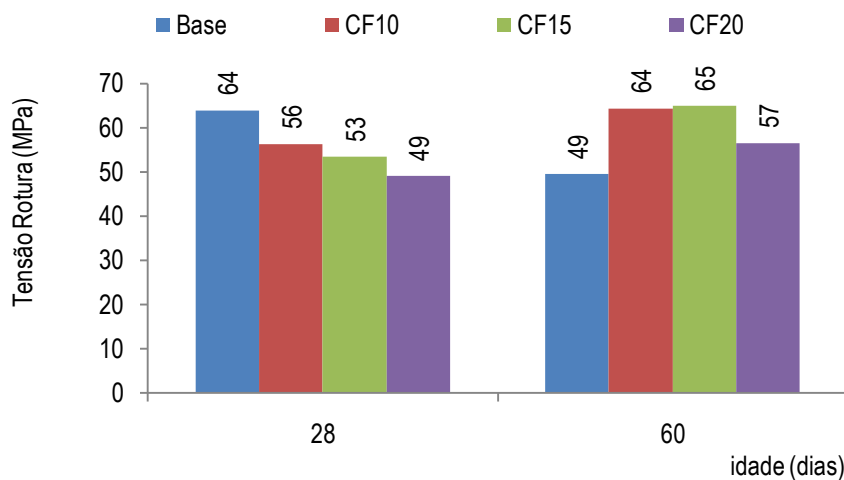


Figura 28 - Evolução da resistência a compressão com adição de CF - Betão

Para uma melhor percepção dos resultados obtidos nos ensaios de compressão foi elaborado um gráfico onde se analisa a variação da resistência à compressão aquando da adição das diferentes percentagens de CF. Tendo como base o valor da tensão de rotura de uma argamassa comercial, foi feita a relação desta com as respetivas percentagens de CF, 10%; 15% e 20%. De acordo com os resultados observados o aumento de CF na composição das argamassas diminui a resistência à compressão.

Na figura 30 verifica-se que a resistência à compressão decresce com a inclusão de cinzas de fundo. Pela análise do gráfico, a adição de 10%; 15% e 20%, de Cinzas de fundo nas composições de betão não contribuiu para a melhoria do desempenho mecânico. Sendo que a adição de 10% CF provoca um decréscimo em cerca de 12%, a adição de 15% provoca um decréscimo de quase 17% e por fim a adição de 20% CF reduz a resistência do betão em cerca de 23%.

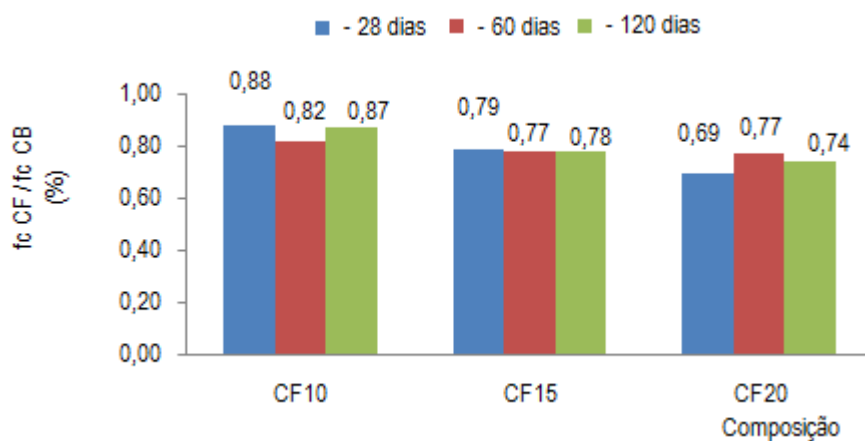


Figura 29 - Variação da resistência à compressão com adição de CF - Argamassa

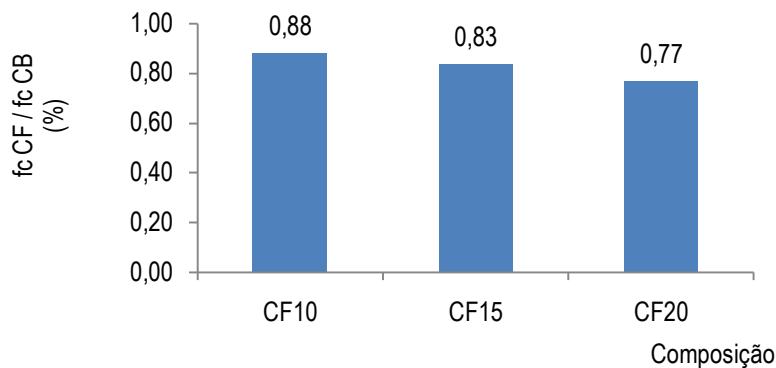


Figura 30 - Variação da resistência à compressão com adição de CF aos 28 dias - Betão

fc CF = resistência à compressão das composições com CF
fc CB = resistência à compressão das composições base

Relativamente à evolução da resistência à flexão com adição de CF foram realizados os ensaios aos provetes de argamassa e betão. De acordo com a figura 22 os resultados obtidos revelam que as misturas com adição de CF apresentam uma tensão de rotura superior à composição de referência. Conclui-se, desta forma, que a adição de Cinzas de Fundo tem um comportamento satisfatório quando comparadas com as argamassas produzidas apenas com Cimento Portland embora, nos ensaios realizados aos 120 dias, apenas a substituição de 10 % continua com um melhor desempenho que a composição base.

Relativamente à figura 23, à semelhança do que acontece nas composições de argamassa, também se verifica uma melhoria do comportamento mecânico com a inclusão de CF nos primeiros 28 dias, quando comparado com um betão de referência em que o ligante é à base exclusivamente de clínquer.

Estas melhorias verificadas na resistência à flexão podem ser consequência do efeito filer que é caracterizado pelo preenchimento com CF dos vazios que existem entre as partículas de cimento. Garante-se desta forma, que a mistura apresente um aumento da densidade e compactidade, ou do efeito pozolânico devido à presença de compostos siliciosos ou silico-aluminosos que por si só apresentam pouco ou nenhum valor aglomerante mas, que na presença de água, ficam aptos a se relacionarem quimicamente com hidróxidos de cálcio provenientes da hidratação do cimento formando, assim, compostos com propriedades aglomerantes.

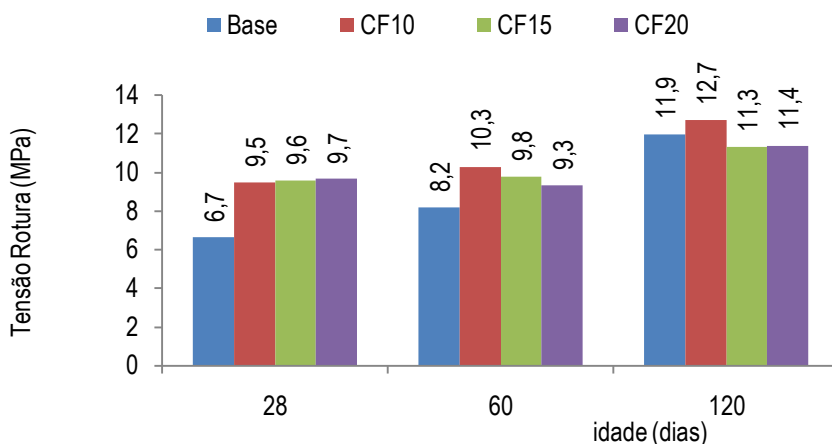


Figura 31 - Evolução da resistência à flexão com adição de CF - Argamassa

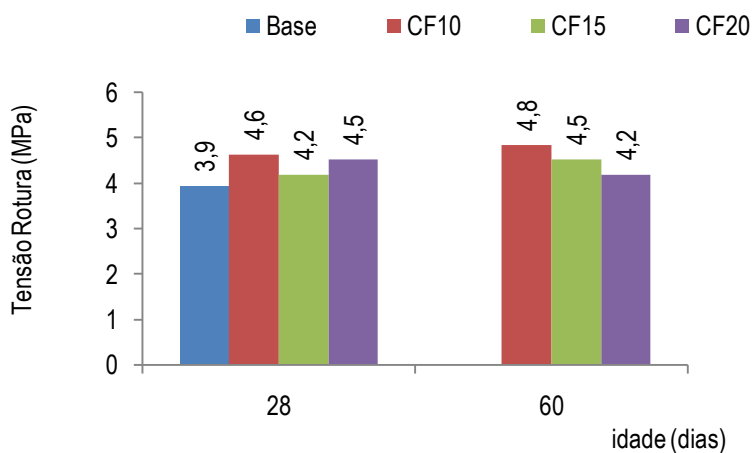


Figura 32 - Evolução da compressão diametral com adição de CF - Betão

Tal como analisado no item referente à compressão, também se quantificarão os resultados obtidos nos ensaios de flexão, através de um gráfico que permite uma análise equivalente. Considerando a propriedade que o ensaio de tração por flexão permite observar revela-se a necessidade de alguma prudência na análise dos resultados, uma vez que se verificam grandes desvios nos resultados obtidos aquando da análise à tração de materiais com argamassa e betões. Esta situação pode dever-se à natureza algo heterogenia destes materiais.

De acordo com a figura 33, o efeito da inclusão de Cinzas de Fundo para a resistência à flexão aos 28 dias, verifica-se uma melhoria no desempenho mecânico em cerca de 40%. Contudo, à medida que se dá o envelhecimento da mistura, apenas as composições com 10% de substituição apresentam um aumento de resistência à flexão.

O aumento da percentagem de CF nas composições do betão novo tende a melhorar o seu desempenho. Para idades mais avançadas, nomeadamente aos 120 dias nos resultados do ensaio de resistência à flexão, verifica-se um decréscimo da sua capacidade resistente quando se aumenta a percentagem de CF. Nas composições de betão não se verifica uma linearidade no aumento da percentagem das cinzas de fundo, mas é possível verificar uma melhoria do desempenho do betão com CF nos ensaios de controlo de resistência aos 28 dias.

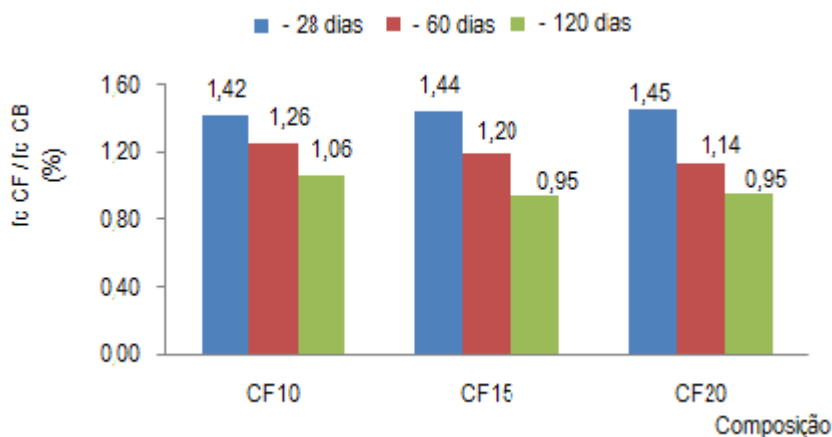


Figura 33 - Variação da resistência à flexão com adição de CF - Argamassa

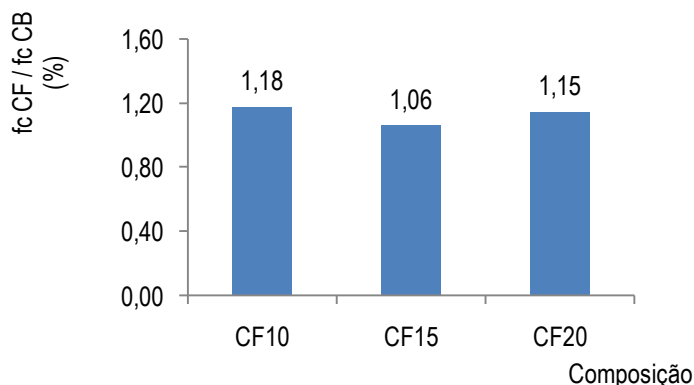


Figura 34 - variação da resistência à compressão diametral com adição de CF aos 28 dias - Betão

4.2.3. Absorção de água por capilaridade - argamassa

Sendo a água o principal vetor de transporte de agentes agressivos, a absorção de água surge como uma das propriedades mais diretamente correlacionadas com a durabilidade do betão. A absorção e transporte de água no betão são determinados pelo tipo, tamanho e distribuição dos poros e fissuras internas. Se existir porosidade e se esta permitir que ocorra a passagem de água da superfície para o interior do betão, a água irá circular através dos poros transportando os agentes agressivos (cloretos, sulfatos, entre outros). Assim sendo, na tabela 9 estão apresentados os valores assintóticos (absorção capilar) e coeficientes de capilaridade (velocidade de absorção) das argamassas em estudo resultantes do ensaio da absorção de água por capilaridade. Observa-se que a inclusão de CF nas misturas é benéfica pois apresenta um coeficiente de capilaridade baixo quando comparado com valores de referência normativo (NP EN 1504-3: 2006) [69] que estabelecem como valores máximos de 0,5 Kg/(m².√h) [23].

Tabela 9 - Valores assintóticos e coeficiente de capilaridade

Composição (Dias)	Valor assintótico (kg/m ²)	Coef. De capilaridade kg/(m ² .√h)
CB		
CF10-28	1,343	0,004
CF15-28	1,630	0,005
CF20-28	1,125	0,003
CF10-60	2,026	0,007
CF15-60	1,798	0,004
CF20-60	2,065	0,007
CF10-120	2,569	0,009
CF15-120	3,555	0,013
CF20-120	2,635	0,010

Analisando a figura 35, verifica-se que o aumento mais significativo da absorção ocorre nas primeiras 24h. Isto acontece porque a água, nos tempos iniciais, preenche primeiro os poros de maiores dimensões, depois os de menor dimensão e por fim é que preenche aqueles que apenas são possíveis de penetrar depois dos outros todos [21]. A adição de CF contribui para o aumento do tempo necessário para as argamassas atingirem o seu valor assintótico. Tal facto acontece devido às partículas de CF que se juntam às partículas de cimento, ocupando os espaços vazios existentes entre às partículas de maior dimensão, refinando a estrutura porosa de forma a aumentar a sua compacidade, Consequentemente há melhoria de algumas propriedades, designadamente as que de seguida se apresentam.

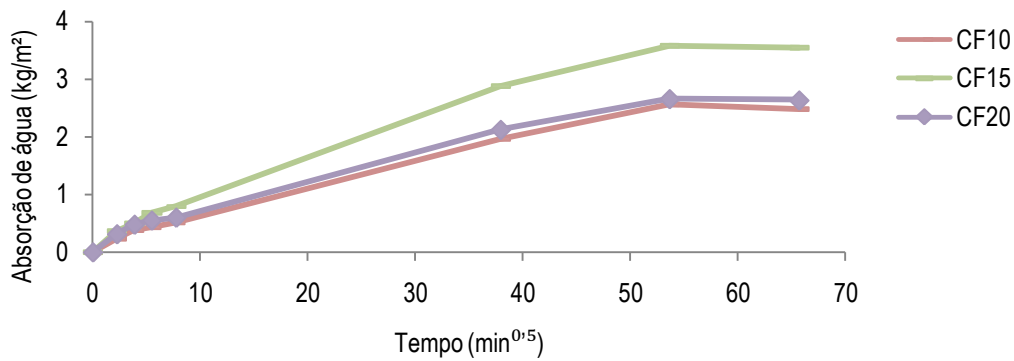


Figura 35 - Ensaio de Capilaridade

4.2.4. Porosidade Aberta

Nas figuras 36 e 37 que se seguem são apresentados os valores de porosidade aberta das composições de argamassa e de betão. Verifica-se, através da análise dos gráficos, que a incorporação de CF diminui a porosidade das composições quando comparado com a composição Base. Tal facto pode estar relacionado com o aumento do refinamento da estrutura porosa por parte das CF, que se reflete numa melhoria da capacidade para as composições resistirem à penetração de água.

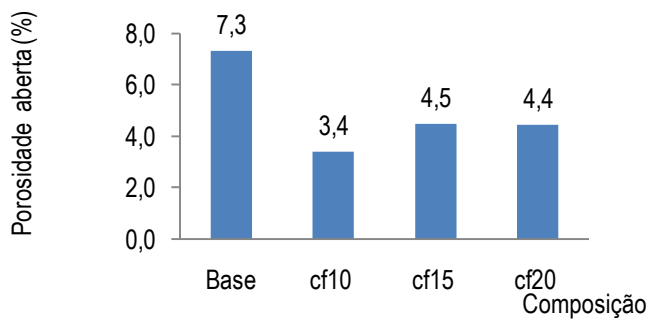


Figura 36 - Porosidade aberta – argamassa

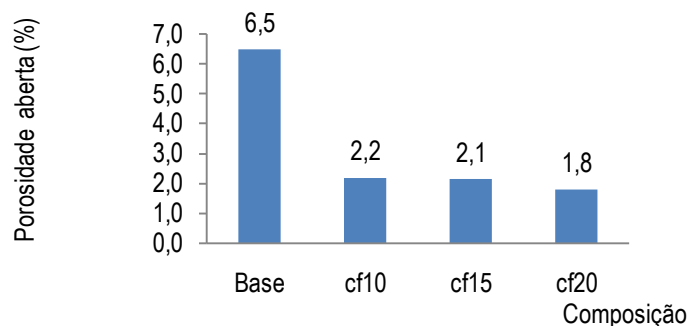


Figura 37 - Porosidade aberta - betão

4.2.5. Carbonatação Acelerada

No que se refere à carbonatação os provetes foram colocados numa câmara de carbonatação acelerada. Depois de cumpridos os tempos estabelecidos foram feitos os ensaios à profundidade de carbonatação para cada uma das amostras com recurso ao indicador de solução de fenolftaleína (1% em álcool)

Argamassa

As figuras 38, 39 e 40 que se seguem, apresentam o resultado da carbonatação acelerada com as respetivas adições de Cinzas de Fundo para as diferentes datas.

De um modo geral é possível verificar que a adição de CF nas composições de argamassa permitiu um aumento da profundidade de carbonatação. Estes resultados não são concomitantes com os ensaios de permeabilidade à água. Como nos ensaios de capilaridade e de porosidade aberta verificou-se uma melhoria no desempenho das argamassas com adição de CF, era de esperar que esta redução de permeabilidade também fosse benéfica para o aumento da resistência à penetração de dióxido de carbono.

A figura 38 expõe os resultados de profundidade de carbonatação das três composições com CF ensaiadas aos 28 dias. Os valores demonstram uma duplicação da profundidade de carbonatação quando se aumenta a adição de CF para 15 e 20%, o que não se observa nas figuras 39 e 40 com datas dos ensaios referentes aos 60 e 120 dias, onde os valores demonstram um desempenho próximo entre as três composições.

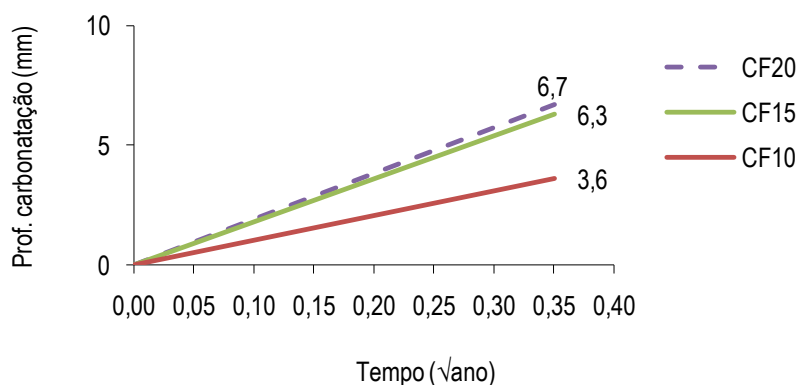


Figura 38 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 28 dias

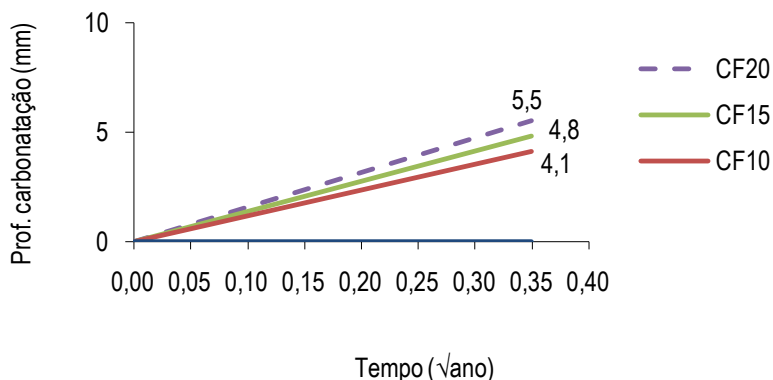


Figura 39 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 60 dias

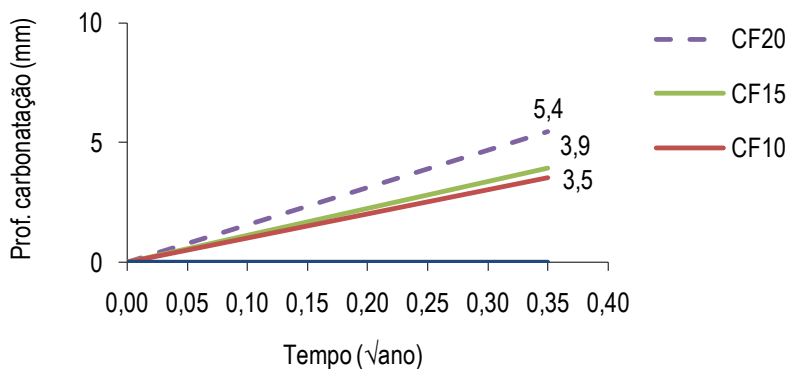


Figura 40 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 120 dias

A tabela 10 mostra os resultados no ensaio da resistência à carbonatação $R_{C65}(\text{kg/m}^3)/(\text{m}^2/\text{ano})$, e o valor do coeficiente de carbonatação, k . Estes valores foram obtidos de acordo com a especificação Portuguesa, (LNEC E465 2009) que faz parte do anexo nacional da norma portuguesa NP EN 206-1 [70].

Tabela 10 - Resultados da carbonatação acelerada k , e resistência a carbonatação R_{C65} -argamassa.

Composição	28 dias		60 dias		120 dias	
	k mm/√ano	R_{C65} (kg/m^3)/(m^2/ano)	k mm/√ano	R_{C65} (kg/m^3)/(m^2/ano)	k mm/√ano	R_{C65} (kg/m^3)/(m^2/ano)
CF10	10	1697	12	1293	10	1765
CF15	18	556	14	945	11	1410
CF20	19	488	16	721	16	740

Com base nos resultados mencionados obteve-se o coeficiente de carbonatação acelerada k e, a partir deste com a equação, $\frac{2 \times C_{acel}}{K^2}$ (C_{acel} representa a concentração de CO_2 para a carbonatação acelerada), obteve-se a Resistência a Carbonatação (R_{c65}). Analisando a tabela 10 concluiu-se que as argamassas com maior percentagem de CF apresentam um pior desempenho, com valores de resistência à carbonatação inferiores às composições com menor percentagem de CF.

Betão

As figuras 41 e 42 que se seguem são referentes aos ensaios de profundidade de carbonatação das três composições estudadas. Pela análise dos resultados verifica-se que o pior desempenho corresponde às composições de betão com 20% de substituição de cimento Portland por CF, pois esta composição apresenta o valor mais elevado de penetração de CO_2 . Pode-se também observar nos provetes ensaiados que as composições com CF15 apresentam melhor desempenho do que as composições CF10. Esta melhoria é constante nos ensaios aos 28 dias e nos ensaios aos 60 dias.

Seria pertinente poder comparar estes resultados com uma composição com base ligante exclusivamente de cimento Portland, mas devido a problemas com a composição base essa comparação não será possível.

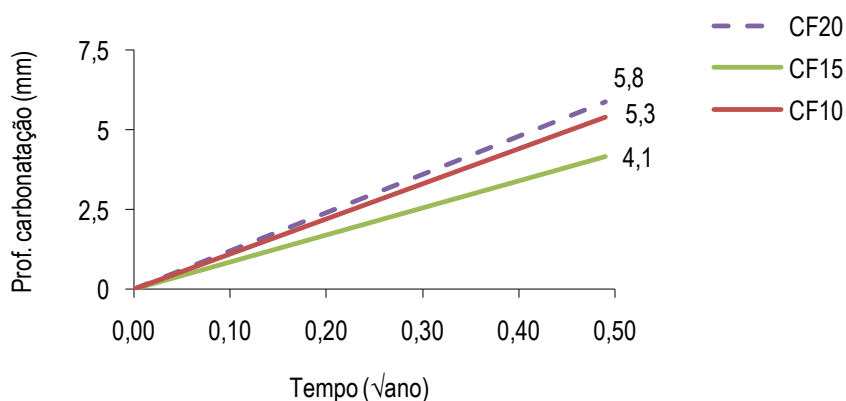


Figura 41 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 28 dias

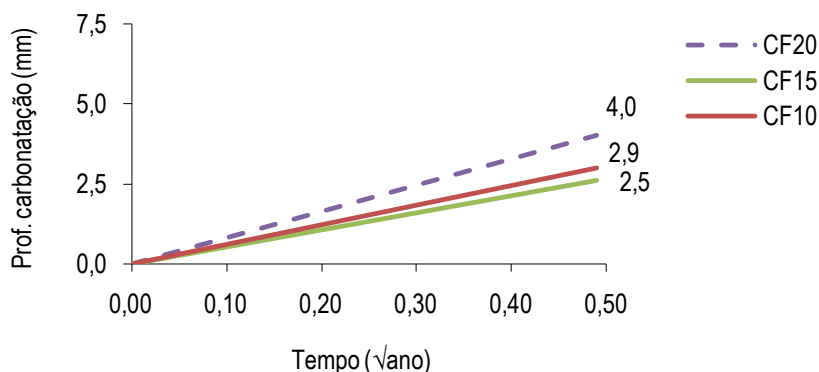


Figura 42 - Profundidade de carbonatação em função do tempo – 60 dias

Como é possível verificar na tabela 11, os betões com a adição de 15% de CF apresentam o melhor desempenho, com uma resistência à carbonatação superior às dosagens de CF10 e CF20, sendo que o pior desempenho está associado à composição com CF20.

Tabela 11 - Resultados da carbonatação acelerada k , e resistência a carbonatação R_{C65} - betão.

Composição	28 dias		60 dias	
	k mm/ $\sqrt{\text{ano}}$	R_{C65} (kg/m ³)/(m ² /ano)	k mm/ $\sqrt{\text{ano}}$	R_{C65} (kg/m ³)/(m ² /ano)
CF10	11	1488	6	4837
CF15	9	2491	5	6408
CF20	12	1250	8	2677

Para que se possa ter uma referência de ordem de grandeza de valores de resistência à carbonatação acelerada, sem o intuito de se proceder a uma comparação com os valores obtidos na presente dissertação, apresenta-se na tabela 12 um grupo de valores de resistência à carbonatação acelerada para diversas composições de betão. Estas composições variam no tipo de cimento, tendo como base: CEM I (clínquer na quase totalidade); CEM II/A-D (com 5% de sílica de fumo); CEM II/A-V (22% de cinza volante) e CEM III/B (70 a 80% de escória de alto forno), variando também na razão Água/Cimento. Ver tabela 12

Tabela 12 Valores indicativos de resistência à carbonatação acelerada (kg.ano/m⁵) (Fib 2006)

Composição	Água/Cimento					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I 42,5	-	1023	610	466	324	237
CEM III/A-D 42,5 (5%)	-	10570	1669	1321	488	382
CEM III/A-V 42,5 (22%)	906	577	-	-	192	-
CEM III/B 42,5	-	382	188	119	72	40

CEM III/A-D 42,5 (5%) – cimento com inclusão de 5% de sílica de fumo
CEM III/A-V 42,5 (22%) - cimento com inclusão de 22% de cinza volante

5. Conclusão

5.1. Considerações finais

Procede-se à conclusão geral dos resultados obtidos ao longo do estudo realizado, por forma a compreender-se o comportamento da adição de cinzas de fundo nas composições de argamassa e betão.

Os ensaios que caracterizam as misturas no estado fresco (ensaio de espalhamento para as argamassas e ensaio do plano inclinado para o betão bem como os resultados da massa volúmica) demonstram que a incorporação de CF nas misturas influencia alguns aspetos:

- Melhoram o comportamento ao nível da trabalhabilidade que, de acordo com a norma correspondente, se considera como valor mínimo aceitável 165 mm de espalhamento. Relativamente a este valor, as misturas com adição de CF apresentam valores superiores;
- Nos ensaios realizados na mesa de espalhamento, a adição de 10% e 15% de CF, favorecem a trabalhabilidade logo nos instantes iniciais. De um modo geral, as adições de CF permitem que as argamassas estejam trabalháveis durante mais tempo;
- O recurso à adição de CF conduz ao crescimento do volume de ligante, dado que foi substituído o cimento Portland por CF em igual massa. Como as cinzas de fundo têm uma massa volúmica menor, há um aumento do volume de ligante.

Relativamente ao estudo do estado endurecido das respetivas composições, foram analisados os resultados obtidos dos ensaios de comportamento mecânico:

- Os resultados de resistência à flexão quando comparados com os valores médios da argamassa de referência, resultam num acréscimo de tensão de rotura, estes são um requisito importante para as argamassas de reparação estrutural. Confere maior resistência à fendilhação e consequentemente aumenta a durabilidade do material;
- Os ensaios da resistência à compressão das composições com CF apresentam um decréscimo na tensão de rotura. Nos betões este decréscimo poderá ir até aos 25% quando comparado com o betão de referência;
- A rotura nos betões com inclusão de CF ocorre pelos agregados e não pela pasta de ligante, pode-se concluir desta forma que as composições estudadas têm boa aderência;

- Verificou-se um aumento do módulo de elasticidade dinâmico para as composições de argamassa, tornando as menos deformáveis e mais suscetíveis de aparecimento de fissuras. Estas argamassas devido ao elevado valor do módulo de elasticidade dinâmico serão mais indicadas para reparação estrutural. Em relação aos provetes de betão observou-se uma redução do módulo de elasticidade dinâmico, tornando os betões mais deformáveis, em relação a este parâmetro físicos em estudo, estes comprovam um bom desempenho deste tipo de composições e mostram que a adição de CF contribui, em geral, para o aumento da sua durabilidade:
- No que se refere à rigidez, verifica-se que o módulo de elasticidade dinâmico aumenta ao longo do tempo, para as composições de argamassa nos ensaios aos 28 e 60 dias e diminui nos ensaios aos 120 dias;
- Em relação aos parâmetros de porosidade aberta verificou-se uma redução em cerca de 53% com a adição de CF10 e cerca de 40% com a adição de CF20 para as argamassas. Relativamente os betões verificou-se uma redução da porosidade aberta em cerca de 66% para as composições de CF10 de adição e para as composições com CF20 regista-se uma redução na porosidade aberta na ordem dos 72%;
- Verifica-se nos ensaios de resistência à carbonatação das argamassas que o aumento da percentagem de CF provoca o aumento da profundidade de carbonatação resultando numa diminuição da resistência à carbonatação. Nos ensaios de betão verifica-se que para substituição de 15% de CF estas apresentam um melhor desempenho que as composições com CF10.
- O recurso a adições de CF contribui para minimizar um problema de impacto ambiental, em alguns contextos faz sentido substituir 20% de cimento por CF.

5.2. Desenvolvimentos Futuros

Este campo de investigação tem mais propriedades para serem estudadas.

Poder-se-á referir que nas campanhas experimentais todos os ensaios foram realizados com cinzas de fundo provenientes da mesma central. Seria uma mais-valia a possibilidade de comparar resultados com diferentes proveniências de cinzas de fundo.

Relativamente às cinzas de fundo, seria interessante acrescentar dados referentes às características físicas e químicas.

Para melhor se compreender o comportamento das argamassas e betões seria pertinente:

- Avaliar a resistência das argamassas estudadas devido à ação de sais solúveis e aos ciclos de gelo-degelo.
- Realizar ensaios de resistência à carbonatação do betão com base exclusiva de cimento Portland para se compreender o seu comportamento.
- Ensaio de resistência ao fogo

O estudo da durabilidade pode ser complementado com alguns ensaios considerados interessantes: Ensaio de permeabilidade aos gases e ensaio de difusão de cloretos em estados estacionários.

Bibliografia

[1] Lapa, N. Incorporação de Cinzas de Fundo em Novos Materiais para a Construção Civil.: Universidade Nova de Lisboa (UNL), Faculdade de Ciências e Tecnologias. Campus da Caparica, Portugal

[2] NAWA, T., IZUMI, T. e EDAMATSU, Y. State-of-the-art Report on Materials and Design of Self-Compacting Concrete, in " International Workshop on Self-Compacting Concrete", . August, 1998. p. 160-190.

[3] Marques, P. 2007. Análise de Durabilidade de Estruturas de betão armado e pré-esforçado. metodologias prescritiva e de desempenho. Dissertação de mestrado: Instituto Superior Técnico, Lisboa.

[4] Baker, R.F.M. 1988. "Initiation Period," in Corrosion of Steel in Concrete, p.22, Schiessl, Chapman and Hall, London UK

[5] BRÁS, A e HENRIQUES, F. 2009. The influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout properties. RILEM Materials and Structures. 42: 1423-1432.

[6] Camões, A. 2002. Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes. Tese de doutoramento: Universidade do Minho Escola de Engenharia, Minho

[7] Wallevik, O. 2009. "Introduction to Rheology of Fresh Concrete". ICI Rheolcenter course, Innovation Center Iceland.

[8] Vieira, J., 2010, "Interacao cimento-superplastificante: Avaliacao da Estabilidade do comportamento", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Tecnico, Lisboa.

[9] Uchikawa, H., Hanehara, S. e Sawaki, D. 1997. The Role of Steric Repulsive Force in The Dispersion of Cement Particles in Fresh Paste Prepared With Organic Admixture. Cement and Concrete Research., Vols. vol. 27, n.º 1,.

[10] Pereira, C. 2012-13. Documentação das aulas de "Materiais de Construção II" – Aula 3 Produtos da hidratação do Cimento.

[11] Roncero, J. 2000. Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes. Tese de Doutoramento. Universidade Politecnica da Catalunha UPC, Barcelona, Espanha.

[12] Rodrigues, M. P. e Almeida, I. 1989. Adjuvantes superplastificantes para o betão: Características e identificação por espectrofotometria de infravermelhos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

[13] Reschke, T. Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die gefügegenwicklung und die Festigkeit von Beton VBT Verlag Bau+Technik GmbH. s.l. : Düsseldorf., 2000.

- [14] Ravina, Dan. Slump retention of fly ash concrete with and without chemical Concrete International, ACI., April 1995. Number 4.
- [15] Ramachandran, V. S, Malhotra, V. M. e Jolicoeur, C. and Spiratos, N. 1998. Superplasticizers: properties and applications in concrete, CANMET – Canada Centre for. Canada : s.n.
- [16] Gonçalves, F. 2013 Otimização de argamassas de cal hidráulica com comportamento térmico melhorado. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Construção Civil. Escola Superior de Tecnologias do Barreiro.
- [17] Power, C. and Wiler, M. 1941. A device for studying the workability of concrete. s.l. : proc. ASTM, 41, 1003-1015.
- [18] Ohta, A., Sugiyama, T. e Tanaka, Y. 1997. Fluidizing mechanism and application of polycarboxylate-based superplasticizers. Rome, Itália : Proceedings of 5th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete. SP 173, AC.
- [19] Neville, M. 1995. Properties of concrete, Fourth edition, Longman Group Limited. England : s.n. Fourth edition.
- [20] Nepomuceno, M. 2005. Metodologia para a Composição de betões Auto-Compactáveis.. Tese de Doutoramento. Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- [21] Nawa, T., IZUMI, T. e Edamatsu. 1998. state-of-the-art Report on Materials and Design of Self-Compacting Concrete, . s.l. : International Workshop on Self-Compacting Concrete.
- [22] Martins, A. 2010. A influência das condições de cura em argamassas de cais aéreas com e sem adição de metacaulino. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Tecnologia do Barreiro – Instituto Politécnico de Setúbal.
- [23] Leal, M. 2013. Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado, Dissertação para à obtenção do grau de Mestre em Construção Civil, Escola Superior de tecnologia do Barreiro.
- [24] I. Oliveira, V. Pandolfelli, Reologia de concretos refratários na presença de diferentes tipos de aditivo e ligante hidráulico, Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa, Universidade Federal de S. Carlos - UFSCar
- [25] Lange, F., Mörtel, H. and Rudert, V. 1997. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. s.l. : Cement and Concrete Research,. Vol. 27 (10).
- [26] Lagerblad, B. and Vogt, C. 2004. Ultrafine particles to save cement and improve concrete properties. s.l. : summary of CBI report 1:2004.

- [27] Khan, M.I. e Lynsdale, C.J. 2001. Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete. s.l. : Cement and Concrete Research 32 (2002) 123–131, 18 May 2001.
- [28] Joshi, R. C. and Lohtia, R. P. 1997. Fly ash in concrete: production, properties and uses,. Gordon and Breach Science Publishers. V. M. Malhotra ed., , Vol. Volume 2, Ottawa, Ontario.
- [29] Jolicoeur, C. e Simard, M. A. Chemical admixture Cement interactions: Phenomenology and Physico-chemical Concepts. Cement and Concrete Composites. n.º 2/3, 1998, Vol. vol. 20.
- [30] Gutiérrez, A and Cánovas, M. 1996. High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning. ACI materials journal. Number 3, May-June, 1996, Vol. Volume 93.
- [31] Griesser, A. 2002. Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures. Rheology, phase composition, pore water and heat of hydration of cementitious systems. Tese de Doutoramento. Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, ETH Zurich, Suíça.
- [32] Flatt, Robert J., Roussel, Nicolas e Cheeseman, Christopher R. 2012. Concrete: An eco material that needs to be improved. s.l. : Journal of the European Ceramic Society, January 2012.
- [33] Fennis, S. 2011. Design of Ecological Concrete by Particle, Packing Optimization. Tese de Doutoramento. Universidade Tecnológica de Delft, Holanda.
- [34] F.Pacheco, Shasavandi, A. e Jalali, S. Eco-Efficient Concrete Using Industrial Wastes: A Review Guimarães, Portugal
- [35] Coutinho, A. 1973. Fabrico e Propriedades do Betão. Lisboa : Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Setembro de 1973. Volume 1.
- [36] Pereira, C 2012-13. Documentação das aulas de “Materiais de Construção II” – Aula 2 Cimentos: composição, microestrutura e microquímica.
- [37] Committee, 225 ACI. Guide to the selection and use of hydraulic cements. ACI Journal. November-December, 1985.
- [38] Kamal, H. Khayat, P. - Executive Summary, State-of-the-Art Review of Form Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete, Department of Civil Engineering Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [39] Collepardi, M. 1994. Superplasticizers and air entraining agents: State of the art and futures needs. Concrete Technology: Past, Present and Future, Proceedings of V. M. Malhotra Symposium. USA : ACI, Detroit, 1994. SP 144.
- [40] Chandra, S. e Flodin, P. 1987. Interactions of polymers and organic admixtures on Portland cement hydration. Cement and Concrete Research. Vol 17, n.º 6.
- [41] CATARINO, J. 2012 Avaliação da Influência do Cimento na interação Cimento-Superplastificante. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

- [42] Botas, S. 2009. Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [43] Biagini, S. High range water reducers (superplasticizers). Application of Admixtures in Concrete, State-of-the-Art Report prepared by RILEM Technical Committee TC 84-AAC. A. M. Paillère ed. Application of Admixtures in Concrete. s.l. : E&FN SPON, 1995.
- [44] Berg, W. Von and Kukko, H. 1991. Fresh mortar and concrete with fly ash, Fly ash in concrete – properties and performance , Report of technical committee 67-FAB – use of fly. E&FN SPON.
- [45] Azhar, S, Nimi tyongskul, Pichai e Sheinn, Aye M. M. and Poon, Chi-Sun, 2000. Use of powdered stone as fine aggregate in high performance concrete – workability, strength and durability, Proceedings of the International Symposium Organized by the Hong Kong University of Science. and Technology and Shenzhen University, Christopher K. Y.. December 2000, Vol. Volume 2.
- [46] Azevedo, A. C. 2002. Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil. Universidade do Minho.
- [47] Amago, D. G. Mecanismo de actuação dos adjuvantes plastificantes e superplastificantes. Adjuvantes para Betões e Argamassas. Lisboa. : APEB, 21 de Maio 2009b.
- [48] Almeida, R. Influência dos componentes na qualidade dos concretos de alto desempenho: agregados e cimento, Seminário sobre cimento e suas influências nas aplicações de concreto. Rio de Janeiro, : s.n., Maio, 1993.
- [49] Aitcin, P. 1998 High-performance concrete. Modern concrete technology 5. London and New York. : E & FN SPON.
- [50] Declaração Ambiental 2011, Central Termoelétrica do Pego. Pego : s.n.
- [51] Declaração Ambiental 2011, Central Termoelétrica de Sines. Sines : s.n.
- [52] Malhotra, V., and Ramezaniapour, A., 1994, Fly ash in concrete – 2nd edition, CANMET – Canada Centre for Mineral and Energy Technology, pp. 307;
- [53] Rasheeduzzafar (1992) – “ Influence of cement composition on concrete durability”, ACI Materials journal, vol.89 nº 6, p. 574-586
- [54] Costa, A. Reabilitação e Reforço de Estruturas - Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas. Instituto Superior Técnico.
- [55] IPQ (2001/2005/2008) – NP EN 197-1:2001/A1:2005/A3:2008 – Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

- [56] IPQ (1995) - NP EN 450, 1995, Cinzas volantes para betão – definições, exigências e controlo da qualidade, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Setembro, pp. 12.
- [57] IPQ (2002) – NP EN 933-3:2002 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação das formas das partículas, Índice de achatamento. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- [58] CEN (1999/2004/2006) – EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006. Methods of test mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussel.
- [59] CEN (1998/2006) – EN 1015-6:1999/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels.
- [60] IPQ (2006) – NP EN 196-1:2006 – Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- [61] CEN (1998/2006) – EN 1015-2:1998/A1:2006 Methods of test mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels.
- [62] IPQ (2007) – NP EN 12504-4:2007. Ensaio de betão nas estruturas – Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- [63] CEN (1999/2006) – EN 1015-11:1999/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.
- [64] CEN (2002) – EN 1015-18:2002. Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.
- [65] IPQ (2008) – NP EN 1936:2008 – Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- [66] IPQ (2003) - NP EN 12390-3:2008 - Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaios, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- [69] IPQ (2006) - NP EN 1504-3 (2006) – “Produtos e sistemas para a reparação de estruturas de betão. Definição, requisitos, controlo de qualidade e avaliação da conformidade. Parte 3: Reparação Estrutural e não estrutural”, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- [70] IPQ (2005) - NP EN 206-1 (2005) – “Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.” Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- [71] LNEC E465 (2005) – “Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho de betão armado ou pré-esforçado que permitem satisfazer a vida útil de projecto sob as exposições ambientais XC ou XS.”, LNEC, Lisboa.

Anexos

ANEXO A – Ficha técnica de Cimento Portland CEM I 42,5R

<p>CEM I 42,5R</p> <p>Cimento Portland</p>		
		
<p>Locais de Produção</p> <p>Fábrica Sesi-Ourão</p> <p>Fábrica Macieira-Liz</p>	<p>Embalagem</p> <p>Granel</p> <p>Sacos de 40kg</p>	<p>Certificação</p> <p>Cimento certificado segundo a NPEN197-1.</p> <p>Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.</p> <p>Composição do Produto (Núcleo Cimento)</p> <p>95% a 100% Cimento Portland</p> <p>0% a 5% Outros Constituintes</p>
<p>Principais Aplicações</p>	<p>O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.</p> <p>As principais aplicações deste cimento são:</p> <ul style="list-style-type: none"> - betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final; - betões leves de elevada resistência; - betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens; - betão aplicado em tempo frio; - prefabricação ligeira pré-esforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pilas; - caldas de selagem e injeção. 	
<p>Principais Características</p>	<p>Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.</p> <p>Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).</p> <p>Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).</p>	
<p>Advertências Específicas</p>	<p>O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.</p> <ul style="list-style-type: none"> - devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas; - devem evitar-se betonagens em tempo muito quente. <p>Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.</p> <p>A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.</p>	
<p>Informação de Segurança</p>	<p>O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele.</p> <p>Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.</p> <p>Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.</p>	
<p>Última actualização</p>	<p>Setembro 2004 - Versão 3</p>	<p>pag. 1 2</p>

Características Químicas

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

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

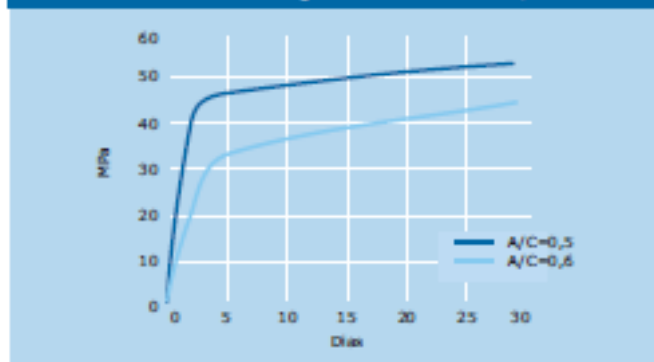
Características Mecânicas

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

Características Físicas

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

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



Companhia Gemil de Cal e Cimento, S.A.

Autoestrada A2,
Ponte de Alcázar do Sal.



Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 8ª
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 - Fax 217 93 6200

Vendas Norte
Tel. 226 076 410 - Fax 226 076 411

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

Vendas Sul
Tel. 212 198 200 - Fax 212 198 229

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

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 200 - Fax 212 198 229

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

ANEXO b – Ficha técnica do superplastificante MC POWERFLOW 1110



MC-PowerFlow 1110

Superplastificante de alto desempenho baseado na nova tecnologia de polímeros MC

Propriedades

- Grande redução na quantidade de água
- Dosagens económicas
- Alta resistência inicial
- Excelente qualidade das superfícies em concreto
- Indicado para lançamentos rápidos

Áreas de aplicação

- Pré-moldados
- Concreto auto-adensável
- Concreto com alta resistência a agentes agressivos
- Concreto aparente
- Concreto de alto desempenho
- Concreto de alta fluidez
- Concreto usinado

Aplicação

MC-PowerFlow 1110 é um superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilatos (PCE) desenvolvida pela MC. Em função da melhoria na resistência inicial o MC-PowerFlow 1110 é especialmente adequado para o uso em fábricas de concreto pré-moldado e na produção de elementos protendidos.

Seu específico mecanismo de funcionamento torna possível a produção de concretos com conteúdos de água extremamente baixos e concretos de alto desempenho com dosagens económicas.

Através da manutenção do conteúdo de água pode-se produzir concretos com diversas consistências.

A combinação especial de diversos agentes ativos permite a produção de concretos homogêneos e sem segregação. Desta maneira, a utilização do MC-PowerFlow 1110 resulta em concretos com acabamento de alta qualidade reduzindo os trabalhos posteriores para melhorar a superfície e a aparência.

MC-PowerFlow 1110 pode ser utilizado em conjunto com outros aditivos da MC. Por favor peça pelos serviços do nosso departamento de tecnologia de concreto para orientação sobre as melhores combinações.

MC-PowerFlow 1110 deve ser adicionado ao concreto durante o processo de mistura. Sua adição é mais efetiva quando feita junto à água do traço. O tempo de mistura deve ser suficiente para permitir a total dispersão do aditivo e seu efeito plastificante.

No caso de dosagens em caminhões betoneira na obra por favor siga corretamente as orientações e recomendações para a adição e mistura.

1



Dados Técnicos – MC-PowerFlow 1110

Característica	Unidade	Valor	Observações
Densidade	g/cm ³	1,05	
Dosagem Recomendada	%	0,2 a 5,0	sobre o peso do cimento
Teor de Cloretos	%	< 0,1	
Teor de Álcalis	%	< 1,0	

Características – MC-PowerFlow 1110

Tipo de produto	Superplastificante
Estado	Líquido
Cor	Marron
Armazenagem	Armazenar os tambores em local seco, coberto e arejado. Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro dos reservatórios instalados em local previamente definido.
Validade	12 meses a partir da data de fabricação
Embalagens	Tambor 210 kg, peso líquido Granel
Descarte	Para a preservação do meio ambiente, favor esvaziar completamente as embalagens

Nota: As informações contidas nesta ficha técnica estão baseadas em nossa experiência e no melhor do nosso conhecimento, porém devem ser ajustadas a cada projeto, aplicação e principalmente às condições locais. Nossos dados se referem a práticas adotadas na engenharia que devem ser consideradas durante a aplicação. Não nos responsabilizamos por aplicações erradas. Recomendações verbais diferentes das contidas aqui, não são válidas sem a confirmação por escrito da MC-Bauchemie.

Edição 03/2013. Esta ficha técnica substitui a anterior. Caso seja necessária atualização, uma nova edição pode ser impressa em substituição a esta.

2

MC-Bauchemie Brasil
Fábrica São Paulo: Rua Henry Martin, 235 – Vargem Grande Paulista – SP – Tel.: (11) 4158-0158
Fábrica Pernambuco: Rodovia Luiz Gonzaga/ BR-232 – Vitória de Santo Antão – PE – Tel.: (81) 3523-2343

www.mc-bauchemie.com.br