



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

**Estudo de um ligante cimentício com baixo teor
em clínquer**

Raquel Filipa Cardoso Pereira Luís

Orientador: Prof.^ª António Bettencourt Ribeiro

Co-Orientador: Prof.^ª Teresa Pinheiro-Alves

Mestrado em Engenharia Civil

Área de especialização: *Construção*

Dissertação

Évora, 2014

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



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL**

Estudo de um ligante cimentício com baixo teor em clínquer

Raquel Filipa Cardoso Pereira Luís

Orientador: Prof.^ª António Bettencourt Ribeiro

Co-Orientador: Prof.^ª Teresa Pinheiro-Alves

Mestrado em Engenharia Civil

Área de especialização: *Construção*

Dissertação

Évora, 2014

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

À memória

*do meu pai, Carlos Alberto Pereira Luís e
da minha bisavó, Maria Vitória da Conceição*

Agradecimentos

Este trabalho não estaria devidamente completo sem que nele manifestasse os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram e me apoiaram neste percurso.

Ao professor António Ribeiro Bettencourt, pela sua excelente orientação, demonstrando-se sempre disponível quando mais necessitei, pelo seu apoio, bem como todo aconselhamento e apoio, manifesto os meus mais sinceros agradecimentos.

À professora Teresa Pinheiro Alves, pela sua coorientação, mostrando-se sempre disponível no percurso desta aprendizagem, não só nesta fase, mas bem como todo o percurso académico, os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao LNEC por tão bem me ter recebido, pela disponibilização dos laboratórios, onde pude elaborar todo o trabalho experimental.

À equipa do laboratório que tanto me ajudou e fez com que todo o processo prático fosse possível, mostrando-se sempre incansáveis, ao Pedro Amaral, ao Olivier e ao Sr. Balsinha. Ao Eng.º Manuel Vieira (LNEC), por todo o auxílio prestado, no início do trabalho experimental.

A todos os meus amigos, foram sem dúvida o meu pilar nesta fase, mostrando-se sempre incansáveis e prontos a ajudar, dando-me força para continuar, nomeadamente, a Joana, a Inês, a Marta, a Helena e a Nádía.

À Filipa dos Santos por toda a paciência e trabalho que teve comigo, foi sem dúvida uma grande ajuda nesta fase.

Por último e não menos importante à minha família, especialmente, à minha mãe, à minha tia Vitória e ao meu irmão, por todo o apoio incondicional ao longo de todo o curso, e ao longo de toda a vida, sem vocês nada disto era possível.

Foi um processo duro, com alguns contratemplos, mas alcançado.

A todos um grande Obrigada!

Resumo

Cada vez mais há uma preocupação acrescida no que diz respeito à diminuição da poluição e consequentemente com a proteção do meio ambiente, desta forma a presente dissertação dirige-se à necessidade de reduzir as emissões de CO₂ no planeta. Neste sentido dá ênfase os estudos relativos a ligantes cimentícios com menor teor de clínquer portland tornam-se mais pertinentes, dado que a produção deste componente do cimento faz-se com libertação significativa daquele gás. A possibilidade de produzir atualmente pastas com elevada fluidez por uso de adjuvantes fortes redutores de água permite introduzir partículas muito finas, não reativas que densificam a estrutura e aumentam a eficiência das partículas reativas, com ganhos na eficiência ambiental. O estudo consiste na avaliação da capacidade de reduzir a dosagem de cimento sem perda significativa de resistência, por introdução de pequenas partículas de calcário e sílica otimizando a granulometria dos finos.

Palavras-chave: ligantes, otimização, ambiente, Dióxido de carbono, clínquer



Abstract

Study of a cement with a low clinker content

In general, there is an increased concern about pollution, its reduction and consequently the protection of the environment; in this context, this thesis addresses the need to reduce CO₂ emissions on the planet. In this regard, studies on portland cement binders with lower clinker content becomes more relevant, as production of clinker is made with significant release of this gas. Currently, the possibility of producing cement pastes with high fluidity by using superplasticizers allows to introduce non-reactive very fine particles that densify the structure and increase the efficiency of reactive particles with gains for the environmental protection. This study evaluates the capacity of reducing the quantity of cement without strength loss by introducing small limestone and silica particles optimizing the size of the fine particles.

Keywords: binders, optimization, environment, carbon dioxide, clinker



Índice

1.INTRODUÇÃO	1
1.1.Considerações iniciais	1
1.2.Motivação e objetivos da dissertação	2
1.3.Descrição e organização da dissertação	3
2.ESTADO DE ARTE.....	5
2.1.Introdução.....	5
2.2.Ligantes	5
2.3.Processo dos ligantes e betão.....	6
2.4.Cimento	7
2.4.1.Processo de fabrico de cimento.....	7
2.4.2.Composição do cimento.....	8
2.4.2.1.Clínquer.....	9
2.4.2.2.Gesso	11
2.4.2.3.Escórias de Alto-Forno.....	11
2.4.2.4.Materiais Pozolânicos	12
2.4.2.5.Materiais Carbonáticos.....	12
2.5.O efeito das adições.....	13
2.6.Adições previstas na NP EN 206-1	14
2.6.1.Materiais Pozolânicos	14
2.6.2.Adições de Minerais	15
2.6.2.1.Cinzas Volantes	15
2.6.2.2.Metacaulino	16
2.6.2.3.Escórias de Alto-forno	16
2.6.2.4.Fíler Calcário	17
2.6.2.5.Sílica de Fumo	18



2.7.Estudos Desenvolvidos	19
2.7.1.Brasil.....	19
2.7.2.Estados Unidos	21
2.7.3.Países Baixos.....	21
2.7.4.Suiça.....	21
2.7.5.Estudos em parcerias.....	22
3.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	23
3.1.Introdução.....	23
3.2.Local de Trabalho.....	23
3.3.Caracterização dos materiais utilizados.....	24
3.3.1.Materiais Finos	24
3.3.2.Adjuvantes	26
3.3.3.Água	26
3.4.Composição das Argamassas.....	27
3.5.Massa Volúmica	29
3.6. Estudo efetuados em argamassas.....	29
3.6.1.Amassaduras das Argamassas	30
3.6.2.Ensaio no Estado Fresco	31
3.6.2.1.Ensaio do Espalhamento	32
3.6.2.2.Ensaio do Escoamento	34
3.6.3.Desmoldagem e conservação dos provetes	35
3.7.Resistência Mecânica	36
3.7.1.Resistência à flexão	37
3.7.1.1.Equipamento de ensaio.....	37
3.7.1.2. Procedimento de ensaio.....	38
3.7.2.Resistência à compressão	39



3.7.2.1.Equipamento de ensaio.....	39
3.7.2.2.Procedimento de ensaio (NP EN 196-1).....	40
4.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
4.1.Introdução.....	45
4.2.Ensaio de Espalhamento e de Escoamento	45
4.2.1.Análise dos Resultados.....	45
4.3.Resistência à flexão	47
4.3.1.Análise de resultados	47
4.4.Resistência à compressão	49
4.4.1.Análise dos resultados	50
4.5.Fator de Eficiência k.....	52
4.5.1.O que é o fator de eficiência k?	52
4.5.2.Análise de resultados	54
4.5.2.1.Fator k relativo à resistência à compressão.....	54
4.5.2.2.Resistência real e resistência estimada.....	57
4.6.Avaliação energética	62
4.6.1.Custo de energia de produção.....	62
4.6.2.Custos de materiais.....	63
4.6.3.Libertação de CO2	66
5.CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	68
5.1.Conclusão.....	68
5.2.Desenvolvimentos futuros	69
BIBLIOGRAFIA.....	71



ANEXOS	76
Anexo 1 – Ficha técnica do cimento (SECIL)	76
Anexo 2 – Composição das argamassas.....	77
Anexo 3- Equipamento de moagem.....	78
Anexo 4 – Registo da apresentação da argamassa no estado fresco	79
Anexo 5 – Resultados do ensaio de espalhamento e escoamento.....	80
Anexo 6 – Valores registados e calculados de resistência.....	81
Anexo 7 – Valores de eficiência das adições.....	89
Anexo 8 – Valores resultantes dos ensaios experimentais	90
Anexo 9 – Dados registados para os gráficos	94
Anexo 10 – Emissões Atmosféricas, EDP	98
Anexo 11 – Inventário de energia e carbono	99



Índice de Figuras

Figura 1: Betões de alta resistência e durabilidade (desempenho)	7
Figura 2: Processo de fabrico do cimento.....	8
Figura 3- Desenvolvimento dos compostos do clínquer nas cinco zonas principais de um forno com sistema de pré-aquecedores e sem pré-calcinado	11
Figura 4- Esquema do processo de Produção de sílica de fumo numa central de produção do metal silício ou ligas de silício	18
Figura 5- Misturador	30
Figura 6- Procedimento de amassadura de uma argamassa	31
Figura 7- Moldagem da argamassa no estado fresco.....	31
Figura 8: Medição do espalhamento da amassadura	33
Figura 9: Ensaio do espalhamento de uma argamassa com maior consistência	34
Figura 10: Ensaio do Escoamento	35
Figura 11: Argamassas no estado seco antes de se proceder à desmoldagem	36
Figura 12: Equipamento de ensaios à resistência à flexão e à compressão.....	37
Figura 13: Ensaio à flexão.....	38
Figura 14: Ensaio à compressão, antes e depois da força aplicada.	38
Figura 15: Equipamento para determinação da resistência à compressão.....	40
Figura 16: Início do ensaio de resistência à compressão	41
Figura 17: Resultados dos ensaios de espalhamento para cada idade.	46
Figura 18: Resultados dos ensaios de escoamento para cada idade	47
Figura 19: Valores de Resistência à flexão para 1 dia de idade	48
Figura 20: Valores de Resistência à flexão para 7 dias de idade	48
Figura 21 Valores de Resistência à flexão para 28 dias de idade:	49
Figura 22 Valores de Resistência à compressão para 1 dia de idade:.....	50
Figura 23 Valores de Resistência à compressão para 7 dias de idade:	50
Figura 24: Valores de Resistência à compressão para 28 dias de idade	51
Figura 25: Valores de Resistência à compressão para 90 dias de idade	51
Figura 26: Evolução dos fatores de eficiência k.....	56



Figura 27:Resistência de compressão a 1 dia de idade	57
Figura 28:Resistência de compressão real e estimada a 1 dia de idade	58
Figura 29:Resistência de compressão aos 7 dias de idade	58
Figura 30:Resistência à compressão real e estimada aos 7 dias de idade.....	59
Figura 31:Resistência aos 28 dias	59
Figura 32:Resistência de compressão real e estimada aos 28 dias de idade.....	60
Figura 33:Resistência de compressão aos 90 dias de idade	60
Figura 34:Resistência de compressão real e estimada aos 90 dias de idade.....	61
Figura 35:Preço das cinzas volantes em função da distância	65
Figura 36:Preço do fíler em função da distância.....	65



Índice de Tabelas

Tabela 1 – Composição de cimentos Portland (EN 197-1).....	9
Tabela 2 – Principais reações dos processos de formação de clínquer	10
Tabela 3 – Composição das argamassas.....	27
Tabela 4 – Resumo das massas volúmicas.....	29
Tabela 5 – Provetes após ensaio de compressão.....	42
Tabela 6 – Valores do fator de eficiência k para cada idade	55
Tabela 7 – Valores de A e B para cada idade	56
Tabela 8 – Custos dos materiais utilizados.....	63
Tabela 9- Custos de ligantes por toneladas.....	64
Tabela 10- Valores de CO ₂ por material.....	66



CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Em meados do século XIX iniciou-se a produção de cimento através da queima de misturas de calcários e argilas constituindo um pó fino. Esta mistura provocou uma gradual substituição dos cimentos naturais devido à sua melhor qualidade. A nova mistura denominou-se por cimento Portland, nome atribuído pelo químico britânico Joseph Aspdin, inspirado na ilha de Portland, devido às propriedades semelhantes com as rochas locais, tais como a durabilidade e firmeza.

A elevada resistência e o poder aglomerante deste material faz com que seja o ligante mais empregado na indústria de construção.

Mas nem só vantagens se encontram no cimento, muito pelo contrário, pois este é um material com um contributo penalizante sob o ponto de vista ambiental.

O cimento é um dos materiais que mais contribui para o efeito de estufa. O fabrico de uma tonelada deste material traduz-se em mais de uma tonelada de CO₂ libertado para a atmosfera. (Sousa, 2005)

A preocupação com o impacto ambiental é notória a nível mundial e nas mais variadíssimas áreas. Com isso as medidas para preservar o meio ambiente também têm aumentado, como por exemplo a reciclagem, sendo esta uma das medidas mais importantes para a sustentabilidade. Paralelamente a este conceito também a construção civil tem procurado responder aos problemas que envolvem o nosso meio ambiente, bem como preservar os recursos naturais.

Neste trabalho de dissertação procuram-se equacionar soluções que tenham em vista a diminuição da libertação de CO₂ na produção de betão, bem como aumentar a sua eficácia e eficiência, ao

mesmo tempo que preservamos o meio ambiente, para isso o estudo é dirigido a uma procura de ligantes cimentícios com baixo teor de clínquer.

Os ligantes são designados como “produtos que têm a propriedade de aglomerar uma porção elevada de materiais “inertes”, conferindo ao conjunto grande coesão e resistência.”; são matérias com características aglomerantes que ganham presa e endurecem. (ESTIG, 2008)

O cimento, como material ligante, tem um papel fulcral na composição do betão, permitindo que este adquira as características eficientes que o faz ser tão recorrente na construção. Este facto torna este estudo mais pertinente, pois há uma necessidade de encontrar um substituto que responda de forma positiva ao meio ambiente, sem perder características, como a resistência.

1.2.Motivação e objetivos da dissertação

A escolha do tema da presente dissertação teve em conta a preocupação com o desequilíbrio do meio ambiente desencadeado por ações humanas. Os problemas referentes ao meio ambiente são inúmeros e conseqüentemente surge uma notória necessidade de tentar reduzir ou mesmo eliminar possíveis causadores, bem como uma procura por encontrar soluções que sejam eficientes e eficazes.

Estamos numa época em que a construção sustentável começa a atingir uma grande relevância, apresentado por isso um notório crescimento. Com esta dissertação pretende-se deixar uma pequena contribuição a fim de preservar o meio que nos envolve, tornando desta forma a construção um pouco mais ecológica.

Esta dissertação tem como enquadramento as seguintes questões:

- ✓ É possível produzir um betão mais ecológico?
- ✓ Como é possível diminuir a libertação de CO₂?
- ✓ Os ligantes cimentícios com baixo teor em clínquer são possíveis?
- ✓ São os betões eficazes?
- ✓ É a sua produção rentável?

O objetivo concreto e principal desta tese foi fazer uma avaliação da eficiência da substituição num cimento Portland de clínquer por uma adição no que respeita à resistência à compressão.

Para a avaliação comparativa, foi escolhida a propriedade resistência à compressão, dada a natureza da especificação do betão, feita quase sempre para satisfazer uma dada classe de resistência. A eficiência ambiental ou económica é feita, assim, comparando o desempenho por unidade de resistência.

1.3.Descrição e Organização da dissertação

A estrutura da presente dissertação apresenta-se de forma a poder responder ao trabalho de investigação proposto.

Assim de forma a cumprir os objetivos definidos, a presente dissertação está estruturada em 5 capítulos, com os seguintes conteúdos:

➤ **Capítulo 1- Introdução**

É efetuada uma introdução ao tema, onde há um enquadramento relativamente aos ligantes e à libertação de dióxido de carbono associado ao cimento, apresentam-se ainda os objetivos da dissertação e é descrita a estruturação da mesma.

➤ **Capítulo 2- Estado de Arte**

Dá lugar ao estado de arte, tanto a nível nacional como internacional, neste capítulo permite-se ganhar um maior conhecimento relativamente ao tema, bem como dos materiais fulcrais para o desenvolvimento do presente estudo. Outro ponto que se dá a conhecer é uma perceção de estudos semelhantes já realizados por outras entidades, ou seja, outras soluções para o problema em estudo ou para situações parecidas.

➤ **Capítulo 3- Procedimento Experimental**

São descritos os materiais usados para o trabalho experimental, bem como todo o procedimento dos ensaios realizados.

➤ **Capítulo 4- Apresentação e Discussão dos Resultados**

São apresentados e devidamente analisados os resultados do trabalho experimental.

➤ **Capítulo 5- Conclusões e propostas futuras**

Diz respeito às conclusões gerais e a propostas futuras.

CAPÍTULO 2

ESTADO DE ARTE

2.1. Introdução

Este trabalho de dissertação enquadra-se no âmbito das soluções que têm em vista a diminuição da libertação de CO₂ na produção de betão, mais propriamente, o estudo é dirigido aos ligantes cimentícios com baixo teor de clínquer Portland.

Os ligantes são designados como “produtos que têm a propriedade de aglomerar uma porção elevada de materiais agregados, conferindo ao conjunto grande coesão e resistência.”, são por isso materiais com características aglomerantes que ganham presa e endurecem (Coutinho, 1988).

2.2 Ligantes

Os ligantes dividem-se em dois grandes grupos os hidrófilos e os hidrófobos (Coutinho, 2006).

Os grupos dos hidrófilos definem-se por “ligantes constituídos por corpos sólidos finamente moídos que, quando misturados com a água, formam uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo da água.” (Coutinho, 2006). Este grupo por sua vez subdivide-se nos ligantes aéreos (cal aérea, gesso), quando envolvidos com água formam uma pasta que endurece ao ar e nos ligantes hidráulicos (cimento e cal hidráulica), devido à presa e endurecimento que adquirem, tanto em contacto com o ar, bem como debaixo de água.

Por último o grupo dos hidrófobos que se definem por “líquidos viscosos ou soluções resinosas cujo endurecimento é provocado por aumento da viscosidade, formando estruturas coloidais rígidas” (Coutinho, 2006), este género de ligante após o endurecimento expelle a água, são compostos orgânicos em que a água não tem qualquer papel na produção e endurecimento do aglomerante. Também denominados por ligantes hidrocarbonados (alcatrão, asfalto, materiais plásticos ou sintéticos como resinas) têm uma aplicação mais reduzida, como por exemplo para estabilização de solos, revestimentos superficiais; argamassas e betões betuminosos e impermeabilizações (Coutinho, 2006).

2.3. O progresso dos ligantes e do betão

O uso de materiais cimentícios não é de agora, muito pelo contrario, esta ligado ao passado. Na antiguidade os Egípcios utilizavam como ligante gesso impuro calcinado.

No que remota aos Gregos e aos Romanos estes usavam a cal, que era obtida pela calcinação de pedra calcária, para preparar argamassas de boa qualidade misturando pastas de cal com areia que serviam para unir as estruturas de pedra. Ainda hoje é possível observar construções romanas, o que demonstra a qualidade e a arte de perfeição que era realizada naqueles tempos. Os construtores da antiguidade descobriram que, empregando certas areias de origem vulcânica, resultavam argamassas de elevada resistência mecânica e que resistiam bem à ação das águas doces, bem como das águas salgadas. No entanto, esta descoberta não prevaleceu com a queda do Império Romano, e até à Idade Média, observou-se um decréscimo no que diz respeito à qualidade e durabilidade das argamassas usadas na construção (Sousa, 2005).

A partir do século XVIII, alguns cientistas começaram a debruçar-se sobre estes problemas, tendo-se dado um passo importante no conhecimento do cimento com estudos de John Smeaton (1756) que descobriu que se podia obter uma cal de carácter hidráulico (Sousa, 2005).

Em meados do século XIX os cimentos naturais passam a sofrer uma gradual substituição por um novo cimento como melhores qualidades, obtido pela cozedura de misturas de calcário e argila. A empregabilidade deste novo material, cimento Portland, veio revolucionar a construção nos primórdios do século XX (Sousa, 2005).

Nos anos que se seguiram à Segunda Guerra Mundial a indústria cimenteira sofreu um ritmo de crescimento exponencial. De 108 milhões de toneladas em 1948, a produção mundial de cimento praticamente decuplicou em 40 anos, atingindo os 1000 milhões de toneladas em 1986, estimando-se um consumo de cimento de cerca de 2000 milhões de toneladas em 2004 (Sousa, 2005).

No que diz respeito ao betão, este é um material composto por uma mistura de cimento, agregados finos e grossos, água e eventuais adições e adjuvantes. Mais uma vez mais, os romanos foram a primeira civilização a usar este material de forma sintética.

As principais alterações registam-se na sua composição, bem como alteração dos seus componentes, enumerando-se os melhoramentos que têm vindo a ser efetuados no cimento, a introdução de adjuvantes introdutores de ar, a introdução de adjuvantes redutores de alta gama (os superplastificante) e alterações verificadas na aplicação de adições minerais (Sousa, 2005).

A resistência e durabilidade deste material dependem da proporção entre os materiais que o compõem. É chamada de dosagem ou traçado a mistura entre os materiais constituintes.

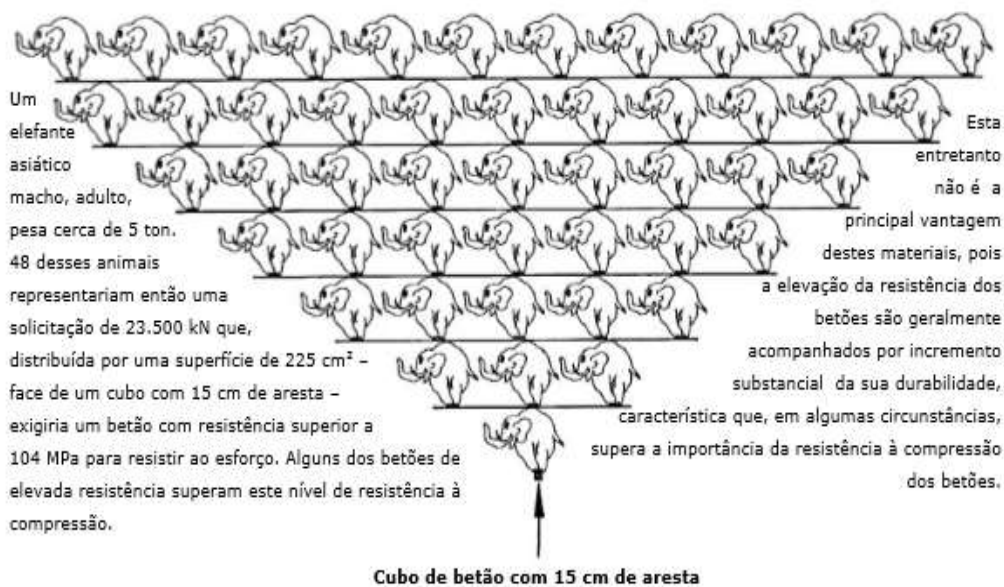


Figura 1: Betões de alta resistência e durabilidade (desempenho) (Sousa, 2005)

Ao betão é atribuída uma classe que é avaliada a partir da imposição de um valor mínimo característico de resistência à compressão aos 28 dias de idade. O desempenho pode assim ser avaliado através de critérios de resistência.

2.4. Cimento

2.4.1. Processo de Fabrico de cimento

O processo de fabrico de cimento assemelha-se em todo o mundo e inicia-se com a exploração das matérias-primas de uma pedra, as quais devem conter, em determinadas proporções, Cálcio, Sílica, Alumina e Ferro. O processo de exploração é conseguido pela recorrência a explosivos ou por um sistema mecânico, na maioria das vezes é realizado a céu aberto.

Após a extração nas pedreiras as matérias-primas são trituradas e passam por uma primeira etapa de homogeneização, a pré-homogeneização.

Seguidamente, aquelas matérias-primas, com a eventual adição de corretivos (areias, calcários de alto teor, cinzas de pirite, etc.) são simultaneamente secas e moídas até atingirem um pó muito fino, o cru, que depois é homogeneizado e armazenado em silos. O cru é levado para fornos que atingem temperaturas superiores a 1500°C, resultando o clínquer.

A moagem muito fina do clínquer associado ao regulador de presa (gesso) e outros constituintes (escórias de alto forno, "filler" calcário, cinzas volantes, etc.) vai dar origem aos diversos tipos de cimento, de acordo com as Normas em vigor, o produto final destina-se à ensilagem posterior expedição (cimento ensacado e/ou a granel).

A Figura 2 ilustra os processos de fabricação do cimento.

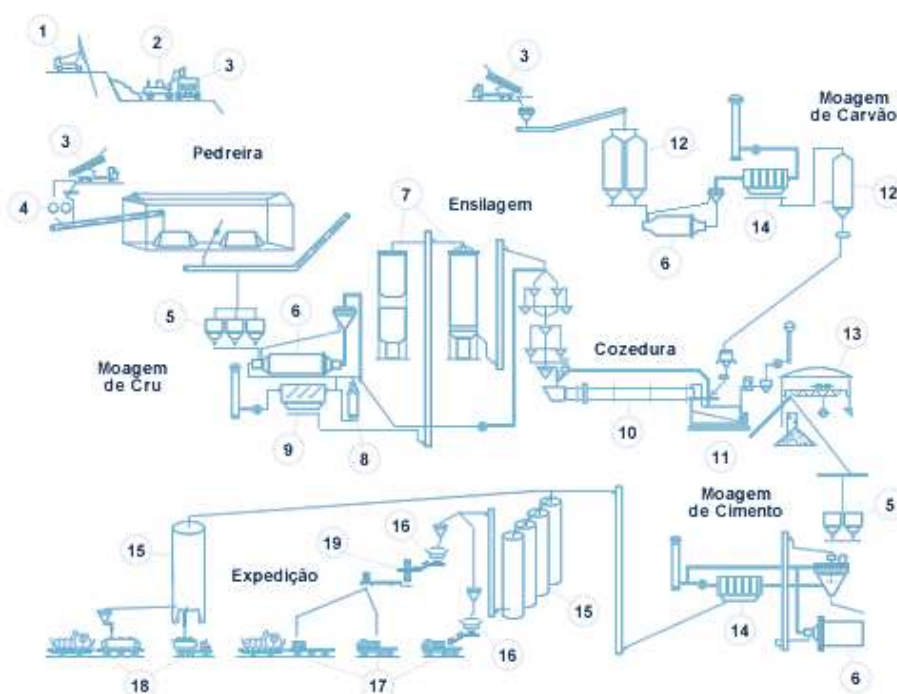


Figura 2: Processo de fabrico do cimento (CIMPOR)

Legenda:

1. Perfuradora, 2. Pás Carregadoras, 3. Camiões Basculantes, 4. Britador, 5. Tremonhas, 6. Moinhos, 7. Silos Homo e Armazenamento, 8. Torre de Condicionamento, 9. Electrofiltro, 10. Forno, 11. Arrefecedor, 12. Silos para Carvão, 13. Armazém para Clínquer, 14. Filtros de Mangas, 15. Silos para Cimento, 16. Ensacadoras Rotativas, 17. Expedição de Cimento em Saco, 18. Expedição de Cimento a Granel, 19. Paletização (paletes ou pacotões - embalagem de plástico).

2.4.2. Composição do cimento

O cimento é constituído por clínquer e adições, sendo o clínquer o constituinte em maior proporção na generalidade dos cimentos. Os outros constituintes, pelo contrário, variam entre os diferentes tipos de cimento, e são elas que lhe conferem diferentes propriedades mecânicas e químicas.

Os outros constituintes são matérias-primas como o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e materiais carbonáticos, que são misturadas com o clínquer na fase de moagem.

Tabela 1: Composição dos cimentos Portland (EN 197-1)

Tipos principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa ³⁾										Constituintes adicionais minoritários	
			Clinker	Escória de alto forno	Silica de fumo	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido	Calcário			
						natural	natural calcinada	siliciosa	calcária		L	LL		
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de pozolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
Cimento Portland composto ^{c)}	CEM II/A-M	80-88	<----- 12-20 ----->										0-5	
	CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->											
CEM III	Cimento de alto-forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cimento pozolânico ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Cimento composto ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	<----- 31-49 ----->			-	-	-	-	0-5	

a) Os valores do Quadro referem-se à soma dos constituintes principais e dos adicionais minoritários.
b) A incorporação de sílica de fumo é limitada a 10 %.
c) Nos cimentos Portland compostos CEM II/A-M e CEM II/B-M, nos cimentos pozolânicos CEM IV/A e CEM IV/B e nos cimentos compostos CEM V/A e CEM V/B os constituintes principais, além do clínquer, devem ser declarados na designação do cimento (como exemplo, ver secção 8).

2.4.2.1. Clínquer

O clínquer é um material conseguido a partir da sinterização de rochas carbónicas e argilosa, ou outro material similar que possua composição semelhante e suficiente reatividade. Até obtermos o produto final, denominado por clínquer, ocorrem várias reações durante o processo, essas reações são apresentadas na tabela 2 (Gobbo, 2003).

A sua composição química contém proporções de determinados óxidos, como, CaO, SiO₂, Al₂O₃ de Fe₂O₃ e outros componentes, distribuídos por quatro fases distintas, denominadas por alite, belite, fase aluminato e fase ferrite, estas fases são representadas na Figura 3 (Gobbo, 2003).

Tabela 2: Principais Reações do processo de formação de clínquer (Gobbo, 2003)

Temperatura	Reação
100-200	Libertação de água livre
500-700	Desidroxilação dos argilominerais; transformação do quartzo- α em quartzo- β
700-900	Decomposição dos carbonatos, com libertação de CO ₂ ; primeiras reações de estado sólido, levando à formação de aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos e início de formação da belite ($2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4$); conversão de quartzo- β em cristobalita.
900-1200	Conversão de ferroaluminatos e aluminatos em C ₄ AF e C ₃ A; formação da belite a partir da sílica remanescente e dos cristais de cal livre.
1200-1350	Cristalização das primeiras alites (~1.200°C), a partir de cristais pré-existentes de belite e cal livre ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaO} \rightarrow \text{C}_3\text{SiO}_5$); a partir de ~1.280°C inicia-se a formação de fase líquida a partir dos aluminatos e ferroaluminatos cálcicos, com consequente nodulização do clínquer.
Acima de 1350	Desenvolvimento dos cristais de alite.

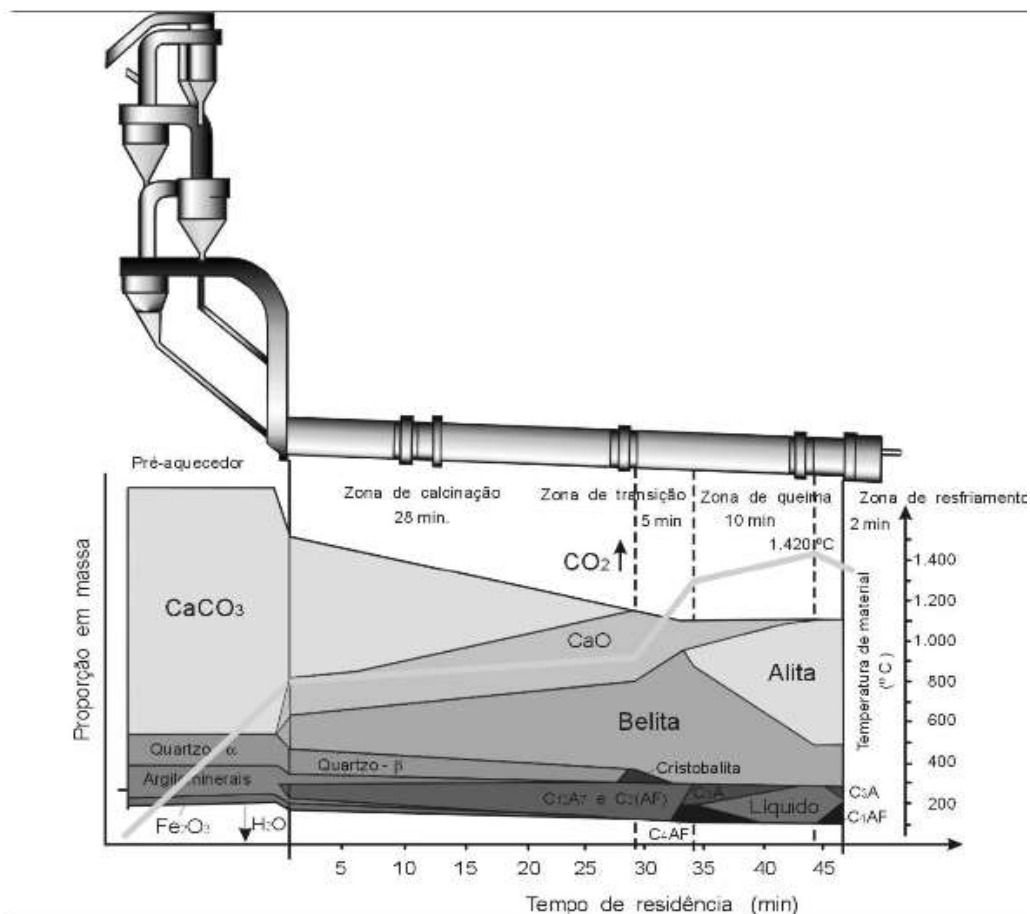


Figura 3: Desenvolvimento dos compostos do clínquer nas cinco zonas principais de um forno com sistema de pré-aquecedores e sem pré-calcinado (Gobbo, 2003)

2.4.2.2. Gesso

O gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) é um mineral aglomerante aéreo que é obtido através do aquecimento da gipsita, que posteriormente é reduzida a pó. Este mineral apresenta como funcionalidade o controlo do tempo de presa, ou seja, o início do endurecimento do clínquer moído quando misturado com água. Se não fosse empregue o gesso na fase de moagem do clínquer, quando em contacto com a água, o cimento endureceria repentinamente, o que prejudicaria a viabilidade do seu uso em obras.

2.4.2.3. Escórias de Alto-forno

Escória de Alto-forno é um produto conseguido sob a forma de granulado pela fusão e arrefecimento brusco da escória de ferro, subproduto da produção de ferro e de aço, em alto-forno.

Em tempos as escórias de alto de forno eram consideradas um material sem grande utilidade, no entanto isto muda ao descobrirem que também possuía propriedades de ligante hidráulico muito resistente, isto é, reagem quando em contacto com a água e desenvolvem características aglomerantes, assemelhando-se ao clínquer. Desta forma tornou-se possível conseguir um tipo cimento como melhores propriedades, como melhor durabilidade e maior resistência, adicionando as escórias de alto-forno à moagem do clínquer com o gesso.

2.4.2.4. Materiais Pozolânicos

Os materiais pozolânicos são originários de rochas magmáticas ou sedimentares, de certos tipos de argila, quando expostos a elevadas temperaturas, e de derivados da queima de carvão mineral.

A adição deste tipo de materiais permite ao cimento ganhar maior resistência a meios agressivos (esgotos, água do mar, solos sulfurosos e a agregados reativos), diminuir o calor de hidratação, diminuir a permeabilidade, reduzir a segregação dos agregados e oferecer maior trabalhabilidade.

2.4.2.5. Materiais Carbonáticos

Os materiais carbonáticos são derivados de rochas moídas e têm na sua constituição carbonato de cálcio.

O fíler calcário quando finamente moído é empregue no cimento a fim de diminuir a percentagem de vazios, desta forma provoca uma melhor trabalhabilidade e acabamento, bem como um aumento da resistência inicial do cimento.

2.5.O efeito das adições

Como já referido anteriormente, o cimento é um dos materiais mais consumidos em todo o mundo e a sua indústria de produção é umas das indústrias mais poluentes, conseqüentemente ocorre a necessidade de atenuar o impacto ambiental e reduzir a emissão de gases tóxicos para a atmosfera.

Este estudo surge com esta mesma necessidade, diminuir o impacto ambiental, para isso pressupõe a substituição de parte do cimento por aditivos, ou mais concretamente, usando ligantes com baixo teor em clínquer, que possam responder da mesma forma eficiente, na produção de argamassas e betões.

O clínquer proporciona ao cimento propriedades que o fazem responder de forma positiva e que levam a sua grande aplicabilidade na construção, desta forma não há uma necessidade de responder apenas de forma positiva ao meio ambiente, também é necessário que o material não perca as suas características, como a resistência exigida. As substituições realizadas vão de encontro a essa necessidade, procurando também materiais que possuam propriedades semelhantes.

No trabalho experimental realizado foram usadas adições com propriedades ligantes, como as cinzas volantes que contêm sílica ativa, e adições sem propriedades ligantes, como o fíler calcário e areia siliciosa moída, que podem aumentar a eficiência do clínquer.

A sílica ativa devido às suas propriedades químicas permite melhorar as condições de aderência pasta/agregado, diminuir a lixiviação e a porosidade quando combinada com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), produto que resulta da hidratação do cimento Portland, originam também silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o constituinte principal do cimento hidratado para a resistência à compressão (Santos, 2012).

Ao substituir o cimento, mesmo sendo uma substituição parcial, por outros constituintes finos há que ter uma especial atenção às resistências obtidas, isto é, o objetivo do estudo é que a alteração do material não faça perder as suas boas características, pois se a perda de resistência for proporcional à alteração, então não é vantajoso e não se torna eficaz. Contudo se a introdução de um novo ligante, como substituto do cimento, mostrar que não houve uma perda total da resistência, sempre tendo em conta a proporção do material introduzido, há que estudar essa potencial substituição, de forma a torna-la o mais eficiente possível, bem como definir os custos que isso acarreta.

2.6. Adições previstas na NP EN 206-1

Segundo a norma NP EN 206-1, a adição é definida como um material finamente dividido com a finalidade de melhorar certas propriedades especiais do betão. Seguidamente são expostas algumas adições que de acordo com esta norma podem ser usadas no betão.

2.6.1. Materiais Pozolânicos

Os povos na antiguidade usavam os solos de origem vulcânica a fim de obterem “ligantes hidráulicos, os quais tinham propriedades pozolânicas. Atualmente os “materiais pozolânicos” são substâncias de composição siliciosa ou sílico-aluminosa ou ainda uma combinação de ambas.

No que diz respeito à sua classificação estes materiais podem ser classificados de acordo com a sua origem:

- Naturais;
- Artificiais;
- Subprodutos de industriais ou da agricultura (cinza volante, sílica de fumo, cinza de casca de arroz).

As pozolanas naturais são de origem vulcânica, normalmente de carácter petrográfico ácido (65% de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Por sua vez, as pozolanas artificiais são produto resultante de processos industriais ou procedentes de tratamento térmico com atividade pozolânica.

Na sua constituição as pozolanas apresentam fundamentalmente concentrações de sílica e alumina, estas por si só não contêm propriedades aglomerantes e hidráulicas, no entanto possuem constituintes que à temperatura ambiente se combinam, quando em contacto com a água, com hidróxido de cálcio e com diferentes componentes do cimento, obtendo compostos de elevada estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. São, desta forma, substâncias providas de grande reatividade para o hidróxido de cálcio, mas insolúveis e inertes na água.

Uma das principais vantagens da utilização das pozolanas, como em cimentos pozolânicos é a diminuição da taxa de desenvolvimento de calor de hidratação, bem como o aumento de resistência ao ataque por sulfatos e ao ataque por ácidos fracos.

Para além das vantagens descritas acima os materiais pozolânicos apresentam outras vantagens quando utilizados no betão com cimento Portland, como:

- Aumento da trabalhabilidade;
- Redução da expansão por reação álcali-agregado;
- Maior impermeabilidade.

Todos estes efeitos traduzem-se em geral num aumento da durabilidade dos betões.

Os materiais pozolânicos, em relação ao clínquer do cimento Portland, são energeticamente mais económicos, contribuindo para uma redução do impacto ambiental, para além da vantagem associada quando estes provêm de resíduos industriais poluidores, mas nem tudo são vantagens, pois ao substituir parte do cimento por pozolanas, os betões passam a obter resistências iniciais menores, isto devido às reações pozolânicas serem mais lentas (Netto, 2006).

2.6.2. Adições de Minerais

2.6.2.1. Cinzas volantes

As cinzas volantes são produzidas através das centrais termoeléctricas de queima de carvão, sendo arrastadas pelos gases de combustão e capturadas antes de saírem para a atmosfera. De acordo com a NP EN 450:1995, as cinzas volantes são definidas por um pó fino constituído por partículas esféricas e vítreas provenientes da queima de carvão pulverizado, com propriedades pozolânicas, constituídas principalmente por SiO_2 e Al_2O_3 .

As cinzas são utilizadas como substituição parcial do cimento, permitindo a redução deste produto, bem como, a diminuição das emissões atmosféricas de CO_2 . Para além desta vantajosa ação, as cinzas volantes também conferem outras potencialidades à mistura, realçam certas propriedades do betão, como a trabalhabilidade, o que melhora a sua compactação e bombagem, redução do calor de hidratação, redução da permeabilidade e consequentemente melhoria da durabilidade. (Santos, 2012) A adição de cinzas, com quantidades superiores a 30% ou 40%, possibilita uma melhoria na resistência aos sulfatos e à reação expansiva entre a sílica do agregado e os alcalis do cimento, porém a resistência mecânica do betão pode diminuir; abaixo desta percentagem de adição, a incorporação de cinza reduz as resistências iniciais, o que pode conduzir a um aumento do tempo de descofragem, contudo pode permitir resistências a longo prazo iguais ou superiores às do cimento Portland.

Estas adições são formadas, essencialmente, por sílica, alumina e óxido de ferro, podendo assim ser classificada de acordo com a quantidade de cálcio (presente no CaO). (ASTM, 2007)

- CaO <10% - cinza volante siliciosa (propriedades pozolânicas);
- CaO > 10% - cinza volante calcária (propriedades hidráulicas e/ ou pozolânicas).

2.6.2.2. Metacaulino

O caulino é uma argila que pertence à classe dos silicatos com composição química $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Este produto ao passar por um processo de calcinação (700-900°C), de forma controlada, origina o metacaulino. (Sousa, 2005)

O metacaulino, produto altamente pozolânico, é visto como uma solução económica e ambientalmente benéfica na substituição de parte do cimento utilizada para fabrico de betão. Em comparação com o cimento, o caulino necessita de um menor consumo de energia de tratamento, possui ainda melhor aproveitamento dos recursos existentes para a sua aquisição.

O metacaulino forma uma fase de transição pouco cristalizada e a ativação pozolânica pelo hidróxido de cálcio fornece produtos de composição e estruturas semelhantes aos realizados com cimento Portland (Sousa, 2005).

O desenvolvimento da resistência à compressão do betão depende de vários fatores como o efeito de enchimento, o efeito da diluição devido ao aumento efetivo da razão a/c e da reação pozolânica do metacaulino com o $Ca(OH)_2$ (Santos, 2012).

2.6.2.3. Escórias de alto-forno

As escórias de alto-forno são um produto que resulta da fusão e arrefecimento da escória de ferro de um alto-forno em água a vapor, obtendo-se um produto vítreo granulado que, posteriormente é moído num pó fino. Este material apresenta-se quimicamente semelhante ao cimento Portland, pois possui quantidades consideráveis de silicato dicálcio, podendo também apresentar por vezes silicato tricálcico.

Ao introduzir escórias como substituição parcial do cimento apresenta como vantagens uma economia de energia, pois provoca uma redução do calor de formação do clínquer e, a consequente diminuição da formação de gases, como o CO₂.

Apesar da sua elevada semelhança química ao cimento, este material reage com extrema lentidão quando empregues isoladamente, no entanto, a ativação pode ser efetuada pela junção de soda (NaOH) de potassa (KOH) cáustica (álcalis), cal, silicato de sódio ou mesmo cimento Portland, provocando o aumento de pH para 12 e ativando as reações de hidratação das escórias. Os produtos da hidratação da escória diferem aos produzidos do cimento, na ausência da produção de hidróxido de cálcio. Esta ausência é importante, pois evita a ocorrência de soluções sobre saturadas de hidróxido de cálcio no interior, condições fundamentais à degradação do betão por:

- Ataque por sulfatos aos aluminatos do cimento ou alumina do agregado, produzindo-se etringite¹ com expansões;
- Ataque por álcalis à sílica reativa dos agregados. (Sousa, 2005)

2.6.2.4. Fíler calcário

O fíler calcário é um material com finura sensivelmente semelhante à do cimento Portland, sendo benéfico para garantir algumas propriedades do betão, tais como:

- Trabalhabilidade;
- Densidade;
- Permeabilidade;
- Capilaridade;
- Exsudação;
- Tendência para fissuração.

De forma global os fíleres são inertes químicos, contudo, se produzirem taumasite, colaboram para o ataque do betão por sulfatos.

Os fíleres trabalham como centros de nucleação das reações, o que se torna vantajoso, visto que melhora a hidratação do cimento Portland.

¹ A etringite é um trissulfoaluminato de cálcio hidratado de fórmula $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$

No grupo dos fíleres, é o filer calcário que ocupa o lugar do mais empregue, se este for devidamente moído, com um Blaine superior a $500\text{m}^2/\text{kg}$, e devidamente misturado no cimento pode ser utilizado como redutor da dosagem de água, conseqüente da melhoria da granulometria total das partículas a introduzir no betão, provocando um aumento da trabalhabilidade.

2.6.2.5. Sílica de fumo

A sílica de fumo apresenta-se como uma material superfino e a sua dimensão média das partículas é de cerca de $0,1\mu\text{m}$.

O processo de introdução da sílica de fumo como adição do betão foi lento, hoje em dia, por norma, é empregue em geral cerca de 8-10% de sílica de fumo em relação à massa de cimento, nos betões com esta adição. A sílica de fumo é um subproduto da preparação do metal silício ou ligas de silício, nomeadamente de ferrossilício, em fornos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão, a elevadas temperaturas (cerca de 2000°C) (Sousa, 2005).

As matérias-primas inseridas no forno para fabrico do silício são compostas por quartzo, carvão e pedaços de madeira. As reações químicas que têm lugar são complexas, uma delas implica a formação de um gás, o monóxido de silício (SiO), este oxida-se e forma o SiO_2 , que condensa em pequenas esferas de sílica amorfa. Estas partículas são, posteriormente, arrastadas nos gases de escape e captadas em filtros de saco, antes da sua saída para a atmosfera, alcançando-se assim a sílica de fumo (Coutinho, 2006).

Na figura seguinte ilustra-se um esquema do processo de produção de sílica de fumo.

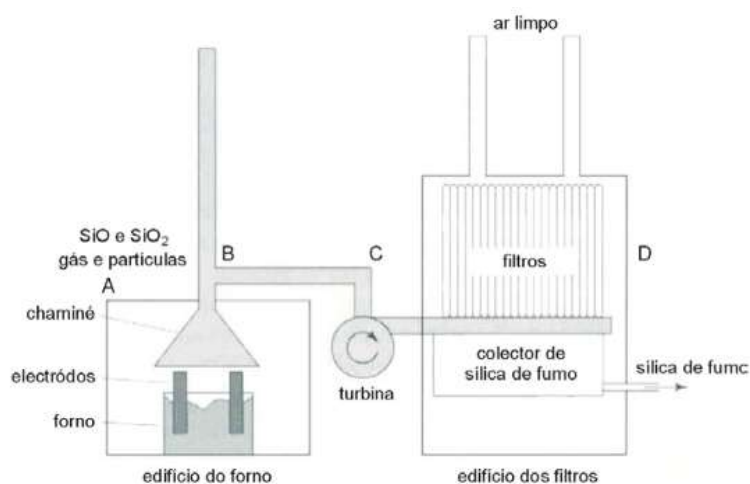


Figura 4: Esquema do processo de Produção de sílica de fumo numa central de produção do metal silício ou ligas de silício (Fidjestol e Lewis, 1998) (Coutinho, 2006)

Ao incorporar sílica de fumo na composição do betão permite obter melhores resultados a nível de resistência, durabilidade e resistência aos ciclos gelo/degelo, estas propriedades são alcançadas como resultado da reação pozolânica e do efeito de enchimento dos poros, a sílica de fumo produz uma matriz homogénea nos poros do betão, reduzindo a dimensão que normalmente possuem. No entanto para atingir um melhor proveito das propriedades deste material é necessário o uso de superplastificantes de forma a garantir a sua boa dispersão na mistura do betão (Sousa, 2005).

As características do material podem alterar em relação da sua pureza, depende por isso, da matéria-prima, dos elétrodos do forno elétrico e da quantidade do carbono reductor (Sousa, 2005).

Para além das vantagens descritas anteriormente, a sílica de fumo apresenta ainda vantagens económicas e ambientais. Contudo apresenta como desvantagem o seu elevado preço, acima de 1.00€/kg em Portugal, o que torna um fator de inibição para a sua utilização, o custo da sílica de fumo é mais de dez vezes superior ao valor do cimento. A aplicação de uma dosagem corrente de 10% de sílica de fumo em relação à massa de cimento pode elevar o custo do material aglomerante presente no betão para cerca do dobro (Sousa, 2005).

2.7. Estudos desenvolvidos

Cada vez mais a preocupação com o meio ambiente e o bem-estar é acrescida, desta mesma forma a construção tenta equacionar soluções que estejam de acordo com o meio ambiente, isto é, diminuir o impacto ambiental negativo.

Neste sentido vários estudos têm sido realizados por todo o mundo, começando por nos centrar no processo de fabrico de alguns materiais, mais concretamente, no cimento. Qual a obra que não aplica cimento? A maioria delas tem o cimento presente

2.7.1. Brasil

O Brasil talvez seja o país que mais progresso fez neste sentido, podem-se encontrar vários artigos de estudos realizados neste sentido ecológico e algumas soluções já correntes.

Um grupo de investigadores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desenvolveram um cimento ecoeficiente, esta nova formulação do produto permite redução de emissões de CO₂ pela

indústria cimenteira, aumenta a eficiência e diminui a concentração do produto na composição e argamassa (Alisson, 2013).

Para produzir uma tonelada de clínquer, no entanto, a indústria cimenteira emite entre 800 e mil quilos de dióxido de carbono, incluindo CO₂ gerado pela decomposição do calcário e pela queima do combustível fóssil para manter os fornos em funcionamento (Alisson, 2013).

A fim de diminuir as emissões de CO₂ na produção de clínquer, nas últimas décadas as indústrias cimenteiras começaram a substituir parte do material por escórias de alto-forno – um resíduo da siderurgia – e, mais recentemente, por cinza volante – resíduo de termelétricas a carvão (Alisson, 2013)

Esta versão ecológica desenvolvida na Universidade de São Paulo permitiu substituir um material na composição do cimento por outro mais simples, não sendo necessário o processo de aquecimento. O clínquer passa a ser substituído por filler.

Ainda em São Paulo o Instituto de Arquitetura e Urbanismo inventaram um betão feito a partir de materiais reciclados (IUA) da Universidade de São Paulo, substituindo os materiais tradicionais que compõem o betão por componentes reaproveitados.

“No novo betão, a areia de fundição – utilizada em moldes nos processos de fundição de peças metálicas – substitui 70% da areia normalmente utilizada, enquanto a escória de aciaria – resíduo que sobra da produção do aço – substitui 100% da pedra.” (Pablos, 2013)

No Rio de Janeiro, a Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe-UFRJ) desenvolveram alternativas ecológicas para matérias-primas do betão e de produtos de fibrocimento.

“O caso do betão, liga formada por cimento, brita (pedra) e areia, é possível reduzir o consumo de cimento em 20% a 40% com alternativas como cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cinza de casca de arroz e resíduos da indústria cerâmica.” A brita pode ser completamente substituída por materiais obtidos em demolições de construções antigas.(Abdala, 2014)

No caso do fibrocimento, usado na fabricação de telhas ou caixas d'água, o consumo de cimento pode ser reduzido em até 50% com o uso de alternativas ecológicas. As fibras vegetais substituem as fibras minerais tradicionais, como o amianto, que provocam danos à saúde humana. Há estudos com outros materiais como borracha de pneu usado, cinzas de esgoto sanitário ou de queima do lixo para substituir, pelo menos parcialmente, o cimento.” (Abdala, 2012)

2.7.2. Estados Unidos

Nos Estados Unidos o departamento de Engenharia Civil da Universidade de Louisiana criou um material que tem como base geopolímeros, este produto possui grande potencial ecológico. Este material apresenta como principal constituinte as cinzas volantes, um dos produtos industriais que se apresenta em maior abundância.

“O betão de geopolímeros tem grandes vantagens sobre o betão de cimento Portland normal, nomeadamente no que diz respeito à quantidade de emissões de CO₂ na sua produção, resistência à compressão e tração, durabilidade, comportamento à corrosão e fogo e utilização de subprodutos na sua constituição.” (Lemos, 2011)

No entanto existem limitações à sua aplicação, nomeadamente de ativadores alcalinos ou a limitação no uso de adjuvantes, que prevalecem, não se prevendo que a sua utilização possa ser muito vasta.

2.7.3. Países Baixos

Nos países baixos investigadores da Universidade de Tecnologia de Eindhoven conceberam um material cimentício capaz de absorver o dióxido de azoto. O betão produzido a partir deste cimento ganhou o nome de Betão Purificador de Ar devido às suas características ecológicas. (Teixeira, 2011)

2.7.4. Suíça

A professora Karen L. Scrivener apresentou uma análise breve, mas abrangente de opções para os cimentos do futuro, a partir da composição da terra. Mostra assim, misturas em que cerca de metade do clínquer do cimento Portland convencional é substituído por uma combinação de calcário e de argila calcinada. Esta mistura apresenta uma opção extremamente promissora para alcançar menores emissões de CO₂, bem como diminuir custos e aumentar a oferta, principalmente em países tropicais e subtropicais, onde o aumento da demanda será o maior nas próximas décadas. Uma forte manifestação de interesse, por parte de muitos produtores de cimento em todo o mundo, já tem sido recebida por esta tecnologia. (L.Scrivener, 2014)

2.7.5. Estudos em parcerias

Estudos efetuados entre o engenheiro civil Enzo Martinelli da Universidade de Salerno e o engenheiro civil José Guillermo da Universidade de Tucumán permitiram desenvolver o chamado “betão verde”, isto é, um betão enriquecido com fibras vegetais.

“O que estamos a tentar avaliar é como é que podemos reduzir a quantidade de fibras industriais usadas tradicionalmente e substituí-las por fibras industriais recicladas. E estamos a tentar perceber qual é a quantidade de fibras recicladas que podemos misturar no betão para manter a mesma qualidade e resistência.” Enzo Martinelli. (SCI-TECH, 2013)

“Nós inserimos no computador vários parâmetros, incluindo a rigidez de cada componente no interior do betão, a sua forma, a química, a temperatura e o nível de hidratação dentro do concreto, quantas fibras contém e que tipo de fibras. Tudo isto é traduzido em parâmetros que nos ajudam a perceber o comportamento do betão quando submetido a stress mecânico.” Comentário atribuído por, José Guillermo Etse, engenheiro civil, Universidade de Tucumán. (SCI-TECH, 2013)

Outro grupo de investigadores, desta vez, do Instituto de Ciências e Tecnologia do Betão (ICITECH), da Universidade Politécnica de Valência da Universidade Jaume I do Imperial College de Londres e da Universidade Estadual Paulista também trabalharam no mesmo sentido, de reduzir o impacto ambiental, produzindo um novo género de cimento, conseguido através de resíduos cerâmicos. Este novo ligante não possui qualquer adição de cimento Portland

A produção deste novo material emprega materiais reciclados como ladrilhos de barro vermelho, loiças sanitárias e grés porcelânico, com origem de resíduos de construção e demolição (RCD) e da indústria cerâmica, sendo usadas como substâncias ativadoras, hidróxido de sódio, silicato de sódio e água.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1.Introdução

No âmbito desta dissertação e de encontro ao objetivo proposto, no presente capítulo é descrito de forma geral as características dos materiais selecionados para a composição das argamassas em estudo, bem como a apresentação de todos os ensaios, equipamentos e procedimentos usados para elaborar e caracterizar as composições das argamassas em estudo, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Este conhecimento é fulcral para se conseguir uma interpretação conveniente do trabalho experimental e permitir um enquadramento adequado aos resultados obtidos.

O trabalho experimental foi realizado com o intuito de avaliar a capacidade de resistência, reduzindo a dosagem de cimento por introdução de pequenas partículas de calcário e sílica com granulometria otimizada, para este feito foi concebido um programa em folha de cálculo Excel que permitiu determinar a percentagem de partículas finas.

Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios de materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa.

3.2.Local de Trabalho

Todo o processo experimental teve lugar no LNEC, especificamente, no Departamento de Materiais, Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos, em Lisboa.

3.3.Caracterização dos materiais utilizados

Todos os materiais necessários para este estudo encontravam-se disponíveis no LNEC.

3.3.1.Materiais finos

➤ **Cimento**

Para este estudo o cimento usado foi CEM I da classe 52,5 R segundo a NP EN 197-1 em todas as amassaduras.

Sendo este estudo focado na eco-eficiência proveniente da substituição e redução do cimento por outras adições, com intuito de uma possível melhoria da eficiência do clínquer. O impacto desse aumento de eficiência é significativo, face à extensa utilização de cimento em obras correntes de betão armado.

O cimento é constituído quase na sua totalidade por clínquer finamente moído, conferindo a capacidade de produzir betões de elevada resistência.

Neste estudo, a mistura de referência foi realizada apenas com cimento, sem adições, de forma a comparar os seus resultados de resistência com as restantes misturas, onde o cimento foi parcialmente substituído por outras adições.

Dado que a norma dos cimentos já permite que as adições sejam utilizadas em certos teores delimitados, este estudo focou-se na avaliação do comportamento de misturas que a quantidade de adição ultrapassa os limites já admitidos.

➤ **Cinzas Volantes**

Neste estudo utilizaram-se cinzas volantes provenientes da Central Térmica de Sines em três amassaduras, cada uma delas com percentagens diferentes, aumentando-se progressivamente o teor de cinzas em substituição de cimento. As percentagens usadas foram de aproximadamente 55%, 65% e 70%.²

Este material apresentava um valor de superfície específica de 4140 cm²/g.

² A percentagem de substituição mais baixa verificada nas cinzas volantes e na areia fina deveu-se à elevada segregação e exsudação do material, não sendo proveitoso para o produto final valores mais altos.

➤ **Areia Fina Siliciosa**

Em semelhança às cinzas volantes, o mesmo se procedeu em relação à areia fina, esta com partículas próximas compreendidas entre os 160 μm e os 80 μm . Neste caso foram realizadas nove misturas com areia de partículas de pequena dimensão, onde em três o cimento foi parcialmente substituído por areia fina com percentagens de, aproximadamente, 30%, 40% e 50%. A areia fina posteriormente passou por um processo de moagem e o material resultante foi usado para mais três misturas de amassaduras, procedendo da forma descrita acima e com as mesmas percentagens de substituição. O material resultante da moagem possuía partículas com dimensões inferiores a 90 μm . Nas restantes três misturas o cimento foi parcialmente substituído pela combinação da areia fina e da areia fina moída, as percentagens das partículas finas foram obtidas pelo programa de otimização da granulometria.

➤ **Fíler**

O fíler calcário usado para este estudo foi o fíler R70, proveniente da empresa Parapedra. Este foi empregue em três distintas amassaduras em substituição parcial do cimento, sendo as percentagens de substituição usadas para cada uma delas de aproximadamente 65%, 70% e 75%. Este material posteriormente passou por uma fase de moagem, e o material resultante desse processo foi usada para mais três misturas de amassaduras, com percentagens idênticas às descritas acima. Este material antes da moagem apresentava um valor de superfície específica de 8970 cm^2/g , posteriormente à moagem passou a apresentar um valor de 9860 cm^2/g .

O fíler é uma matéria-prima produzida pela moagem fina de calcário, basalto, materiais carbonáticos, entre outros. Neste estudo usou-se fíler produzido pela moagem de calcário. A sua pequena granulometria permite aumentar a trabalhabilidade, diminuir a capilaridade e a permeabilidade de argamassas.

➤ **Areia siliciosa de referência**

Para todas as misturas foi usada uma areia de referência, esta areia resultou da mistura de frações de areia siliciosas com granulometrias diferentes, superiores a 80 μm . A massa deste material, bem como o peso de cada fração, foram iguais para as 19 amassaduras.

3.3.2. Adjuvantes

Não é fácil definir com exatidão um adjuvante, nome que designa determinados produtos comerciais que se adicionam em pequenas quantidades, durante a amassadura, aos constituintes normais das argamassas e betões com o fim de desencadear ou alterar determinadas propriedades, quer no estado fluído, quer no estado depois do endurecimento ou ainda no momento de passagem de um para o outro.

O adjuvante é uma substância empregada em percentagem muito pequena, igual ou inferior a 5% do peso do cimento.

As alterações que se podem registar nas argamassas e betões, por adição de adjuvantes trazem algumas vantagens, tais como:

- Melhorar a trabalhabilidade;
- Acelerar ou retardar a presa;
- Acelerar o endurecimento nas primeiras idades;
- Aumentar as tensões de rotura após a primeira semana;
- Aumentar a resistência aos ciclos de congelação e descongelação;
- Diminuir a permeabilidade aos líquidos;
- Impedir a segregação e a sedimentação do cimento nas caldas de injeção. (Coutinho, 1971)

O adjuvante usado para este trabalho foi o Sikaplast 912, sendo este um redutor de água corrente e o objetivo pretendido para as misturas passava pela redução o teor de água. A dosagem deste adjuvante manteve-se para todas as misturas realizadas.

3.3.3. Água

A água usada em todas amassaduras das argamassas foi proveniente da rede pública de abastecimento de Lisboa. Sendo esta água potável, e de acordo com a NP EN 1008 (2003) é considerada apropriada para o fabrico de betão. Esta não foi caracterizada por não se considerar pertinente para os resultados deste trabalho

3.4. Composição das argamassas

Na tabela seguinte pode-se observar as dosagens por m³ (kg/m³) de cada amassadura.

Tabela 3: Composição das argamassas

Nº	Cimento	Cinzas	Filer R70	Filer R70 moído	Areia fina	Areia fina moída	Areia referência > 80	Água	Adjuvante	Peso ligante	Volume	A/C	A/L
1	798	0	0	0	0	0	1317	239	4	798	1,000	0,300	0,300
2	344	420	0	0	0	0	1260	229	4	763	1,000	0,667	0,300
3	265	492	0	0	0	0	1250	227	4	757	1,000	0,857	0,300
4	102	642	0	0	0	0	1229	223	4	745	1,000	2,182	0,300
5	279	0	501	0	0	0	1287	234	4	780	1,000	0,839	0,300
6	236	0	543	0	0	0	1285	234	4	779	1,000	0,992	0,300
7	192	0	585	0	0	0	1282	233	4	777	1,000	1,212	0,300
8	279	0	0	501	0	0	1287	234	4	780	1,000	0,839	0,300
9	236	0	0	543	0	0	1285	234	4	779	1,000	0,992	0,300
10	192	0	0	585	0	0	1282	233	4	777	1,000	1,212	0,300
11	386	0	0	0	394	0	1288	234	4	780	1,000	0,606	0,300
12	474	0	0	0	310	0	1294	235	4	784	1,000	0,496	0,300
13	564	0	0	0	225	0	1300	236	4	788	1,000	0,420	0,300
14	386	0	0	0	248	146	1288	234	4	780	1,000	0,606	0,300
15	474	0	0	0	195	115	1294	235	4	784	1,000	0,496	0,300
16	564	0	0	0	141	83	1300	236	4	788	1,000	0,420	0,300
17	386	0	0	0	0	394	1288	234	4	780	1,000	0,606	0,300
18	474	0	0	0	0	310	1294	235	4	784	1,000	0,496	0,300
19	564	0	0	0	0	225	1300	236	4	788	1,000	0,420	0,300

Apesar de apenas alguns materiais usados para substituição do cimento não terem características ligantes, considerou-se como potencial ligante toda a sua massa, vindo o ligante assim estabelecido definido pela seguinte equação:

$$(Eq. 3.1) \text{ Ligante} = C_m + CV + Fl + Flm + Arf + Arfm$$

Onde:

C_m – Cimento Portland 52,5 R;

CV – Cinzas Volantes;

Fl – Filer R70;

Flm – Filer R70 moído;

Ar – Areia fina siliciosa (80 a 160 microns);

$Arfm$ – Areia fina siliciosa moída.

A pequena parcela de areia fina proveniente da areia de referência ficou assim excluída desta definição de ligante.

A pequena parcela de areia fina proveniente da areia de referência ficou assim excluída desta definição de ligante.

As dosagens de cada constituinte foram estabelecidas de forma a respeitar em todas as amassaduras as seguintes relações em massa:

areia de referência/ligante =1,65;

água/ligante =0,30;

adjuvante*100/ligante =0,55.

Assim, entre amassaduras as variações respeitaram apenas à variação percentual de cada constituinte do ligante. Como as massas volúmicas dos constituintes do ligante variam, existem pequenas diferenças na dosagem de ligante por metro cúbico, mas estas são de pequena expressão.

3.5. Massa Volúmica

Entende-se por massa volúmica a relação entre a massa de um corpo e o seu volume. Quando aplicada ao inerte especifica-se à massa volúmica das partículas individuais, e não à massa agregada em conjunto. As massas volúmicas dos materiais utilizados neste estudo são apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 4: Resumo das massas volúmicas

Material	Massa Volúmica (Kg/cm³)
Cimento	3080
Cinzas Volantes	2330
Areia fina	2620
Areia de Referência	2650
Fíler	2700
Água	1000
Adjuvante	1070

3.6. Estudos efetuados em argamassas

Para a realização de todas as amassaduras usou-se a areia de referência, descrita anteriormente. Todas as misturas tiveram concentrações idênticas desta areia para se conseguir uma eficiente comparação entre os ligantes e assim se alcançar resultados o mais precisos possível. A mistura das argamassadas foi efetuada no misturador, Figura 5, segundo a norma NP EN 196-1. A dosagem de todos os materiais foi realizada por pesagem, numa balança. Tentou-se proceder sempre de forma idêntica, eliminando possíveis erros significativos associados ao operador.

Neste trabalho foram realizadas 19 amassaduras com composições distintas, de forma a observar e a retratar alterações de resistências pertinentes. Cada amassadura foi efetuada como o modo de funcionamento automático da misturadora, sendo que por isso os tempos respetivos às diversas operações controladas pelo dispositivo.

3.6.1. Amassadura das argamassas

O procedimento efetuado para as 19 amassaduras distintas, seguindo a norma NP EN 196-1 foi o seguinte:

1. Colocação de cerca de 2/3 da quantidade de água na panela, juntamente com o ligante;
2. Logo após o contacto da água com o ligante, a misturadora foi ligada na velocidade lenta, fazendo uma mistura durante 30 segundos, período ao qual se seguiu um novo período de 30 segundos em que se introduziu a areia de referência, Figura 6;
3. Após os 60 segundos descritos, iniciou-se a mistura a velocidade rápida, a qual durou 30 segundos;
4. De seguida, com a misturadora parada, retiraram-se para o meio do balde os materiais aderentes às paredes e à pá, com o auxílio de uma espátula, num período de 90 segundos;
5. No período de 90 segundos descrito em 4, adicionou-se a restante água e o adjuvante;
6. Misturou-se durante mais 60 segundos a uma velocidade rápida;
7. Com a ajuda da espátula, mais uma vez, retiraram-se para o meio da panela os materiais aderentes às paredes e à pá, fazendo depois uma pequena mistura manual com a espátula;
8. Procedeu-se aos ensaios no estado fresco necessários;
9. Após a realização dos ensaios, realizou-se a produção dos provetes de argamassa (4x4x16 cm), vertendo o material para dentro do molde numa só fase sem qualquer compactação, Figura 7. Os moldes permaneceram em camara condicionada a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e HR durante 24 horas.



Figura 5: Misturador



Figura 5: Procedimento de amassadura de uma argamassa



Figura 6: Moldagem da argamassa no estado fresco

3.6.2. Ensaio no Estado Fresco

Após a realização das amassaduras, de forma a avaliar a trabalhabilidade das misturas, no estado fresco, realizou-se o ensaio de espalhamento e o ensaio de escoamento por funil, realizados de acordo com o descrito a seguir.

3.6.2.1. Ensaio de Espalhamento

➤ Objetivo de ensaio

O ensaio de espalhamento é uma medida da trabalhabilidade que se relaciona bem com a tensão de cedência. Nas pastas, o espalhamento varia significativamente com o tipo de ligante e de superplastificante, possibilitando a avaliação da compatibilidade do ligante com o superplastificante.

A determinação da consistência da argamassa por este método é então obtida através da medição do espalhamento numa superfície plana. Para este ensaio não foi regido uma norma técnica, visto que não existem normas que uniformizem o ensaio do espalhamento como mini-cone de Kantro, desta forma foram seguidos os princípios mostrados no estudo de Kantro (1980).

➤ Aparelhos e utensílios

Para determinação do espalhamento das argamassas utilizou-se um tronco-cone, designado por mini-cone e uma placa de superfície plana.

Foram utilizados os seguintes materiais:

- Mini-cone (com as seguintes dimensões: 19,0 mm de diâmetro interior, 38,1 mm de diâmetro exterior e 57,0 mm de altura.);
- Placa plana;
- Paquímetro.

➤ Procedimento

1. Colocou-se o molde com formato troncocónico numa placa plana e nivelada;
2. De seguida colocou-se a argamassa no interior do molde, numa só fase e sem qualquer compactação;

3. Nivelou-se a superfície superior do molde, de maneira a que este ficasse bem preenchido, rasando a argamassa com uma espátula;
4. Levantou-se o molde com cuidado na vertical e de forma contínua;
5. Sem tocar na placa mediu-se o diâmetro máximo da extensão do fluxo e o seu diâmetro na perpendicular (D_1 e D_2).

O espalhamento da argamassa resulta da média dos dois diâmetros, medidos em alinhamentos perpendiculares entre si.



Figura 7: Medição do espalhamento da amassadura 12

➤ **Resultados**

O espalhamento de cada argamassa é determinado pela média dos dois diâmetros retirados (D_1 e D_2), sendo calculado pela seguinte fórmula:

$$D_m = \frac{D_1 + D_2}{2}, \quad (\text{Eq.3.2})$$

Onde,

D_1 e D_2 – Diâmetros da argamassa após o espalhamento (mm);

D_m – Espalhamento (mm)



Figura 8: Ensaio de espalhamento da argamassa com maior consistência

3.6.2.2. Ensaio de Escoamento

➤ Objetivo do ensaio

O ensaio de escoamento é uma medida da trabalhabilidade que se relaciona bem com a viscosidade. O tempo de escoamento é o tempo que determinado volume de pasta demora a fluir através do orifício de um funil, varia significativamente com o tipo de ligante e com o superplastificante com o tipo de ligante e o superplastificante usado. Para o procedimento deste ensaio seguiu-se a NP EN 445 (2008), com as devidas adaptações.

➤ Aparelho e utensílios

Foram utilizados os seguintes utensílios:

- Funil de plástico (com capacidade de 200ml);
- 1 Gobelé;
- Cronómetro.

➤ Procedimento

1. Posicionou-se o funil na estrutura de suporte, com o bocal voltado para cima, e sob o seu orifício de saída colocou-se um gobelé;

2. Tapando o orifício de saída do funil com um dedo preencheu-se o funil com argamassa;
3. Destapou-se a base do funil, deixando a argamassa fluir por essa abertura;
4. Com a ajuda de um cronómetro mediu-se o tempo que a argamassa levou a escoar pela abertura.



Figura 9: Ensaio de Escoamento

3.6.3. Desmoldagem e conservação dos provetes

Foram realizados seis provetes por cada composição, com dimensões de 40mm x 40mm x 160 mm, tendo a desmoldagem sido realizada com cuidado para não ocorrerem danos. Para este efeito foram usados martelos de borracha, de plástico e ou outros instrumentos escolhidos para esta finalidade.

A desmoldagem foi iniciada poucos minutos antes de fazer as 24 horas, devido à realização dos testes de compressão e de flexão necessários a um dia de idade.

Os restantes provetes ficaram conservados no laboratório, sendo armazenados num recipiente de plástico, com água suficiente pra os cobrir, a temperatura constante, até perfazer o tempo necessário para os restantes ensaios.



Figura 10: Argamassas no estado seco antes de se proceder à desmoldagem

3.7. Resistências Mecânicas

De forma a conseguir-se determinar as resistências mecânicas, concretamente as resistências à flexão e à compressão, seguiu-se a norma NP EN 196-1.

Consoante as datas de ensaio, os provetes foram retirados do seu meio de conservação no dia respetivo e seguidamente secos na superfície, com a ajuda de um pano. Posteriormente cada provete foi partido em duas metades por flexão, determinando-se a resistência à flexão, e cada metade foi depois submetida ao ensaio de resistência à compressão.

Foram realizados ensaios a 1, 7 e 28 dias de idade, sendo que para as misturas que possuíam cinzas volantes foram realizados para os 7, 28 e 90 dias de idade; para cada mistura de argamassa foram necessários seis provetes para o ensaio de resistência à flexão e à compressão, o que correspondeu a dois provetes ensaiados por cada idade.

Todo o procedimento de ensaio efetuado para a determinação dos valores das resistências à compressão e à flexão, bem como o equipamento utilizado, apresentam-se nos pontos que se seguem.



Figura 11: Equipamento de ensaios à resistência à flexão e à compressão

3.7.1. Resistência à flexão

3.7.1.1. Equipamento de ensaio

O aparelho usado para determinação dos valores de resistência mecânica à flexão deve verificar os seguintes requisitos [NP EN 196-1]:

- O aparelho para determinação da resistência à flexão deve permitir a aplicação de cargas até 10 kN com uma exatidão de $\pm 1,0\%$ de carga registada nos 4/5 superiores da escala de medida e com uma velocidade de (50 ± 10) N/s;
- A máquina deve ter um dispositivo de flexão com dois cilindros de apoio em aço de $(10 \pm 0,5)$ mm de diâmetro, distando um do outro $(100,0 \pm 0,5)$ mm e um terceiro cilindro, de carga, em aço do mesmo diâmetro equidistantes dos dois primeiros. O comprimento está compreendido entre 45 mm e 50 mm;
- Os três planos verticais passando pelos eixos dos três cilindros devem estar paralelos e permanecer paralelos durante o ensaio, equidistantes e perpendiculares à direção do provete. Um dos cilindros de apoio e o cilindro de carga devem poder bascular ligeiramente e para

permitir uma distribuição uniforme da carga na largura do provete evitando todo o esforço de torção.



Figura 12: Ensaio à flexão

3.7.1.2. Procedimento de ensaio

1. O provete foi colocado no aparelho de flexão, de acordo com o descrito no ponto anterior, 3.4.1.1., com uma face lateral de moldagem sobre os cilindros de apoio e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios, como se pode verificar na Figura 14;
2. A carga foi aplicada verticalmente por meio do cilindro de carga sobre a face lateral do prisma e aumentando uniformemente a velocidade de (50 ± 10) N/s, até à rotura;



Figura 13: Ensaio à flexão, antes e depois da força aplicada.

A resistência à flexão (R_f) pode ser determinada através da seguinte equação:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (\text{Eq.3.3.})$$

Onde:

R_f – Resistência à flexão (MPa);

b - Lado da secção quadrada do prisma (mm);

F_f – Carga aplicada ao centro do prisma (mm);

l - Distância entre os apoios (mm).

3.7.2. Resistência à Compressão

3.7.2.1. Equipamento de Ensaio

O aparelho para se proceder à determinação dos valores de resistência à compressão deve possuir determinados requisitos, tais como (NP EN 196-1):

- Capacidade favorável para o ensaio e deve ter nos 4/5 superiores de escala de medida usada uma exatidão de +/- 1,0% de carga registada, de acordo com a EN ISO 7500 1;
- Velocidade de carga de (2400 +/- 200) N/s;
- Dispositivo indicador que seja produzido de forma, a que o valor registado quando da rotura do provete permaneça indicado depois do regresso do zero à carga.



Figura 14: Equipamento para determinação da resistência à compressão

3.7.2.2.Procedimento de Ensaio (NP EN 196-1)

1. O ensaio foi efetuado sobre duas metades do provete rompido no ensaio de resistência à flexão, com a ajuda do equipamento especificado no ponto anterior;
2. Cada semi-provete foi centrado lateralmente em relação aos pratos da máquina a $\pm 0,5$ mm e longitudinalmente, como se pode observar na figura 16;
3. A carga foi aumentada uniformemente à velocidade de (2400 ± 200) N/s até à rotura.



Figura 15: Início do ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão (R_c) é determinada através da seguinte equação: (Eq.3.4.)

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Onde:
























R_c - Resistência à compressão (MPa);

F_c - Carga máxima na rotura (N);










1600- Área (40 mm x 40 mm).

Na Tabela 5 encontram imagens das várias misturas produzidas, ilustrando o aspeto das superfícies laterais e das superfícies de rotura.

Tabela 5: Provetes após ensaio de compressão

a/l=0,3	Idades (Dias)			
	1	7	28	90
Argamassas				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				

17				
18				
19				

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1.Introdução

No presente capítulo são apresentados os valores obtidos nos ensaios experimentais, bem como a sua devida análise e discussão.

São apresentados gráficos que permitem uma melhor percepção dos resultados alcançados.

4.2.Ensaio de espalhamento e de escoamento

4.2.1.Análise dos Resultados

A partir dos ensaios realizados no estado fresco, mais concretamente, ensaio de espalhamento e de escoamento, teve o seu maior interesse para analisar a influência da utilização dos vários ligantes na trabalhabilidade, o que permite também inferir a sua potencialidade para a resistência. Efetivamente, se em relação à argamassa de referência, só com cimento, a argamassa com um ligante distinto apresentar maior trabalhabilidade, então pode-se concluir que seria possível diminuir a dosagem de cimento mantendo a mesma trabalhabilidade. O mesmo é válido em sentido contrário, ou seja, mais cimento será necessário se a trabalhabilidade for inferior.

Estes ensaios no estado fresco foram efetuados previamente ao fabrico dos provetes, sendo que cada composição possui a mesma razão a/l, igual a 0,3. No entanto, dado que se substituiu cimento por adições, a razão a/c das misturas é variável.

Nas Figuras 17 e 18 é possível analisar-se os resultados obtidos, de acordo com a dosagem de adição em cada mistura, evidenciando-se alguns casos específicos. Consta-se que a substituição de cimento por areia fina até uma certa dosagem (cerca de 25%), faz aumentar o espalhamento, mas à medida que se aumenta a sua quantidade a massa toma uma consistência bastante espessa, ou seja, maiores concentrações de areia torna a amassadura com menor trabalhabilidade. Note-se que as argamassas com areia fina não escoaram, pelo que o tempo correspondente seria infinito, apresentando-se na Figura 18 o valor de 160 apenas para efeitos gráficos.

Por outro lado, ao adicionar-se filer calcário ou cinzas volantes constata-se que a massa adquire uma maior fluidez, sendo o seu efeito benéfico crescente como o aumento da dosagem.

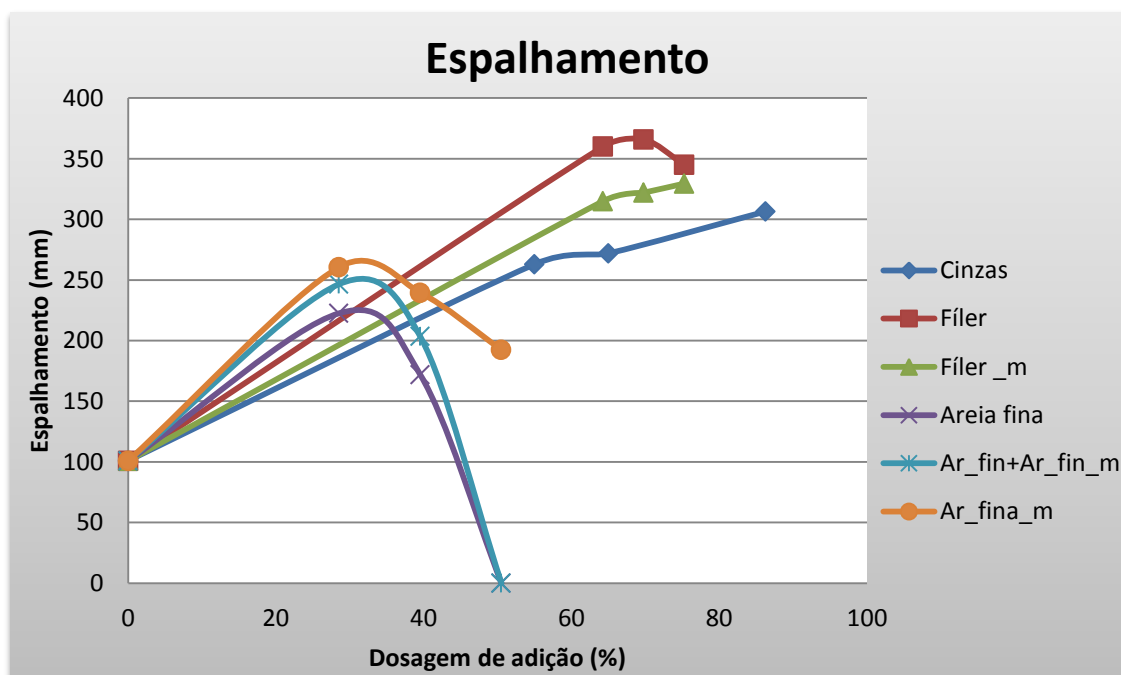


Figura 16: Resultados dos ensaios de espalhamento para cada idade

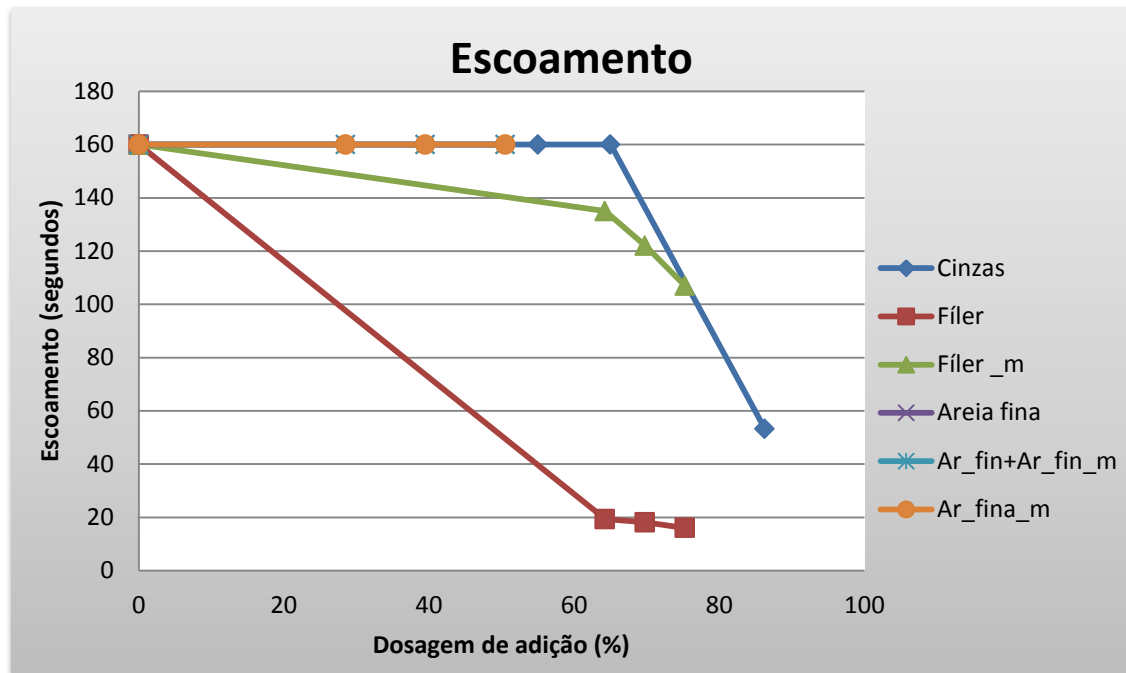


Figura 17: Resultados dos ensaios de escoamento para cada idade 3

4.3. Resistência à Flexão

O ensaio de flexão é realizado com o intuito de determinar a resistência à tração da argamassa.

A tensão de rotura obtida é determinada considerando comportamento elástico e é calculada para a fibra extrema da secção.

4.3.1. Análise dos Resultados

Os resultados experimentais do ensaio de resistência à flexão foram obtidos pela Equação 3.3., sendo ilustrados nas Figuras 19, 20 e 21, onde se pode observar a evolução da resistência de acordo com a percentagem de adição em cada amassadura. As diferentes figuras correspondem às idades de ensaio, respetivamente 1, 7 e 28 dias de idade.

³ O tempo de escoamento de 160 segundos é apenas para efeitos de apresentação no gráfico, e refere-se às misturas de argamassa que possuíam uma consistência mais espessa, tornando o processo de escoamento muito moroso, não se conseguindo medir o valor correto no período de ensaio.

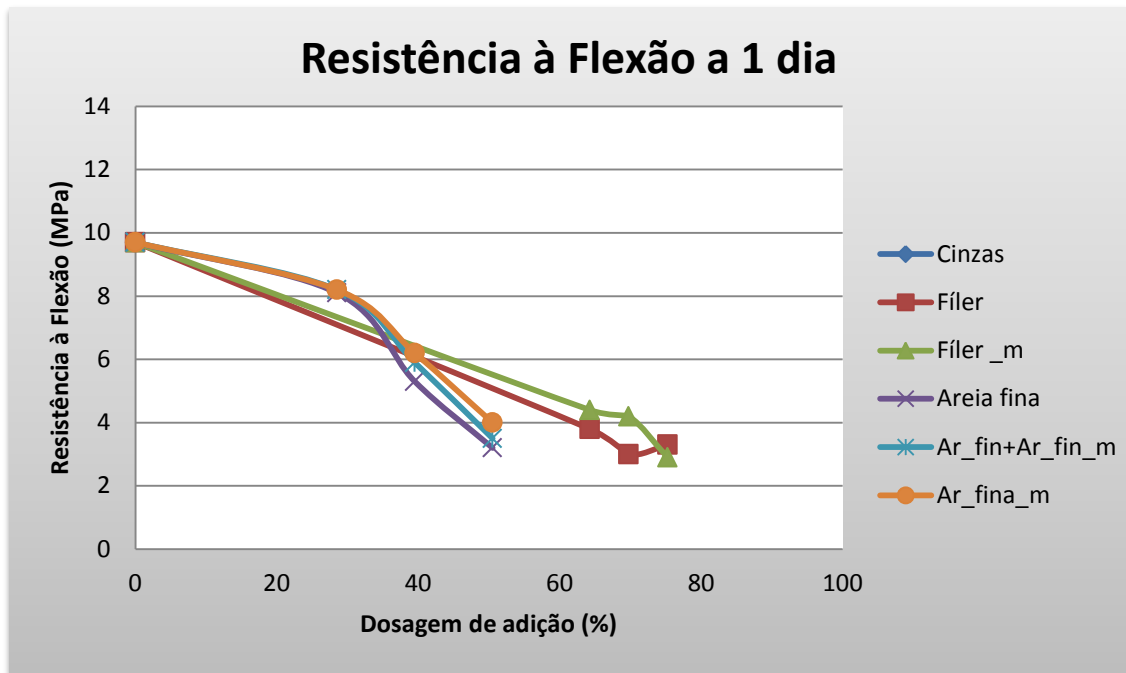


Figura 18: Valores de Resistência à flexão para 1 dia de idade

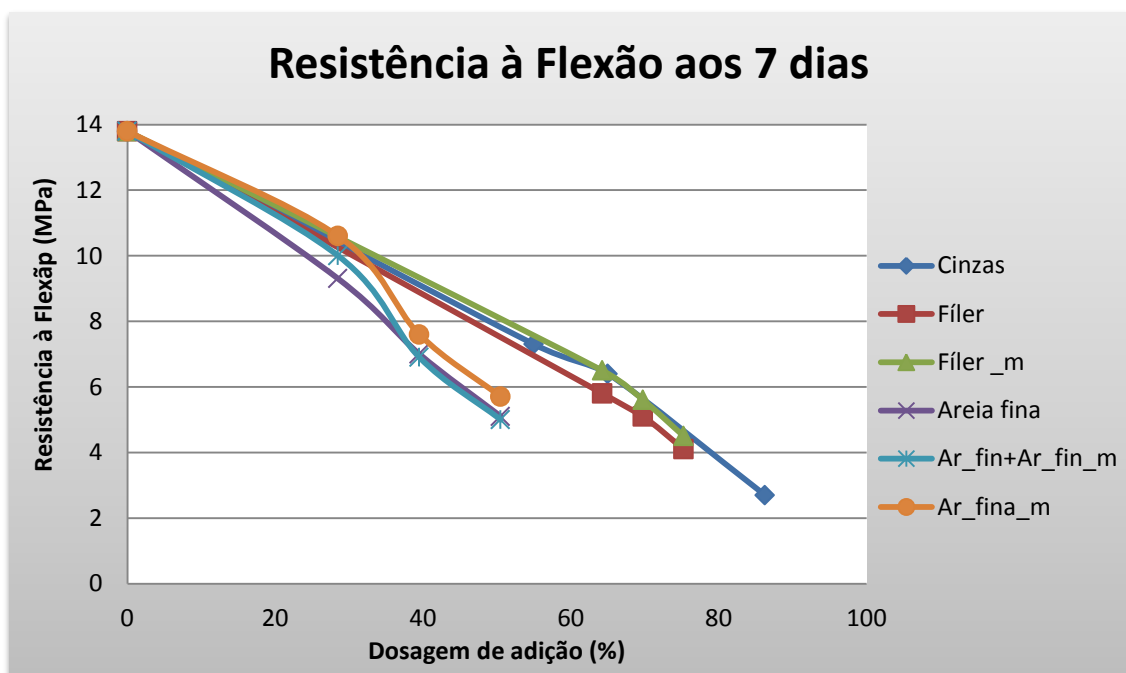


Figura 19: Valores de Resistência à flexão para 7 dias de idade

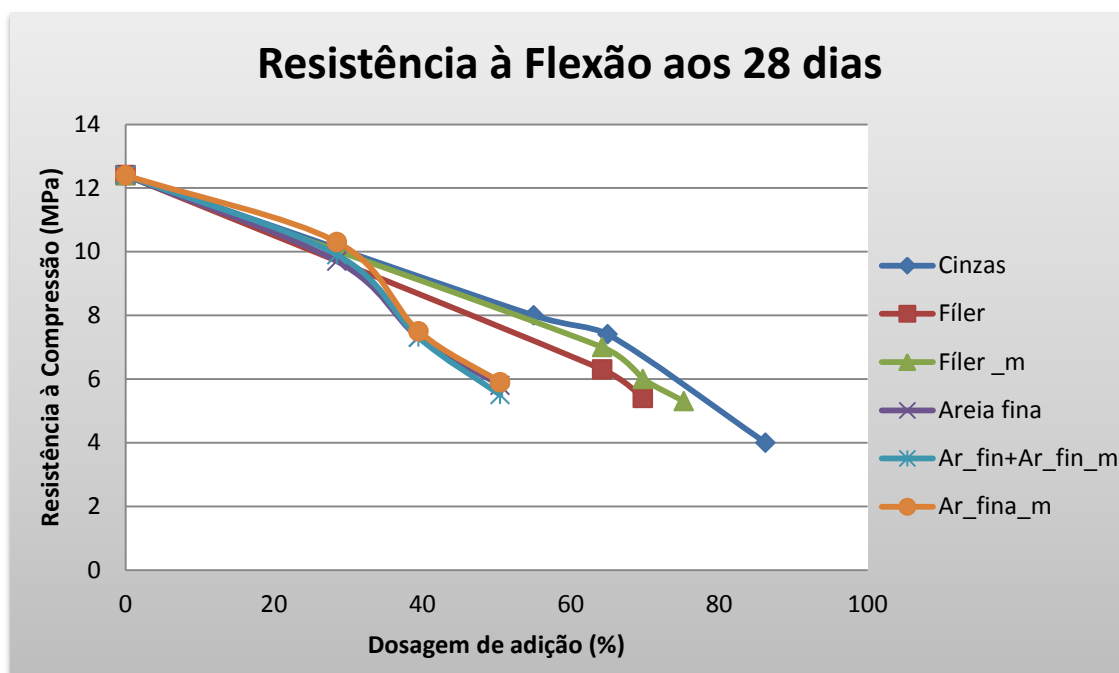


Figura 20: Valores de Resistência à flexão para os 28 dias de idade

Pela observação das figuras é possível verificar que as adições de areia fina e areia fina moída são as que apresentam a pior resposta no que diz respeito à resistência à flexão.

Observa-se também que existe uma perda significativa da resistência quando se substitui cimento pelas adições, perda essa, que estará também relacionada com o facto de se ter utilizado um cimento muito resistente.

4.4. Resistência à compressão

O método de ensaio de determinação da resistência à compressão dos provetes encontra-se discriminado no subcapítulo 3.6.2. Concretizados os ensaios, apresentam-se os resultados de resistência à compressão obtidos para cada composição de argamassa apresentada na Tabela 8, representado cada resultado a média de quatro amostras. Estes valores são obtidos em unidades de força (kN), sendo necessário a conversão para unidades de pressão (MPa), sendo para isso empregue a Equação 3.4.

4.4.1. Análise dos resultados

Neste subcapítulo são apresentados gráficos que permitem comparar as resistências, obtidas a partir do ensaio de resistência à compressão, de acordo com a percentagem de dosagem das adições em cada mistura, bem como para cada idade, como se pode observar nas Figuras 22, 23, 24 e 25 seguidamente ilustradas.

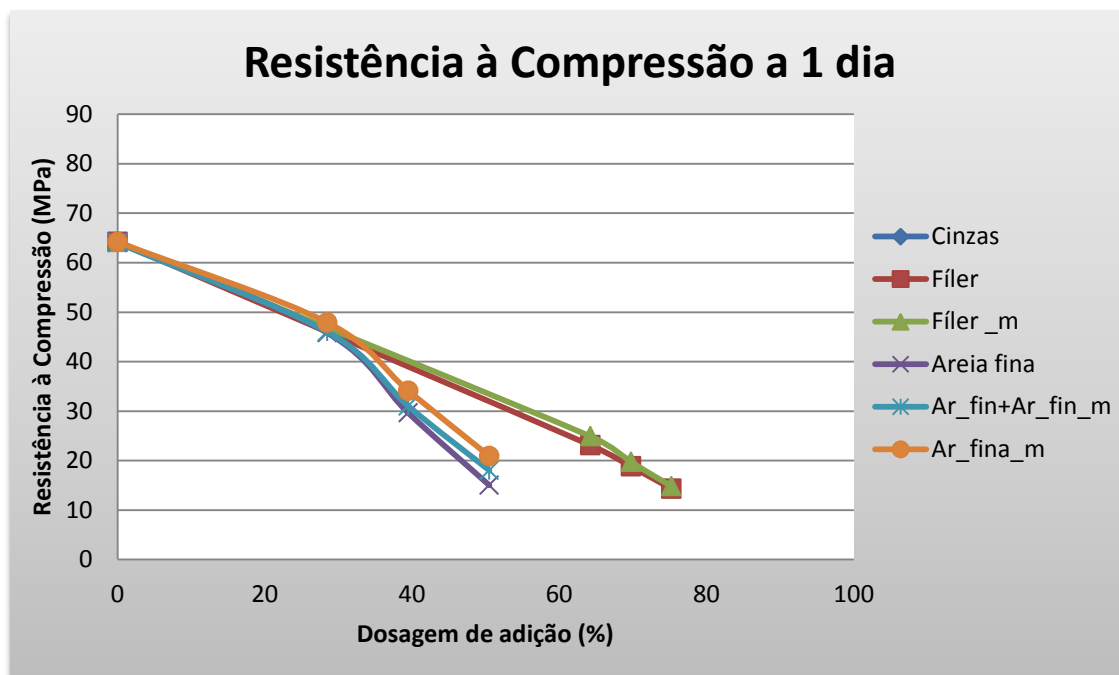


Figura 21: Valores de Resistência à compressão para 1 dia de idade

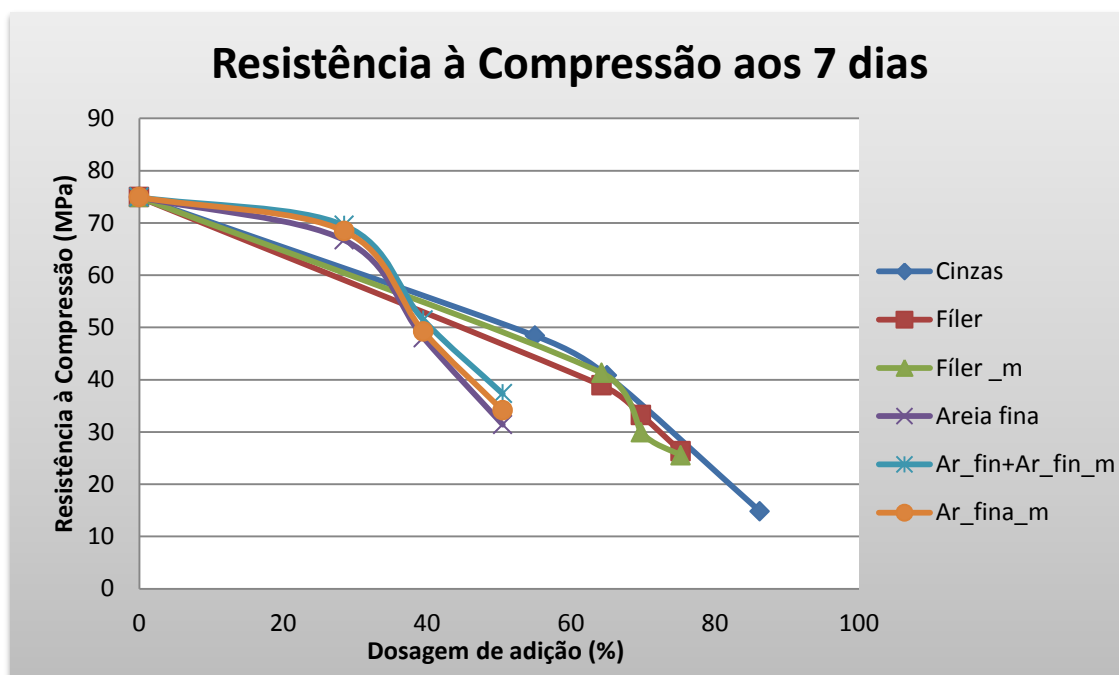


Figura 22: Valores de Resistência à compressão para 7 dias de idade

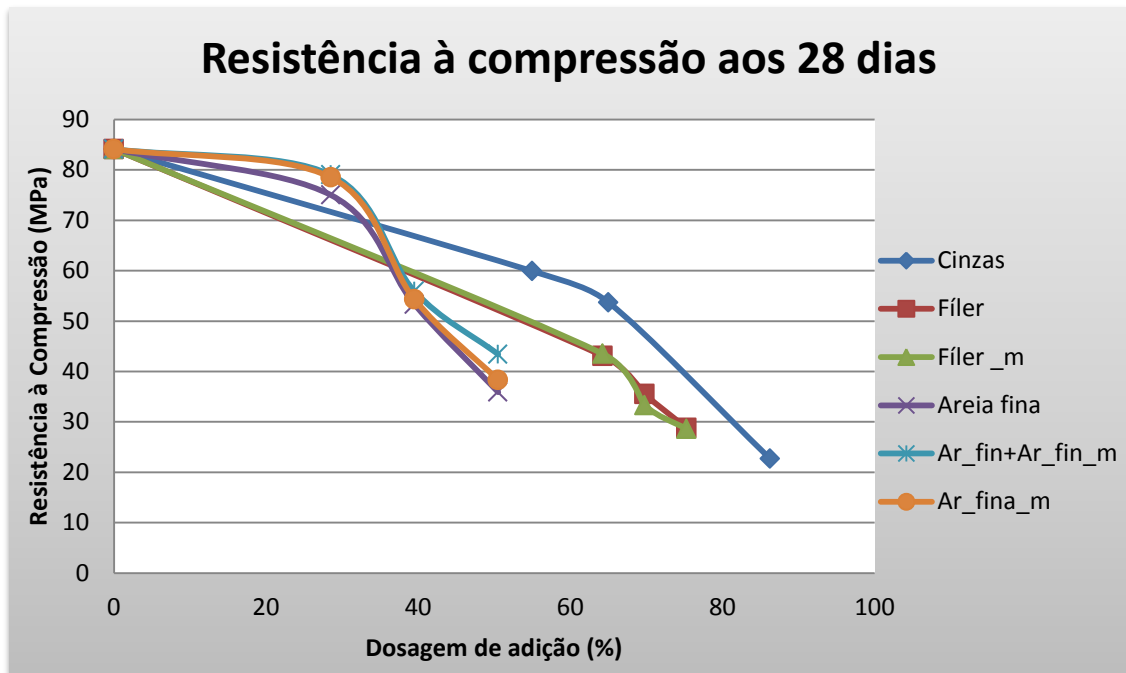


Figura 23: Valores de Resistência à compressão para 28 dias de idade

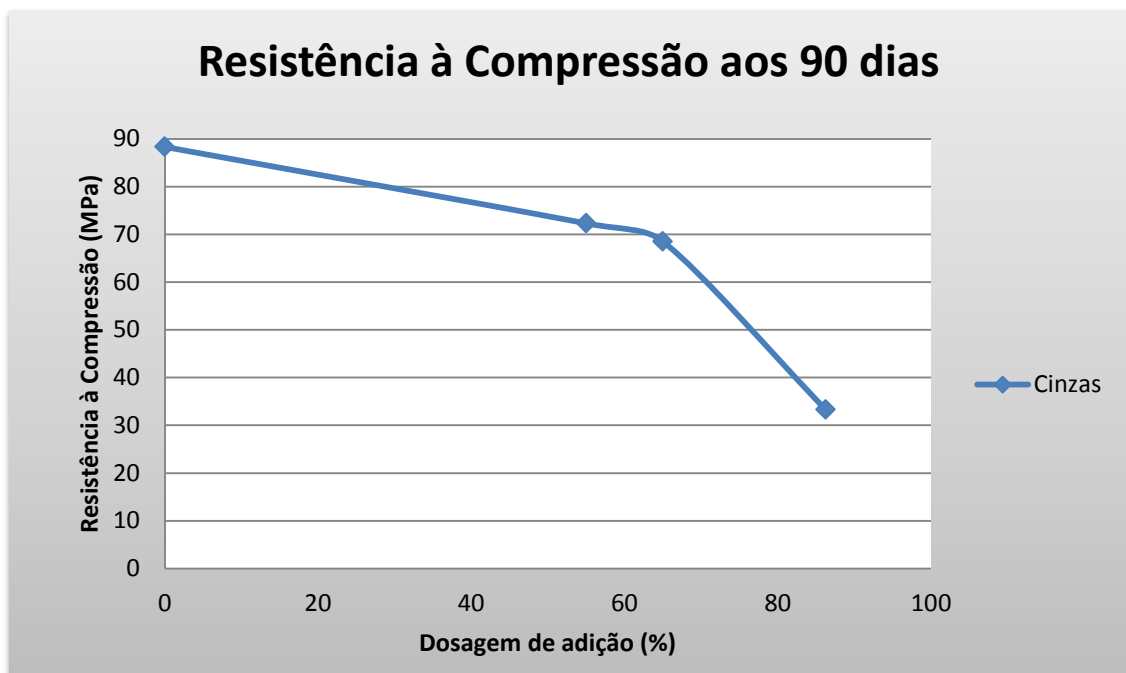


Figura 24: Valores de Resistência à compressão para 90 dias de idade

Dado que não foram preparados prismas da mistura de referência para ensaio aos 90 dias, o valor com 0 % de adição foi estimado em 22,13% acima do valor obtido aos 28 dias.

Após uma análise dos valores obtidos, constata-se que os materiais utilizados como substitutos do cimento, ou seja, as cinzas volantes, o filler calcário, o filler calcário moído, a areia fina e ainda a areia fina moída, têm um comportamento inferior ao cimento. No entanto, é de salientar a pequena redução na resistência aos 7 dias quando se substitui 25% de cimento por areia. Por outro lado, observa-se que aos 90 dias a mistura com 65% de cinzas volantes também apresenta uma redução de resistência pouco significativa. Isto mostra que, em função do objetivo a atingir, por manipulação da constituição do ligante podem formular-se misturas com reduções significativas de clínquer portland sem perdas relevantes no comportamento.

4.5. Fator de eficiência k

4.5.1. O que é o fator k?

O fator k surge com o intuito de quantificar o efeito da substituição de cimento por outras adições, permitindo deste modo avaliar a eficiência da adição em relação a determinada característica, por comparação com o desempenho que se obteria com cimento portland.

Concretamente, o fator k é expresso na forma de uma dosagem de cimento equivalente, C_{eq} , em que esta variável é expressa pela Equação 4.1.

$$C_{eq} = C + k \times Ad \text{ (Equação 4.1)}$$

Sendo C a dosagem de cimento e Ad a dosagem da respetiva adição. Deste modo, o desempenho com uma mistura em que a dosagem de cimento for C e a dosagem de adjuvante for A será equivalente a uma mistura de cimento em que a dosagem de cimento é igual a C_{eq} .

O objetivo principal deste fator é exprimir a eficiência de cada tipo de adição e, desta forma, permite comparar o desempenho de diferentes adições através dos respetivos valores de k.

Define-se então k, como o valor que traduz a eficiência da adição i na mistura.

Neste trabalho, para o cálculo dos valores de k, foi utilizada a ferramenta Solver do software Excel da Microsoft, através da minimização das diferenças entre os resultados obtidos e os valores obtidos pela aplicação da equação transcrita, seguidamente.

$$R = A \times \left(\frac{W}{C_{eq}}\right)^B \quad (\text{Equação 4.2}) \quad (\text{Rao, 2001})$$

Onde,

R- Resistência à compressão;

A e B – Constantes para um material, idade e as condições de teste;

W – Água da amassadura;

C_{eq} – Resultado da expressão apresentada na Equação 4.1, aplicada às adições utilizadas.

Quando existe mais do que uma adição, e para o presente trabalho, a Equação 4.1 vem expressa através da Equação 4.3.

$$C_{eq} = C + k_{cvx} \cdot CV + k_{f70} \cdot F70 + k_{f70m} \cdot F70m + k_{arf} \cdot ARF + k_{arfm} \cdot ARFM \quad (\text{Equação 4.3})$$

onde,

k_{cv} - Fator k de eficiência das cinzas volantes;

CV- Dosagem de cinzas volantes;

k_{f70} – Fator k de eficiência do filer calcário R70;

F70 – Dosagem de filer calcário R70;

k_{f70m} – Fator k de eficiência do filer calcário R70 moído;

F70m – Dosagem de filer calcário R70 moído;

k_{arf}- Fator k de eficiência da areia fina

ARF – Dosagem de areia fina;

k_{arfm} – Fator k de eficiência da areia fina moída;

ARFM – Dosagem de areia fina moída.

4.5.2. Análise dos Resultados

A partir dos resultados alcançados nos testes experimentais, o principal parâmetro que se pode extrair deste trabalho, é o desempenho relativamente a resistência à compressão para cada idade de ensaio.

Assim, seguidamente é apresentada uma tabela com os valores de eficiência para cada adição, que foi usada como substituinte de parte do cimento, de acordo com a idade das amassaduras.

São ainda apresentadas figuras que ilustram e permitem verificar a resistência à compressão real, ou seja, os valores obtidos através dos ensaios experimentais, bem como uma análise comparativa entre a resistência real e a resistência estimada através dos valores obtidos pelos fatores de eficiência.

4.5.2.1. Fator k relativo à resistência à compressão

Nas Tabelas 6 e 7 pode-se observar os valores de eficiência obtidos, bem como os valores de A e B. Numa perspetiva global, a partir da tabela 6 verifica-se que o fíler calcário é o componente com melhor eficiência a 1 dia de idade.

Os valores de k para o fíler calcário indicam que se o objetivo for atingir uma certa resistência à compressão a 1 dia, se trocarmos uma determinada dosagem de cimento por cerca de 4 vezes essa dosagem de fíler (k de cerca de 0,25), a resistência manter-se-á em valores semelhantes. Essa relação sobe para 6 a 7 vezes (k de cerca de 0,14-0,16), se o objetivo for definido para os 7 ou os 28 dias.

Note-se que, para trabalhabilidades equivalentes, as dosagens de fíler necessárias para equivaler a dosagem de cimento deverão ser menores, porque ocorre também um aumento de trabalhabilidade com a introdução do fíler, pelo que estes valores podem ser considerados do lado da segurança, ou seja, obter-se-ão, em princípio maiores resistências quando se usar fíler comparativamente à mistura só com cimento.

Tabela 6: Valores do fator de eficiência k para cada idade

	1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
k_cv	-	0,169	0,266	0,392
k_f70	0,223	0,162	0,151	-
k_f70m	0,245	0,152	0,142	-
k_arf	0,000	0,000	0,000	-
k_arfm	0,101	0,052	0,061	-

Uma análise comparativa, isto é, verificando para cada idade os fatores de eficiência de cada adição, permite perceber detalhadamente a contribuição de cada adição ao longo do tempo.

Para 1 dia de idade as cinzas volantes não foram avaliadas, o fíler moído é a adição com maior eficiência, 25%, seguido do fíler, 22%, segue-se a areia fina moída com uma percentagem de 10% na eficiência e, por último, a areia fina que não contribui como ligante para a resistência a 1 dia. Por sua vez, a areia fina moída não contribui para a resistência nesta idade. Nesta idade a contribuição de cada adição seguiu a ordenação em relação à finura, ou seja, a maior contribuição foi obtida com o material mais fino, o fíler moído, e a menor contribuição com o material mais grosso, a areia fina.

Aos 7 dias de idade as cinzas volantes surge já como a adição que mais contribuiu para a resistência, com aproximadamente, 17 %, de eficiência, seguido do fíler, com uma percentagem muito próxima, 16%, o fíler moído apresenta-se com uma eficiência de 15 %, o que faz com que nesta idade não apresente vantagem ao ser moído, por último a areia moída, com 5%. A areia fina, mais uma vez, não contribui para a resistência nesta idade. Nesta idade a influência da finura vem menos acentuada nas adições não ativas (areia e fíler), mas tem ainda relevância, dado que o fíler apresentou mais eficiência que a areia.

Aos 28 dias as cinzas volantes são as adições com maior eficiência, 27%, sendo notório o efeito da reação face à diferença para os 7 dias, seguido do fíler, cerca de 15%, não existindo vantagem na sua moagem, e finalmente a areia moída, com 6%. A areia fina não moída não contribui para a resistência nesta idade. É interessante observar que os valores da eficiência aos 7 e aos 28 dias de idade da areia e do fíler mantêm-se praticamente constantes, evidenciando que a estrutura porosa entre os 7 e os 28 dias não sofre alterações qualitativas em presença destas duas adições.

Por último, aos 90 dias, a única adição considerada foi as cinzas volantes, que apresentam uma eficiência de 39%, o que mostra bem a vantagem do uso deste material para desempenho a longo prazo, não só pelo valor obtido, mas também pelo ritmo de crescimento de k com a idade.

Assim os resultados obtidos são coerentes com efeito físico reconhecido ao fíler e à areia fina, que contribuem essencialmente para a resistência a idades jovens, que tende a desaparecer com o evoluir da hidratação, porque a estrutura porosa vai refinando. Já o efeito das cinzas volantes resulta da formação de novos produtos sólidos, que aumentam com a idade.

Tabela 7: Valores de A e B para cada idade

	1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
A	9,137	22,857	25,305	30,000
B	-1,687	-1,097	-1,115	-0,944

Na Tabela 7, acima representada, apresentam-se os valores de A e B para a 1, 7, 28 e 90 dias de idade, estes valores são dependentes do tipo de adição e de acordo com as condições ds testes..

Para os 90 dias de idade, para obtenção dos valores que minimizavam as diferenças entre os valores obtidos e os valores reais, através do software SOLVER, foi mostrado um limite ao valor de A de 30.

Na Figura 26 é possível fazer uma análise à evolução da eficiência de cada adição, ao longo da idade da amassadura.

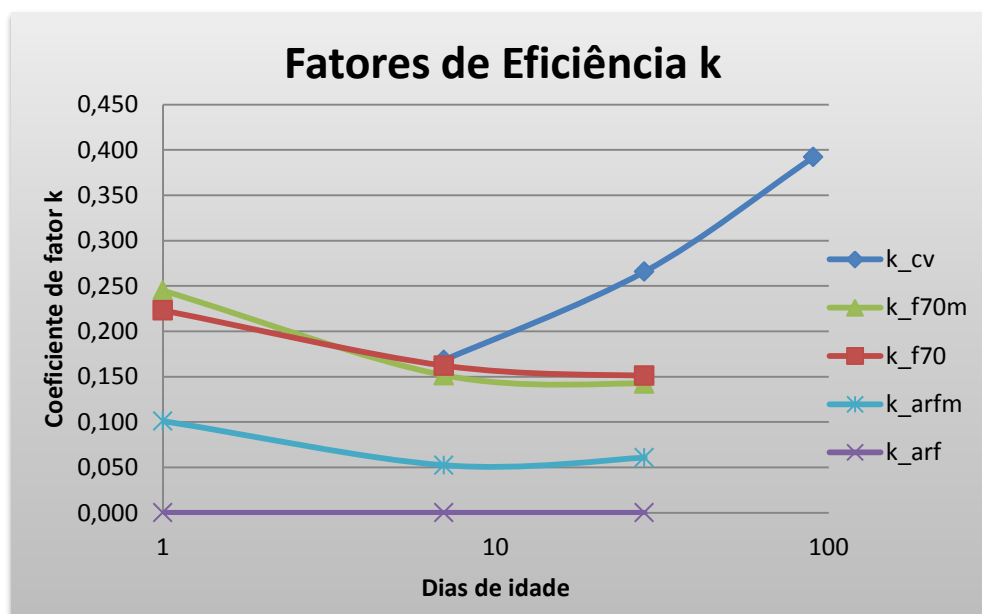


Figura:25: Evolução dos fatores de eficiência k

4.5.2.2. Resistência real e Resistência estimada

Nesta subsecção são apresentados graficamente os valores da resistência à compressão estimados pelas expressões matemáticas do tipo da equação 4.2 e os valores efetivamente obtidos nos ensaios.

Nos gráficos intitulados “Resistência a 1, 7, 28 ou 90 dias” apresentam-se os valores da resistência expressos em função da razão A/C, enquanto que nos gráficos intitulados “Resistência real e resistência estimada a 1,7, 28 ou 90 dias” os valores da resistência são expressos em função da razão A/C_{eq} relativos.

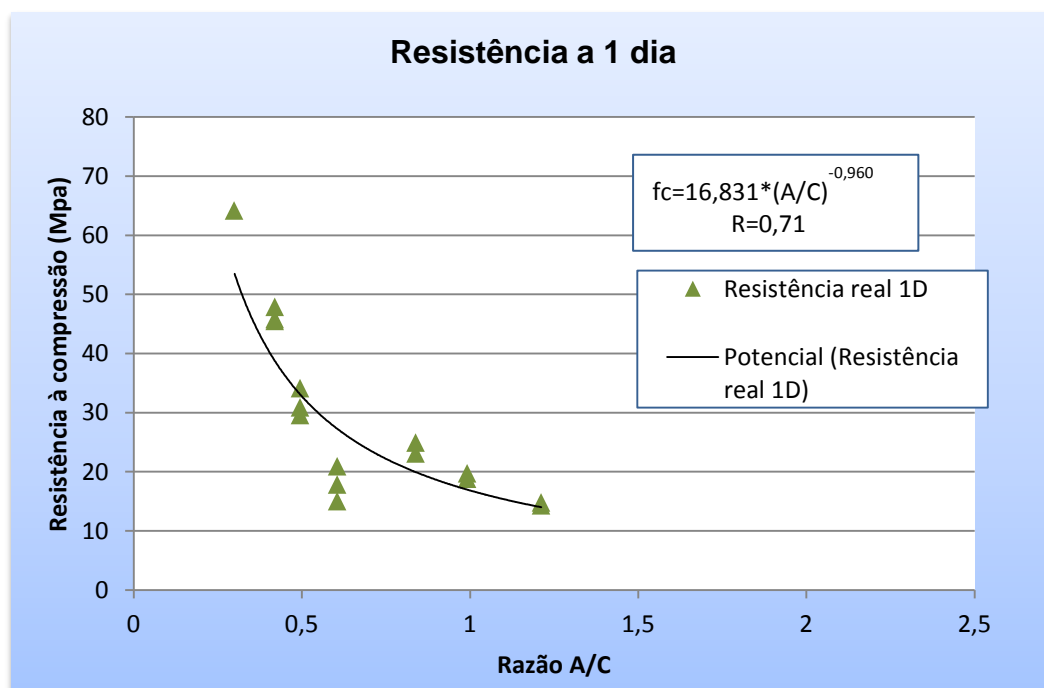


Figura 26: Resistência de compressão a 1 dia de idade.

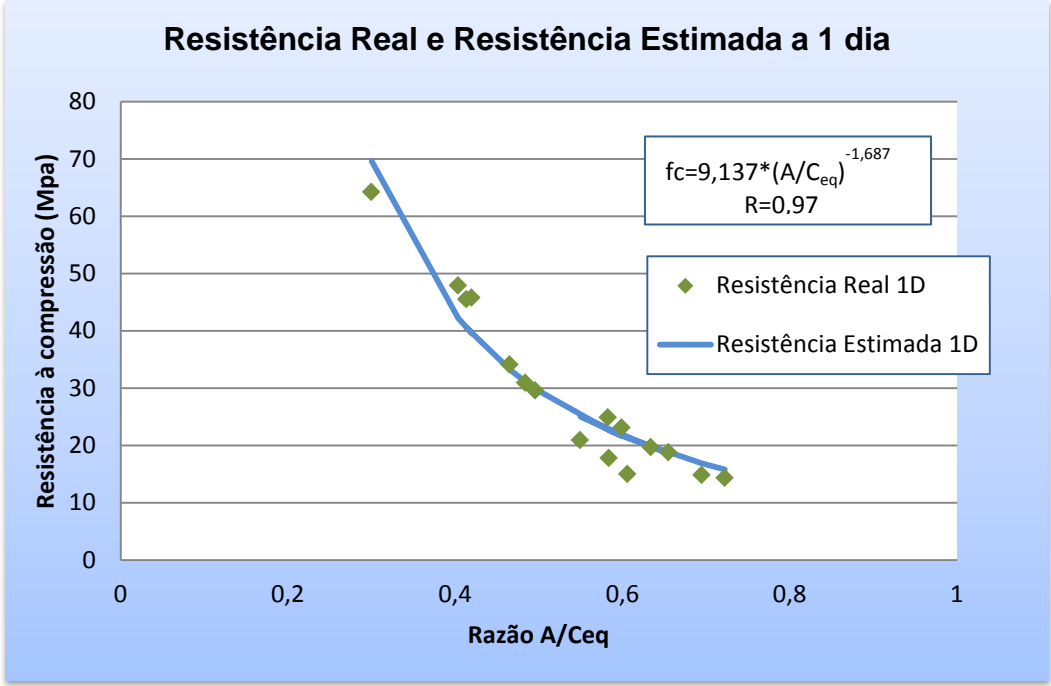


Figura 27: Resistência de compressão real estimada a 1 dia de idade.

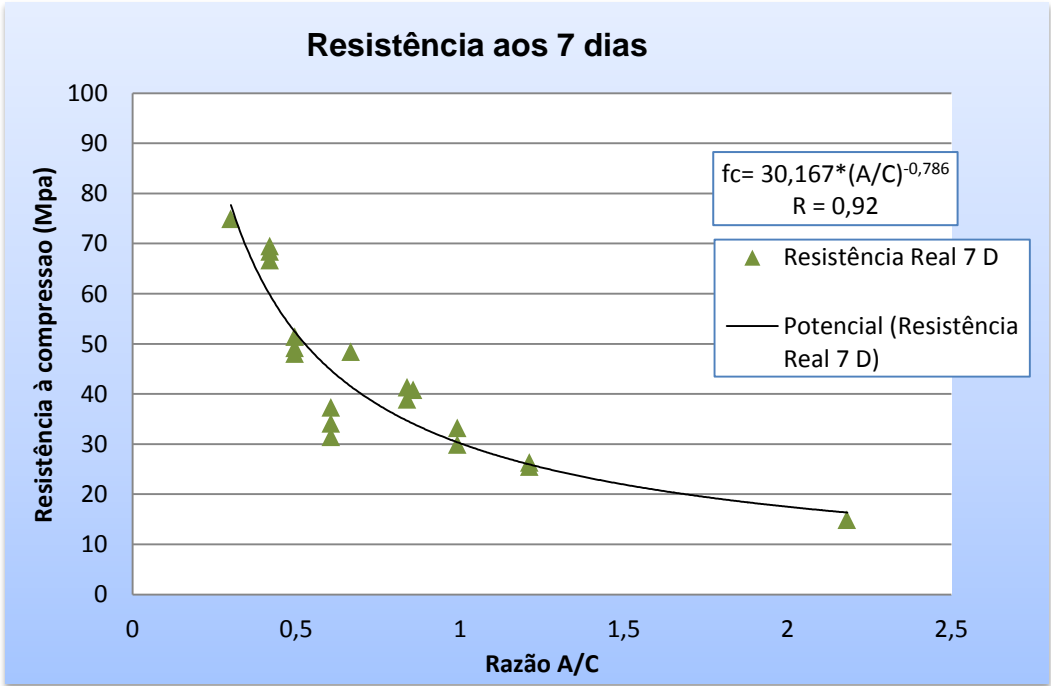


Figura 28: Resistência de compressão aos 7 dias de idade.

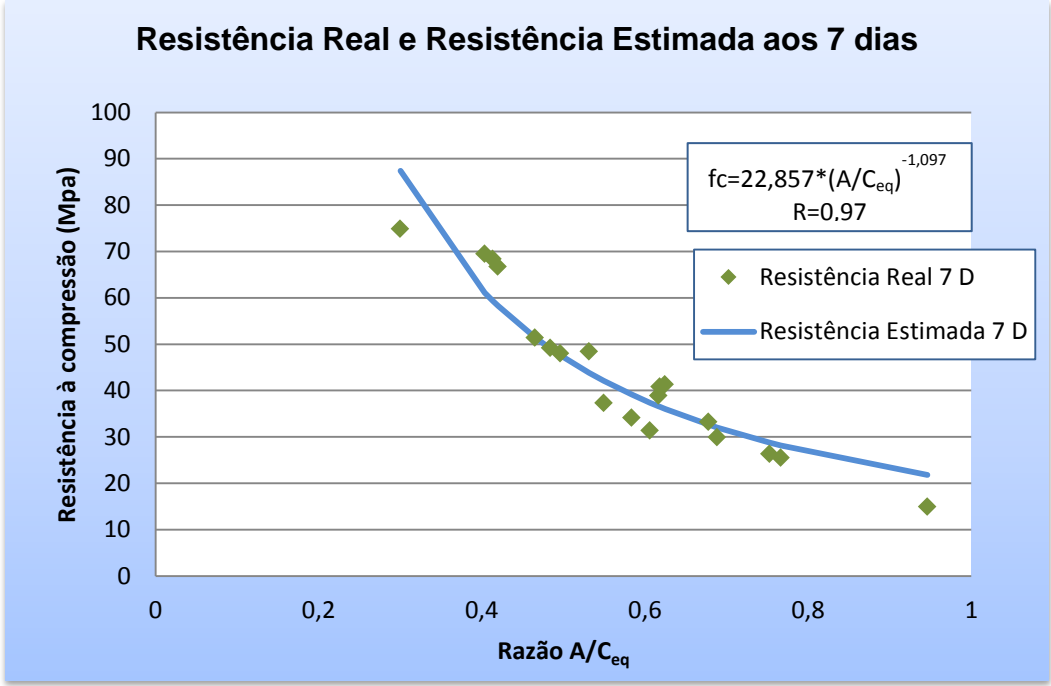


Figura 29: Resistência de compressão real e estimada aos 7 dias de idade

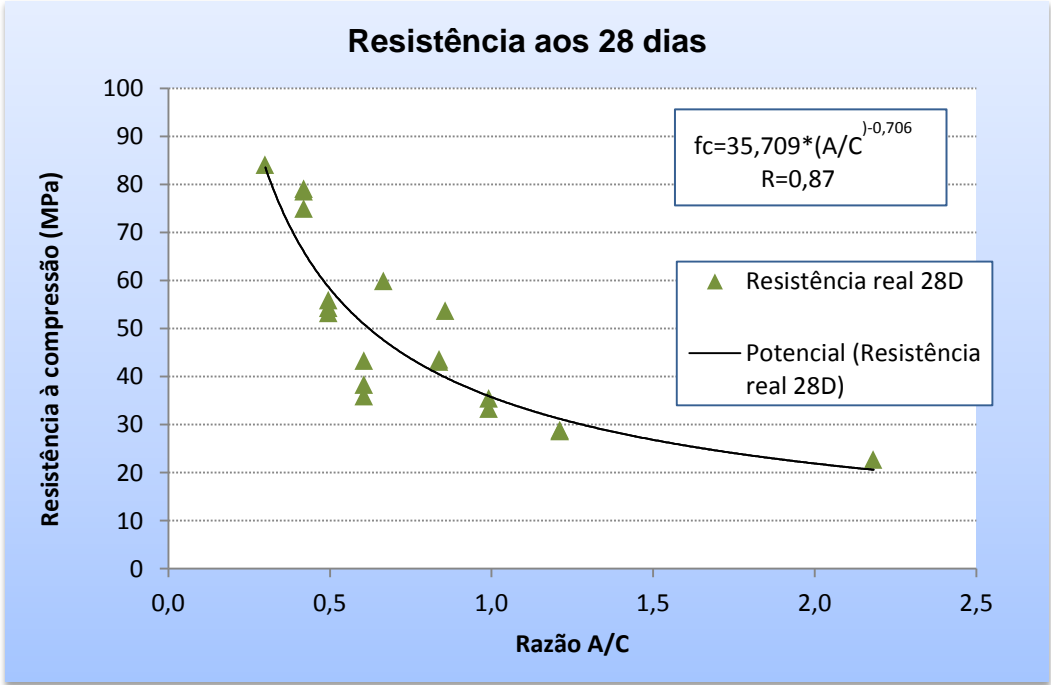


Figura 30: Resistências de compressão aos 28 dias de idade.

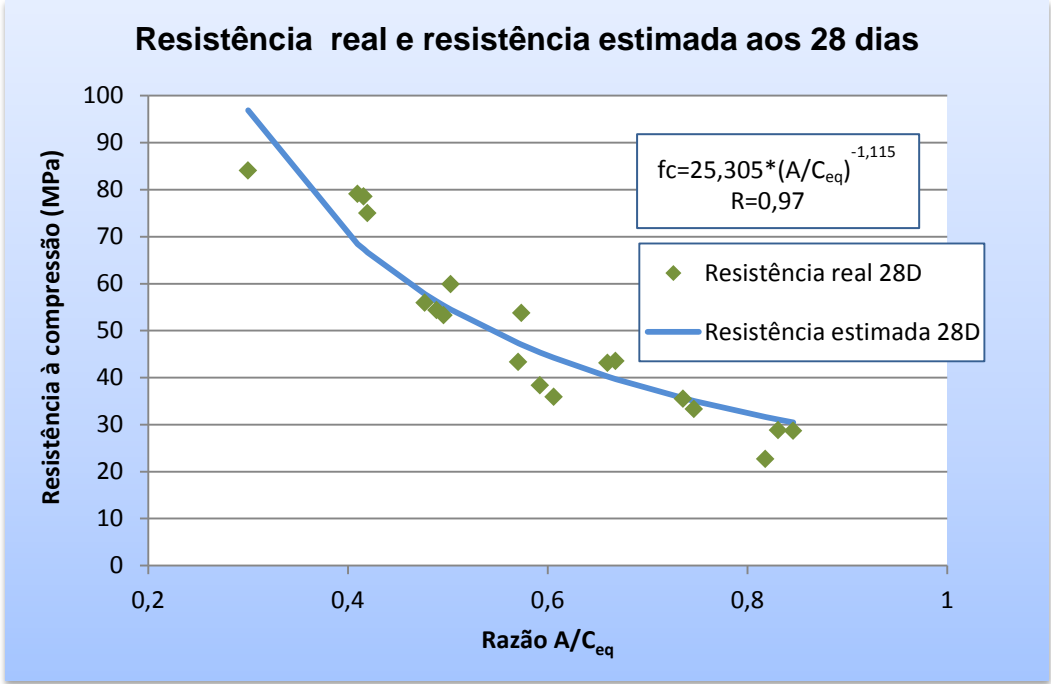


Figura 31: Resistência de compressão real e estimada aos 28 dias de idade

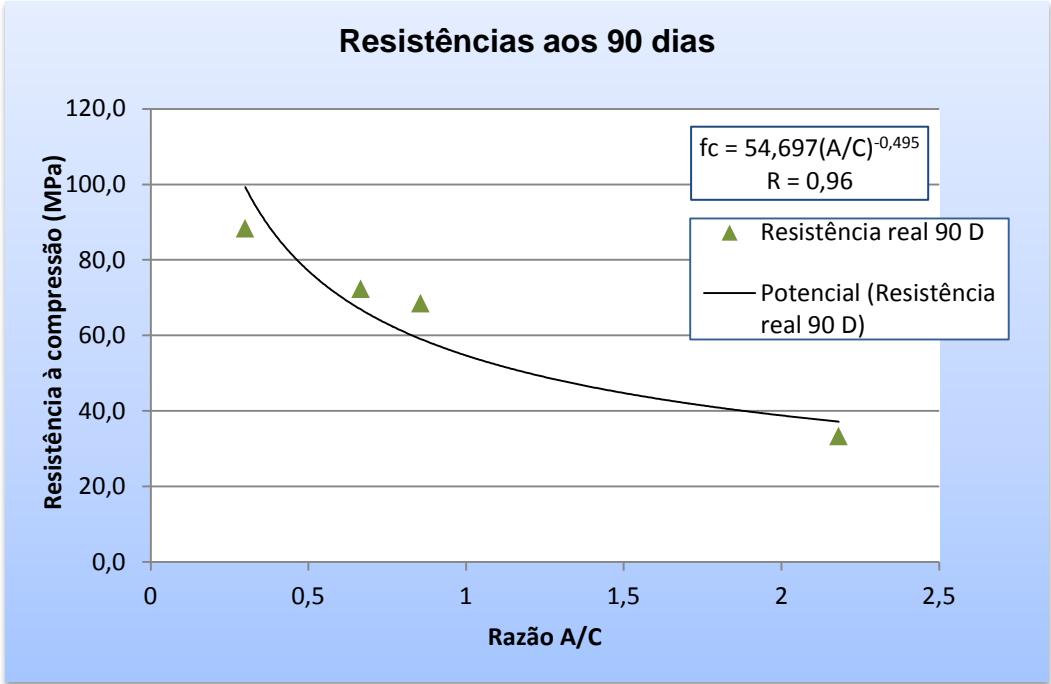


Figura 30: Resistência de compressão aos 90 dias de idade.

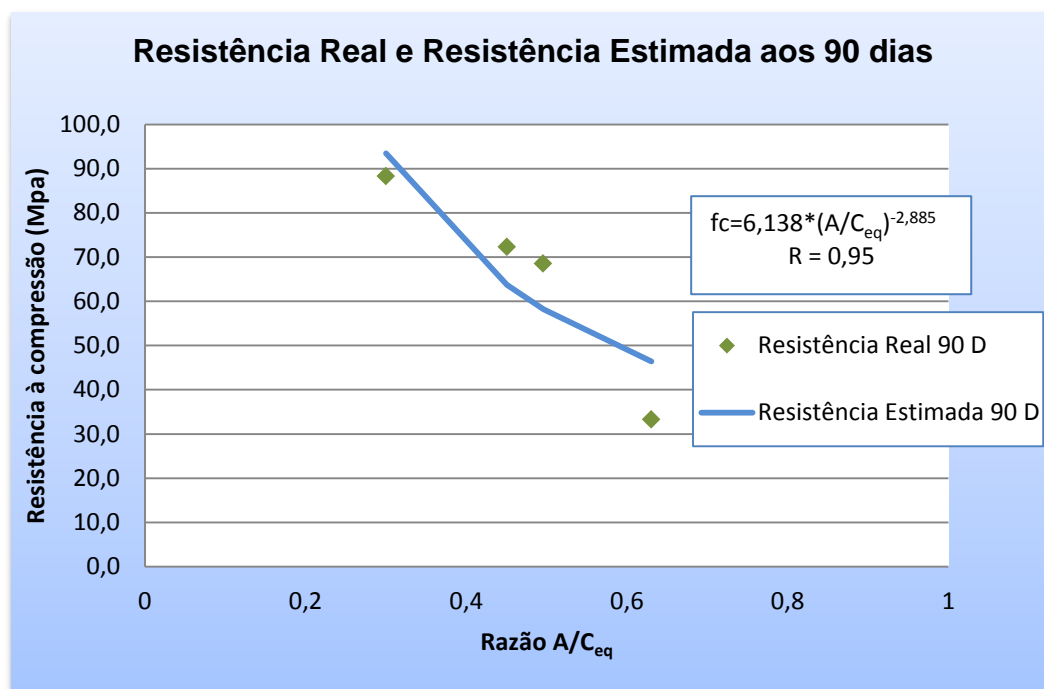


Figura 34: Resistência de compressão real e estimada aos 90 dias de idade

O objetivo essencial deste estudo, como já referido, é analisar o desempenho de cada adição. De forma a contabilizar as melhores opções, como substituintes do ligante cimentício.

Para uma análise mais detalhada, para cada idade foram realizados dois gráficos. Num primeiro gráfico apresentam-se os valores das resistências obtidas a partir dos ensaios em laboratório para todas as composições de amassaduras, em função do teor água/cimento, bem como a curva de tendência que melhor se ajusta a esses valores.

No outro gráfico correspondente à mesma idade, além dos valores obtidos apresentados nos pontos, ilustra-se a curva com a resistência estimada, calculada a partir da equação 4.2 e dos valores das tabelas 6 e 7, descritos anteriormente.

Numa perspetiva global é possível constatar-se que para os gráficos em que a resistência é apresentada em função da razão A/C é notória uma dispersão elevada, isto deve-se ao facto de não ter em consideração a participação das adições na formação dos sólidos.

Por sua vez no gráfico onde é possível fazer uma análise comparativa entre os valores reais e os valores estimados de compressão, considerando a eficiência das adições, verifica-se que a dispersão das adições diminui significativamente.

Saliente-se que, em geral, os valores k, que traduzem a eficiência de cada adição a determinada idade, podem ser considerados por defeito para aplicações reais em condições semelhantes às

usadas neste estudo, dado que na maioria dos casos as misturas apresentaram maior trabalhabilidade que as misturas de referência,

4.6. Avaliação energética

4.6.1. Custo de Energia de Produção

Dado que o motivo para a realização do trabalho foi a preocupação com o impacto ambiental relacionado com a produção de cimento Portland, importa fazer um balanço energético sobre a incorporação das adições.

A balança que se pretende fazer tem âmbito limitado, dado que se baseia em certos pressupostos que apenas são válidos em condições particulares de aplicação. Por um lado, baseia-se na eficiência de cada adição, a qual, naturalmente está condicionada ao objetivo a atingir. Por outro, não são consideradas todas as vertentes associadas à alteração do ligante por exemplo a necessidade de existência de mais silos de armazenamento.

Apesar disso, em qualquer balanço sobre o impacto de uso de adições, é sempre necessário fazer um exercício deste tipo, ou seja, definir um objetivo, estabelecer uma eficiência e determinar as variações energéticas associadas ao próprio material, sendo a utilidade deste estudo essencialmente como um exercício nesse âmbito.

Assim para a produção destas argamassas há que ter em conta a energia gasta e os custos que a mesma acarreta. Como já referido anteriormente cada argamassa tem uma composição distinta, em que as adições foram as cinzas volantes, o fíler calcário R70, fíler calcário R70 moído, areia fina com granulometria entre os 0,16 e 0,08 milímetros e areia fina moída com granulometria inferior a 0,09 milímetros. Inicialmente o pretendido era obter uma areia fina moída com granulometria inferior a 0,08 mm, no entanto, como o procedimento laboratorial com equipamento disponíveis era demasiado moroso, pois, após uma hora e meia de moagem apenas se obtinha 6 gramas com a granulometria desejada, optou-se então por estabelecer uma granulometria inferior a 0,09 mm.

Os materiais moídos, areia fina moída e fíler calcário R70 moído, estes foram obtidos por moagem da areia fina e do fíler calcário R70, respetivamente. Para a redução da finura do material, foi usado um equipamento de moagem, com uma potência de 390 W. O processo de moagem tornou-se um trabalho moroso, pois o equipamento de moagem é de laboratório, ou seja, de pequena capacidade, o que faz com que a moagem do material já realizada pequenas parcelas.

O filer calcário R70 possuía um valor de Blaine de 897 m²/g, e após a moagem passou para 9860 m²/g.

De acordo com os dados fornecidos da fábrica de Alhandra, acerca da energia elétrica gasta por tonelada na moagem de CEM II/B-L 32,5 N sabe-se o que o valor gasto é de cerca de 32,3 kWh/ton. Dado que não foram fornecidos elementos para o Cimento CEM I 52,5 R, assumiu-se o valor 32,3 kWh/ton também para este cimento.

Numa escala industrial tem-se a noção que o gasto energia que se obtém com a produção de cimento, é superior aos outros materiais envolvidos. Pois, a produção dos outros materiais não depende de muitas etapas para se conseguir o produto final. Consequentemente faz com que o cimento acarreta um maior custo de energia elétrica.

4.6.2. Custos de Materiais

No presente subcapítulo apresentam-se tabelados os valores comerciais dos materiais usados para este estudo (Tabela 8). O preço do cimento e da areia já têm incorporado o preço do transporte, mas o do custo do filer e das cinzas volantes não. Assumindo um custo de transporte por quilómetro de 7 cêntimos por tonelada, os custos destes materiais são os apresentados nas Figuras 36 e 37.

4

Tabela 8: Custos dos materiais utilizados

Material	Custo
Cimento	100 €/ton
Filer Calcário	9€/ton
Cinzas Volantes	20€/ton
Areias finas	14€/m ³

Para uma distância de 100 km, assumindo os valores de k apresentados na Tabela 6, obtêm-se os custos por tonelada de tipo de ligantes apresentados na Tabela 9. Assim, para a resistência aos 7 dias, apenas o filer F70 é competitivo face ao cimento, com um custo unitário de 98,7 €/ton, face a 100€/ton. Aos 28 dias as cinzas e o filer R70 surgem também com um custo unitário menor face ao cimento, com valores de 101,6€/ton e 106,0€/ton, respetivamente. Por último, para a resistência aos

⁴ Os valores do Filler calcário e das Cinzas Volantes têm um acréscimo de 0,07€/ton/km.

90 dias, as cinzas apresentam custos unitários competitivos em relação ao cimento, com um custo unitário de 68,0 €/ton, francamente vantajoso.

Na tabela não se apresenta o custo da areia fina, dado que os valores de k são nulos. Os custos associados à areia fina moída são sempre mais elevados do que o cimento, não sendo assim interessantes na função de ligante. Estes custos foram calculados através da seguinte expressão:

Custo de tonelada de cimento equivalente = $1/k \times$ custo unitário da adição respetiva

Tabela 9: Custos de ligante por tonelada (€/ton)

	Cimento CEM I	Cinzas	Fíler 70	Fíler 70 moído	Areia fina moída
Custo 7 dias	100	160,2	98,7	131,1	264,3
Custo 28 dias	100	101,6	106,0	139,4	227,9
Custo 90 dias	100	68,9	-	-	-

Preço das Cinzas Volantes
20 €/ton
0,07 €/ton/km

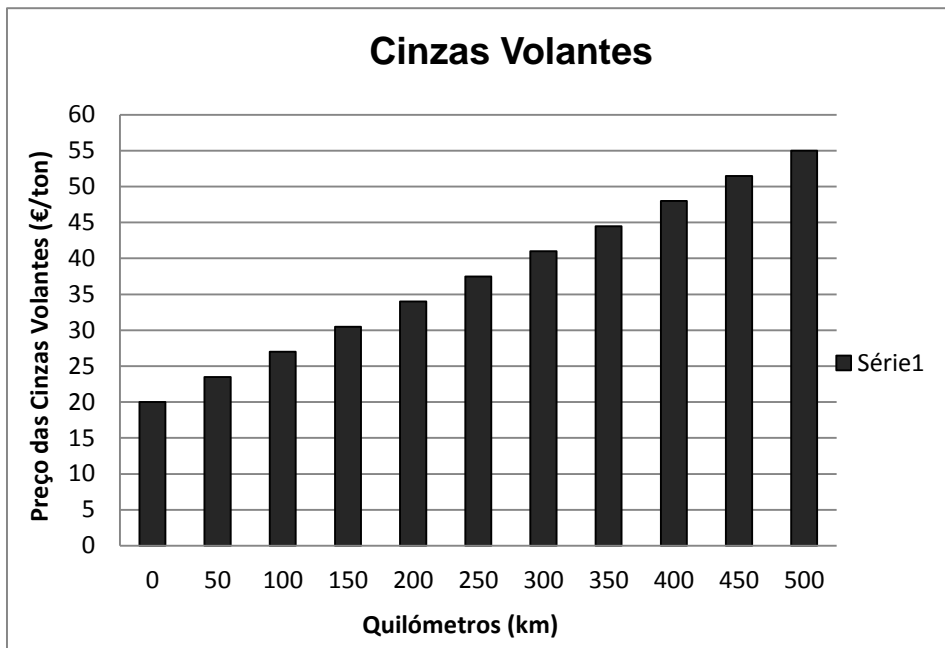


Figura 35: Preço das cinzas volantes em função da distância

Preço do Filler Calcário
9 €/ton
0,07E/ton/km

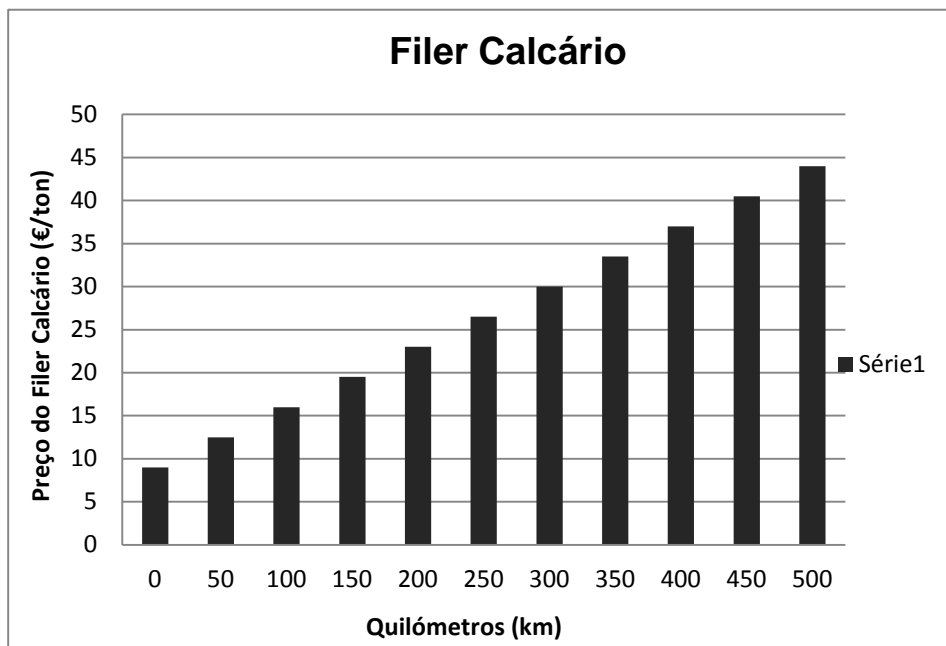


Figura 36: Preço do fíler em função da distância

Nas Figuras 35 e 36 é possível ter uma noção de como a distância de onde as cinzas volantes e o filer são encomendados têm um contributo significativo, no que diz respeito ao preço final do produto.

4.6.3. Libertação de CO₂

Todos os materiais empregues na construção não estão livres de libertarem CO₂ para a atmosfera, no entanto alguns têm um contributo mais significativo, como o caso do cimento.

O cimento é um dos materiais mais tóxicos para o meio ambiente, libertando durante a sua produção, grandes quantidades de CO₂, e é neste ponto que este estudo se centra, encontrar ligantes cimentícios que tenham um contributo mais benéfico para a atmosfera, diminuindo desta forma o impacto ambiental.

Na Tabela 10 é possível analisar o contributo de cada um dos materiais, no que diz respeito à libertação de CO₂. Observa-se portanto o elevado contributo negativo do cimento, contudo é notório que ao contrário deste material tóxico, as cinzas respondem de forma antagónica, libertando pequenas concentrações de CO₂.

Na Tabela 10 são ainda apresentados os valores da emissão de CO₂ de 1 tonelada de cimento equivalente, calculados pela seguinte expressão:

Emissão de tonelada de cimento equivalente = 1/k x emissão unitária da adição respetiva

Tabela 10: Valores de CO₂ por material (kgCO₂/kg)

	Cimento CEM I	Cinzas	Filer 70	Filer 70 móido	Areia fina móida
Emissão unitária	930	8	87	174	91,8
Emissão 7 dias	930	47,5	536,5	1148,2	1750,7
Emissão 28 dias	930	30,1	576,2	1221,2	1509,7
Emissão 90 dias	930	20,4			

Constata-se que o uso de cinzas volantes é muito vantajoso para o ambiente, ao contrário do fíler F70 moído e da areia fina moída. O Fíler F70 também apresenta vantagens relativamente ao cimento, mas ainda assim bem inferiores às das cinzas volantes.

Note-se que estes valores são válidos para o intervalo de percentagens de substituição utilizadas e para as condições usadas, podendo, naturalmente, ser diferentes para outras condições.

Os cálculos efetuados foram muito simplificados, relativamente a todas as emissões envolvidas na utilização destes materiais, mas, julga-se, representam boas aproximações no que respeita á emissão apenas associadas à massa de cada material.

As emissões globais não foram calculadas, mas estarão relacionadas em parte com o custo do material, que depende da energia utilizada. A tabela 10 de custos atrás apresentada, pode assim servir como indicador para as emissões globais, apesar de imperfeito.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. Conclusão

Este trabalho aborda um problema contemporâneo, as emissões de dióxido carbono, que são um dos grandes desafios ambientais que perseguem a sociedade atual, pois são estas emissões que ocupam notoriamente um lugar de realce nas alterações climáticas verificadas no nosso planeta. Hoje em dia este problema alastra-se para outros setores, como a nível económico, através de penalizações financeiras que são estabelecidas para quem exceda o valor admissível de emissões de CO₂.

Na atualidade o cimento é um dos materiais mais consumidos na construção, e conseqüentemente, contribui para o impacto ambiental através das emissões de CO₂ que acarreta. Efetivamente, este material emite por tonelada um valor quase igual de CO₂, e este facto deve de ser alterado. Variadíssimos estudos têm sido realizados para abordar este problema e tentar responder da melhor forma à necessidade da utilização de ligantes hidráulicos na construção.

O elevado uso de cimento deve-se ao facto da boa resposta deste material aos desafios da construção, mostrando uma grande eficiência e eficácia. Contudo os problemas da sua utilização são acrescidos devido à demanda mundial, prevendo-se a quase duplicação do seu consumo se nada for feito.

Neste âmbito, este estudo procurou dar um contributo, procurando novas respostas, tendo sempre em conta as características do material, e a sua eficiência para o fim pretendido.

Com este trabalho de investigação conclui-se que é possível substituir, no ligante, parte do cimento por outras adições, em ligantes com baixo teor em clínquer, mantendo o produto características de resistência suficientes para classificar a substituição como eficiente.

Para a avaliação da eficiência usou-se um fator k definido de forma semelhante ao usado na norma EN 206 para o estabelecimento da dosagem de cimento equivalente, com vista à percepção da valia das adições, isto é, a eficiência das adições para obter um determinado valor de resistência a idade especificada.

Pode-se concluir que as cinzas volantes são o material com melhor desempenho, assumindo um papel crescente com o desenrolar da idade.

Relativamente ao efeito da moagem dos materiais, é possível verificar que a moagem do filer não apresentou grande eficácia, e como é um processo que acarreta mais custos e gastos de energia, não é uma medida que seja compensatória. No entanto com a areia, a moagem confere melhorias relativamente ao uso de areia não moída. Do ponto de vista económico e ambiental, porém, essa melhoria não é suficiente para justificar a substituição de cimento.

Note-se que na avaliação não foi considerado o efeito benéfico na trabalhabilidade, o que melhoraria a eficiência destes materiais, pelo que os valores apresentados estão por defeito e podem ser considerados assim do lado da segurança.

Podemos então definir uma escala decrescente na função de ligante, em substituição de cimento, em função da sua eficiência económica e ambiental: as cinzas volantes, o filler calcário e a areia de granulometria muito fina.

No que respeita à areia, foi notório que a finura do material teve um papel relevante na resposta da argamassa, ou seja, melhor desempenho quanto menor a dimensão do material.

Conclui-se, assim, como já referido, é possível o uso de ligantes cimentícios com baixo teor em clínquer, criando betões considerados mais ecológicos.

No entanto, com certas adições a produção destes materiais ainda acarreta elevados custos, mas há que pensar no futuro, pois maiores custos hoje em dia podem vir a fortalecer, não só o meio ambiente, bem como a economia no futuro, pelo que se justifica o aprofundamento do estudo destes materiais.

5.2. Desenvolvimentos Futuros

Como referido anteriormente, os ensaios realizados neste trabalho apenas permitem uma análise de comparação qualitativa, pelo que pode ser o ponto de partida para o seguimento deste mesmo trabalho, sabendo que o ganho da trabalhabilidade das amassaduras pode ser conseguido pela diminuição da água.

Existe assim, um potencial de poupança do cimento, que pode ser avaliado por argamassas com trabalhabilidades semelhantes.

Há uma necessidade de fornecer uma base científica e de engenharia sólida para estes materiais, bem como um estudo profundo, diversos estudos estão a ser desenvolvidos, mas é preciso mais recursos para os suportar e leva-los à verdadeira aplicação. É de extrema importância que haja uma solidificação destes estudos e com esforço se consiga acelerar a introdução de tais adições ambientalmente amigáveis. Desta forma, o estudo dos mecanismos fundamentais que permitem a melhoria do desempenho de cada adição permitirá potenciar a sua utilização.

Se não formos nós a preocuparmo-nos com o nosso futuro, quem será?

Bibliografia

LIVROS/ARTIGOS/DISSERTAÇÕES

Abdala, V. (16 de Setembro de 2012). UFRJ desenvolve concreto ecológico com fibras vegetais e materiais reciclados . (F. Massalli, Ed.) *Agência Brail* .

Alisson, E. (3 de Maio de 2013). Pesquisadores da Poli-USP desenvolvem cimento ecoeficiente. *FAPESP*.

Coutinho, In J. d. (2006), *Materiais de Construção 2 1ª Parte- Ligantes e Caldas 2002* (pp. 102-123). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Coutinho, A. de Sousa (1988). *Fabrico e Propriedades do Betão, Volume I*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ESTIG, (2008), *Materiais de Construção 2:Ligantes*, Instituto Politécnico de Beja

Gobbo, L. d. (2003). *Os compostos do clínquer portland: sua caracterização por difração de raios-x e quantificação por refinamento de Rietveld*. São Paulo: Universidade de São Paulo Instituto de Geocências.

Kantro, D. L. (1980) *Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste - A Miniature Slump Test*. Cement, Concrete and Aggregates, vol. 2, n.º 2, pp.95-102.

L.Scrivener, K. (Julho de 2014). Options for the future of cement. (S. I.-F. Cements, Ed.) *TheIndian Concrete Journal*, 11-21.

Lemos, P. (4 de Julho de 2011). Betão Ecológico de Geopolímeros. *Materiais de Construção*.

Netto, R. M. (2006). *Materiais Pozolânicos*. Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais.

Pablos, M. (5 de Outubro de 2012). Novo concreto é elaborado a partir de material reciclável. *Agência USP de Notícias*.

Pablos, M. (9 de Outubro de 2012). Universidade brasileira inventa betão feito a partir de materiais reciclados. (GREENSAVERS, Ed.) *Matérias*.

Pablos, M. (s.d.). Matérias. *GREENSAVERS*.

Rao, G. (2001). Generalization of Abrams ' lawfer cement mortars. *Cement and Concrete Research*.

Santos, B. L. (2012). *Eficiência de Misturas Ternárias - Aplicação do conceito do fator k*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SCI-TECH,(24 de Junho de 2013). Betão "verde" em construção. *Futuris*.

Sousa, S. P. (2005). *Betão Eco-Eficiente com Cinzas de Casca de Arroz*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Teixeira, R. (26 de Junho de 2011). O Betão que purifica o Ar. *Engenharia civil e construção em Portugal*.

ENDEREÇOS ELECTRÓNICOS

<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2012-09-16/ufrj-desenvolve-concreto-ecologico-com-fibras-vegetais-e-materiais-reciclad0s>. Consultado a 12 de Março de 2014.

<http://greensavers.sapo.pt/2012/10/09/universidade-brasileira-inventa-betao-feito-a-partir-de-materiais-reciclad0s/>. Consultado a 12 de Março de 2014.

<http://pt.euronews.com/2013/06/24/betao-verde-em-construcao/>. Consultado a 12 de Março de 2014.

<http://www.engenhariaportugal.com/betao-ecologico-de-geopolimeros>. Consultado a 13 de Março de 2014.

<http://www.engenhariacivil.com/cimento-sustentavel-residuos-ceramicos>. Consultado a 13 de Março de 2014.

http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland_composicao.htm. Consultado a 5 de Junho de 2014.

http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/Sub-paginas/MatConst_apoio_files/ppt/ligantes2.pdf. Consultado a 24 de Julho de 2014.

<http://www.secil.pt/pdf/Processo%20de%20Fabrico%20de%20Cimento.pdf>. Consultado a 1 de Setembro de 2014.

http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=29&name=Producao--cimento. Consultado a 2 de Setembro de 2014.

NORMAS/ESPECIFICAÇÕES DE ENSAIOS

ASTM C 150 (2007) Standard Specification for Portland Cement American Society of Testing Materials

NP EN 196-1 (2006) – Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1; Determinação das resistências mecânicas. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 197-1 (2011) – Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

NP EN 445 (2008) – Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

ANEXOS

ANEXO 1 – Ficha técnica do cimento (SECIL)

➤ Características Químicas

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

(1)As percentagens são referidas à massa do cimento

➤ Características Mecânicas

Resistência à Compressão (Mpa)			
Resistências aos primeiros dias		Resistência de Referência	NP EN 196-1
2 Dias	7 Dias	28 dias	
≥ 30	-	≥52,5	

➤ Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Específico
Princípio de presa	NP EN 196-3	≥ 45 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

ANEXO 2 – Composição das argamassas

➤ Massas Efetivamente usadas nas amassaduras com areia seca

nº	Data de amassadura	Cimento (g)	cinzas (g)	fíler R70 (g)	fíler R70 moído (g)	areia fina (g)	areia fina moída (g)	areia referência > 80 (g)	água (ml)	adjuv. (ml)
1	27/02/2014	1818,2	0	0	0	0,0	0,0	3000	545,4	10
2	27/02/2014	818,2	1000	0	0	0,0	0,0	3000	545,4	10
3	27/02/2014	636,4	1181,8	0	0	0,0	0,0	3000	545,4	10
4	05/03/2014	200	1254,6	0	0	0,0	0,0	2400	436,4	8
5	05/03/2014	520	0	934,6	0	0,0	0,0	2400	436,4	8
6	05/03/2014	440	0	1014,6	0	0,0	0,0	2400	436,4	8
7	05/03/2014	360	0	1094,6	0	0,0	0,0	2400	436,4	8
8	26/06/2014	520	0	0	934,6	0,0	0,0	2400	436,4	8
9	05/06/2014	440	0	0	1014,6	0,0	0,0	2400	436,4	8
10	26/06/2014	360	0	0	1094,6	0,0	0,0	2400	436,4	8
11	05/03/2014	720	0	0	0	734,6	0,0	2400	436,4	8
12	06/03/2014	880	0	0	0	574,6	0,0	2400	436,4	9
13	06/03/2014	1040	0	0	0	414,6	0,0	2400	436,4	6,5*
14	10/04/2014	720	0	0	0	462,4	272,2	2400	436,4	8
15	14/04/2014	880	0	0	0	361,7	212,9	2400	436,4	8
16	14/04/2014	1040	0	0	0	261,0	153,6	2400	436,4	8
17	10/04/2014	720	0	0	0	0,0	734,6	2400	436,4	8
18	10/04/2014	880	0	0	0	0,0	574,6	2400	436,4	8
19	10/04/2014	1040	0	0	0	0,0	414,6	2400	436,4	8

*No caso das argamassas 12 e 13 houve a necessidade de alterar a dosagem de adjuvante devido à consistência da mistura.

nº	A/C	A/L
1	0,30	0,3
2	0,67	0,3
3	0,86	0,3
4	2,18	0,3
5	0,84	0,3
6	0,99	0,3
7	1,21	0,3
8	0,84	0,3
9	0,99	0,3
10	1,21	0,3
11	0,61	0,3
12	0,50	0,3
13	0,42	0,3
14	0,61	0,3
15	0,50	0,3
16	0,42	0,3
17	0,61	0,3
18	0,50	0,3
19	0,42	0,3

ANEXO 3:Equipamento de moagem

Características do equipamento de moagem:
Volts 115 230
Amps. 3,4 1,7
R.P.M. 17 15 1425
CO.S MAFF.R.P.M. 58-48
TYPE RAFRAME 5815RW
H.P.1/6

ANEXO 4-Registo da apresentação da argamassa no estado fresco

Argamassa	Nota
1	Sem registo relevante a apresentar.
2	Sem registo relevante a apresentar.
3	Sem registo relevante a apresentar.
4	Sem registo relevante a apresentar.
5	Apresentava muita segregação.
6	Sem registo relevante a apresentar.
7	Sem registo relevante a apresentar.
8	Apresentava muita segregação e exsudação.
9	Sem registo relevante a apresentar.
10	Apresentava muita segregação e exsudação, os grãos não ficaram bem misturados.
11	Sem registo relevante a apresentar.
12	Sem registo relevante a apresentar.
13	Sem registo relevante a apresentar.
14	Apresentava muita segregação.
15	Sem registo relevante a apresentar.
16	Sem registo relevante a apresentar.
17	Sem registo relevante a apresentar.
18	Apresentava muita segregação.
19	Sem registo relevante a apresentar.

ANEXO 5: Resultados do ensaio de espalhamento e escoamento

Ensaio	Espalhamento- Dm (mm)	Escoamento (seg.)
1	101	-
2	263	-
3	272	-
4	307	53,16
5	360	19,34
6	366	18,1
7	345	16,03
8	315	135
9	322	122
10	330	107
11	-	-
12	172	-
13	223	-
14	-	-
15	204	-
16	242	-
17	292	-
18	240	-
19	261	-

Data	nº	Ensaio do Espalhamento		Media
27/02/2014	1	100	102	101
27/02/2014	2	261	265	263
27/02/2014	3	270	274	272
05/03/2014	4	308	305	307
05/03/2014	5	359	361	360
05/03/2014	6	362	370	366
05/03/2014	7	342	348	345
26/06/2014	8	313	317	315
05/06/2014	9	320	324	322
26/06/2014	10	327	332	330
05/03/2014	11	0	0	0
06/03/2014	12	170	174	172
06/03/2014	13	224	221	223
10/04/2014	14	0	0	0
14/04/2014	15	199	208	204
14/04/2014	16	239	254	247
10/04/2014	17	198	187	193
10/04/2014	18	239	240	240
10/04/2014	19	261	260	261

ANEXO 6- Valores registados e calculados de Resistência

$R=(A/B)^{(A/Ceq)}$
"(1)" $R=A*(W/Ceq)^B$
$Ceq=C+k_{cv}*CV+k_{f70}*F70+k_{f70m}*F70M+k_{arf}*ARF+k_{arfm}*ARFM$

➤ 1 Dia

Mistura	Resistência Estimada 1D	Ceq	A/Ceq
1	69,6485	1818,20	0,30
2	-	-	-
3	-	-	-
4	-	-	-
5	21,6854	728,46	0,60
6	18,6565	666,30	0,65
7	15,8157	604,14	0,72
8	22,7202	748,87	0,58
9	19,7149	688,46	0,63
10	16,8856	628,05	0,69
11	21,2625	720,00	0,61
12	29,828	880,00	0,50
13	39,5372	1040,00	0,42
14	22,6505	747,50	0,58
15	31,0683	901,51	0,48
16	40,5377	1055,52	0,41
17	25,0896	794,23	0,55
18	33,2223	938,06	0,47
19	42,2607	1081,89	0,40

Mistura	Resistência Real 1D	1	2	3	4,00	Media	DP
1	64,2	103	102,1	102,5	103,20	64,19	0,56
2	-		-	-	-	-	-
3	-		-	-	-	-	-
4	-		-	-	-	-	-
5	23,1	37,02	36,7	36,51	37,59	23,10	14,91
6	18,8	30,86	29,5	30,03	29,85	18,79	0,27
7	14,3	23,29	23,39	21,96	22,71	14,27	0,72
8	24,9	39,84	40,29	39,57	39,79	24,92	0,37
9	19,7	32,27	32,07	30,76	30,99	19,70	0,70
10	14,8	23,54	24,15	23,43	23,75	14,82	0,36
11	15	24,16	24,04	23,66	23,88	14,96	0,19
12	29,6	45,8	47,31	48,22	48,41	29,65	0,59
13	45,8	75,28	75,46	70,35	71,86	45,77	2,63
14	17,8	27,52	28,73	29,22	28,22	17,76	0,50
15	30,9	49,22	49,53	49,07	49,67	30,86	0,31
16	45,5	72,85	71,24	73,13	73,78	45,47	1,32
17	20,9	32,76	33,77	33,45	33,72	20,89	0,17
18	34,1	54,23	54,51	54,54	54,86	34,08	0,19
19	47,9	76,53	76,33	76,32	77,26	47,88	0,54

Mistura	desv_1d^2(1)	est^2	f. excel^2	formula excel	real^2
1	29,69	4850,91	2859,161966	53,47113208	4121,64
2	0,00	-	-	-	0
3	0,00	-	-	-	0
4	0,00	-	-	-	0
5	2,00	470,26	396,8230357	19,92041756	533,61
6	0,02	348,06	287,6851399	16,96128356	353,44
7	2,30	250,14	195,8370281	13,99417836	204,49
8	4,75	516,21	396,8230357	19,92041756	620,01
9	0,00	388,68	287,6851399	16,96128356	388,09
10	4,35	285,12	195,8370281	13,99417836	219,04
11	39,22	452,09	741,0924717	27,22301364	225
12	0,05	889,71	1088,666906	32,99495273	876,16
13	39,22	1563,19	1498,239361	38,70709704	2097,64
14	24	513,04	741	27,223014	316,84
15	0	965,24	1089	32,994953	954,81
16	25	1643,31	1498	38,707097	2070,25
17	18	629,49	741	27,223014	436,81
18	0,77	1103,72	1088,666906	32,99495273	1162,81
19	31,80	1785,97	1498,239361	38,70709704	2294,41
Soma dos quadrados	219,90	16655,14	14603,84859		16875,05

R_estimado	0,973767
R_formula excel	0,713145

Valores para 1 dia		min	max
k_cv_1d	0	0	1
k_f70_1d	0,223043	0	1
k_f70m_1d	0,244881	0	1
k_arf_1d	0	0	1
k_arfm_1d	0,101043	0	1
A_1d			
	9,137177	1	50
B_1d			
	-1,68685	-3	-0,1

➤ 7 Dias

Mistura	Razão A/C	Resistência Real 7 D	1	2	3	4	Media	DP
1	0,29997	74,90	117,80	122,20	122,60	116,60	74,88	3,046309242
2	0,66659	48,40	77,63	78,63	76,47	77,00	48,40	0,928524816
3	0,85701	40,80	64,68	65,54	65,16	65,51	40,76	0,400697309
4	2,182	14,90	24,00	23,86	23,74	23,64	14,88	0,155349069
5	0,839	38,90	61,03	61,98	63,54	62,43	38,90	1,042065257
6	0,992	33,20	52,48	54,72	51,28	54,07	33,21	1,555257213
7	1,212	26,30	41,89	41,60	42,44	42,36	26,30	0,397607428
8	0,839	41,30	65,77	64,91	67,04	66,76	41,33	0,973413239
9	0,992	29,90	47,79	48,50	47,53	47,85	29,95	0,41242171
10	1,212	25,50	41,88	41,66	39,78	40,08	25,53	1,073126274
11	0,606	31,40	50,35	50,68	48,91	51,17	31,42	0,971918206
12	0,496	48,00	79,66	79,93	74,26	73,19	47,98	3,533355346
13	0,42	66,70	104,40	103,90	107,60	110,80	66,67	3,201431971
14	0,606	34,10	54,40	51,63	57,62	55	34,11	2,448442
15	0,496	49,20	79,41	78,77	78,13	79	49,23	0,522558
16	0,42	68,40	109,40	107,60	110,40	110	68,41	1,320353
17	0,606	37,30	59,45	61,17	58,93	59	37,34	0,983306
18	0,496	51,40	85,46	86,48	78,11	79,16	51,44	4,276824172
19	0,42	69,50	111,90	112,90	109,20	110,60	69,47	1,605199884

Mistura	Resistência Estimada 7 D	Ceq	A/Ceq
1	85,64102	1818,2	0,299967
2	43,80016	986,7035	0,55275
3	36,49632	835,5374	0,652754
4	21,4253	411,4044	1,060757
5	36,67595	671,5515	0,649838
6	32,68028	604,524	0,72189
7	28,72743	537,4965	0,811912
8	36,08178	661,6269	0,659586
9	32,04189	593,7498	0,73499
10	28,04664	525,8728	0,829858
11	39,58853	720	0,606111
12	49,33712	880	0,495909
13	59,2601	1040	0,419615
14	40,45024	734,2725	0,59433
15	50,02415	891,1639	0,489697
16	59,76381	1048,055	0,41639
17	41,91782	758,5185	0,575332
18	51,1932	910,129	0,479492
19	60,62037	1061,739	0,411024

Mistura	desv_7d^2(1)	est^2	f. excel^2	Formula excel	real^2
1	115,3695	7334,384	6040,943	77,7235	5610,01
2	21,15849	1918,454	1721,722	41,49364	2342,56
3	18,52169	1331,981	1159,877	34,05696	1664,64
4	42,57954	459,0435	266,9221	16,33775	222,01
5	4,94638	1345,126	1199,252	34,63022	1513,21
6	0,270111	1068,001	921,6115	30,35806	1102,24
7	5,892428	825,2654	672,6639	25,93577	691,69
8	27,22981	1301,895	1199,252	34,63022	1705,69
9	4,587675	1026,682	921,6115	30,35806	894,01
10	6,485364	786,6139	672,6639	25,93577	650,25
11	67,05203	1567,252	1999,941	44,7207	985,96
12	1,78788	2434,151	2740,104	52,346	2304
13	55,35212	3511,759	3558,905	59,65656	4448,89
14	40,32555	1636,222	1999,941	44,7207	1162,81
15	0,679231	2502,416	2740,104	52,346	2420,64
16	74,58382	3571,713	3558,905	59,65656	4678,56
17	21,32427	1757,104	1999,941	44,7207	1391,29
18	0,042765	2620,744	2740,104	52,346	2641,96
19	78,84792	3674,829	3558,905	59,65656	4830,25
Soma	587,0366	40673,63	39673,37		41260,67

R_estimado 0,971342673
R_formula excel 0,921582321

Valores aos 7 dias		min	max
k_cv_7d	0,169	0	1
k_f70_7d	0,162	0	1
k_f70m_7d	0,152	0	1
k_arf_7d	0,000	0	1
k_arfm_7d	0,052	0	1
A_7d	22,857	1	50
B_7d	-1,097	-3	-0,1

➤ 28 Dias

Mistura	Resistência real 28D	DP	R_est_28D	Ceq	A/Ceq	desv_28d ² (1)	est ²
1	84,078125	2,962164	96,87	1818,20	0,30	163,61	9383,63
2	59,878125	0,80	54,43	1084,06	0,50	29,73	2962,13
3	53,7140625	1,06	47,01	950,59	0,57	44,94	2209,94
4	22,6984375	0,32	31,66	533,55	0,82	80,31	1002,37
5	43,090625	1,15	40,21	661,12	0,66	8,31	1616,71
6	35,4625	0,24	35,63	593,20	0,74	0,03	1269,58
7	28,8296875	0,47	31,11	525,28	0,83	5,22	968,07
8	43,54375	0,36	39,67	653,16	0,67	15,01	1573,62
9	33,321875	0,38	35,05	584,56	0,75	3,00	1228,70
10	28,64375	0,32	30,50	515,96	0,85	3,44	930,18
11	35,9	0,41	44,22	720,00	0,61	69,23	1955,43
12	53,25625	2,15	55,31	880,00	0,50	4,21	3058,87
13	74,96875	3,21	66,63	1040,00	0,42	69,55	4439,44
14	38,315625	1,10	45,35	736,55	0,59	49,55	2057,07
15	54,3265625	0,89	56,21	892,95	0,49	3,57	3160,12
16	78,53125	0,98	67,30	1049,34	0,42	126,22	4528,84
17	43,290625	0,52	47,29	764,67	0,57	15,99	2236,28
18	55,896875	0,37	57,76	914,94	0,48	3,47	3336,29
19	79,0625	1,17	68,43	1065,21	0,41	113,00	4682,97
Soma dos quadrados						808,39	52600,23

Mistura	1	2	3,00	4,00	Média
1	138,2	138	133,80	128,10	84,08
2	96,42	94,19	95,47	97,14	59,88
3	85,21	83,9	87,53	87,13	53,71
4	36,41	35,58	36,78	36,50	22,70
5	69,57	70,44	66,25	69,52	43,09
6	57,13	56,33	56,50	57,00	35,46
7	45,27	46,38	45,84	47,02	28,83
8	69,74	69,69	68,93	70,32	43,54
9	53,86	53,82	52,68	52,90	33,32
10	45,11	46,2	46,21	45,80	28,64
11	57,62	57,28	58,22	56,64	35,90
12	81,55	83,33	86,98	89,08	53,27
13	117,2	114,1	123,70	124,80	74,97
14	63,43	61,98	59,44	60,37	38,32
15	85,18	88,59	86,58	87,34	54,33
16	124,9	124,7	125,00	128,00	78,53
17	69,58	70,3	68,70	68,48	43,29
18	89,64	89,52	88,59	89,99	55,90
19	125,5	124,7	129,00	126,80	79,06

MISTURA	RAZÃO A/C	excel^2	formula excel	real^2
1	0,299967	6981,160498	83,55333924	7069,131104
2	0,666585187	2260,847072	47,54836561	3585,389854
3	0,857008171	1585,552437	39,81899593	2885,20051
4	2,182	423,7331825	20,58478036	515,2190649
5	0,839	1633,817291	40,42050582	1856,801963
6	0,992	1289,676824	35,91207073	1257,588906
7	1,212	971,962876	31,17631915	831,1508813
8	0,839	1633,817291	40,42050582	1896,058164
9	0,992	1289,676824	35,91207073	1110,347354
10	1,212	971,962876	31,17631915	820,4644141
11	0,606	2586,449667	50,85714961	1288,81
12	0,496	3431,904937	58,58246271	2836,228164
13	0,42	4340,376252	65,88153195	5620,313477
14	0,606	2586,449667	50,85714961	1468,087119
15	0,496	3431,904937	58,58246271	2951,375393
16	0,42	4340,376252	65,88153195	6167,157227
17	0,606	2586,449667	50,85714961	1874,078213
18	0,496	3431,904937	58,58246271	3124,460635
19	0,42	4340,376252	65,88153195	6250,878906
Soma dos quadrados		50118,39974		53408,74135

R_estimado	0,969494614
R_formula excel	0,873007362

Valores aos 28 dias		min	max
k_cv_28d	0,266	0	1
k_f70_28d	0,151	0	1
k_f70m_28d	0,142	0	1
k_arf_28d	0,000	0	1
k_arfm_28d	0,061	0	1
A_28d	25,305	1	50
B_28d	-1,115	-3	-0,1

➤ 90 Dias

MISTURA	RAZÃO A/C	Resistência Real 90 D	1	2	3	4	Media	DP
1	0,299967	88,305	-	-	-	-		
2	0,666585187	72,3	117,9	117,70	114,40	112,50	72,27	2,63
3	0,857008171	68,5	108,8	109,00	109,70	110,90	68,50	0,95
4	2,182	33,3	53,44	53,43	53,26	53,17	33,33	0,13

MISTURA	Resistência Estimada 90 D	Ceq	A/Ceq
1	93,46	1818,200000	0,300000
2	63,67	1210,639162	0,450506
3	58,18	1100,184601	0,495735
4	46,38	692,354172	0,630313

	desv_90d^2(1)	est^2	f. excel^2	formula excel	real^2
	26,53324639	8734,032	9854,266	99,26865	7797,773
	74,42773356	4054,232	4470,025	66,85824	5227,29
	106,5936216	3384,398	3485,555	59,03859	4692,25
	170,9929306	2150,773	1381,85	37,17324	1108,89
soma	378,5475322	18323,43	19191,69		18826,2

Valores aos 90 dias		min	max
k_cv_90d	0,39244	0,00	1,00
k_f70_90d	0	0,00	1,00
k_f70m_90d	0	0,00	1,00
k_arf_90d	0	0,00	1,00
k_arfm_90d	0	0,00	1,00
A_90d	30	1	30
B_90d	- 0,94379	-3	-0,1

R_estimado	0,945876
R_formula excel	0,962274

ANEXO 7- Valores de eficiência das adições

Mistura	Dosagem de cimento (g)	Eficiência do cimento a um 1 dia	Eficiência do cimento aos 7 dias	Eficiência do cimento aos 28 dias	Eficiência do cimento aos 90 dias
1	1818,2	0,03531	0,041195	0,046255	
2	818,2	-	0,059154	0,073209	0,088365
3	636,4	-	0,064111	0,084381	0,107637
4	200	-	0,0745	0,1135	0,1665
5	520	0,044423	0,074808	0,082885	-
6	440	0,042727	0,075455	0,080682	-
7	360	0,039722	0,073056	0,08	-
8	520	0,047885	0,079423	0,083654	-
9	440	0,044773	0,067955	0,075682	-
10	360	0,041111	0,070833	0,079444	-
11	720	0,020833	0,043611	0,049861	-
12	880	0,033636	0,054545	0,060568	-
13	1040	0,044038	0,064135	0,072115	-
14	720	0,024722	0,047361	0,053194	-
15	880	0,035114	0,055909	0,061705	-
16	1040	0,04375	0,065769	0,075481	-
17	720	0,029028	0,051806	0,060139	-
18	880	0,03875	0,058409	0,063523	-
19	1040	0,046058	0,066827	0,075962	-

ANEXO 8 – Valores resultantes dos ensaios experimentais

➤ Valores dos ensaios de Resistência à Flexão

Argamassa	Idade (Dias)	Resistência à Flexão (MPa)
1	1	9,7
	7	13,8
	28	12,4
2	7	7,3
	28	8,0
	90	8,6
3	7	6,4
	28	7,4
	90	7,9
4	7	2,7
	28	4,0
	90	5,6
5	1	3,8
	7	5,8
	28	6,3
6	1	3,0
	7	5,1
	28	5,4
7	1	2,3
	7	4,1
	28	4,5
8	1	4,4
	7	6,5
	28	7,0
9	1	4,2
	7	5,6
	28	6,0
10	1	2,9
	7	4,5
	28	5,3

11	1	3,2
	7	5,1
	28	5,8
12	1	5,6
	7	7,0
	28	7,3
13	1	8,1
	7	9,3
	28	9,7
14	1	3,5
	7	5,0
	28	5,5
15	1	5,9
	7	6,9
	28	7,3
16	1	8,2
	7	10
	28	9,9
17	1	4,0
	7	5,7
	28	5,9
18	1	6,2
	7	7,6
	28	7,5
19⁵	1	8,2
	7	10,6
	28	10,3

⁵ Estes valores não tiveram grande relevância para o objetivo de estudo deste trabalho.

➤ **Valores dos ensaios de Resistência à compressão**

Argamassa	Idade (Dias)	Resistência à Compressão (MPa)
1	1	64,2
	7	74,9
	28	84,1
	90	88,3
2	7	48,4
	28	59,9
	90	72,3
3	7	40,8
	28	53,7
	90	68,5
4	7	14,9
	28	22,7
	90	33,3
5	1	23,1
	7	38,9
	28	43,1
6	1	18,8
	7	33,2
	28	35,5
7	1	14,3
	7	26,3
	28	28,8
8	1	24,9
	7	41,3
	28	43,5
9	1	19,7
	7	29,9
	28	33,3
10	1	14,8
	7	25,5
	28	28,6
11	1	15,0
	7	31,4
	28	35,9

12	1	29,6
	7	48,0
	28	53,3
13	1	45,8
	7	66,7
	28	75,0
14	1	17,8
	7	34,1
	28	38,3
15	1	30,9
	7	49,2
	28	54,3
16	1	45,5
	7	68,4
	28	78,5
17	1	20,9
	7	37,3
	28	43,3
18	1	34,1
	7	51,4
	28	55,9
19	1	47,9
	7	69,5
	28	79,0

ANEXO 9– Dados registados para os gráficos

Gráfico de Escoamento		Gráfico de Espalhamento	
Dosagem (%)	esc. (seg.)	Dosagem (%)	esp. (mm)
Cinzas	Cinzas	Cinzas	Cinzas
0	160	0	101
54,99945	160	54,99945	263
64,99835	160	64,99835	272
86,25052	53,16	86,25052	306,5
Fíler	Fíler	Fíler	Fíler
0	160	0	101
64,25134	19,34	64,25134	360
69,75113	18,1	69,75113	366
75,25093	16,03	75,25093	345
Fíler_m	Fíler_m	Fíler_m	Fíler_m
0	160	0	101
64,25134	135	64,25134	315
69,75113	122	69,75113	322
75,25093	107	75,25093	329,5
Areia fina	Areia fina	Areia fina	Areia fina
0	160	0	101
28,50268	160	28,50268	222,5
39,50227	160	39,50227	172
50,50186	160	50,50186	0
Ar_fin+Ar_fin_m	Ar_fin+Ar_fin_m	Ar_fin+Ar_fin_m	Ar_fin+Ar_fin_m
0	160	0	101
28,50268	160	28,50268	246,5
39,50227	160	39,50227	203,5
50,50186	160	50,50186	0
Ar_fina_m	Ar_fina_m	Ar_fina_m	Ar_fina_m
0	160	0	101
28,50268	160	28,50268	260,5
39,50227	160	39,50227	239,5
50,50186	160	50,50186	192,5

Gráfico de Flexão		Gráfico de compressão	
Dosagem (%)	Resist. 1 d	Dosagem (%)	Resist. 1 d
Cinzas	Cinzas	Cinzas	Cinzas
0	9,7	0	64,2
54,99945		54,99945	
64,99835		64,99835	
86,25052		86,25052	
Fíler		Fíler	
0	9,7	0	64,2
64,25134	3,8	64,25134	23,1
69,75113	3	69,75113	18,8
75,25093	3,3	75,25093	14,3
Fíler_m		Fíler_m	
0	9,7	0	64,2
64,25134	4,4	64,25134	24,9
69,75113	4,2	69,75113	19,7
75,25093	2,9	75,25093	14,8
Areia fina		Areia fina	
0	9,7	0	64,2
28,50268	8,1	28,50268	45,8
39,50227	5,3	39,50227	29,6
50,50186	3,2	50,50186	15
Ar_fin+Ar_fin_m		Ar_fin+Ar_fin_m	
0	9,7	0	64
28,50268	8,2	28,50268	46
39,50227	5,9	39,50227	31
50,50186	3,5	50,50186	18
Ar_fina_m		Ar_fina_m	
0	9,7	0	64,2
28,50268	8,2	28,50268	47,9
39,50227	6,2	39,50227	34,1
50,50186	4	50,50186	20,9

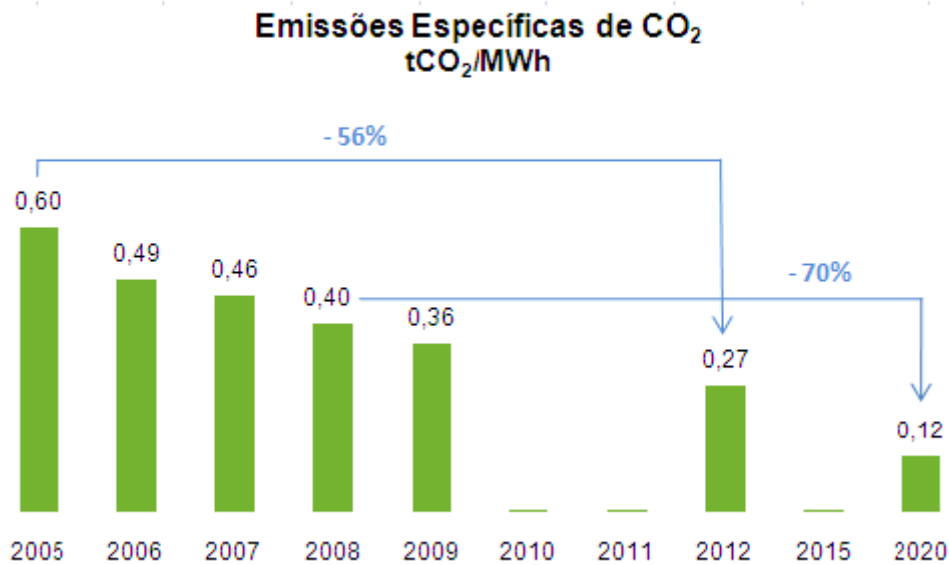
Gráfico de Flexão		Gráfico de Compressão	
Dosagem (%)	Resist. 7 d	Dosagem (%)	Resist. 7 d
Cinzas	Cinzas	Cinzas	Cinzas
0	13,8	0	74,9
54,99945	7,3	54,99945	48,4
64,99835	6,4	64,99835	40,8
86,25052	2,7	86,25052	14,8
Fíler		Fíler	
0	13,8	0	74,9
64,25134	5,8	64,25134	38,9
69,75113	5,1	69,75113	33,2
75,25093	4,1	75,25093	26,3
Fíler_m		Fíler_m	
0	13,8	0	74,9
64,25134	6,5	64,25134	41,3
69,75113	5,6	69,75113	29,9
75,25093	4,5	75,25093	25,5
Areia fina		Areia fina	
0	13,8	0	74,9
28,50268	9,3	28,50268	66,7
39,50227	7	39,50227	48
50,50186	5,1	50,50186	31,4
Ar_fin+Ar_fin_m		Ar_fin+Ar_fin_m	
0	13,8	0	74,9
28,50268	10	28,50268	69,5
39,50227	6,9	39,50227	51,4
50,50186	5	50,50186	37,3
Ar_fina_m		Ar_fina_m	
0	13,8	0	74,9
28,50268	10,6	28,50268	68,4
39,50227	7,6	39,50227	49,2
50,50186	5,7	50,50186	34,1

Gráfico de Flexão		Gráfico de Compressão	
Dosagem (%)	Resist. 28 d	Dosagem (%)	Resist. 28 d
Cinzas	Cinzas	Cinzas	Cinzas
0	12,4	0	84,1
54,99945	8	54,99945	59,9
64,99835	7,4	64,99835	53,7
86,25052	4	86,25052	22,7
Fíler		Fíler	
0	12,4	0	84,1
64,25134	6,3	64,25134	43,1
69,75113	5,4	69,75113	35,5
75,25093	4,5	75,25093	28,8
Fíler_m		Fíler_m	
0	12,4	0	84,1
64,25134	7	64,25134	43,5
69,75113	6	69,75113	33,3
75,25093	5,3	75,25093	28,6
Areia fina		Areia fina	
0	12,4	0	84,1
28,50268	9,7	28,50268	75
39,50227	7,3	39,50227	53,3
50,50186	5,8	50,50186	35,9
Ar_fin+Ar_fin_m		Ar_fin+Ar_fin_m	
0	12,4	0	84,1
28,50268	9,9	28,50268	79
39,50227	7,3	39,50227	55,9
50,50186	5,5	50,50186	43,4
Ar_fina_m		Ar_fina_m	
0	12,4	0	84,1
28,50268	10,3	28,50268	78,5
39,50227	7,5	39,50227	54,3
50,50186	5,9	50,50186	38,3

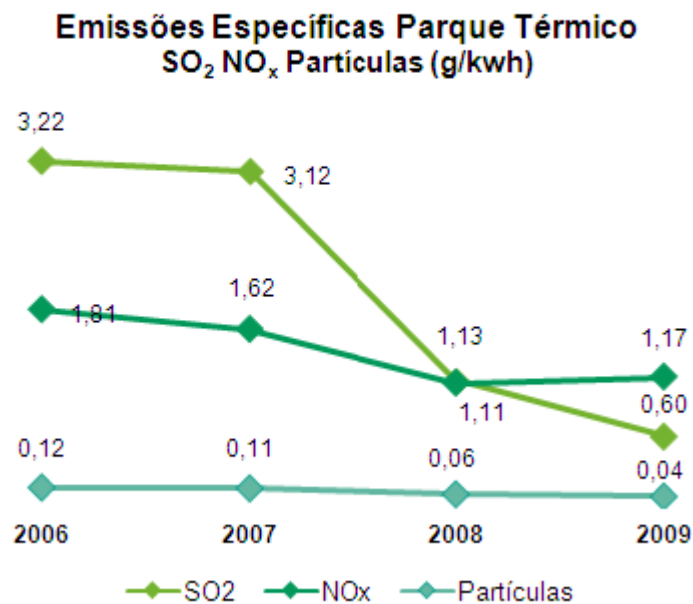
Gráfico de Compressão	
Dosagem	Resist. 90 dias
Cinzas	Cinzas
0	88,3
54,99945	72,3
64,99835	68,5
86,25052	33,3

Anexo 10 – Emissões Atmosférica- EDP

1. Emissões específicas de CO₂



2. Emissões específicas de SO₂, NO_x e partículas



ANEXO 11-Inventário de energia e carbono

INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) SUMMARY				
Materials	Embodied Energy & Carbon Coefficients			Comments
	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg	EC - kgCO2e/kg	
EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon				
Aggregate				
General (Gravel or Crushed Rock)	0,083	0,0048	0,0052	Estimated from measured UK industrial fuel consumption data
Aluminium				
Main data source: International Aluminium Institute (IAI) LCA studies (www.world-aluminium.org)				
General	155	8,24	9,16	Assumed (UK) ratio of 25.6% extrusions, 55.7% Rolled & 18.7% castings. Worldwide average recycled content of 33%.
Virgin	218	11,46	12,79	
Recycled	29,0	1,69	1,81	
Cast Products	159	8,28	9,22	Worldwide average recycled content of 33%.
Virgin	226	11,70	13,10	
Recycled	25,0	1,35	1,45	
Extruded	154	8,16	9,08	Worldwide average recycled content of 33%.
Virgin	214	11,20	12,50	
Recycled	34,0	1,98	2,12	
Rolled	155	8,26	9,18	Worldwide average recycled content of 33%.
Virgin	217	11,50	12,80	
Recycled	28	1,67	1,79	
Asphalt				
Asphalt, 4% (bitumen) binder content (by mass)	2,86	0,059	0,066	1.68 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Modelled from the bitumen binder content. The fuel consumption of asphalt mixing operations was taken from the Mineral Products Association (MPA). It represents typical UK industrial data. Feedstock energy is from the bitumen content.
Asphalt, 5% binder content	3,39	0,064	0,071	2.10 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.
Asphalt, 6% binder content	3,93	0,068	0,076	2.52 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.
Asphalt, 7% binder content	4,46	0,072	0,081	2.94 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.
Asphalt, 8% binder content	5,00	0,076	0,086	3.36 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.
Bitumen				
General	51	0.38 - 0.43 (?)	0.43 - 0.55 (?)	42 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Feedstock assumed to be typical energy content of Bitumen. Carbon dioxide emissions are particularly difficult to estimate, range given.
Brass				
General	44,00	2.46 (?)	2.64 (?)	Poor data availability. It is believed that the data may be largely dependent upon ore grade. Poor carbon data, making estimate of embodied carbon difficult.
Virgin	80,00	4.47 (?)	4.80 (?)	
Recycled	20,00	1.12 (?)	1.20 (?)	
Bricks				
General (Common Brick)	3,00	0,23	0,24	
EXAMPLE: Single Brick	6.9 MJ per brick	0.53 kgCO2 per brick	0,55	Assuming 2.3 kg per brick.
Limestone	0,85	?	-	
Bronze				
General	69.0 (?)	3.73 (?)	4.0 (?)	Average of the only two references

Carpet				
General Carpet	74 (187 per sqm)	3.9 (9.8 per sqm)	-	For per square meter estimates see material profile. Difficult to estimate, taken from Ref. 94.
Felt (Hair and Jute) Underlay	19,00	0,97	-	Ref. 94.
Nylon (Polyamide), pile weight 300 g/m2	130 MJ per sqm	6.7 (GWP) per sqm	6.7 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 1,477 g/m2. See Refs. 277 & 279. These carpets (inc. below) are a tufted surface pile made of 100% nylon (polyamide) with a woven textile backing and flame proofed on the basis of aluminium hydroxide.
Nylon (Polyamide), pile weight 500 g/m2	180 MJ per sqm	9.7 (GWP) per sqm	9.7 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 1,837 g/m2. See Refs. 277 & 279.
Nylon (Polyamide), pile weight 700 g/m2	230 MJ per sqm	12.7 (GWP) per sqm	12.7 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 2,147 g/m2. See Refs. 277 & 279.
Nylon (Polyamide), pile weight 900 g/m2	277 MJ per sqm	15.6 (GWP) per sqm	15.6 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 2,427 g/m2. See Refs. 277 & 279.
Nylon (Polyamide), pile weight 1100 g/m2	327 MJ per sqm	18.4 (GWP) per sqm	18.4 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 2,677 g/m2. See Refs. 277 & 279.
Carpet tiles, nylon (Polyamide), pile weight 300 g/m2	178 MJ per sqm	7.75 (GWP) per sqm	7.75 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 4,123 g/m2. See Refs. 277 & 279. These carpet tiles (inc. below) are a tufted surface pile made of 100% nylon (polyamide) fleece-covered bitumen backing and flame-proofed on the basis of aluminium hydroxide.
Carpet tiles, nylon (Polyamide), pile weight 500 g/m2	229 MJ per sqm	10.7 (GWP) per sqm	10.7 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 4,373 g/m2. See Refs. 277 & 279.
Carpet tiles, nylon (Polyamide), pile weight 700 g/m2	279 MJ per sqm	13.7 (GWP) per sqm	13.7 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 4,623 g/m2. See Refs. 277 & 279.
Carpet tiles, nylon (Polyamide), pile weight 900 g/m2	328 MJ per sqm	16.7 (GWP) per sqm	16.7 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 4,873 g/m2. See Refs. 277 & 279.
Carpet tiles, nylon (Polyamide), pile weight 1100 g/m2	378 MJ per sqm	19.7 (GWP) per sqm	19.7 (GWP) per sqm	Total weight of this carpet 5,123 g/m2. See Refs. 277 & 279.
Polyethylterephthalate (PET)	106,50	5,56	-	Includes feedstock energy
Polypropylene	95,40	4,98	-	Includes feedstock energy, for per square meter see material profile
Polyurethane	72,10	3,76	-	Includes feedstock energy
Rubber	67.5 to 140	3.61 to 7.48	-	
Saturated Felt Underlay (impregnated with Asphalt or tar)	31,70	1,65	-	Ref. 94.
Wool	106,00	5,53	-	For per square meter see material profile. See Refs. 63, 201, 202 & 281 (Same author).
Cement				
General (UK weighted average)	4,5	0,73	0,74	Weighted average of all cement consumed within the UK. This includes all factory made cements (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV) and further blending of fly ash and ground granulated blast furnace slag. This data has been estimated from the British Cement Association's factsheets (see Ref. 59). 23% cementitious additions on average.
Average CEM I Portland Cement, 94% Clinker	5,50	0,93	0,95	This is a standard cement with no cementitious additions (i.e. fly ash or blast furnace slag). Composition 94% clinker, 5% gypsum, 1% minor additional constituents (mac's). This data has been estimated from the British Cement Association's factsheets (see Ref. 59).
6-20% Fly Ash (CEM II/A-V)	5.28 to 4.51	0.88 (@ 6%) to 0.75 (@ 20%)	0.89 to 0.76	See material profile for further details.
21-35% Fly Ash (CEM II/B-V)	4.45 to 3.68	0.74 to 0.61	0.75 to 0.62	
21-35% GGBS (CEM II/B-S)	4.77 to 4.21	0.76 to 0.64	0.77 to 0.65	
36-65% GGBS (CEM III/A)	4.17 to 3.0	0.63 to 0.38	0.64 to 0.39	
66-80% GGBS (CEM II/B)	2.96 to 2.4	0.37 to 0.25	0.38 to 0.26	
Fibre Cement Panels - Uncoated	10,40	1,09	-	Few data points. Selected data modified from Ref. 107.
Fibre Cement Panels - (Colour) Coated	15,30	1,28	-	
Mortar (1:3 cement:sand mix)	1,33	0,208	0,221	Values estimated from the ICE Cement, Mortar & Concrete Model
Mortar (1:4)	1,11	0,171	0,182	
Mortar (1:5)	0,97	0,146	0,156	
Mortar (1:6)	0,85	0,127	0,136	
Mortar (1:½:4½ Cement:Lime:Sand mix)	1,34	0,200	0,213	
Mortar (1:1:6 Cement:Lime:Sand mix)	1,11	0,163	0,174	
Mortar (1:2:9 Cement:Lime:Sand mix)	1,03	0,145	0,155	
Cement stabilised soil @ 5%	0,68	0,060	0,061	
Cement stabilised soil @ 8%	0,83	0,082	0,084	Assumed 8% stabiliser contents (6% cement and 2% quicklime)

Ceramics												
General	10,00			0,66			0,70			Very large data range, difficult to select values for general ceramics.		
Fittings	20,00			1,07			1,14			Ref. 1.		
Sanitary Products	29,00			1,51			1,61			Limited data.		
Tiles and Cladding Panels	12,00			0,74			0,78			Difficult to select, large range, limited data. See Ref. 292.		
Clay												
General (Simple Baked Products)	3,00			0,23			0,24			General simple baked clay products (inc. terracotta and bricks)		
Tile	6,50			0,45			0,48					
Vitrified clay pipe DN 100 & DN 150	6,20			0,44			0,46					
Vitrified clay pipe DN 200 & DN 300	7,00			0,48			0,50					
Vitrified clay pipe DN 500	7,90			0,52			0,55					
Concrete												
General	0,75			0,100			0,107			It is strongly recommended to avoid selecting a 'general' value for concrete. Selecting data for a specific concrete type (often a ready mix concrete) will give greater accuracy, please see material profile. Assumed cement content 12% by mass.		
16/20 Mpa	0,70			0,093			0,100			Using UK weighted average cement (more representative of 'typical' concrete mixtures).		
20/25 MPa	0,74			0,100			0,107					
25/30 MPa	0,78			0,106			0,113					
28/35 MPa	0,82			0,112			0,120					
32/40 MPa	0,88			0,123			0,132					
40/50 MPa	1,00			0,141			0,151					
% Cement Replacement - Fly Ash	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%	Note 0% is a concrete using a CEM I cement (not typical)		
GEN 0 (6/8 MPa)	0,55	0,52	0,47	0,071	0,065	0,057	0,076	0,069	0,061	Compressive strength designation C6/8 Mpa. 28 day compressive strength under British cube method of 8 MPa, under European cylinder method 6 MPa. Possible uses: Kerb bedding and backing. Data is only cradle to factory gate but beyond this the average delivery distance of ready mix concrete is 8.3 km by road (see Ref. 244).		
GEN 1 (8/10 MPa)	0,70	0,65	0,59	0,097	0,088	0,077	0,104	0,094	0,082	Possible uses: mass concrete, mass fill, mass foundations, trench foundations, blinding, strip footing.		
GEN 2 (12/15 MPa)	0,76	0,71	0,64	0,106	0,098	0,087	0,114	0,105	0,093	-		
GEN 3 (16/20 MPa)	0,81	0,75	0,68	0,115	0,105	0,093	0,123	0,112	0,100	Possible uses: garage floors.		
RC 20/25 (20/25 MPa)	0,86	0,81	0,73	0,124	0,114	0,101	0,132	0,122	0,108	-		
RC 25/30 (25/30 MPa)	0,91	0,85	0,77	0,131	0,121	0,107	0,140	0,130	0,115	Possible uses: reinforced foundations.		
RC 28/35 (28/35 MPa)	0,95	0,90	0,82	0,139	0,129	0,116	0,148	0,138	0,124	Possible uses: reinforced foundations, ground floors.		
RC 32/40 (32/40 MPa)	1,03	0,97	0,89	0,153	0,143	0,128	0,163	0,152	0,136	Possible uses: structural purposes, in situ floors, walls, superstructure.		
RC 40/50 (40/50 MPa)	1,17	1,10	0,99	0,176	0,164	0,146	0,188	0,174	0,155	Possible uses: high strength applications, precasting.		
PAV1	0,95	0,89	0,81	0,139	0,129	0,115	0,148	0,138	0,123	Possible uses: domestic parking and outdoor paving.		
PAV2	1,03	0,97	0,89	0,153	0,143	0,128	0,163	0,152	0,137	Possible uses: heavy duty outdoor paving.		
% Cement Replacement - Blast Furnace Slag	0%	25%	50%	0%	25%	50%	0%	15%	30%	Note 0% is a concrete using a CEM I cement		
GEN 0 (6/8 MPa)	0,55	0,48	0,41	0,071	0,056	0,042	0,076	0,060	0,045	See fly ash mixtures		
GEN 1 (8/10 MPa)	0,70	0,60	0,50	0,097	0,075	0,054	0,104	0,080	0,058			
GEN 2 (12/15 MPa)	0,76	0,62	0,55	0,106	0,082	0,061	0,114	0,088	0,065			
GEN 3 (16/20 MPa)	0,81	0,69	0,57	0,115	0,090	0,065	0,123	0,096	0,070			
RC 20/25 (20/25 MPa)	0,86	0,74	0,62	0,124	0,097	0,072	0,132	0,104	0,077			
RC 25/30 (25/30 MPa)	0,91	0,78	0,65	0,131	0,104	0,076	0,140	0,111	0,081			
RC 28/35 (28/35 MPa)	0,95	0,83	0,69	0,139	0,111	0,082	0,148	0,119	0,088			
RC 32/40 (32/40 MPa)	1,03	0,91	0,78	0,153	0,125	0,094	0,163	0,133	0,100			
RC 40/50 (40/50 MPa)	1,17	1,03	0,87	0,176	0,144	0,108	0,188	0,153	0,115			
PAV1	0,95	0,82	0,70	0,139	0,111	0,083	0,148	0,118	0,088			
PAV2	1,03	0,91	0,77	0,153	0,125	0,094	0,163	0,133	0,100			

COMMENTS				
The first column represents standard concrete, created with a CEM I Portland cement. The other columns are estimates based on a direct substitution of fly ash or blast furnace slag in place of the cement content. The ICE Cement, Mortar & Concrete Model was applied. Please see important notes in the concrete material profile.				
REINFORCED CONCRETE - Modification Factors				
For reinforcement add this value to the appropriate concrete coefficient for each 100 kg of rebar per m3 of concrete	1,04	0,072	0,077	Add for each 100 kg steel rebar per m3 concrete. Use multiple of this value, i.e. for 150 kg steel use a factor of 1.5 times these values.
EXAMPLE: Reinforced RC 25/30 MPa (with 110 kg per m3 concrete)	1.92 MJ/kg (0.78 + 1.04 * 1.1)	0.185 kgCO2/kg (0.106 + 0.072 * 1.1)	0.198 kgCO2/kg (0.113 + 0.077 * 1.1)	with 110 kg rebar per m3 concrete. UK weighted average cement. This assumes the UK typical steel scenario (59% recycled content). Please consider if this is in line with the rest of your study (goal and scope) or the requirements of a predefined method.
PRECAST (PREFABRICATED) CONCRETE - Modification Factors				
For precast add this value to the selected coefficient of the appropriate concrete mix	0,45	0,027	0,029	For each 1 kg precast concrete. This example is using a RC 40/50 strength class and is not necessarily indicative of an average precast product. Includes UK recorded plant operations and estimated transportation of the constituents to the factory gate (38km aggregates, estimated 100km cement). Data is only cradle to factory gate but beyond this the average delivery distance of precast is 155km by road (see Ref. 244). UK weighted average cement. See also the new report on precast concrete pipes (Ref 300).
EXAMPLE: Precast RC 40/50 MPa	1.50 MJ/kg (1.00 + 0.50)	0.168 kgCO2/kg (0.141 + 0.027)	0.180 kgCO2/kg (0.151 + 0.029)	
EXAMPLE: Precast RC 40/50 with reinforcement (with 80kg per m ³)	2.33 MJ/kg (1.50 + 1.04 * 0.8)	0.229 kgCO2/kg (0.171 + 0.072 * 0.8)	0.242 kgCO2/kg (0.180 + 0.077 * 0.8)	
CONCRETE BLOCKS (ICE CMC Model Values)				
Block - 8 MPa Compressive Strength	0,59	0,059	0,063	Estimated from the concrete block mix proportions, plus an allowance for concrete block curing, plant operations and transport of materials to factory gate.
Block - 10 MPa	0,67	0,073	0,078	
Block - 12 MPa	0,72	0,082	0,088	
Block - 13 MPa	0,83	0,100	0,107	
Autoclaved Aerated Blocks (AAC's)	3,50	0.24 to 0.375	-	Not ICE CMC model results.
NOMINAL PROPORTIONS METHOD (Volume), Proportions from BS 8500:2006 (ICE Cement, Mortar & Concrete Model Calculations)				
1:1:2 Cement:Sand:Aggregate	1,28	0,194	0,206	High strength concrete. All of these values were estimated assuming the UK average content of cementitious additions (i.e. fly ash, GGBS) for factory supplied cements in the UK, see Ref. 59, plus the proportions of other constituents .
1:1.5:3	0,99	0,145	0,155	Often used in floor slab, columns & load bearing structure.
1:2:4	0,82	0,116	0,124	Often used in construction of buildings under 3 storeys.
1:2.5:5	0,71	0,097	0,104	
1:3:6	0,63	0,084	0,090	Non-structural mass concrete.
1:4:8	0,54	0,069	0,074	
BY CEM I CEMENT CONTENT - kg CEM I cement content per cubic meter concrete (ICE CMC Model Results)				
120 kg / m ³ concrete	0,49	0,060	0,064	Assumed density of 2,350 kg/m3. Interpolation of the CEM I cement content is possible. These numbers assume the CEM I cement content (not the total cementitious content) , i.e. they do not include cementitious additions). They may also be used for fly ash mixtures without modification, but they are likely to slightly underestimate mixtures that have additional GGBS due to the higher embodied energy and carbon of GGBS (in comparison to aggregates and fly ash).
200 kg / m ³ concrete	0,67	0,091	0,097	
300 kg / m ³ concrete	0,91	0,131	0,140	
400kg / m ³ concrete	1,14	0,170	0,181	
500 kg / m ³ concrete	1,37	0,211	0,224	
MISCELLANEOUS VALUES				
Fibre-Reinforced	7.75 (?)	0.45 (?)	-	Literature estimate, likely to vary widely. High uncertainty.
Very High GGBS Mix	0,66	0,049	0,050	Data based on Lafarge 'Envirocrete', which is a C28/35 MPa, very high GGBS replacement value concrete
Copper				
EU Tube & Sheet	42,00	2,60	2,71	EU production data, estimated from Kupfer Institut LCI data. 37% recycled content (the 3 year world average). World average data is expected to be higher than these values.
Virgin	57,00	3,65	3,81	
Recycled	16,50	0,80	0,84	
Recycled from high grade scrap	18 (?)	1,1 (?)		Uncertain, difficult to estimate with the data available.
Recycled from low grade scrap	50 (?)	3,1 (?)		
Glass				
Primary Glass	15,00	0,86	0,91	Includes process CO2 emissions from primary glass manufacture.
Secondary Glass	11,50	0,55	0,59	EE estimated from Ref 115.
Fibreglass (Glasswool)	28,00	1,54	-	Large data range, but the selected value is inside a small band of frequently quoted values.
Toughened	23,50	1,27	1,35	Only three data sources

<u>Insulation</u>				
General Insulation	45,00	1,86	-	Estimated from typical market shares. Feedstock Energy 16.5 MJ/kg (Included)
Cellular Glass	27,00	-	-	Ref. 54.
Cellulose	0,94 to 3,3	-	-	
Cork	4,00	0,19	-	Ref. 55.
Fibreglass (Glasswool)	28,00	1,35	-	Poor data difficult to select appropriate value
Flax (Insulation)	39,50	1,70	-	Ref. 2. 5.97 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Mineral wool	16,60	1,20	1,28	
Paper wool	20,17	0,63	-	Ref. 2
Polystyrene	See Plastics	See Plastics	-	see plastics
Polyurethane	See Plastics	See Plastics	-	see plastics
Rockwool	16,80	1,05	1,12	Cradle to Grave
Woodwool (loose)	10,80	-	-	Ref. 205.
Woodwool (Board)	20,00	0,98	-	Ref. 55.
Wool (Recycled)	20,90	-	-	Refs. 63, 201, 202 & 281.
<u>Iron</u>				
General	25,00	1,91 (?)	2,03	It was difficult to estimate the embodied energy and carbon of iron with the data available.
<u>Lead</u>				
General	25,21	1,57	1,67	Allocated (divided) on a mass basis, assumes recycling rate of 61%
Virgin	49,00	3,18	3,37	
Recycled	10,00	0,54	0,58	Scrap batteries are a main feedstock for recycled lead
<u>Lime</u>				
General	5,30	0,76	0,78	Embodied carbon was difficult to estimate
<u>Linoleum</u>				
General	25,00	1,21	-	Data difficult to select, large data range.
<u>Miscellaneous</u>				
Asbestos	7,40	-	-	Ref. 4.
Calcium Silicate Sheet	2,00	0,13	-	Ref. 55.
Chromium	83	5,39	-	Ref. 22.
Cotton, Padding	27,10	1,28	-	Ref. 38.
Cotton, Fabric	143	6,78	-	Ref. 38.
Damp Proof Course/Membrane	134 (?)	4,2 (?)	-	Uncertain estimate.
Felt General	36	-	-	
Flax	33,50	1,70	-	Ref. 2
Fly Ash	0,10	0,008	-	No allocation from fly ash producing system.
Grit	0,12	0,01	-	Ref. 114.
Ground Limestone	0,62	0,032	-	
Carpet Grout	30,80	-	-	Ref. 169.
Glass Reinforced Plastic - GRP - Fibreglass	100	8,10	-	Ref. 1.
Lithium	853	5,30	-	Ref. 22.
Mandolite	63	1,40	-	Ref. 1.
Mineral Fibre Tile (Roofing)	37	2,70	-	Ref. 1.
Manganese	52	3,50	-	Ref. 22.
Mercury	87	4,94	-	Ref. 22.
Molybdenum	378	30,30	-	Ref. 22.
Nickel	164	12,40	-	Ref. 114.
Perlite - Expanded	10,00	0,52	-	Ref. 114.
Perlite - Natural	0,66	0,03	-	Ref. 114.
Quartz powder	0,85	0,02	-	Ref. 114.
Shingle	11,30	0,30	-	Ref. 70.
Silicon	2355	-	-	Ref. 167.
Slag (GGBS)	1,60	0,083	-	Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), economic allocation.
Silver	128,20	6,31	-	Ref. 148.
Straw	0,24	0,01	-	Refs. 63, 201, 202 & 281.
Terrazzo Tiles	1,40	0,12	-	Ref. 1.
Vanadium	3710	228	-	Ref. 22.
Vermiculite - Expanded	7,20	0,52	-	Ref. 114.
Vermiculite - Natural	0,72	0,03	-	Ref. 114.
Vicuclad	70,00	-	-	Ref. 1.
Water	0,01	0,001	-	
Wax	52,00	-	-	Ref. 169.
Wood stain/Varnish	50,00	5,35	-	Ref. 1.
Yttrium	1470	84,00	-	Ref. 22.
Zirconium	1610	97,20	-	Ref. 22.

Paint				
General	70,00	2,42	2,91	Large variations in data, especially for embodied carbon. Includes feedstock energy. Water based paints have a 70% market share. Water based paint has a lower embodied energy than solvent based paint.
EXAMPLE: Single Coat	10.5 MJ/Sqm	0.36 kgCO2/Sqm	0,44	Assuming 6.66 Sqm Coverage per kg
EXAMPLE: Double Coat	21.0 MJ/Sqm	0.73 kgCO2/Sqm	0,87	Assuming 3.33 Sqm Coverage per kg
EXAMPLE: Triple Coat	31.5 MJ/Sqm	1.09 kgCO2/Sqm	1,31	Assuming 2.22 Sqm Coverage per kg
Waterborne Paint	59,00	2,12	2,54	Waterborne paint has a 70% of market share. Includes feedstock energy.
Solventborne Paint	97,00	3,13	3,76	Solventborne paint has a 30% share of the market. Includes feedstock energy. It was difficult to estimate carbon emissions for Solventborne paint.
Paper				
Paperboard (General for construction use)	24,80	1,29	-	Excluding calorific value (CV) of wood, excludes carbon sequestration/biogenic carbon storage.
Fine Paper	28,20	1,49	-	Excluding CV of wood, excludes carbon sequestration
EXAMPLE: 1 packet A4 paper	70,50	3,73	-	Standard 80g/sqm printing paper, 500 sheets a pack. Doesn't include printing.
Wallpaper	36,40	1,93	-	
Plaster				
General (Gypsum)	1,80	0,12	0,13	Problems selecting good value, inconsistent figures, West et al believe this is because of past aggregation of EE with cement
Plasterboard	6,75	0,38	0,39	See Ref [WRAP] for further info on GWP data, including disposal impacts which are significant for Plasterboard.
Plastics				
Main data source: Plastics Europe (www.plasticseurope.org) ecoprofiles				
General	80,50	2,73	3,31	35.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Determined by the average use of each type of plastic used in the European construction industry.
ABS	95,30	3,05	3,76	48.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
General Polyethylene	83,10	2,04	2,54	54.4 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Based on average consumption of types of polyethylene in European construction
High Density Polyethylene (HDPE) Resin	76,70	1,57	1,93	54.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Doesn't include the final fabrication.
HDPE Pipe	84,40	2,02	2,52	55.1 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Low Density Polyethylene (LDPE) Resin	78,10	1,69	2,08	51.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Doesn't include the final fabrication
LDPE Film	89,30	2,13	2,60	55.2 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Nylon (Polyamide) 6 Polymer	120,50	5,47	9,14	38.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Doesn't include final fabrication. Plastics Europe state that two thirds of nylon is used as fibres (textiles, carpets...etc) in Europe and that most of the remainder as injection mouldings. Dinitrogen monoxide and methane emissions are very significant contributors to GWP.
Nylon (polyamide) 6,6 Polymer	138,60	6,54	7,92	50.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Doesn't include final fabrication (i.e. injection moulding). See comments for Nylon 6 polymer.
Polycarbonate	112,90	6,03	7,62	36.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Doesn't include final fabrication.
Polypropylene, Orientated Film	99,20	2,97	3,43	55.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included).
Polypropylene, Injection Moulding	115,10	3,93	4,49	54 MJ/kg Feedstock Energy (Included). If biomass benefits are included the CO2 may reduce to 3.85 kgCO2/kg, and GWP down to 4.41 kg CO2e/kg.
Expanded Polystyrene	88,60	2,55	3,29	46.2 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
General Purpose Polystyrene	86,40	2,71	3,43	46.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
High Impact Polystyrene	87,40	2,76	3,42	46.4 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Thermoformed Expanded Polystyrene	109,20	3,45	4,39	49.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Polyurethane Flexible Foam	102,10	4,06	4,84	33.47 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Poor data availability for feedstock energy
Polyurethane Rigid Foam	101,50	3,48	4,26	37.07 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Poor data availability for feedstock energy
PVC General	77,20	2,61	3,10	28.1 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Based on market average consumption of types of PVC in the European construction industry
PVC Pipe	67,50	2,56	3,23	24.4 MJ/kg Feedstock Energy (Included). If biomass benefits are included the CO2 may reduce to 2.51 kgCO2/kg, and GWP down to 3.23 kg CO2e/kg.
Calendered Sheet PVC	68,60	2,61	3,19	24.4 MJ/kg Feedstock Energy (Included). If biomass benefits are included the CO2 may reduce to 2.56 kgCO2/kg, and GWP down to 3.15 kg CO2e/kg.
PVC Injection Moulding	95,10	2,69	3,30	35.1 MJ/kg Feedstock Energy (Included). If biomass benefits are included the CO2 may reduce to 2.23 kgCO2/kg, and GWP down to 2.84 kg CO2e/kg.
UPVC Film	69,40	2,57	3,16	25.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Rubber				
General	91,00	2,66	2,85	40 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Sand				
General	0,081	0,0048	0,0051	Estimated from real UK industrial fuel consumption data
Sealants and adhesives				
Epoxide Resin	137,00	5,70	-	42.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Source: www.plasticseurope.org
Mastic Sealant	62 to 200	-	-	
Melamine Resin	97,00	4,19	-	Feedstock energy 18 MJ/kg - estimated from Ref 34.
Phenol Formaldehyde	88,00	2,98	-	Feedstock energy 32 MJ/kg - estimated from Ref 34.
Urea Formaldehyde	70,00	2,76	-	Feedstock energy 18 MJ/kg - estimated from Ref 34.
Soil				
General (Rammed Soil)	0,45	0,023	0,024	
Cement stabilised soil @ 5%	0,68	0,060	0,061	Assumed 5% cement content.
Cement stabilised soil @ 8%	0,83	0,082	0,084	Assumed 8% stabiliser content (6% cement and 2% lime).
GGBS stabilised soil	0,65	0,045	0,047	Assumed 8% stabiliser content (8% GGBS and 2% lime).
Fly ash stabilised soil	0,56	0,039	0,041	Assumed 10% stabiliser content (8% fly ash and 2% lime).

Steel		Main data source: International Iron & Steel Institute (IISI) LCA studies (www.worldsteel.org)			
UK (EU) STEEL DATA - EU average recycled content - See material profile (and Annex on recycling methods) for usage guide					
General - UK (EU) Average Recycled Content	20,10	1,37	1,46		EU 3-average recycled content of 59%. Estimated from UK's consumption mixture of types of steel (excluding stainless). All data doesn't include the final cutting of the steel products to the specified dimensions or further fabrication activities. Estimated from World Steel Association (Worldsteel) LCA data.
Virgin	35,40	2,71	2,89		
Recycled	9,40	0,44	0,47		Could not collect strong statistics on consumption mix of recycled steel.
Bar & rod - UK (EU) Average Recycled Content	17,40	1,31	1,40		EU 3-average recycled content of 59%
Virgin	29,20	2,59	2,77		
Recycled	8,90	0,42	0,45		
Coil (Sheet) - UK (EU) Average Recycled Content	18,80	1,30	1,38		Effective recycled content because recycling route is not typical. EU 3-average recycled content of 59%
Virgin	32,80	2,58	2,74		
Recycled		Not Typical Production Route			
Coil (Sheet), Galvanised - UK (EU) Average Recycled Content	22,60	1,45	1,54		Effective recycled content because recycling route is not typical. EU 3-average recycled content of 59%
Virgin	40,00	2,84	3,01		
Engineering steel - Recycled	13,10	0,68	0,72		
Pipe - UK (EU) Average Recycled Content	19,80	1,37	1,45		Effective recycled content because recycling route is not typical. EU 3-average recycled content of 59%
Virgin	34,70	2,71	2,87		
Recycled		Not Typical Production Route			
Plate - UK (EU) Average Recycled Content	25,10	1,55	1,66		Effective recycled content because recycling route is not typical. EU 3-average recycled content of 59%
Virgin	45,40	3,05	3,27		
Recycled		Not Typical Production Route			
Section - UK (EU) Average Recycled Content	21,50	1,42	1,53		
Virgin	38,00	2,82	3,03		
Recycled	10,00	0,44	0,47		
Wire - Virgin	36,00 (?)	2,83 (?)	3,02		
Stainless	56,70	6,15			World average data from the Institute of Stainless Steel Forum (ISSF) life cycle inventory data. Selected data is for the most popular grade (304). Stainless steel does not have separate primary and recycled material production routes.
OTHER STEEL DATA - 'R.O.W' and 'World' average recycled contents - See material profile (and Annex on recycling methods) for usage guide					
General - R.O.W. Avg. Recy. Cont.	26,20	1,90	2,03		Rest of World (non-E.U.) consumption of steel. 3 year average recycled content of 35.5%.
General - World Avg. Recy. Cont.	25,30	1,82	1,95		Whole world 3 year average recycled content of 39%.
Bar & rod - R.O.W. Avg. Recy. Cont.	22,30	1,82	1,95		
Bar & rod - World Avg. Recy. Cont.	21,60	1,74	1,86		
Coil - R.O.W. Avg. Recy. Cont.	24,40	1,81	1,92		
Coil - World Avg. Recy. Cont.	23,50	1,74	1,85		
Coil, Galvanised - R.O.W. Avg. Recy. Cont.	29,50	2,00	2,12		
Coil, Galvanised - World Avg. Recy. Cont.	28,50	1,92	2,03		Comments above apply. See material profile for further information.
Pipe - R.O.W. Avg. Recy. Cont.	25,80	1,90	2,01		
Pipe - World Avg. Recy. Cont.	24,90	1,83	1,94		
Plate - R.O.W. Avg. Recy. Cont.	33,20	2,15	2,31		
Plate - World Avg. Recy. Cont.	32,00	2,06	2,21		
Section - R.O.W. Avg. Recy. Cont.	28,10	1,97	2,12		
Section - World Avg. Recy. Cont.	27,10	1,89	2,03		
Stone Data on stone was difficult to select, with high standard deviations and data ranges.					
General	1.26 (?)	0.073 (?)	0,079		ICE database average (statistic), uncertain. See material profile.
Granite	11,00	0,64	0,70		Estimated from Ref 116.
Limestone	1,50	0,087	0,09		Estimated from Ref 188.
Marble	2,00	0,116	0,13		
Marble tile	3,33	0,192	0,21		Ref. 40.
Sandstone	1,00 (?)	0,058 (?)	0,06		Uncertain estimate based on Ref. 262.
Shale	0,03	0,002	0,002		
Slate	0.1 to 1.0	0.006 to 0.058	0.007 to 0.063		Large data range
Timber Note: These values were difficult to estimate because timber has a high data variability. These values exclude the energy content of the wooden product (the Calorific Value (CV) from burning). See the material profile for guidance on the new data structure for embodied carbon (i.e. split into foss and bio)					
General	10,00	0.30_{foss}+0.41_{bio}	0.31_{foss}+0.41_{bio}		Estimated from UK consumption mixture of timber products in 2007 (Timber Trade Federation statistics). Includes 4.3 MJ bio-energy. All values do not include the CV of timber product and exclude carbon storage.
Glue Laminated timber	12,00	0.39_{foss}+0.45_{bio}	0.42_{foss}+0.45_{bio}		Includes 4.9 MJ bio-energy.
Hardboard	16,00	0.54_{foss}+0.51_{bio}	0.58_{foss}+0.51_{bio}		Hardboard is a type of fibreboard with a density above 800 kg/m ³ . Includes 5.6 MJ bio-energy.
Laminated Veneer Lumber	9,50	0.31_{foss}+0.32_{bio}	0.33_{foss}+0.32_{bio}		Ref 150. Includes 3.5 MJ bio-energy.
MDF	11 (?)	0.37_{foss}+0.35_{bio}	0.39_{foss}+0.35_{bio}		Wide density range (350-800 kg/m ³). Includes 3.8 MJ bio-energy.
Oriented Strand Board (OSB)	15,00	0.42_{foss}+0.54_{bio}	0.45_{foss}+0.54_{bio}		Estimated from Refs. 103 and 150. Includes 5.9 MJ bio-energy.
Particle Board	14,50	0.52_{foss}+0.32_{bio}	0.54_{foss}+0.32_{bio}		Very large data range, difficult to select appropriate values. Modified from CORRIM reports. Includes 3.2 MJ bio-energy (uncertain estimate).
Plywood	15,00	0.42_{foss}+0.65_{bio}	0.45_{foss}+0.65_{bio}		Includes 7.1 MJ bio-energy.
Sawn Hardwood	10,40	0.23_{foss}+0.63_{bio}	0.24_{foss}+0.63_{bio}		It was difficult to select values for hardwood, the data was estimated from the CORRIM studies (Ref. 88). Includes 6.3 MJ bio-energy.
Sawn Softwood	7,40	0.19_{foss}+0.39_{bio}	0.20_{foss}+0.39_{bio}		Includes 4.2 MJ bio-energy.
Veneer Particleboard (Furniture)	23_(foss + bio)	(?)	(?)		Unknown split of fossil based and biogenic fuels.

Tin				
Tin Coated Plate (Steel)	19.2 to 54.7	1.04 to 2.95	-	
Tin	250,00	13,50	14,47	lack of modern data, large data range
Titanium				
Virgin	361 to 745	19.2 to 39.6 (??)	20.6 to 42.5 (??)	lack of modern data, large data range, small sample size
Recycled	258,00	13.7 (??)	14.7 (??)	lack of modern data, large data range, small sample size
Vinyl Flooring				
General	68,60	2,61	3,19	23.58 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Same value as PVC calendered sheet. <i>Note: the book version of ICE contains the wrong values. These values are up to date</i>
Vinyl Composite Tiles (VCT)	13,70	-	-	Ref. 94.
Zinc				
General	53,10	2,88	3,09	Uncertain carbon estimates, currently estimated from typical UK industrial fuel mix. Recycled content of general Zinc 30%.
Virgin	72,00	3,90	4,18	
Recycled	9,00	0,49	0,52	
Miscellaneous (No material profiles):				
	Embodied Energy - MJ	Embodied Carbon - Kg CO2		
PV Modules	MJ/sqm	Kg CO2/sqm		
Monocrystalline	4750 (2590 to 8640)	242 (132 to 440)	-	Embodied carbon estimated from typical UK industrial fuel mix. This is not an ideal method.
Polycrystalline	4070 (1945 to 5660)	208 (99 to 289)	-	
Thin Film	1305 (775 to 1805)	67 (40 to 92)	-	
Roads	Main data source: ICE reference number 147			
Asphalt road - Hot construction method - 40 yrs	2,509 MJ/Sqm	93 KgCO2/Sqm	99 KgCO2/Sqm	730 MJ/Sqm Feedstock Energy (Included). For more detailed data see reference 147. (Swedish study). The data in this report was modified to fit within the ICE framework. Includes all sub-base layers to construct a road. Sum of construction, maintenance, operation.
Construction	1,069 MJ/Sqm	30.9 KgCO2/Sqm	32.8 KgCO2/Sqm	480 MJ/Sqm Feedstock Energy (Included)
Maintenance - 40 yrs	471 MJ/Sqm	11.6 KgCO2/Sqm	12.3 KgCO2/Sqm	250 MJ/Sqm Feedstock Energy (Included)
Operation - 40 yrs	969 MJ/Sqm	50.8 KgCO2/Sqm	54.0 KgCO2/Sqm	Swedish scenario of typical road operation, includes street and traffic lights (95% of total energy), road clearing, sweeping, gritting and snow clearing.
Asphalt road - Cold construction method - 40 yrs	3,030 MJ/Sqm	91 KgCO2/Sqm	97 KgCO2/Sqm	1,290 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Sum of construction, maintenance, operation.
Construction	825 MJ/Sqm	26.5 KgCO2/Sqm	28.2 KgCO2/Sqm	320 MJ/Sqm Feedstock Energy (Included)
Maintenance - 40 yrs	1,556 MJ/Sqm	13.9 KgCO2/Sqm	14.8 KgCO2/Sqm	970 MJ/Sqm Feedstock Energy (Included)
Operation - 40 yrs	969 MJ/Sqm	50.8 KgCO2/Sqm	54.0 KgCO2/Sqm	See hot rolled asphalt.
Concrete road - 40 yrs	2,084 MJ/Sqm	142 KgCO2/Sqm	-	Sum of construction, maintenance, operation.
Construction	885 MJ/Sqm	77 KgCO2/Sqm	-	
Maintenance - 40 yrs	230 MJ/Sqm	14.7 KgCO2/Sqm	-	
Operation - 40 yrs	969 MJ/Sqm	50.8 KgCO2/Sqm	-	Swedish scenario of typical road operation, includes street and traffic lights (95% of total energy), and also road clearing, sweeping, gritting and snow clearing.
Note: The above data for roads were based on a single reference (ref 145). There were other references available but it was not possible to process the reports into useful units (per sqm). One of the other references indicates a larger difference between concrete and asphalt roads than the data above. If there is a particular interest in roads the reader is recommended to review the literature in further detail.				
Windows	MJ per Window			
1.2mx1.2m Single Glazed Timber Framed Unit	286 (?)	14.6 (?)	-	Embodied carbon estimated from typical UK industrial fuel mix
1.2mx1.2m Double Glazed (Air or Argon Filled):	--	--	-	--
Aluminium Framed	5470	279	-	
PVC Framed	2150 to 2470	110 to 126	-	
Aluminium -Clad Timber Framed	950 to 1460	48 to 75	-	
Timber Framed	230 to 490	12 to 25	-	
Krypton Filled Add:	510	26	-	
Xenon Filled Add:	4500	229	-	
NOTE: Not all of the data could be converted to full GHG's. It was estimated from the fuel use only (i.e. Not including any process related emissions) the full CO2e is approximately 6 percent higher than the CO2 only value of embodied carbon. This is for the average mixture of fuels used in the UK industry.				

Material	EC - kgCO2/kg
Cimento	0,93
Filler Calcário	0,087
Filler Calcário moído	0,087
Areia Fina	0,0048
Areia Fina moída	0,0048
Cinzas volantes	0,008