



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Rui Jorge Alves da Cunha Reis

**Betões Eco-Eficientes com Cinzas
Volantes e Metacaulino**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Rui Jorge Alves da Cunha Reis

**Betões Eco-Eficientes com Cinzas
Volantes e Metacaulino**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização Materiais, Reabilitação e
Sustentabilidade da Construção

Trabalho efectuado sob a orientação do

**Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite
Camões Azevedo**

Dezembro de 2009

À memória do meu avô
Agostinho Cunha

Agradecimentos

Este trabalho não estaria devidamente concluído sem apresentar os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao Professor Aires Camões, pela orientação, incentivo, amizade e entusiasmo demonstrado ao longo de todo este processo, assim como à disponibilidade e incansável apoio para a conclusão deste.

Ao Professor Saíd Jalali, que com a sua sabedoria sempre me soube auxiliar quando mais precisei.

Aos Professores Barroso Aguiar e Rui Ferreira, pelo auxílio e apoio prestados.

À Sónia, que sem todo o seu apoio não poderia ter realizado este trabalho.

Agradeço ao Carlos e Marcos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela ajuda e empenho demonstrados.

À Doutora Cristina do Departamento de Engenharia Civil, sempre incansável na ajuda a todos os alunos.

A todos os colegas do mestrado, que sempre se pautaram pela boa disposição e companheirismo.

A todos os restantes Professores e Funcionários da Universidade, pela postura e profissionalismo.

Aos meus colegas de trabalho, por todo o apoio e compreensão dispensados, nos momentos mais difíceis.

À minha família pela força e incentivo.

Resumo

Betões Eco-Eficientes com Cinzas Volantes e Metacaulino

Na consciencialização crescente dos problemas ambientais, nomeadamente na eficiência energética e nos gases de efeito de estufa, a indústria da construção e do cimento tem tido cada vez mais um lugar de destaque, sendo esta última responsável por cerca de 7% das emissões de CO₂ para a atmosfera. Sabendo que a produção de cimento contribui com cerca de uma tonelada de CO₂ por cada tonelada produzida, não deixa de ser paradoxal que o produto mais consumido pelo Homem, apenas ultrapassado pela água, não encontre um substituto credível, mais eficiente e mais ecológico. A reduzida vida dos edifícios actuais combinada com a dependência crescente pelo cimento, agravam ainda mais os impactes negativos.

Entre soluções tecnológicas, eficiência energética, produção intensiva ou na procura de combustíveis alternativos para a produção de cimento, uma solução mais simples poderá estar na racionalização dos recursos e na sua substituição por materiais alternativos. Já existe um tipo de betão (betão de elevado volume de cinzas volantes) com aplicações ainda muito restritas, mas com grandes vantagens ambientais. No entanto, as reduzidas resistências iniciais são uma das características impeditivas da sua utilização generalizada como também para uma maior sustentabilidade da construção. Neste pequeno contributo, apresentam-se o que poderão ser as vantagens da utilização de dois aditivos, cinzas volantes e metacaulino, que utilizados simultaneamente poderão revelar características surpreendentes mesmo neste tipo de betões. As sinergias resultantes destas misturas ternárias demonstram desempenhos muito promissores, possibilitando grandes incorporações na substituição do cimento, mantendo ou melhorando os desempenhos mecânicos e de durabilidade, obtendo-se um betão eco-eficiente.

Abstract

Eco-Efficient Concrete with Fly-Ash and Metakaolin

In the growing awareness concerning environmental problems, particularly about energetic efficiency and greenhouse gases, has led to an exponential growth of construction and cement industries, being this last one responsible for 7% of the emissions of CO₂ into the atmosphere. Knowing that cement production contributes with about a tonne of CO₂ for every single tonne of cement produced, the paradox remains that the most consumed product by mankind, only surpassed by water, has failed to encounter a reliable substitute, more efficient as more ecological. The reduced life of the actual buildings combined with the growing dependence for the cement aggravates furthermore the negative impact.

Among the technological solutions regarding energetic efficiency, intensive production or the search for alternative fuels for cement production, a simpler solution might reside on the rationalization of the resource and its substitution for these alternative materials. There is already one kind of concrete (concrete of elevated volume of ash) with a narrow number of applications, but with great ambient advantages. However, the reduced initial resistances are one of the unobtrusive characteristics of their general use as also for one bigger sustainability of construction. In this smaller contribution, presents what could be the advantages of use of two additives, ash and metakaolin that used simultaneity could uncover surprising characteristics even in this kind of concrete. The synergies resulting of that ternary mixture demonstrate very promising performances, allowing big corporations in the replacement of cement, maintaining or even improving the mechanical and durability performances, obtaining an eco-efficient concrete.

Índice geral

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice geral	xi
Índice de figuras	xv
Índice de quadros	xix
Simbologia	xxi
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Organização da dissertação	3
Capítulo 2 - Betão eco-eficiente	5
2.1 Introdução	5
2.2 A indústria do cimento e o ambiente	6
2.3 Adições	9
2.3.1 Metacaulino	10
2.3.2 Matéria-prima	11
2.3.3 Características da matéria-prima	12
2.3.4 Cinzas volantes	14
2.4 Betões de elevado desempenho	16
2.4.1 Generalidades	16
2.5 Betões eco-eficientes	17
Capítulo 3 - Materiais e procedimentos de ensaio	25
3.1 Introdução	25
3.2 Materiais utilizados	26
3.2.1 Cimento	26
3.2.2 Cinzas volantes	28

3.2.3	Metacaulino	31
3.2.4	Agregado	33
3.2.5	Água de amassadura	37
3.2.6	Superplastificante	37
3.3	Ensaio em argamassas	39
3.3.1	Estudo das composições.....	39
3.6.1	Execução das amassaduras.....	43
3.6.2	Trabalhabilidade das argamassas frescas	45
3.6.3	Moldagem e armazenamento	46
3.6.4	Resistência à flexão	47
3.6.5	Resistência à compressão.....	49
3.6.6	Resistividade eléctrica	50
3.6.7	Difusão dos cloretos.....	52
3.6.8	Porosidade aberta	55
3.6.9	Absorção de água por capilaridade	56
Capítulo 4 - Análise de resultados.....		59
4.1	Introdução	59
4.2	Análise estatística dos resultados	60
4.2.1	Tendência ou localização central	60
4.2.1.1	Média	61
4.2.2	Dispersão.....	61
4.2.2.1	Variância.....	61
4.2.2.2	Desvio padrão.....	62
4.2.2.3	Coeficiente de variação	62
4.3	Constituição da argamassa.....	62
4.4	Trabalhabilidade	64
4.5	Resistências mecânicas	66
4.5.1	Resistência à flexão	66
4.5.2	Resistência à compressão.....	74
4.5.3	Relações entre resistência à flexão e tracção	80
4.6	Avaliação da durabilidade.....	85
4.6.1	Coeficiente de difusão dos cloretos por migração	86
4.6.2	Porosidade aberta	88
4.6.3	Absorção por capilaridade	90
4.6.4	Resistividade eléctrica	106
4.7	Análise de custos.....	108

Capítulo 5 - Análise do desempenho numa estrutura de betão armado	111
5.1 Introdução	111
5.2 Metodologia.....	112
5.3 Cálculos.....	115
5.3.1 Dados iniciais	115
5.3.2 Concentração de cloretos	115
5.3.3 Recobrimento nominal	119
5.3.4 Previsão da vida útil.....	122
5.4 Conclusão.....	124
Capítulo 6 - Conclusões.....	125
6.1 Introdução	125
6.2 Conclusões mais relevantes.....	125
6.3 Trabalhos futuros.....	127
6.4 Desenvolvimento do estado do conhecimento	127
Bibliografia	129

Índice de figuras

Figura 2-1 - Consumo global de cimento. Fonte: WBCSD [6]	8
Figura 2-2 - Metas da WBCSC para a mitigação dos efeitos ambientais da produção do cimento [7]	8
Figura 2-3 - O motor da evolução das adições	9
Figura 2-4 - Caulinite [14]	12
Figura 2-5 - cinza volante classe F [2]	14
Figura 2-6 - Patologia do consumo	18
Figura 2-7 - Chaves para diminuição da dependência	19
Figura 2-8 - Vantagens da utilização das cinzas	19
Figura 2-9 - Mitigação das desvantagens das CV pelo metacaulino (a vermelho)	20
Figura 2-10 - Mecanismo de concepção de um betão eco-eficiente	21
Figura 2-11 - Vantagens dos betões eco-eficientes	23
Figura 3-1 - Misturadoras usadas para seleccionar o agregado	34
Figura 3-2 - Série de peneiros e máquina de agitar para análise granulométrica	35
Figura 3-3 - Curva granulométrica do agregado.....	36
Figura 3-4 - Determinação da baridade do agregado	36
Figura 3-5 - Materiais usados numa composição	40
Figura 3-6 - Equipamento para ensaio de espalhamento	46
Figura 3-7 - Moldagem da argamassa	46
Figura 3-8 - Mesa vibratória	47
Figura 3-9 - Armazenamento dos provetes.....	47
Figura 3-10 - Máquina universal de ensaios Lloyd - ensaio à flexão	48
Figura 3-11 - Máquina universal de ensaios ELE - ensaio à compressão	49
Figura 3-12 - Esquema de funcionamento dos eléctrodos.....	50
Figura 3-13 - Critérios de medida da resistividade eléctrica.....	52
Figura 3-14 - Equipamento para o ensaio de resistividade eléctrica.....	52
Figura 3-15 - Instalação do ensaio do coeficiente de difusão dos cloretos.....	54
Figura 3-16 - Medição da penetração dos cloretos.....	55
Figura 3-17 - Equipamento para ensaio de porosidade aberta	55
Figura 4-1 - Volume da pasta ligante	64

Figura 4-2 - Volume da pasta ligante – variação em função da composição padrão.....	64
Figura 4-3 - Trabalhabilidade das composições.....	65
Figura 4-4 - Evolução no tempo da massa mm.....	68
Figura 4-5 - Evolução no tempo da massa mm - variação em função da composição padrão.....	68
Figura 4-6 - Resistência à flexão até aos 90 dias	70
Figura 4-7 - Resistência à flexão até aos 28 dias	70
Figura 4-8 - Resistência à flexão - índice de actividade	71
Figura 4-9 - Resistência à flexão - previsão do índice de actividade para 1000 dias	72
Figura 4-10 – Comparação da resistência à flexão aos 28 e 90 dias.....	73
Figura 4-11 – Índice de actividade na resistência à flexão aos 28 e 90 dias.....	73
Figura 4-12 - Resistência à flexão - efeito da incorporação de metacaulino	74
Figura 4-13 - Resistência à compressão – até aos 90 dias.....	76
Figura 4-14 - Resistência à compressão - até aos 28 dias	77
Figura 4-15 - Resistência à compressão - índice da actividade	78
Figura 4-16 - Resistência à compressão - previsão do índice de actividade para 1000 dias	78
Figura 4-17 – Comparação da resistência à compressão aos 28 e 90 dias	79
Figura 4-18 – Índice de actividade na resistência à compressão aos 28 e 90 dias	79
Figura 4-19 – Índice de actividade ternária na resistência à compressão aos 28 dias	79
Figura 4-20 - Cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição.....	81
Figura 4-21 - Relação linear entre compressão e flexão	83
Figura 4-22 - Relação exponencial entre compressão e flexão	83
Figura 4-23 - Relação flexão/compressão - valores médios	84
Figura 4-24 – Coeficiente de difusão dos cloretos por migração.....	87
Figura 4-25 – Variação em relação à composição padrão do coeficiente de difusão dos cloretos por migração.....	87
Figura 4-26 – Índice de eficiência ternária para o coeficiente de difusão de cloretos por migração.....	88
Figura 4-27 - Porosidade aberta.....	89
Figura 4-28 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição I.....	92
Figura 4-29 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição II.....	93
Figura 4-30 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição III, IV e V.....	94

Figura 4-31 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição VI	95
Figura 4-32 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição VII.....	96
Figura 4-33 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição VIII.....	97
Figura 4-34 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição IX.....	98
Figura 4-35 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar aos 28 dias.....	100
Figura 4-36 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar aos 90 dias.....	101
Figura 4-37 - Coeficiente de capilaridade aos 28 e 90 dias	103
Figura 4-38 - Ascensão capilar aos 28 e 90 dias	103
Figura 4-39 – Variação do coeficiente de capilaridade em relação à composição padrão aos 28 e 90 dias	103
Figura 4-40 - Variação da ascensão capilar aos 28 e 90 dias.....	104
Figura 4-41 - Índice de eficiência ternária do coeficiente de absorção capilar aos 28 dias	104
Figura 4-42 - Índice de eficiência ternária da ascensão capilar aos 28 dias	104
Figura 4-43 - Índice de eficiência ternária da ascensão capilar aos 28 dias	105
Figura 4-44 - Resistividade eléctrica em provetes cilíndricos até aos 90 dias	107
Figura 4-45 - Resistividade eléctrica em provetes cilíndricos até aos 7 dias.....	107
Figura 4-46 - Custos em função do desempenho mecânico.....	109
Figura 5-1- Perfil de cloretos totais, para tg=50 anos, CC2 e exposição XS1.....	117
Figura 5-2 - Perfil de cloretos totais, para tg=50 anos, CC2 e exposição XS2	117
Figura 5-3 - Perfil de cloretos totais, para tg=100 anos, CC2 e exposição XS2	118
Figura 5-4 - Perfil de cloretos totais, para tg=50 anos, CC3 e exposição XS3	118
Figura 5-5 - Recobrimento nominal para exposição XS2 e XS3.....	121
Figura 5-6 – Variação com a composição padrão do recobrimento nominal para exposição XS2 e XS2.....	121
Figura 5-7 - Previsão da vida útil com exposição XS2.....	123
Figura 5-8 - Variação em relação à composição padrão da previsão da vida útil com exposição XS2	123
Figura 5-9 - Índice de actividade ternária em relação à composição padrão da previsão da vida útil com exposição XS2.....	123

Índice de quadros

Quadro 2.1 - Características das matérias-primas dos caulinos portugueses [15].....	13
Quadro 2.2 - Cinzas volantes: Requisitos normativos internacionais	15
Quadro 3.1 - Características do cimento utilizado. Fonte: CIMPOR	27
Quadro 3.2 - Composição do cimento utilizado. Fonte: catálogo CIMPOR [26]	28
Quadro 3.3 - Propriedades especiais do betão fabricado com o cimento utilizado [26]	28
Quadro 3.4 - Utilizações recomendadas para o cimento utilizado [26]	28
Quadro 3.5 - Perda ao fogo das cinzas volantes utilizadas. Fonte: Camões [27]	29
Quadro 3.6 - Amplitude de variação das características químicas e físicas das cinzas volantes utilizadas – PEGOP. Fonte: Camões [27]	30
Quadro 3.7 - Índice de actividade não normalizado das cinzas volantes.....	30
Quadro 3.8 - Características do caulino utilizado (MIBAL-C) [15].....	32
Quadro 3.9 - Análise Granulométrica do agregado	35
Quadro 3.10 - Características geométricas do agregado	37
Quadro 3.11 - Cálculo da baridade do agregado	37
Quadro 3.12 Características principais do superplastificante usado. (Fonte: rótulo do produto)	39
Quadro 3.13 – Resumo das massas volúmicas dos materiais	42
Quadro 3.14 - Composições por cada amassadura	42
Quadro 3.15 - Características da betoneira utilizada	43
Quadro 3.16 - Tempo de amassadura teórico para a betoneira usada	44
Quadro 3.17 - Características da Lloyd LR30K	47
Quadro 3.18 - Formatação do ensaio à flexão	48
Quadro 3.19 - Características da ELE.....	49
Quadro 3.20 - Frequência programada	57
Quadro 4.1 - Composições	63
Quadro 4.2 - Espalhamento.....	64
Quadro 4.3 - Massa dos provetes e resistência à flexão	67
Quadro 4.4 - Resistência à flexão - características das linhas de tendência	69
Quadro 4.5 - Massa dos provetes e resistência à compressão	75
Quadro 4.6 - Resistência à compressão - características das linhas de tendência	76

Quadro 4.7 - Relação entre resistência à flexão e à compressão - resumo	82
Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de difusão dos cloretos por migração.....	86
Quadro 4.9 - Porosidade aberta - resultados finais.....	89
Quadro 4.10 - Ensaio de absorção por capilaridade - resultados	91
Quadro 4.11 - Resultados da resistividade eléctrica	106
Quadro 4.12 - Custos dos materiais.....	108
Quadro 4.13 - Custos por composição e variação destes em relação à composição padrão.....	109
Quadro 5.1 - Quadro 1 da Norma E 465 [72]	113
Quadro 5.2 - Classes de exposição aos cloretos da E 465 [72]	113
Quadro 5.3 - Resumo do nível selecção da segurança da E 465 [72]	114
Quadro 5.4 - Cenários estudados.....	115
Quadro 5.5 - Cálculos de durabilidade	117
Quadro 5.6 - Cálculo do recobrimento nominal.....	121
Quadro 5.7 - Previsão da vida útil pretendida - resumo	122

Simbologia

SIGLAS

ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BED	Betão de elevado desempenho
BER	Betão de elevada resistência
CEN	<i>Comité Europeu de Normalização</i>
CEMBUREU	<i>European Cement (Industry) Association</i>
IAPMEI	<i>Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas</i>
IBRACON	<i>Instituto Brasileiro do Concreto</i>
IEP	<i>Instituto Electrotécnico Português</i>
ISEP	<i>Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LNEC	<i>Laboratório Nacional de Engenharia Civil</i>
MIBAL	<i>Minas de Barqueiros, S</i>
OPMNM	Outros Produtos Minerais não metálicos
PCA	Portland Cement Association
SCI	<i>Cement Sustainability Initiative</i>
UTAD	<i>Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro</i>
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>

ALFABETO LATINO (MAIÚSCULAS)

A/C	relação água/cimento
A/L	relação água/ligante
A	água; área; ou porosidade aberta
ADI	adições
BEVCV	betão de elevado volume de cinzas volantes (BEVCV)
C	cimento; custo; ou absorção capilar
CC	classe de consequência
CV	cinzas volantes

$C(x,t)$	concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, à profundidade X , após ter decorrido o tempo t de exposição aos cloretos
C_s	concentração dos cloretos, em % da massa ligante, na superfície do betão ($X=0$), para $t=0$, suposta constante
C_{cr}	concentração crítica de cloretos
C_{nom}	recobrimento nominal
C_{min}	recobrimento mínimo
$C_{min,b}$	recobrimento mínimo de forma a garantir transmissão das forças de aderência aço-betão (mm);
$C_{min,dur}$	recobrimento mínimo de forma a garantir adequada protecção do aço contra a corrosão; (mm);
$C_{min,f}$	recobrimento mínimo de forma a garantir adequada resistência ao fogo; (mm)
D	coeficiente de difusão em regime não estacionário
$D_a(t)$	coeficiente de difusão dos cloretos no tempo t
$D_a(t_0)$	coeficiente de difusão dos cloretos no tempo t_0
$D_{máx}$	máxima dimensão do agregado
F	constante de Faraday; ou diâmetro do tambor
F_C	carga máxima de rotura
F_R	factor redutor que traduza a acção do adjuvante
I	intensidade da corrente; ou índice de vazios
L	comprimento ou espessura do provete
K	coeficiente que permite ajustar fórmula de relação entre diversos ensaios; ou factor para ter consideração alguns parâmetros da especificação E 465
M_0	massa do provete antes do ensaio
M_i	massa do no instante i
K_{vert}	parâmetro da Norma E-465 para cálculo de C_s
L	ligante
M	agregados
MTK	metacaulino
N	constante que depende da forma do material agregado (rolado ou britado), e da consistência da argamassa ou betão
R	resistência eléctrica
R	constante dos gases perfeitos
R_C	resistência à compressão
RC	classe de fiabilidade da estrutura
R_f	resistência à flexão

R_{t_j}	resistência à tracção aos j dias
SP	superplastificante
T	valor médio das temperaturas inicial e final, na solução anódica
U	valor absoluto da voltagem aplicada
V	diferença de potencial
V_A	volume da água
V_{ADI}	volume dos aditivos
V_{ADJ}	volume dos adjuvantes
V_C	volume do cimento
V_{CV}	volume das cinzas volantes
V_L	volume do ligante
V_M	volume dos agregados
V_{MTK}	volume do metacaulino
V_{SP}	volume do superplastificante
X	profundidade de penetração dos cloretos

ALFABETO LATINO (MINÚSCULAS)

a_{lig}	água do ligante
a_{adi}	água das adições
a_M	água do agregado
C_0	concentração de cloretos na solução catódica
C_d	concentração de cloretos para a qual ocorre mudança de cor
c_V	coeficiente de variação
erf	função erro
erf^{-1}	inverso da função erro
kt	quilotoneladas
m_1	massa no provete saturado no ar
m_2	massa submersa do provete saturado
m_3	massa do provete seco
n	elementos da amostra
p	percentagem do inerte com diâmetro $d_i < d < d_{i+1}$
s	desvio padrão
s^2	variância
t	tempo; duração do ensaio; ou duração da amassadura
t_0	idade de referência
t_d	vida útil de cálculo
t_g	vida útil pretendida

t_p	período de propagação
t_{ic}	período de iniciação de cálculo (anos);
v_c	volume da carga (agregado)
v_f	volume da parte fluida
v_l	volume da pasta ligante
v_m	volume aparente da argamassa
v_s	volume da parte sólida
\bar{x}	média aritmética
x_i	elementos da amostra
x_d	valor médio da profundidade de penetração
z	valor absoluto da valência do ião, para os cloretos

ALFABETO GREGO

β	coeficiente que varia com a forma do inerte e com o seu grau de aderência ao cimento
γ	compacidade da pasta ligante; ou factor de segurança
ΔC_{dev}	margem de segurança para o recobrimento
$\Delta C_{dur,sr}$	redução no recobrimento para uso de aço inoxidável
$\Delta C_{dur,add}$	redução no recobrimento no caso de haver protecção adicional
ρ	resistividade eléctrica
σ	compacidade
σ_c	tensão de rotura à compressão
σ_t	tensão de rotura à tracção

Introdução

A Natureza é muito melhor engenheiro que o Homem. Tem mais paciência e a sua forma de levar a cabo o processo construtivo é muito diferente ... é um projectista pragmático mais que matemático, pois os projectos maus são sempre comidos pelos bons.

J. E. Gordon [1]

1.1 Considerações gerais

Muitos factores têm estado na génese dos problemas ambientais, e estes têm sabido demonstrar-nos de forma dramática a sua face. Um desses factores é o consumo de cimento. Sendo este o produto mais consumido pelo Homem, apenas ultrapassado pela água, é responsável por cerca de 7% das emissões de CO₂ para a atmosfera. O ritmo de construção e do desenvolvimento global, a imergência meteórica da economia de países como a China e a Índia, os prazos de consumo cada vez mais acelerados, o desperdício constante na concepção rápida e pouco eficiente dos materiais de construção, bem como a visão a curto prazo dos custos ambientais, são cada vez mais um naipe de factores de degradação ecológica e social, onde é necessário um grande impulso para sair desta inércia de devastação. Caso contrário, a indústria do cimento e da construção terá de continuar a desenvolver-se de forma intensiva para acompanhar e alimentar o ritmo de dependência exponencial por este produto [2].

Em analogia ao comentário inicial deste trabalho, o Homem neste momento não tem nem poderia ter a paciência da natureza, pois tem usado esse luxo para a delapidação dos seus recursos. Urge assim “meter mãos à obra” e começar pelo que é mais fácil: economizar os recursos e usá-los com mais sabedoria. É nestes dois aspectos que esta dissertação pretende dar um pequeno contributo.

1.2 Objectivos

O objectivo principal desta dissertação é fornecer um pequeno contributo para a diminuição da dependência do consumo de cimento, estudando a utilização de misturas ternárias com cinzas volantes e metacaulino, de forma a quantificar a sua viabilidade de utilização generalizada na construção, nomeadamente a eficiência face a vários parâmetros de desempenho, incluindo resistências mecânicas, durabilidade, custos, e impacto ambiental.

Pretende-se essencialmente verificar se existem ganhos adicionais nas misturas ternárias destes aditivos com cimento, relativamente às misturas binárias com apenas um destes a actuar isoladamente.

Pretende-se também despistar qual o mecanismo de funcionamento destas misturas ternárias e comparar a sua eficiência para várias percentagens de incorporação de cinzas, de forma a verificar se existe complementaridade destes dois aditivos.

Também ambiciona-se dar uma contribuição no estudo das sinergias nas misturas com vários aditivos, analisando alguns métodos de avaliação e previsão dos seus efeitos, desde a composição até à análise mais fina dos resultados em casos reais.

De forma a avaliar possíveis vantagens ecológicas no âmbito da substituição do cimento, interessa estudar a eficiência com várias percentagens de substituição. Quer-se verificar desta forma se com elevadas substituições é ainda possível manter ou eventualmente melhorar as características do betão e das argamassas.

Por fim, mas não menos importante, pretende-se conhecer a disponibilidade de matéria-prima no panorama nacional e internacional, e a resposta possível do mercado tendo em vista a sua utilização generalizada.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos.

- **Capítulo 1:** O primeiro e presente capítulo serve como uma iniciação aos temas em estudo, a sua importância e descreve a organização das várias partes do trabalho.

- **Capítulo 2:** Este capítulo é dedicado à indústria do cimento, nomeadamente no que respeita à poluição e as possibilidades para consumir menos quantidade de cimento.

- **Capítulo 3:** Fundamenta-se a campanha experimental efectuada e os materiais seleccionados. Descreve-se detalhadamente cada um dos ensaios, bem como alguns dos seus fundamentos teóricos mais interessantes. Fornece-se também a caracterização dos materiais utilizados.

- **Capítulo 4:** Descreve-se os resultados acompanhados de uma análise crítica, tanto quantitativa como qualitativa. Para cada tipo de resultados ou rácios entre estes, construiu-se elementos gráficos de forma a estudar mais facilmente as tendências ao longo do tempo ou uma comparação mais fina entre as várias composições. Foi também efectuada um estudo comparativo de custos directos e indirectos,

- **Capítulo 5:** *Análise de sensibilidade dos materiais numa estrutura de betão armado.*

- **Capítulo 6:** É efectuada uma síntese final das conclusões obtidas e a sua adequação aos objectivos propostos. Faz-se uma sugestão para trabalhos futuros.

Betão eco-eficiente

2.1 Introdução

A emergência para as questões ambientais tem vindo a crescer desde a consciencialização global do comum cidadão para as mudanças climáticas. Estas têm apresentado as suas consequências de uma forma tanto destruidora como de espectacular, sendo difícil passar despercebidas. Dos vários problemas ambientais um dos mais prementes é o aquecimento global. De uma forma cada vez mais consensual, a responsabilização do aquecimento global tem sido atribuído às elevadas emissão de CO₂ e outros gases com efeito de estufa.

A indústria do cimento emite uma cota parte de 7% deste CO₂, ao mesmo tempo que juntamente com o ramo da construção é responsável por dois dos sectores chave da economia e do emprego. Sabendo que o principal destino do cimento é o fabrico de betão, e que o seu uso nas últimas décadas tem sido imprudentemente levado a cabo com uma demanda de utilização sem critérios, demonstra que para além do desenvolvimento tecnológico há um trabalho subjacente ao nível de todos os responsáveis. Numa analogia às confissão de Eduardo Torroja [3], por vezes estamos a calcular um elemento de uma estrutura de betão, mas nunca ninguém ousou pensar porque haveria de ser de betão, ou que tipo de betão.

É precisamente por estes motivos que é necessário aumentar o conhecimento da utilização do cimento e a sua racionalização. Todos nós sabemos os benefícios económicos e ambientais que advêm de desligar uma pequena luz de stand-by. Já mais difícil será a consciencialização para a redução de uma pequena parte da

utilização de cimento por outro material ou por uma concepção mais eficiente e acima de tudo, mais inteligente.

Até ao momento, os projectistas, construtores e promotores prescrevem o betão apenas do ponto de vista das resistências mecânicas, descurando as questões de durabilidade. Aliás, esta questão é bastante pertinente na medida que não há decoro algum em construir descaradamente com produtos sem qualidade.

Também tem-se verificado e constatado que a utilização de cimento Portland não é garantia de durabilidade das construções, pelo que será necessário encontrar betões com melhor desempenho neste capítulo. Sabemos que os custos da falta de durabilidade das construções são elevados, com manutenções onerosas e constantes, paragens das condições de serviço, perda definitiva de funções, patologias precoces e frequentes. Também a estética e o conforto ficam comprometidos, e até a desvalorização no mercado [4].

2.2 A indústria do cimento e o ambiente

A indústria do cimento tem conhecido alguns avanços nas áreas dos materiais utilizados na sua produção, e tem conseguido acompanhar a evolução estando na vanguarda tecnológica dos processos produtivos. Por outro lado e paradoxalmente, não se tem verificado grandes revoluções como na informática, medicina ou genética [5].

Também no sector económico esta indústria tem conseguido impor-se com o aumento da concorrência, originando fusões e alargando domínios na óptica de internacionalização, sendo um sector com tendência para ser dominado a longo prazo pelas grandes multinacionais. No entanto, esta indústria continua a apresentar dois pontos fracos, que mais do que importantes são críticos: o impacto ambiental e a elevada susceptibilidade à conjuntura dos mercados [5].

No que se refere aos impactos ambientais, estes são ainda potenciados devido às próprias características intensivas desta indústria, que terá mais argumentos negociais ao justificar os avultados investimentos e a mão-de-obra que emprega [5]:

- **Uso intensivo do capital:** uma unidade de produção moderna equivale a três anos de receitas.

- **Produção intensiva:** cada fábrica moderna tem uma produção nominal acima de 1 milhão de toneladas por ano, tendo um período de vida de cerca de 50 anos.
- **Energia elevada:** para produzir uma tonelada de cimento é necessário entre 60 e 130 kWh de energia eléctrica.
- **Recursos humanos:** Emprega cerca de 800 mil pessoas em todo o mundo.
- **Relação peso/custo muito elevada:** significa que a distribuição do cimento é extremamente onerosa, estando limitada a um raio de acção de 300 km. Poderá dizer-se que é mais barato efectuar a travessia do oceano com 35.000 toneladas de carga, do que transportá-las por auto-estrada num raio de 300 km.
- **CO₂:** cada tonelada de cimento produzida, implica a libertação de outra tonelada de CO₂ para a atmosfera, tendo a indústria cimenteira responsabilidade por 7% do CO₂ produzido pelo Homem à escala planetária.

Numa perspectiva da própria indústria, reconhecendo naturalmente os seus pontos fracos, e com alguma passividade do legislador, esta tende a autorregular-se promovendo iniciativas ao nível global, de forma a "alterar o rumo actual". Mas trata-se efectivamente de ganhar peso na sua representatividade perante a sociedade. No fundo, é uma forma de estar bem com ela própria (aparentemente) e com os cidadãos. Um mero exemplo é a criação da organização *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) que supostamente pretende dar um grande contributo na autorregulação do sector à escala planetária. Este surgimento da própria indústria pelas questões ambientais, de forma extremamente concertada e organizada, é um indício de reconhecimento de que a consciencialização global por vezes é mais importante que os próprios actos. Isto significa que não bastará encontrar um punhado de soluções, é necessário vendê-las face a um adversário demasiadamente versátil e astuto. Este ponto foi descurado pelos vários intervenientes, o que explica também, parte do atraso na sociedade em resolver alguns destes problemas ambientais.

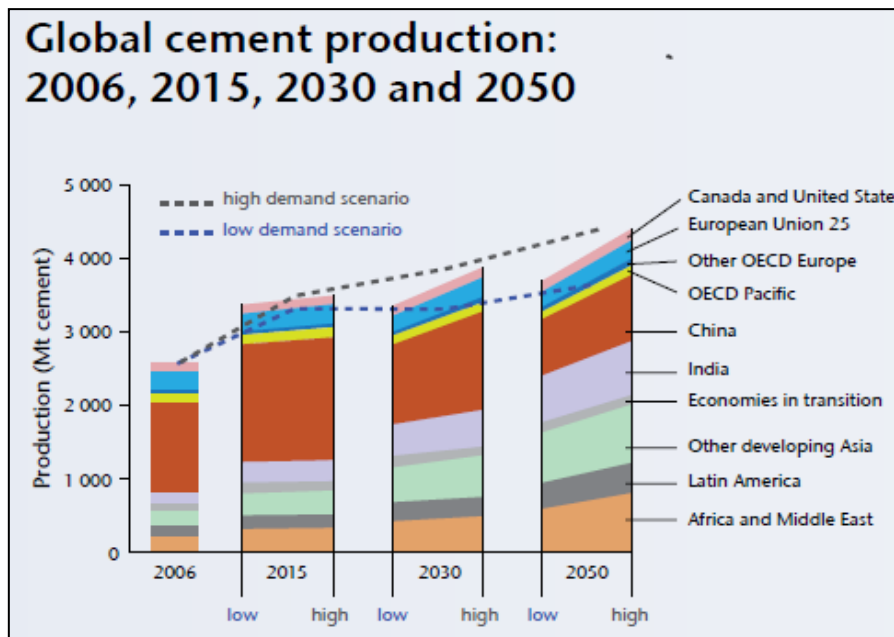


Figura 2-1 - Consumo global de cimento. Fonte: WBCSD [6]

Uma das formas propostas pelas cimenteiras para diminuição dos efeitos ambientais é a redução do rácio clínquer/cimento (clinker to cement ratio). Como se pode ver no quadro abaixo, a intenção é algo modesta, pois em 40 anos a redução será de 77% para 71%.

Cement Roadmap Indicators						
	2012	2015	2020	2025	2030	2050
Thermal energy consumption per tonne of clinker GJ / tonne	3.9	3.8	3.5-3.7	3.4-3.6	3.3-3.4	3.2
Share of alternative fuel & biomass use (1)	5-10%	10-12%	12-15%	15-20%	23-24%	37%
Clinker to cement ratio	77%	76%	74%	73.5%	73%	71%
CCS						
no. of pilot plants	2	3				
no. of demo plants operating		2	6			
no. of commercial plants operating				10-15	50-70	200-400
Mt stored	0.1	0.4	5-10	20-35	100-160	490-920
Tonne CO ₂ emissions per tonne cement (2)	0.75	0.66	0.62	0.59	0.56	0.42

Figura 2-2 - Metas da WBCSC para a mitigação dos efeitos ambientais da produção do cimento [7]

Esta dissertação pretende interagir efectivamente na redução do rácio clínquer/cimento, mas de uma forma mais drástica. Na continuação explica-se melhor o conceito.

2.3 Adições

Para obter-se determinadas propriedades especiais é possível modificar a matéria-prima do cimento, tal como a eliminação do aluminato tricálcico e do hidróxido de cálcio libertado pela hidratação do silicato tricálcico [8].

Provavelmente a motivação original para o desenvolvimento de cimentos compostos foi sem dúvida a economia de custos. Em pouco tempo, devido a vários incentivos, a produção de cimentos compostos com calcário, cimentos com escória, e cimentos pozolânicos, superou na Europa e na Ásia a produção de cimentos Portland [2]. Sabemos hoje também, que determinadas características destes cimentos compostos, apresentam melhores qualidades do que o cimento de referência.

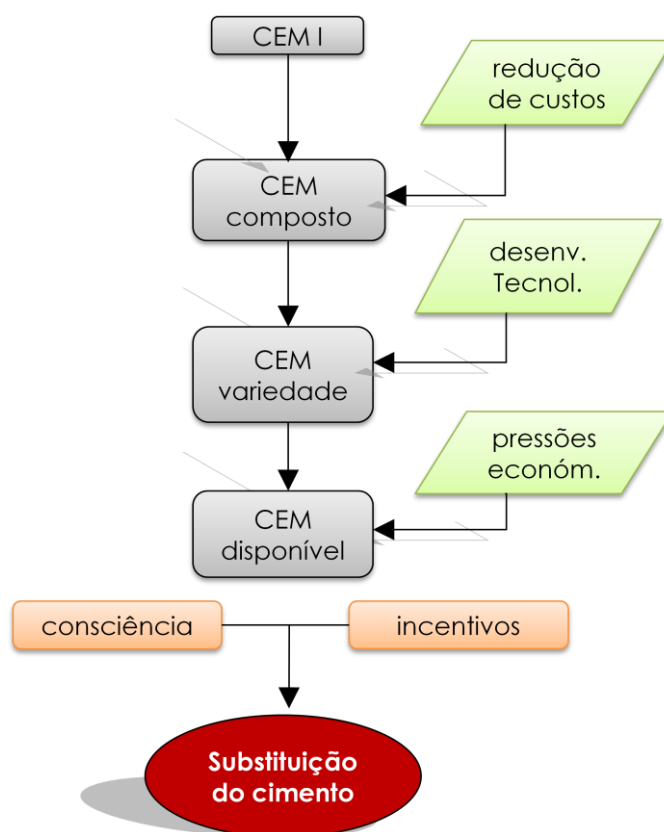


Figura 2-3 – O motor da evolução das adições

Também já são produzidos compostos comerciais eco-eficientes com cinzas volantes, em que o cimento utilizado é do tipo II/B, sendo exemplo um produto denominado CEM II/B-M(W,L) 32,5R, produzido pela CIMPOR na Turquia [9].

No diagrama anterior faz-se um resumo simples do caminho que levou e pode levar o cimento com adições. Verifica-se que sem as pressões económicas e consciencialização global do comum cidadão, referidas atrás, não basta descobrir as

melhorias para se ter sucesso. Outros motivos para o crescimento da procura destas adições são [10]:

- A possibilidade de redução da energia incorporada quando se utilizam subprodutos industriais na substituição do cimento, pois é necessário muita energia para produzir o cimento.
- A possibilidade de redução da poluição incorporada na produção de cimento.
- Reutilização de subprodutos nos betões compostos, que de outra forma seriam necessários armazenar, tratar, havendo continuamente o risco de poluição.

As adições podem aumentar a durabilidade dos betões, diminuindo a porosidade, aumentando a compacidade pela redução da quantidade e tamanho dos cristais de hidróxido de cálcio [10]. Também permitem melhoramentos na trabalhabilidade.

2.3.1 Metacaulino

O metacaulino é uma adição do tipo II, e é resultado da cozedura de caulino a cerca de 750/800 °C. Segundo *Sampaio et al.* [10], a reactividade pozolânica do metacaulino depende de 3 factores:

- Cristalinidade de origem;
- Granulometria;
- Grau de amorfização;

Segundo o mesmo autor, uma argila com 20% de caulinite já tem grandes possibilidades de se tornar um material pozolânico, e o seu desempenho depende muito do tipo de cimento, e mais propriamente de [10]:

- Complementaridade de granulometria;
- Diferencial em termos de forças electroestáticas entre partículas;

O metacaulino poderá consumir muito rapidamente o hidróxido de cálcio [11] [12], o que favorece o ganho de resistência nas idades mais jovens, sendo uma vantagem, se não uma necessidade perante a utilização de cinzas.

2.3.2 Matéria-prima

Como foi referido, a matéria-prima do metacaulino é o caulino. Caulino é a designação comercial e industrial de uma argila muito refractária e que coze branco ou quase branco [13]. Um dos componentes essenciais do caulino consiste nos minerais argilosos designados de Caulinite e Halloysite (filosílicatos), para além de quartzo, micas e feldspatos finamente pulverizados (milésimas de milímetro). Este termo vem da localidade chinesa *Kao Ling*, perto de *Ingde Zhen*, e que significa montanha alta. Não é por acaso que esta localidade é conhecida como o maior centro cerâmico da China, e o seu produto é conhecido e utilizado desde a antiguidade para produzir porcelana.

No que se refere aos jazigos de caulino, estes podem classificar-se em dois grupos:

- Residuais ou hidrotermais;
- Depósitos sedimentares detríticos;

Segundo *Galopim de Carvalho* [13], os jazigos Portugueses são do tipo residuais e resultam da alteração meteórica ou hidrotermal no local dos feldspatos, que estão presentes nos granitos alcalinos, gnaisses, pórfiros ácidos e pegmatitos graníticos. Ocorrem numa faixa granítica marcada por profunda alteração que percorre o litoral entre Viana do Castelo e Aveiro, e na qual os feldspatos (potássicos e sódicos) foram decompostos, deixando como resíduos caulinite e halloysite. A alteração parcial da biotite na rocha original, liberta hidróxidos de ferro de cor amarelada característica, que afecta a massa de caulino, retirando-lhe qualidade, que por definição deverá ser branca ou quase branca.

Também é extraído na vizinha Espanha, nomeadamente em *Lugo*, *La Corunha* e *Valência*. Nos restantes países, além da China, são conhecidos grandes depósitos na França, Reino Unido, República Checa, Ucrânia, Alemanha, Grécia e Espanha.

As propriedades da caulinite (Figura 2-4) são as seguintes:

- Mineralógicas:
 - Cor: branca, amarelada, esverdeada ou cinzenta;
 - Risco: incolor;
 - Brilho: terroso;
 - Densidade: 2.6;
 - Dureza: 1;
 - Clivagem: perfeita;
 - Fractura: irregular;

- Morfológicas: agregados terrosos e excepcionalmente escamosos, maciços;
- Fórmula química: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$;

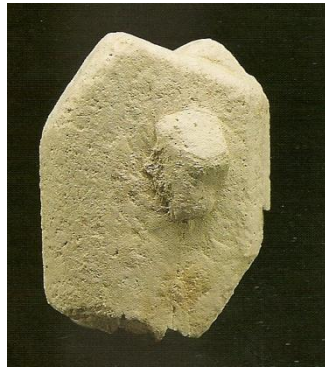


Figura 2-4 - Caulinite [14]

O caulino é utilizado na indústria cerâmica fina, tal como porcelana, faianças delicadas e resistentes, na indústria de papel como por exemplo em carga no papel couché, na indústria dos plásticos e tintas como inerte. Também tem aplicações em produtos químicos, tais como fertilizantes, medicamentos, detergentes, colas, filtros e até alimentação animal.

2.3.3 Características da matéria-prima

No quadro seguinte faz-se a caracterização dos vários produtos comercializados ou em fase de comercialização em Portugal

Quadro 2.1 - Características das matérias-primas dos caulinos portugueses [15]

Zona		Alvarães		Vila chã		S. Vicente P. Jusã	Barqueiros	
Características		SAS 50	A130S	CAMP A	CAMP S ₁		MIBAL A	MIBAL C
Dimensão das partículas (%)	< 30 µm			98 ± 1	98 ± 2		99 ± 3	
	< 10 µm			73 ± 3	74 ± 5		93 ± 5	
	< 5 µm			50 ± 4	54 ± 4		82 ± 5	
	< 2 µm	45.0	62.0	30 ± 4	35 ± 4	33.0	68 ± 6	
Composição Química	SiO ₂	48.0	47.7	48.1	57.78	47.9	47.0	47.0
	Al ₂ O ₃	36.0	36.0	35.5	27.57	36.6	37.1	37.1
	Fe ₂ O ₃	1.0	1.0	1.5	1.75	0.8	0.9	1.3
	MnO	-	-	-	0.01	-	--	--
	K ₂ O	1.5	1.2	2.0	2.46	1.7	2	2
	Na ₂ O	0.3	0.4	0.2	0.31	0.2	0.2	0.2
	MgO	0.4	0.3	0.3	0.35	0.2	0.15	0.15
	TiO ₂	0.3	0.3	0.1	0.20	0.05	0.1	0.3
	CaO	0.1	0.1	0.13	0.07	0.05	0.1	0.1
	P ₂ O ₅	0.2	0.1	-	0.10	0.1	--	--
Perda ao fogo	12.2	12.7	12.0	9.50	12.5	12.75	12.75	
Humidade (%)	Inicial	-	-	32 ± 3		-	32 ± 3	
	Grânulos	-	18 ± 2	18 ± 2		-	18 ± 2	
	Após secagem	-	-	<2		-	< 2	
Parâmetros de cor	--			Após secagem		1200 °C/1350 °C	Após secagem	
	L*	93.5	94.0	70 -85	70 - 80	94.8 /93.0	75-85	55-65
	a*	0.5	0.0	-	-	0.8/0.8	--	--
	b*	6.7	7.0	-	-	4.5/6.0	--	--
Resíduo no crivo (%) (ASTM D 4315-94)	54 µm	-		<0.6	<0.6	-	< 0.3	
	45 µm	1.0		-	-	1.0	--	--
	63 µm	0.3		-	-	0.3	--	--
Parâmetros após secagem	Burnout	1185 °C		-		1200 °C/1350 °C	1180 °C	
	Resistência à flexão (110 °C) (MPa)	1.57	1.77	1.47± 0.49	-	1.76	2.45 ± 0.49	
	Resistência à flexão após cozedura (MPa)	37.3	40.2	-	-	27.5/34.3	13 ± 3	
	Absorção de água (%)	14.0	12.0	-	-	17.0/17.0	10 ± 2	
Outros	Reologia - silicato de sódio L-60 (Brookfield S03 - 20 rpm)	1.62 g/cm ³ - 80 cP 0.6 / -		1.6 g/cm ³ - 250 cP 0.35 ± 1 / 0.12 ± 0.05			1.5 g/cm ³ - 500 cP 0.6 ± 0.3	
	Densidade (ASTM D 1817-96) (g/cm ³)	-	-	2.6-2.7	2.4-2.7	-	2.4 - 2.7	
	Absorção de óleo (ASTM D 281-95)	-	-	25 - 35	-	-	34 - 48	
	PH da suspensão (ISO 789/9-1981 (E))	-	-	5 - 8		-	6 - 9	

2.3.4 Cinzas volantes

As cinzas volantes têm grande disponibilidade no mercado em geral, são mais baratas do que o cimento, o metacaulino e a sílica de fumo, embora não apresentem características mecânicas tão elevadas e tão rápidas no tempo como estes constituintes referidos. Possibilitam bons níveis de durabilidade, baixa necessidade de água de amassadura e eventualmente resistências mecânicas a longo prazo.

As cinzas volantes caracterizam-se como adições do tipo II, e são resultado da combustão de carvão nas centrais termoelétricas.

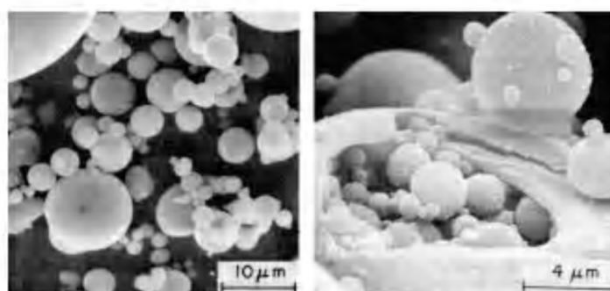


Figura 2-5 - cinza volante classe F [2]

No Quadro 2.2 são apresentadas as características exigíveis por vários documentos normativos. Portugal e membros do CEN estão abrangidos pelas NP EN 450-1 [16] e NP EN 450-2 [17]. Além de Portugal, são membros deste organismo abrangidos por estas Normas: Alemanha, Áustria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslováquia, Eslovénia, Espanha, Estónia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Letónia, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Baixos, Polónia, Reino Unido, República Checa, Suécia e Suíça. Nos Estados Unidos a Norma é a ASTM – C618 [18] [19].

O uso de cinzas volantes em Portugal é recente, e a necessidade da sua utilização deve-se aos excedentes da central termoelétrica de Sines. Além de grandes obras em Portugal, tal como a Ponte de Vasco da Gama, o Estádio Alvalade XXI e o Metro do Porto, o emprego de cinzas está generalizado, sendo actualmente de uso corrente pelas centrais de betão.

O objectivo é maximizar a incorporação de cinzas em compostos cimentícios, de forma a diminuir o consumo de cimento, e conseguir assim ganhos económicos. A boa notícia é que as cinzas além dos ganhos económicos à conta do menor consumo de cimento, proporcionam determinadas características melhoradas aos compostos

cimentícios com elas produzidas e, o que é mais interessante, menor produção de CO₂, com todas as vantagens associadas.

Quadro 2.2 - Cinzas volantes: Requisitos normativos internacionais

Requisito		EN 450-1	ASTM C618		ex-URSS
			F	C	
SiO ₂ (%)	mín.	--	--		25
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	mín.	--	70	50	--
SO ₃ (%)	máx.	3.0	5.0		3.0
MgO (%)	máx.	--	--		--
CaO livre (%)	máx.	1.0 ¹	--		--
Perda ao fogo (%)	máx.	5.0 ²	6.0 ³	6.0	5.0
Humidade (%)	máx.	--	3		2.0
Na ₂ O (%)	máx.	--	1.5 ⁴		--
Cl ⁻ (%)	máx.	0.1	--		--
Retidos: 90 µm (%)	máx.	--	--		25
Retidos: 45 µm (%)	máx.	40	34		--
Índice de actividade (%)	mín.	75 (28 dias) 85 (90 dias)	75 (28 dias) 75 (90 dias)		85 (28 dias 65 °C)
Exigência de água	máx.	--	105		105
Expansão ou contracção em autoclave	máx.	--	0.8		--
Tempo de presa: inicial (min)	mín.	--	--		15
Final (horas)	máx.	--	--		4

1 – Pode atingir 2.5% desde que cumpridas exigências de expansibilidade

2 – Pode atingir 7.0% desde que haja concordância contratual

3 – Pode atingir 12.0% desde que haja dados que comprovem o seu desempenho

4 – Opcional: apenas se requerido pelo comprador

Por este motivo, grandes empresas cimenteiras, tal como a Portuguesa CIMPOR, têm investimentos internacionais interessantes neste domínio, o que por si só demonstram a grande vantagem económica e ambiental. Um exemplo recente, é o investimento de 1.2 milhões de euros na estação de carregamento da central termoeléctrica de *Kandal*, Turquia, duas estações de descarga e dois sistemas de alimentação em *Sivas* e *Nevsehir*. Segundo a CIMPOR [9], estes investimentos permitiram reduzir as emissões de CO₂, sendo o objectivo final a maximização da incorporação de cinzas de forma a alcançar um consumo de 50 Kt/ano. Segundo a mesma fonte, este investimento só aconteceu porque há uma real procura do mercado por um aditivo de cinzas volantes cálcicas. Assim, foi criado um produto denominado CEM II/B-M(W,L) 32,5R. Interessante será referir que o tipo de cimento usado nesta dissertação também é do tipo II/B.

2.4 Betões de elevado desempenho

2.4.1 Generalidades

Uma das utilizações das adições é no fabrico de betões com propriedades específicas. No início da investigação dos betões especiais procurava-se principalmente o aumento das resistências mecânicas. O aparecimento de plastificantes e superplastificantes cada vez mais eficientes, permitiu controlar a trabalhabilidade em vez da tradicional razão água/ligante (A/L). Isto tornou possível fabricar betões com uma razão A/L de 0.3 e até de 0.2, com características muito mais compactas e resistentes. Este tipo de betões, ao contrário dos betões de elevada resistência (*BER*), foi distinguido pela elevada durabilidade. Embora o *ACI* adopte uma definição mais vaga, resultando que alguns betões de elevado desempenho possam não ser efectivamente duráveis, segundo *Metha* e *Aitcin* [20] pode-se definir-se um *BED* por 3 aspectos:

- Trabalhabilidade;
- Resistência;
- Durabilidade;

Para uma composição pode-se utilizar apenas cimento em doses elevadas, entre os 400 e 500 kg/m³ (por vezes mais), mas também incorporar aditivos com vantagens económicas, reológicas ou até de desempenho. Entre os mais comuns estão as cinzas volantes e a sílica de fumo, mas também há lugar para outros materiais com características pozolânicas, tais como o metacaulino, escória granulada de alto-forno, cinzas de casca de arroz, etc. A sílica de fumo sendo um material muito fino e reactivo, apresenta elevada pozolanicidade e grandes desempenhos, havendo no entanto pouca disponibilidade no mercado e com custos elevadíssimos, cerca de 10 vezes o do cimento. Por esse motivo, a sua utilização justifica-se em aplicações de grandes resistências mecânicas e químicas. É no entanto obrigatório a partir dos 100 MPa. Pode-se utilizar para utilizações menos resistentes, as cinzas volantes.

Os betões de elevado desempenho poderão ser a solução para situações muito particulares e específicas, tais como:

- **Edifícios altos:** devido às elevadas resistências mecânicas e ao maior módulo de elasticidade, é possível construir estruturas mais delgadas, resistentes, e com menores deformações obtidas pelo ganho de rigidez.

- **Construções em ambientes muito agressivos:** devido às elevadas resistências químicas, proporcionando períodos de vida superiores a 100 anos [21].
- **Construções de muito grande longevidade:** para edifícios especiais, tais como templos, onde se pretendem durabilidades de 1000 anos [2].
- **Estruturas ultra-finas e resistentes pré-fabricadas:** para tirar partido da elevada resistência, podendo utilizar-se como elementos estruturais laminares ou tubulares de pequena espessura.
- **Estruturas em serviço imediato:** poderá tirar-se partido de resistências iniciais elevadas.

2.5 Betões eco-eficientes

Pode-se englobar em três grandes grupos os fundamentos da utilização excessiva do cimento: o *lobby* da indústria, o consumo, e os riscos para a construção (Figura 2-6). Além da grande dependência pela utilização do cimento, também se verifica um excesso de consumo devido à má utilização: dosagens elevadas, má formação dos agentes envolvidos, falta de estudos de composição, etc. Este mal está há muito tempo identificado, mesmo em Portugal, originando patologias inesperadas ou precoces, e claro, custos de exploração dos edifícios muito mais acentuados e que não são devidamente contabilizados aquando o projecto ou construção. Poderá chamar-se a estes três grandes grupos, a patologia do consumo.

Estes factores são ainda ampliados pela falta de visibilidade de todos estes problemas. Sem a necessária consciencialização de todos os intervenientes, mais difícil se torna de combater.

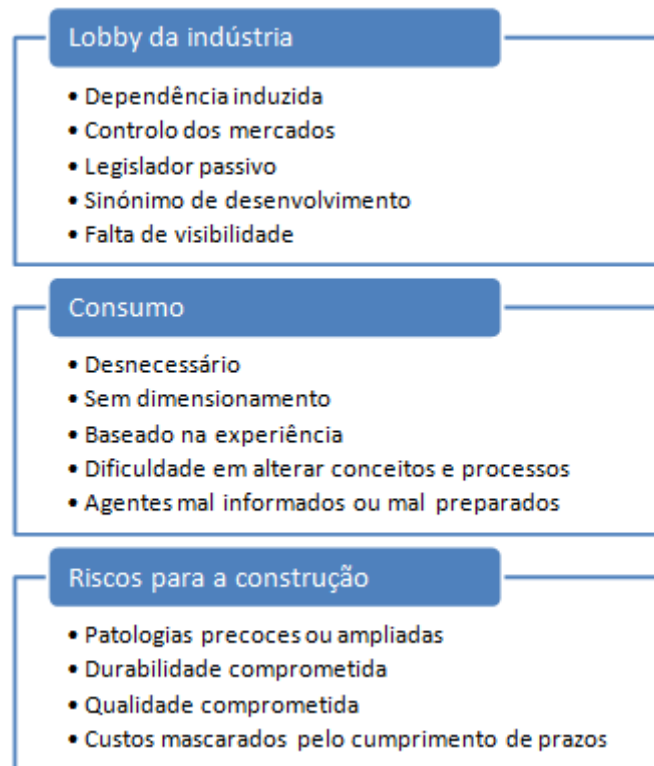


Figura 2-6 - Patologia do consumo

Assim, deve-se identificar as grandes chaves para diminuir a dependência. Estas passam por diminuir o consumo de cimento, pela utilização criteriosa deste material, a diminuição da relação clínquer/cimento, e ainda pela utilização de misturas cada vez mais eficientes (Figura 2-7). Neste estudo estamos principalmente a tentar utilizar as duas últimas chaves: substituição do cimento e desenvolvimento tecnológico nas misturas de composição de betões. Mas nunca esquecendo que a par destes desenvolvimentos, terá de haver um trabalho de consciencialização, ou mesmo de pressão sobre todos os agentes, sob pena do factor “lobby” ser preponderante e impedir o acesso de conhecimento e a procurada “alteração” de maus hábitos instalados.

Para concretizar estas chaves, irão utilizar-se as duas adições referidas neste estudo: cinzas volantes e metacaulino. Tal como nos betões especiais, pretende-se substituir o cimento por cinzas volantes. A sua utilização, além de permitir fabricar betões com menor quantidade de cimento, permite vantagens acrescidas tanto no estado fresco como na obra acabada.

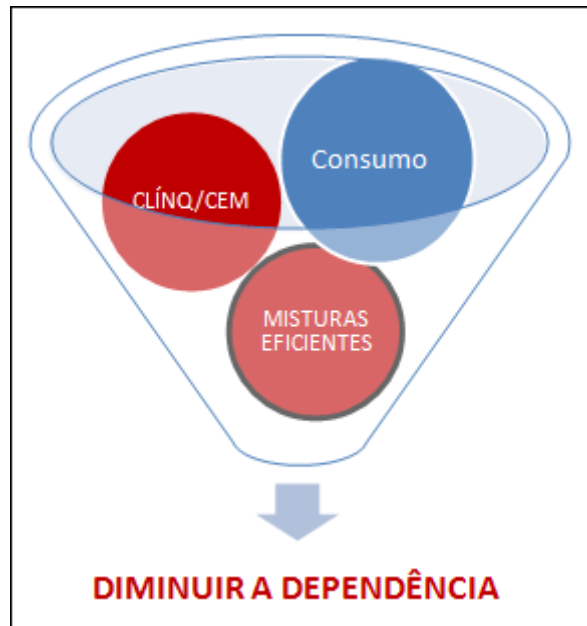
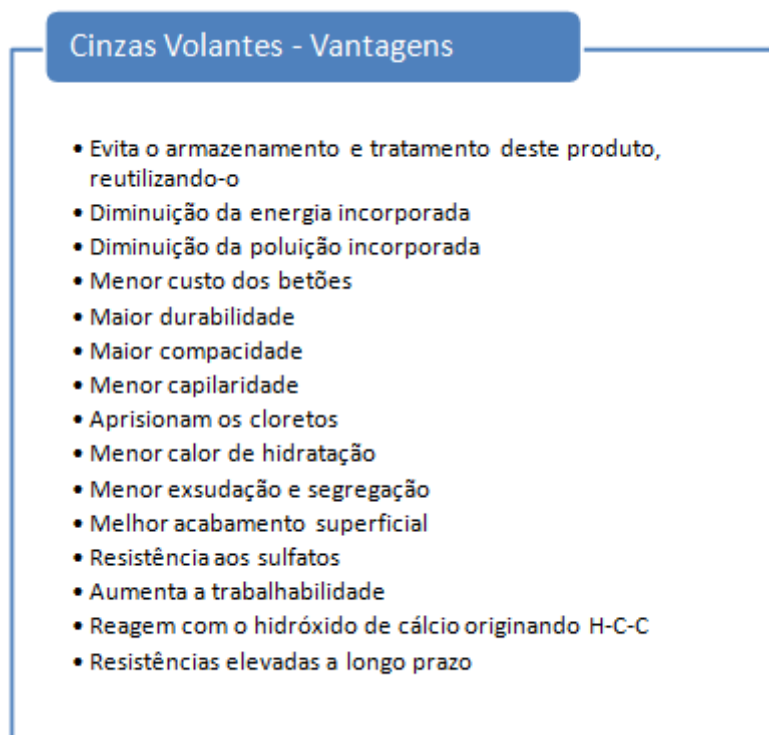


Figura 2-7 - Chaves para diminuição da dependência



- Evita o armazenamento e tratamento deste produto, reutilizando-o
- Diminuição da energia incorporada
- Diminuição da poluição incorporada
- Menor custo dos betões
- Maior durabilidade
- Maior compacidade
- Menor capilaridade
- Aprisionam os cloretos
- Menor calor de hidratação
- Menor exsudação e segregação
- Melhor acabamento superficial
- Resistência aos sulfatos
- Aumenta a trabalhabilidade
- Reagem com o hidróxido de cálcio originando H-C-C
- Resistências elevadas a longo prazo

Figura 2-8 - Vantagens da utilização das cinzas

Mas para ter grandes benefícios ambientais será necessário substituir a maior quantidade de cimento possível, mas tal poderá não ser possível devido às desvantagens da utilização deste aditivo. É aqui que entra o metacaulino, pois permite com uma pequena percentagem de adição, mitigar ou até inverter algumas destas desvantagens (Figura 2-9).

Com a utilização do metacaulino poderá corrigir-se as baixas resistências iniciais, conseguindo-se produzir betões com grande volume de incorporação de aditivos e com comportamento mecânico semelhante a um betão normal, ou mesmo melhorado. Relativamente à durabilidade, estas adições proporcionam um material mais compacto e com desempenho também mais elevado.

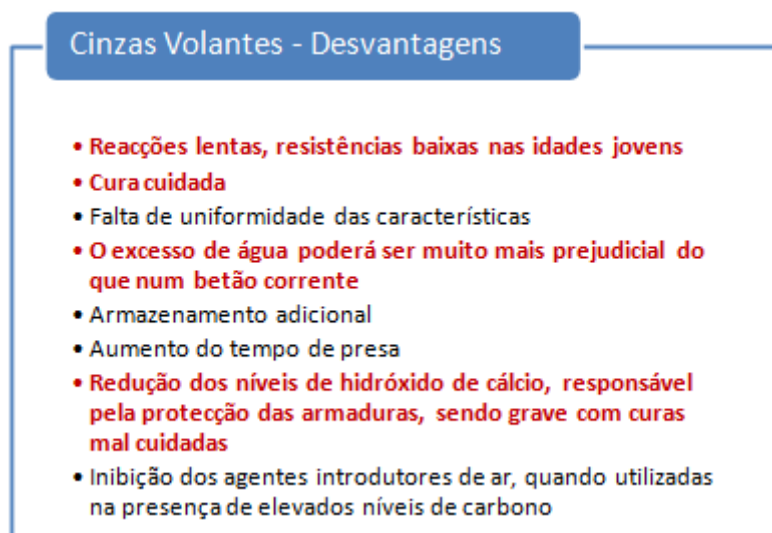


Figura 2-9 - Mitigação das desvantagens das CV pelo metacaulino (a vermelho)

Por fim, considerando todas as vantagens na utilização de adições no contexto dos betões especiais, e tendo também como objectivo alargar o leque de aplicações, surge uma janela interessante para reduzir a dependência do cimento. Como se viu atrás, três características das composições dos betões especiais poderão ser: a baixa razão A/L para originar materiais mais compactos e duráveis, sendo a trabalhabilidade controlada por superplastificante; grandes quantidades de ligante; e adições de materiais com características pozolânicas. Outras sinergias poderão ser encontradas ou trabalhadas, para obtenção de betões eco-eficientes com requisitos específicos (Figura 2-10).

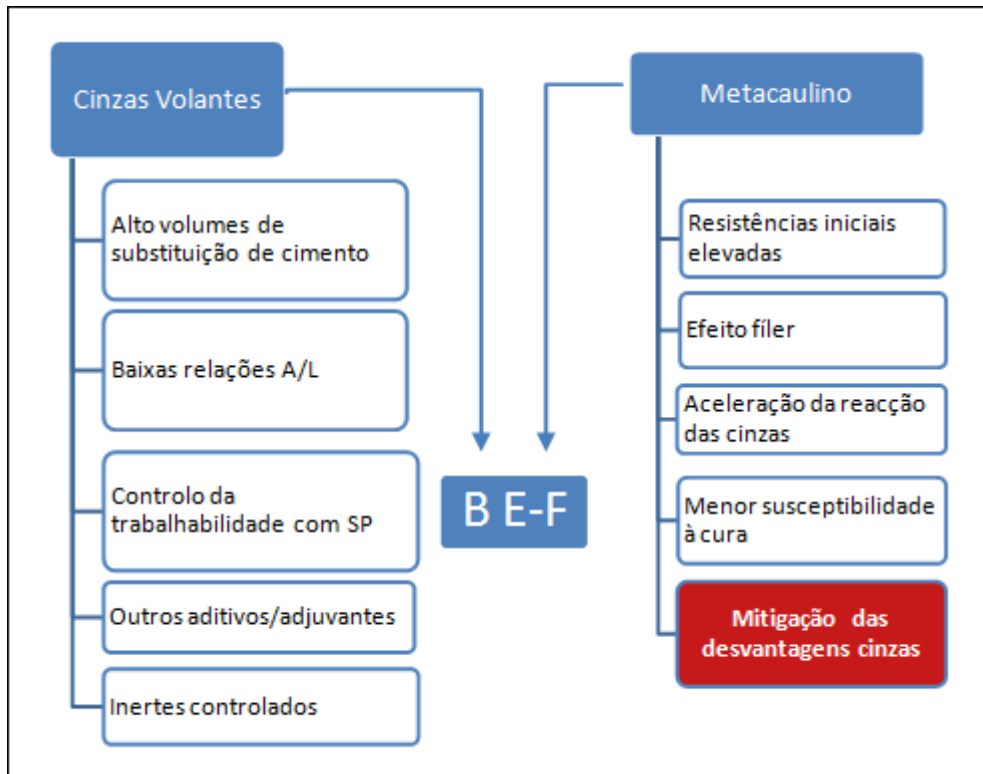


Figura 2-10 - Mecanismo de concepção de um betão eco-eficiente

Poderá fazer todo o sentido reorganizar estes componentes neste contexto:

- Volumes elevados de cinzas, que será uma forma de substituir o ligante tradicional por este subproduto industrial, que de outro modo teria de ser armazenado, tratado, podendo também ser um foco de poluição.
- Estas cinzas vão contribuir para o aumento da compacidade e durabilidade do material, embora de efeito pozolânico lento.
- Baixa razão A/L (0.3 ou até 0.2), sendo a trabalhabilidade controlada pelo uso de superplastificantes: originando um produto ainda mais compacto, resistente e durável.
- Introdução de metacaulino de forma a garantir as resistências iniciais necessárias para tornar este betão utilizável em construções correntes, e mitigar eventualmente parte da cura cuidada que as cinzas requerem. Além disto, para contribuir com aumento da resistência e durabilidade, devido ao facto de ser um material muito reactivo e fino (efeito filler).

No fundo estaremos a criar um betão especial, em que a grande vantagem será a incorporação máxima possível de cinzas, de forma a substituir grande parte do cimento, mas também a conseguir um material com desempenhos mecânicos e de durabilidade tão bons ou melhores que os betões "normais". Estes betões poderiam ser usados em aplicações correntes a um custo muito mais reduzido para o promotor, diminuindo os custos de construção, mas sobretudo diminuindo drasticamente o consumo de cimento ao nível global, com vantagens ambientais imensas. Todos os impactes negativos associados à indústria do cimento seriam reduzidos, desde as emissões de CO₂, consumo de energia, as cicatrizes na paisagem das explorações, os problemas com os aquíferos, etc., etc., etc. Sendo a indústria do cimento uma das mais intensivas, e sendo o seu produto o mais consumido pelo homem (apenas ultrapassado pela água), estaremos a falar de reduções do consumo de cimento em proporções planetárias. Isto seria sem dúvida um betão eco-eficiente.

Estamos também a criar um produto com alta carga de *Sinergia*, como o esforço coordenado de vários componentes. Neste caso, a optimização de um betão pela adição de dois aditivos distintos. Pretende-se que esta conjugação ternária potencie determinadas propriedades, de tal forma que sem ser pela conjugação destes produtos seja impossível, mais difícil ou então mais oneroso de as obter.

Mais, sabe-se que no ano 2002 a produção de caulino em Portugal foi de 162.000 toneladas, havendo ainda segundo a *Quercus*, reservas muito abundantes por explorar.

Como conclusão, analisando os grandes grupos patológicos e os benefícios da utilização de betões eco-eficientes, verifica-se que com a sua utilização obtêm-se três grandes vantagens: melhoria do ambiente, eficiência melhorada e redução de custos (Figura 2-11). Bastará a diminuição do cimento nas composições de betão, para que a custos mais reduzidos possa produzir-se um material com vantagens para o meio ambiente e para a própria construção. Existe então uma janela aberta para a utilização mais eficiente de betões, com consumos mais reduzidos e com fortes vantagens ambientais e económicas, sendo estas últimas derivadas do custo da própria composição do betão; pela prevenção e retardamento de patologias da construção; mas também, o que é muito interessante, pela diminuição dos custos associados à emissão de CO₂ para a atmosfera.

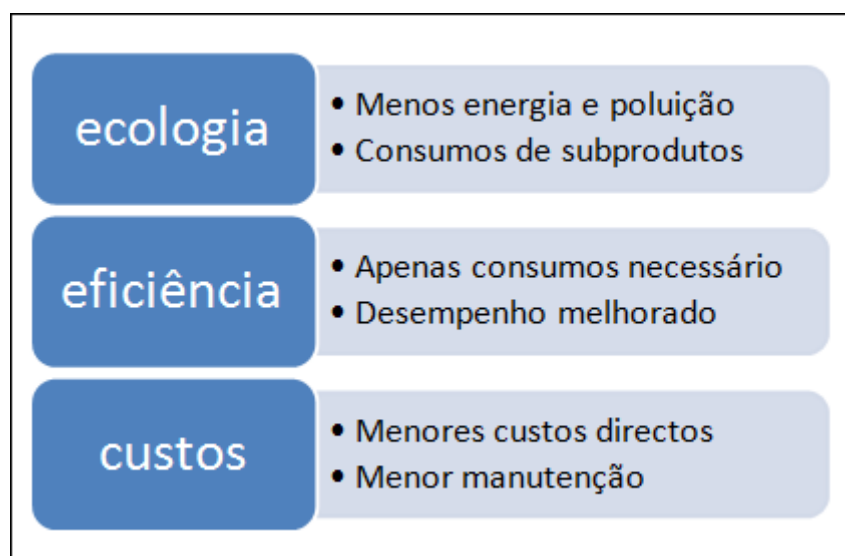


Figura 2-11 - Vantagens dos betões eco-eficientes

Materiais e procedimentos de ensaio

3.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os materiais seleccionados, definindo as propriedades mais relevantes para o presente trabalho, bem como os ensaios, equipamentos e procedimentos usados para elaborar e caracterizar as composições de argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Este conhecimento é importante para interpretar convenientemente o trabalho experimental e fornecer um enquadramento adequado aos resultados obtidos.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção pertencente ao Laboratório Professor Júlio Barreiros Martins, no departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, situado no Campus de Azurém, Guimarães.

Todos os materiais utilizados foram seleccionados tendo em conta a sua facilidade de obtenção, presença e utilização generalizada no mercado. Previu-se a utilização de materiais não correntes nas aplicações comuns em Portugal, restringindo o estudo a um único tipo de material para cada um dos constituintes das amassaduras. Também foi considerado para a escolha do lote de materiais, aqueles em que as propriedades fossem bem conhecidas. Deva referir-se que quando se fala de materiais disponíveis, está a considerar-se que produtos como o metacaulino, que não tem utilização corrente em Portugal, mas no entanto, verifica-se a disponibilidade de matéria-prima para o produzir, bem como Empresas dispostas a efectuar a comercialização, evidentemente se economicamente viável.

3.2 Materiais utilizados

Segue-se uma apresentação das principais características de cada material usado na constituição das composições das argamassas produzidas.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado em todas as amassaduras foi o cimento composto, Portland calcário, tipo CEM II/B-L 32.5N, da marca *CIMPOR*, proveniente do seu centro de produção de Souselas.

A opção por este tipo de cimento em detrimento do cimento Portland (CEM I) foi motivada tendo em conta três vertentes fundamentais:

- **Mercado:** é o cimento com maior predominância/disponibilidade no mercado;
- **Económica:** é um cimento mais barato que o cimento Portland;
- **Utilização:** é o cimento mais utilizado em situações correntes de elementos de betão armado;

Sendo este estudo centrado na eco-eficiência proveniente da substituição de cimento por adições, aliado a um possível ganho ou melhoria das suas propriedades, bem como à grande utilização no mercado nacional deste em obras correntes de betão armado, optou-se pela selecção deste tipo de cimento.

Saliente-se que é de esperar que os resultados sejam sensíveis ao tipo de cimento utilizado, nomeadamente devido ao teor de clínquer Portland presente, superior por exemplo no CEM I ou no CEM II/A. A grande quantidade de filler calcário presente no cimento utilizado (que como foi descrito no capítulo 2 é uma adição do tipo I), é indicativa de que há menos matéria disponível para reagir quimicamente [22], e também para potenciar eventuais reacções pozolânicas. Existe sempre a possibilidade de subsistirem dificuldades em isolar determinados resultados devido ao cimento ser composto com outros constituintes, alheios ao clínquer Portland. Este apuramento, ou despistagem, ficará para estudos posteriores mais específicos, pois tal como já foi referido, o presente estudo encontra-se numa primeira fase de abordagem, vocacionado objectivamente para os materiais mais correntes.

O cimento foi adquirido e armazenado em sacos de papel de 35 kg, tendo-se efectuado 4 remessas de 1 saco cada. Com este procedimento pretendeu-se minimizar ao máximo o contacto do cimento com o ar, evitando o uso do mesmo

saco durante períodos prolongados [23]. Deste modo, conseguiu-se um armazenamento adequado do cimento, sem grandes quantidades de armazenagem, sem grumos, sem compactação, e acima de tudo, de forma a tentar manter as mesmas características ao longo das diversas amassaduras [24].

As principais características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado em todas as composições, estão patentes no Quadro 3.1. Este quadro refere-se a valores extraídos da ficha de controlo estatístico com os resultados médios mensais dos ensaios de autocontrolo do CEM II/B-L 32,5 N de Souselas, fornecidos gentilmente pela CIMPOR. No Quadro 3.2 e no Quadro 3.3 são apresentadas as propriedades especiais e as utilizações recomendadas do betão fabricado com o cimento utilizado, de acordo com fabricante.

Quadro 3.1 - Características do cimento utilizado. Fonte: CIMPOR

Composição química	Perda ao fogo (%)	11.72
	Óxido de silício – SiO ₂ (%)	15.97
	Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	4.04
	Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	2.17
	Óxido de cálcio total – CaO (%)	59.00
	Óxido de magnésio – MgO (%)	2.10
	Sulfatos – SO ₃ (%)	3.15
	Cloretos – Cl ⁻ (%)	0.01
	CaO livre (%)	1.06
	Resíduo insolúvel (%)	2.60
Propriedades físicas	Massa volúmica (kg/cm ³)	3020
	Superfície específica de Blaine (cm ² /g)	4521
	Granulometria > 90 µm (%)	1.7
	Água de pasta (%)	26.4
	Início de presa ≥ 75 (min)	175
	Fim de presa (min)	225
	Expansibilidade ≤ 10 (mm)	1.1
Propriedades mecânicas	Resis. comp. 2 dias (MPa)	22.9
	Resis. comp. 7 dias > 16.0 (MPa) ¹	32.8
	Resis. comp. 28 dias ≥ 32.5 e ≤ 52.5 (MPa) ¹	38.6

1 - Resultados confirmados experimentalmente [25]

Quadro 3.2 - Composição do cimento utilizado. Fonte: catálogo CIMPOR [26]

Clínquer (%)	65-79
Calcário (%)	21-35
Sulfato de cálcio regulador de presa	Não fornecido

Quadro 3.3 - Propriedades especiais do betão fabricado com o cimento utilizado [26]

Desenvolvimento lento das resistências iniciais
Progressão muito sensível da resistência até aos 28 dias
Elevada trabalhabilidade com baixa relação A/C

Quadro 3.4 - Utilizações recomendadas para o cimento utilizado [26]

Betão armado	Indicado indistintamente para todas as classes de resistências, com vantagem nas de C12/15 a C25/30
	Com desempenho mecânico a 28 dias
Pré-fabricação	Artefactos e outros elementos simples
	Elementos estruturais em betão simples
	Betonagem em grandes massas
	Argamassas de todos os tipos
	Betão simples de uso geral, em fundações e elevações

3.2.2 Cinzas volantes

Actualmente em Portugal existem duas centrais produtoras de cinzas volantes para betão, resultantes do uso de carvão para a produção de electricidade: as provenientes da central termoeléctrica do Pego e as provenientes da central termoeléctrica de Sines. Em Portugal, no ano de 2008, a produção anual de cinzas volantes atingiu cerca de 500 mil toneladas.

Presentemente as cinzas volantes, quer de Sines, quer do Pego, são escoadas praticamente na sua totalidade para a indústria cimenteira e de betão pronto, que também recorre à importação de cinzas volantes de Espanha. Segundo a *Tejo Energia*, a central do Pego produziu 152 mil toneladas em 2008, das quais 91% foram reutilizadas, na sua grande maioria pela indústria do betão.

A produção anual de cinzas volantes em Espanha é bastante superior à nacional devido à elevada quantidade de centrais termoeléctricas existentes. Cifra-se entre 7 a 12 milhões de toneladas por ano e aproximadamente 35% não são aproveitadas, sendo armazenadas em aterro.

As cinzas volantes utilizadas neste estudo são provenientes da Central termoelétrica do Pego, classe F [18]. Este tipo de cinzas já foi submetido a vários estudos na Universidade do Minho, nomeadamente por *Camões* [27], e portanto foram já devidamente caracterizadas.

De referir que de acordo com *Camões* [27], as cinzas volantes do Pego apresentam uma finura dentro dos limites das *Normas*, mas com variação bastante superior. Segundo a *Norma NP EN 450-1* [16], a finura não deve exceder 40% em massa e não deve variar mais de ± 10 pontos percentuais em relação ao valor declarado. Ora as cinzas utilizadas apresentam uma finura de 22.82%, mas com uma variação de cerca de 40%, o que equivale a quatro vezes o permitido. Este facto não é importante, dado que as quantidades utilizadas foram bastante reduzidas e referentes a uma só remessa, pelo que o valor realmente importante (a finura) está garantido.

Ainda citando *Camões* [27], e no seguimento da caracterização das cinzas utilizadas, poderá verificar-se uma grande amplitude entre os valores apresentados. A explicação deste autor poderá ser a utilização de carvão de origens variadas e a necessidade de cumprir valores ambientais. Também se verifica uma percentagem elevada do teor de inquinados (Quadro 3.5). No Quadro 3.6 são apresentadas as principais características das cinzas utilizadas, segundo a caracterização de *Camões* [27].

Quadro 3.5 - Perda ao fogo das cinzas volantes utilizadas. Fonte: *Camões* [27]

Cinzas volantes	Perda ao fogo média (%)
Conforme recebidas	7.0
Partículas $\geq 75 \mu\text{m}$	26.5
Partículas $< 75 \mu\text{m}$	3.5

Quadro 3.6 - Amplitude de variação das características químicas e físicas das cinzas volantes utilizadas – PEGOP. Fonte: Camões [27]

Composição química	Perda ao fogo (%)	5.60 - 9.28
	Óxido de silício – SiO ₂ (%)	42.16 – 58.46
	Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	21.04 – 32.65
	Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	3.51 – 9.13
	Óxido de cálcio total – CaO (%)	1.67 – 9.18
	Óxido de magnésio – MgO (%)	0.65 – 2.69
	Sulfatos – SO ₃ (%)	0.22 – 1.04
	Cloretos – Cl ⁻ (%)	0.00 – 0.06
	CaO livre (%)	0.00 – 0.12
	Óxido de sódio – Na ₂ O (%)	0.18 – 0.91
	Óxido de potássio – K ₂ O (%)	0.72 – 3.11
	Óxido de fósforo – P ₂ O ₅ (%)	0.15 – 2.14
	Óxido de titânio – TiO ₂ (%)	0.69 – 1.89
	Total SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	74.55 – 92.16
Propriedades físicas	Massa volúmica (kg/cm ³) ¹	2360
	Superfície específica de Blaine (m ² /kg) ²	387.9
	Granulometria > 45 µm (%)	14.10 – 31.55
	Granulometria > 75 µm (%)	5.60 – 18.85
	Humidade (%)	0.01 – 0.32
	Exigência de água ³	0.297

1 - Resultados confirmados experimentalmente por Camões [27] – LNEC E64 [28]

2 - Resultados confirmados experimentalmente por Camões [27] – LNEC 196-6 [29]

3 - Resultados confirmados experimentalmente por Camões [27] – LNEC 196-3 [30]

Quanto ao índice de actividade, recorreu-se novamente aos estudos do mesmo autor, que concluiu que as cinzas utilizadas cumprem o especificado nas Normas, podendo considerar-se que os índices de actividade requeridos [16] [17] serão atingidos. Estes resultados não são alheios ao método alternativo para a determinação deste índice [27]. Por esse motivo, o Quadro 3.7 está descrito como “índice não normalizado”.

Quadro 3.7 - Índice de actividade não normalizado das cinzas volantes

Idade	Índice de actividade não normalizado (%)	
	CV/(C+CV)=20%	CV/(C+CV)=40%
7 dias	85.9	7.0
28 dias	97.3	26.5
90 dias	99.2	3.5

As cinzas utilizadas foram armazenadas em recipientes plásticos, estanques e protegidas do contacto com o ar. No entanto estas cinzas mantiveram-se em

armazenamento durante sete anos, podendo eventualmente ter havido lugar à alteração de algumas das suas características referidas.

3.2.3 Metacaulino

A matéria-prima deste produto, tal como já foi referido no capítulo 2, extrai-se fundamentalmente numa faixa granítica marcada por profunda alteração que percorre o litoral entre Viana do Castelo e Aveiro, e na qual os feldspatos (potássicos e sódicos) foram decompostos, deixando como resíduos caulinite e halloysite [13]. A matéria-prima também pode ser extraída na vizinha Espanha, nomeadamente *Lugo*, *La Corunha* e *Valência*.

O Metacaulino utilizado neste estudo é um produto em fase de comercialização, produzido pela *Mibal*, e extraído em Barqueiros, no Concelho de Barcelos. Segundo fonte responsável da empresa [31], esta produz 3 tipos de metacaulino: MIBAL-A, MIBAL-B, e o MIBAL-C, embora o MIBAL-B não seja produzido com a matéria-prima de Barcelos, mas sim de Alvarães. O jazigo de Barcelos é provavelmente de natureza sedimentar com reservas brutas estimadas em milhões de toneladas [8].

Segundo responsável pela *MIBAL* [31], a principal diferença entre o MIBAL-A e MIBAL-C reside na quantidade de óxido de ferro, maior no MIBAL-C. Este facto é comprovado por um estudo comparativo das características das matérias-primas portuguesas [15], onde se verifica que além do óxido de ferro, também há dióxido de titânio em maior quantidade no MIBAL-C. Além das diferenças na composição química, também verificam-se pequenas discrepâncias ao nível da cor e no parâmetro *burnout*. Mas segundo *Pinto* [8] há várias análises sobre o metacaulino MIBAL-A, efectuadas pela *MIBAL*, Universidade do Minho e pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, que sugerem que afinal o produto não é tão homogéneo como à primeira vista se quer fazer crer. Este autor refere diferenças no teor em sílica e em alumina, o que indicia diferentes graus de meteorização da jazida. Verifica-se também que os valores determinados e compilados por estes autores são diferentes do estudo comparativo dos vários fornecedores, efectuado por *Ferraz e Gomes* [15], o que demonstra em definitivo que embora possa haver uma eventual relação e comportamento entre os metacaulinos MIBAL-A e MIBAL-C, algumas das suas características apresentam heterogeneidades, cuja importância não se consegue determinar no âmbito desta dissertação. Assim, apresenta-se no quadro seguinte a caracterização efectuada por *Ferraz e Gomes* [15] ao metacaulino MIBAL-C, que foi o usado.

Quadro 3.8 - Características do caulino utilizado (MIBAL-C) [15]

Características		MIBAL - C
Difusão das partículas (%)	< 30 µm	99 ± 3
	< 10 µm	93 ± 5
	< 5 µm	82 ± 5
	< 2 µm	68 ± 6
Composição Química Perda ao fogo	SiO ₂	47.0
	Al ₂ O ₃	37.1
	Fe ₂ O ₃	1.3
	MnO	--
	K ₂ O	2
	Na ₂ O	0.2
	MgO	0.15
	TiO ₂	0.3
	CaO	0.1
	P ₂ O ₅	--
	Perda ao fogo	12.75
Humidade (%)	Inicial	32 ± 3
	Grânulos	18 ± 2
	Após secagem	< 2
Parâmetros de cor	--	Após secagem
	L*	55-65
	a*	--
	b*	--
Resíduo no peneiro (%) (ASTM D 4315-94)	54 µm	
	45 µm	--
	63 µm	--
Parâmetros após secagem	Burnout	0.09
	Resistência à flexão (110 °C) (MPa)	2.45 ± 0.49
	Resistência à flexão após secagem (MPa)	13 ± 3
	Absorção de água (%)	10 ± 2
Outros	Reologia - silicato de sódio L-60 (Brookfield S03 - 20 rpm)	0.5g/cm ³ – 500 cP
	Densidade (ASTM D 1817-96) (g/cm ³)	2.4 - 2.7
	Absorção de óleo (ASTM D 281-95)	34 - 48
	PH da suspensão (ISO 789/9-1981 (E))	6 - 9

3.2.4 Agregado

O agregado utilizado foi seleccionado de dois lotes disponíveis na Universidade do Minho: *Lote A* e *Lote B*. A sua escolha baseou-se essencialmente na realização de composições prévias e verificação da respectiva consistência durante e após a amassadura, bem como na experiência da sua utilização por intermédio de vários técnicos e alunos da própria Universidade:

- O *Lote A* era comercializado por um fornecedor da Universidade do Minho, mas com pouco histórico a nível comercial, pelo que ainda não havia uma caracterização técnica disponível. Apresentava à vista desarmada muitas quantidades de finos e sabe-se que produz argamassas duras e pouco trabalháveis.
- O *Lote B* foi cedido por uma indústria de pré-fabricação para um estudo paralelo da Universidade do Minho. Apresentava uma menor quantidade de finos, e sabe-se que é usado na produção de pequenos elementos pré-fabricados.

De forma a determinar o agregado mais adequado de um ponto de vista de trabalhabilidade e facilidade na produção de argamassas, efectuaram-se várias amassaduras. Para o *Lote A* utilizaram-se vários misturadores, a) b) e c). Figura 3-1 da esquerda para a direita:

- Misturador para ensaio de resistências mecânicas do cimento, normalizado segundo NP EN 196-1 [25], da marca *Controls*, modelo *Automatic Controller L5*, Figura 3-1 (a);
- Misturador de mão da marca *Kinzo*, modelo 25 CO6, Figura 3-1 (b);
- Betoneira eléctrica de eixo variável, da marca *LISPRENE-LIS 140*, Figura 3-1 (c);

As várias misturas foram efectuadas com razões crescentes de A/C: 0,5; 0,55; 0,6 e 0,7. Deva salientar-se que os resultados não foram nada animadores, traduzindo-se em argamassas pouco homogéneas e duras, mesmo após períodos muito elevados de amassadura, com o misturador de mão e com a betoneira, superiores a 20 minutos.

Para o *Lote B* efectuou-se apenas uma amassadura com a betoneira eléctrica de eixo variável *LISPRENE – LIS 140*.

Após o leque de testes efectuados com o *Lote A*, chegou-se à conclusão que este agregado não era adequado para efectuar argamassas padrão [25], muito menos argamassas com metacaulino, pois têm tendência a ser menos trabalháveis. A mistura resultante não era uniforme, e a consistência das argamassas efectuadas com razões $A/C=0.55$ variavam de secas ou muito secas, consoante o método e equipamento misturador. Por sua vez, o agregado do *Lote B* demonstrou rapidamente que dava origem a argamassas de cimento e areia fáceis de produzir, uniformes, e com bastante trabalhabilidade.

A justificação para esta escolha está na utilização de um agregado que não dificulte a trabalhabilidade das amassaduras, pois sabe-se que o metacaulino torna as argamassas mais secas e menos moldáveis, aprisionando a água [8].



Figura 3-1 - Misturadoras usadas para seleccionar o agregado

Posto isto, adoptou-se o *Lote B* para todas as amassaduras e realizou-se o estudo da granulometria deste tipo de areia. O método escolhido foi o da peneiração a seco, segundo a *Norma NP EN 933-1* [32], com peneiros especificados na *NP EN 933-2* [33] e de acordo com a *ISO 3310-1* [34], *ISO 3310-2* [35] e a *NP EN 933-5* [36].



Figura 3-2 - Série de peneiros e máquina de agitar para análise granulométrica

Quadro 3.9 - Análise Granulométrica do agregado

Massa seca total M_1 (kg)		1,100	
Massa seca após lavagem M_2 (kg)		1,100	
Massa seca dos finos removidos por lavagem M_2 (kg)		0,000	
Análise granulométrica			
Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado
63	0,000	0	100
31,5	0,000	0	100
16	0,000	0	100
8	0,000	0	100
4	0,023	2	98
2	0,238	22	76
1	0,310	28	48
0,5	0,274	25	23
0,25	0,174	16	7
0,125	0,046	4	3
0,063	0,016	1	2
P	0,009	-	-
% Finos	-	0,8	-
Total	1,090	99	-
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		0,9%	Observações: ensaio válido (<1%)

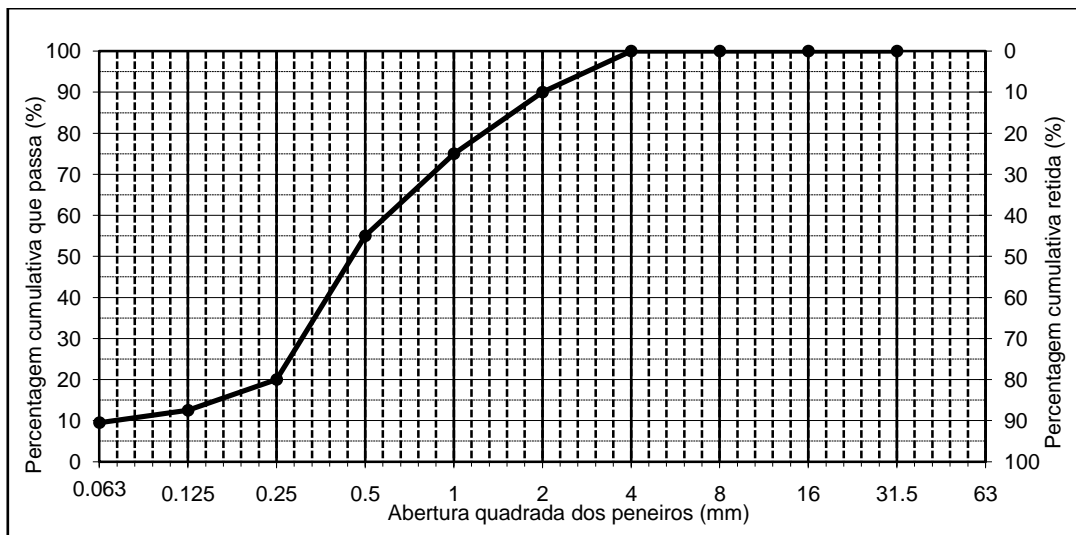


Figura 3-3 - Curva granulométrica do agregado

Da análise granulométrica é possível extrair mais duas características fundamentais: o módulo de finura e a dimensão máxima ($D_{m\acute{a}x}$) do agregado. Estes são elementos importantes para a definição da curva granulométrica e do tipo de betão ou argamassa que se vai utilizar, de acordo com a geometria das peças a moldar [24]. Determinou-se o $D_{m\acute{a}x}$ segundo Faury [37][38] e segundo as *Normas Americanas* [39][40].

Para a determinação da baridade, utilizou-se o procedimento da *Norma NP EN 1097-3* [41]. Os valores obtidos estão no Quadro 3.11.



Figura 3-4 – Determinação da baridade do agregado

Quadro 3.10 - Características geométricas do agregado

MF	3.44
D _{máx} (Fauy)	4mm
D _{máx} (ASTM)	2mm

Quadro 3.11 - Cálculo da baridade do agregado

Ensaio	M1	M2	Areia	Va	Baridade ρ	
					Ensaio	Média
					(kg)	(kg)
1	8,5828	13,4408	4,8580	0,00207953	2336,10	2336,10
2	8,5828	13,4408	4,8580		2336,10	
3	8,5828	13,4408	4,8580		2336,10	

M1 - molde vazio; M2 – molde cheio

O armazenamento dos agregados foi efectuado ao abrigo do exterior, dentro de um recipiente plástico e fechado. Alguns dias antes da utilização do agregado, este foi seco em estufa a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, de forma a eliminar qualquer presença de humidade.

3.2.5 Água de amassadura

Foi utilizada a água da rede pública de Guimarães, disponível no próprio Laboratório da Universidade do Minho. Não foi necessário proceder à sua análise, pois segundo o especificado na Norma NP EN 1008 [42], bastará ser potável para que cumpra automaticamente a sua aptidão para fabrico de argamassas e betões.

3.2.6 Superplastificante

A utilização de metacaulino origina uma perda de trabalhabilidade acentuada, pois devido à sua elevada finura desenvolve-se uma grande apetência para fixar a água. Quando descreve este facto na sua tese de doutoramento, Pinto [8] demonstra as dificuldades que obteve na reologia das pastas frescas, e que de alguma forma se confirmou nas amassaduras efectuadas, razão pela qual foi necessária a introdução de superplastificante. A necessidade de incorporação de um superplastificante nas composições não foi motivada exclusivamente com o intuito de induzir trabalhabilidade, mas sim, com a necessidade de simular composições de betão de melhorado, ou mesmo de elevado desempenho. Tal só é possível recorrendo a razões

água/ligante bastante reduzidas, só possíveis de alcançar com recurso a um superplastificante.

No entanto é necessário acrescentar dois bons motivos para a utilização deste adjuvante, sendo o último a justificação da sua utilização:

- O procedimento da ordem de entrada dos constituintes na betoneira foi de acordo com o “Método de ensaios de cimento”, segundo a *Norma NP EN 196-1* [25].
- A betoneira disponível para efectuar as amassaduras não tinha energia suficiente para misturar um material tão pouco trabalhável, obrigando a um esforço manual suplementar por parte do operador, de forma a garantir a homogeneidade da amassadura, principalmente nas fases iniciais.

Optou-se assim pela utilização de um superplastificante comercial, apenas em algumas composições com metacaulino, de forma a garantir a trabalhabilidade mínima para se efectuar a amassadura. Não para garantir uma trabalhabilidade final. Este conceito é importante, pois influenciou alguns resultados da trabalhabilidade das argamassas após a amassadura [43].

Deva referir-se que mesmo com este adjuvante, as dificuldades do início da amassadura nas composições com metacaulino foram imensas, obrigando a paragens consecutivas da betoneira, de forma a corrigir manualmente as deficiências desta, no que toca a misturar uniformemente os constituintes.

Foi utilizado o superplastificante comercial de grande efeito, *GLENIUM 77 SCC* da *BASF*, com dosagens entre 0.4% e 1.5%, sendo esta última a dosagem recomendada pelo fabricante. Uma parte utilizada no início do processo de amassadura, outra parte no fim do processo, também de acordo com indicações do fabricante. Este produto cumpre a *Norma NP EN 934-2* [44]. No quadro seguinte apresentam-se as principais características retiradas do rótulo do produto usado.

Quadro 3.12 Características principais do superplastificante usado. (Fonte: rótulo do produto)

Norma	NP EN 934-2: 2003 [44]
Função principal	forte redutor de água/superplastificante (T3.1, T3.2 NP EN 934-2: 2003) [44]
Função secundária	risco de desagregação com sobredosagem
Dosagem recomendada	1,5% da massa de cimento
Estado	líquido
Cor	castanho claro
Densidade	1.05 +/- 0.02 g/cm ³
Conteúdo máximo de iões de cloreto	≤ 0.1% (NP EN 480-10)
Conteúdo máximo de iões de alcalis	≤ 3.5% (NP EN 480-12)
Comportamento à corrosão: Não contém substâncias que favorecem a corrosão	não contém substâncias que favorecem a corrosão

3.3 Ensaios em argamassas

Foram realizadas várias amassaduras de forma a retractor algumas características estabelecidas previamente e que se admitiram mais interessantes, tendo sempre em atenção a viabilidade, nomeadamente temporal, da sua realização.

Deva referir-se que inicialmente estavam previstas apenas três amassaduras (I, II, VI), mas com o decorrer dos trabalhos e dos ensaios, foi decidido em dois momentos distintos de análise e reflexão, efectuar mais três amassaduras em cada, tendo-se no final contabilizado nove amassaduras com composições distintas.

3.3.1 Estudo das composições

Para se formular convenientemente uma composição de argamassa, é necessário conhecer os volumes reais dos vários componentes. Como já foi referido e explicado anteriormente, esse conhecimento não foi totalmente obtido pela caracterização dos materiais, pois foram utilizados valores correntes ou determinados em outros trabalhos experimentais. No que se refere ao estudo das composições, o parâmetro fundamental é a massa volúmica. Foram utilizados valores correntes para cimento, metacaulino e areia [45] [46] [47]. Estes valores foram posteriormente confirmados, de acordo com a bibliografia e valores apresentados.



Figura 3-5 – Materiais usados numa composição

Sabendo que o volume total da argamassa é o somatório dos volumes reais de todos os constituintes, a expressão seguinte serve para determinar esse mesmo volume:

$$\text{Volume argamassa} = vm = V_L + V_M + V_A + V_{ADJ} + V_V \quad (\text{eq.3.1})$$

podendo escrever-se:

$$vm = V_C + V_{ADI} + V_M + V_A + V_{ADJ} + V_V \quad (\text{eq.3.2})$$

ou então:

$$vm = V_C + V_{MTK} + V_{CV} + V_M + V_A + V_{ADJ} + V_V \quad (\text{eq.3.3})$$

desenvolvendo ainda mais um pouco:

$$vm = \frac{C}{\delta_C} + \frac{MTK}{\delta_{MTK}} + \frac{CV}{\delta_{CV}} + \frac{A}{\delta_A} + \frac{M}{\delta_M} + \frac{SP}{\delta_{SP}} + V_V \quad (\text{eq.3.4})$$

onde:

- vm volume aparente da argamassa (litros);
- V_L volume do ligante (litros);
- V_C volume do cimento (litros);
- V_{MTK} volume do metacaulino (litros);

V_{CV}	volume das cinzas volantes (litros);
V_A	volume da água (litros);
V_M	volume do agregado (litros);
V_{ADI}	volume dos aditivos (litros);
V_{ADJ}	volume dos adjuvantes (litros);
V_{SP}	volume do superplastificante (litros);
V_V	volume dos vazios (litros);
C	massa do cimento (kg);
CV	massa das cinzas volantes (kg);
MTK	massa do metacaulino (kg);
M	massa do agregado (kg);
A	massa da água (kg);
δ_C	massa volúmica do cimento (kg/m ³);
δ_{MTK}	massa volúmica do metacaulino (kg/m ³);
δ_{CV}	massa volúmica das cinzas volantes (kg/m ³);
δ_A	massa volúmica da água (kg/m ³);
δ_M	massa volúmica do agregado (kg/m ³);
δ_{SP}	massa volúmica do superplastificante (kg/m ³);

Com as massas volúmicas determinadas anteriormente (Quadro 3.13), considerando que o ligante é a soma da quantidade de cimento com as adições de metacaulino e cinzas volantes, e admitindo um volume de vazios (V_v) de 0.03 m³/m³ de argamassa, determinou-se para cada composição a quantidade de areia (M), água (A) e superplastificante (SP).

$$L=C+MTK+CV \quad (\text{eq.3.5})$$

onde:

L	quantidade de ligante (kg/m ³);
C	quantidade de massa de cimento relativamente à quantidade de massa ligante (%);
MTK	quantidade de massa de metacaulino relativamente à quantidade de massa ligante (%);
CV	quantidade de massa de cinzas volantes relativamente à quantidade de massa ligante (%);

Quadro 3.13 – Resumo das massas volúmicas dos materiais

Material	Kg/m ³
C	3150
MT	2590
CV	2200
M	2650
A	1000
SP	1050

No Quadro 3.14 está o resumo da constituição de cada composição, o seu número (em romano) e a sua designação. Para esta última atribuiu-se uma letra maiúscula representando o constituinte de ligante, (C)cimento, (MTK)metacaulino ou (CV)cinzas volantes, seguido do sua quantidade de massa relativamente à massa de ligante, podendo variar entre 0 e 100%. O último parâmetro da designação “índice” refere-se à relação água/ligante, que é igual para todas as composições excepto para a IX.

Quadro 3.14 - Composições por cada amassadura

Comp.	Designação	Materiais						
		L	C	MTK	CV	M	A/L	SP
		(kg/m ³)	(%)	(%)	(%)	(Kg)	(--)	(%L)
I	C100+MTK0+CV0-0,55	484	100	0	0	1457,9	0,55	0,0
II	C90+MTK10+CV0-0,55	484	90	10	0	1449,1	0,55	1,5
III	C80+MTK0+CV20-0,55	484	80	0	20	1422,8	0,55	0,0
IV	C60+MTK0+CV40-0,55	484	60	0	40	1387,6	0,55	0,0
V	C40+MTK0+CV60-0,55	484	40	0	60	1352,5	0,55	0,0
VI	C70+MTK10+CV20	484	70	10	20	1414,0	0,55	0,0
VII	C50+MTK10+CV40-0,55	484	50	10	46	1378,8	0,55	0,4
VIII	C30+MTK10+CV10-0,55	484	30	10	60	1343,6	0,55	1,5
IX	C75+MTK8.3+CV16.7-0,46	484	75	8,3	16,7	1329,3	0,46	0,5

onde:

L quantidade de ligante (kg/m³);

C quantidade de massa de cimento relativamente à quantidade de massa ligante (%);

MTK quantidade de massa de metacaulino relativamente à quantidade de massa ligante (%);

CV quantidade de massa de cinzas volantes relativamente à quantidade de massa ligante (%);

M quantidade de agregado (kg/m³);

A/L relação água / ligante;

SP quantidade de superplastificante relativamente à quantidade de ligante (%);

3.6.1 Execução das amassaduras

Tendo em vista conseguir a maior eficácia na homogeneidade da argamassa, utilizou-se uma betoneira eléctrica de eixo variável, *LISPRENE – LIS 140*, sendo das disponíveis, a que apresentava condições com capacidade mais adequada ao volume pretendido para cada amassadura. Na Figura 3-1 (c) poderá verificar-se a betoneira utilizada. No Quadro 3.15 estão as características principais desta betoneira.

Quadro 3.15 - Características da betoneira utilizada

Referência	LISPRENE – LIS 140
Tipo	eixo inclinado
Capacidade (L)	140
Potência (kW)	0,33
Motor (V)	220
Peso (kg)	56
Diâmetro do tambor (cm)	65
Velocidade (rpm)	27

Os procedimentos foram baseados no ensaio para determinar a resistência das argamassas (25), mas com as devidas modificações. Tal opção, como já foi referido, determinou uma maior dificuldade em misturar os diversos constituintes. Isto acarretou a necessidade de parar frequentemente a betoneira, e com ajuda de uma colher efectuar manualmente o processo de mistura. Este processo foi mais crítico nas composições com metacaulino, onde se verificou uma “colagem” mais forte do ligante nas paredes da misturadora, ou seja, uma maior viscosidade. A solução encontrada consistiu em parar o equipamento, e mais uma vez com a colher, raspar cuidadosamente as paredes do misturador. Só depois foi possível efectuar uma mistura mecânica final. Na produção de cada amassadura este processo manual foi efectuado diversas vezes, as consideradas suficientes para proporcionarem o fabrico de uma argamassa homogénea.

Assim, o tempo de amassadura óptimo (teórico) foi superado várias vezes. Poderá verificar-se que segundo trabalhos de *Joisel* [48], a homogeneidade consiste no número de rotações e não no tempo de amassadura, sendo o número de rotações ideal de 40 rpm para a betoneira utilizada. Mas como o número de rotações e o

tempo de amassadura estão interligados, a velocidade de rotação óptima é função do diâmetro do tambor, e pode ser determinada com a seguinte expressão [24]:

$$v = \frac{20}{F} \quad (\text{eq. 3.6})$$

Então a duração é função do número de rotações:

$$t = 120 \cdot \sqrt{F} \quad (\text{eq. 3.7})$$

onde:

- v velocidade (rpm);
- t duração da amassadura (s);
- F diâmetro do tambor (m);

No quadro seguinte apresenta-se a velocidade e tempo de amassadura óptimo teórico, para betões. Estes valores são indicadores das dificuldades de amassadura das argamassas, pois o tempo foi largamente ultrapassado. Isto também poderá indicar que a ordem de entrada dos elementos de amassadura, nomeadamente a entrada tardia do agregado, teve provavelmente um efeito demasiado severo na energia necessária para realizar a betonagem

Quadro 3.16 - Tempo de amassadura teórico para a betoneira usada

Velocidade óptima (rpm)	24
Tempo óptimo (s)	96

Posto isto, os procedimentos programados para cada amassadura foram os seguintes:

1. Molhagem das paredes do misturador.
2. Período de espera entre 5 e 10 minutos, de forma a retirar a água em excesso do misturador.
3. Introdução de metade da água prevista juntamente com a quantidade total de ligante, e misturar durante 5 minutos.
4. Verificar a homogeneidade da mistura e se necessário parar a betoneira e efectuar uma raspagem às paredes desta, bem como misturar manualmente.
5. Misturar mecanicamente durante 5 minutos.

6. Adicionar um pouco mais de água de amassadura se a pasta estiver muito seca.
7. Repetir os passos 4 a 6 até se obter uma pasta uniforme. Caso seja impossível misturar os constituintes, introduzir um pouco de superplastificante com água de amassadura.
8. Introduzir 1/3 agregado, e misturar durante 2 minutos.
9. Introduzir mais 1/5 da água da amassadura prevista e misturar durante 5 minutos.
10. Introduzir mais 1/3 do agregado e misturar durante 2 minutos.
11. Introduzir a restante água da amassadura prevista e misturar durante 5 minutos.
12. Introduzir o restante 1/3 do agregado e misturar durante 5 minutos ou até se obter uma pasta homogénea.

O tempo final das amassaduras foi longo, mas foi semelhante para todas as amassaduras.

3.6.2 Trabalhabilidade das argamassas frescas

De forma a avaliar o comportamento das argamassas frescas, efectuou-se um ensaio de espalhamento segundo a Norma EN 1015-3 [43]. Na Figura 3-6 apresenta-se o equipamento usado. Este ensaio foi efectuado logo após a conclusão das amassaduras, e apenas se realizou um ensaio por amassadura. O valor calculado é a média aritmética de duas leituras ortogonais, sendo apresentado com a precisão de décima de centímetro.

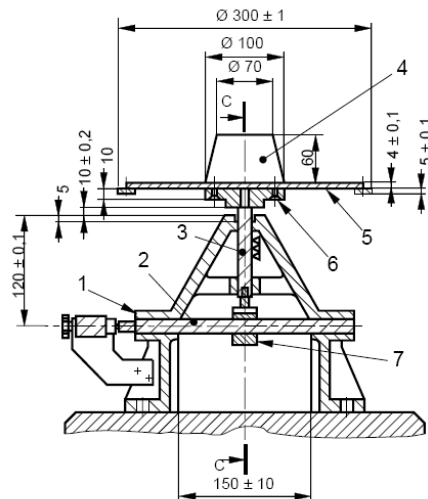


Figura 3-6 - Equipamento para ensaio de espalhamento

3.6.3 Moldagem e armazenamento

Os provetes foram moldados imediatamente a seguir à preparação das argamassas e ao ensaio de espalhamento. Com os moldes sobre uma mesa vibratória (Figura 3-8) procedeu-se ao enchimento uniforme com argamassa até metade da altura do provete. Seguiu-se um período de compactação com cerca de 10 segundos. Seguidamente picou-se a argamassa com a colher e encheu-se a totalidade do molde, também de um modo uniforme. Posteriormente realizou-se nova compactação durante 10 segundos. A seguir, procedeu-se ao transporte cuidadoso dos provetes até um local onde permanecerá cerca de 24 horas. Por fim, ainda foi necessário limpar os excessos de argamassa e alisar a superfície do provete.



Figura 3-7 - Moldagem da argamassa

Os provetes permaneceram no Laboratório de Materiais de Construção, 24 horas, findas as quais se procedeu às operações de desmoldagem. Estas foram efectuadas de modo a não danificar os provetes e os próprios moldes.

Após esta operação, armazenaram-se os provetes em recipientes de plástico, com água suficiente para os cobrir e de forma a terem todas as faces em contacto com a água, e a temperatura constante (Figura 3-9).



Figura 3-8 – Mesa vibratória



Figura 3-9 - Armazenamento dos provetes

3.6.4 Resistência à flexão

A resistência à flexão dos provetes foi efectuada segundo a Norma NP EN 196-1 [25]. Utilizaram-se séries de 3 provetes 40x40x160 mm³, para cada idade e cada amassadura, que foram submetidos ao ensaio de flexão numa máquina universal de ensaio, da marca LLOYD instruments, modelo LR30K [49], com as seguintes características (Quadro 3.17). Os provetes utilizados foram séries de 3 paralelos com 40x40x160 mm³, por cada amassadura, e por cada idade de 3, 7, 14, 21, 28 e 90 dias.

Quadro 3.17 - Características da Lloyd LR30K

Gama nominal	0 a 3000 kN
Resolução	0.1 kN (0 a 1000 kN); 1kN (1000 a 3000 kN)
Sentido	compressão

A realização destes ensaios foi sempre compatibilizada com os ensaios à flexão e de resistividade eléctrica. Primeiro, porque os ensaios à compressão serão efectuados com os provetes partidos, provenientes do ensaio à flexão. Segundo, porque desta forma se poderá relacionar mais facilmente os resultados do desempenho mecânico com a resistividade eléctrica.



Figura 3-10 – Máquina universal de ensaios Lloyd - ensaio à flexão

O ensaio foi formatado com dois estágios distintos, de forma a dotar a prensa de duas velocidades. Uma inicial muito lenta até chegar aos 5 N, evitando um arranque demasiadamente violento sobre o provete. Após se ter atingido os 5 N, a velocidade da prensa passa à velocidade referida na Norma [25], ou seja, 50 N/s. No Quadro 3.18 sintetiza-se toda esta informação.

Quadro 3.18 - Formatação do ensaio à flexão

Propriedades	Estágio 1	Estágio 2
Velocidade	1.0 mm/min.	50 N/s
Limite	5 N	7.5 mm

O valor da resistência à flexão de cada provete é obtido com a seguinte expressão, sendo os valores arredondados a 0.1 MPa. O valor da resistência à flexão de cada amassadura numa determinada idade, é obtido com a média aritmética dos valores individuais.

$$R_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (\text{eq. 3.8})$$

onde:

- R_f resistência à flexão (MPa);
- F_f carga aplicada ao centro do prisma, na rotura (N);
- b lado da secção quadrada do prisma (mm);
- l distância entre apoios (mm);

3.6.5 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão foi efectuada com recurso ao ensaio das metades originadas do ensaio à flexão, tendo-se utilizado uma série de 6 provetes de $40 \times 40 \times (\pm 80)$ mm³, para cada idade e cada amassadura, de forma a serem submetidos a uma máquina universal de ensaio, da marca *ELE*, com uma unidade de medida digital *DK38*, e um transdutor de força *C18/3MN I*. As principais características deste equipamento são as seguintes:

Quadro 3.19 - Características da ELE

Capacidade	30 kN
Banda de velocidades	0.001 to 508 mm/min
Precisão da velocidade	< 0.2 % no estado estacionário
Máximo deslocamento	870 mm
Largura entre colunas	404 mm
Resolução mínima	0.001
Precisão da carga	0.5%
Extensão da resolução	0.05 microns
Extensómetro	analógico ou digital
Sistema de medida de carga	EN ISO 7500: 2004 Class 0.5 ASTM E4
Temperatura de operação	5 °C a 35 °C



Figura 3-11 - Máquina universal de ensaios *ELE* - ensaio à compressão

O valor da resistência à compressão de cada provete é obtido com auxílio da seguinte expressão (eq. 3.8), com os valores arredondados a 0.1 MPa. O valor da resistência à compressão de cada amassadura numa determinada idade, é obtido com a média aritmética dos valores individuais. Caso um destes resultados individuais exceda $\pm 10\%$ da média dos restantes valores, este resultado individual é ignorado,

pelo que calcula-se a média dos resultados restantes. Este último passo é repetido até não haver resultados individuais estatisticamente díspares.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{eq. 3.9})$$

onde:

R_c resistência à compressão (MPa);

F_c carga máxima de rotura (N);

3.6.6 Resistividade eléctrica

Para o ensaio de resistividade eléctrica considerou-se como documento orientativo um procedimento de ensaio interno, PE-002 [50]. Este ensaio consistiu em medir a resistividade ao longo do tempo, de um provete cúbico com 15 cm de aresta e um provete cilíndrico com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Cada amassadura possuiu o seu conjunto de provetes representativos.

O equipamento utilizado é um resistivímetro de funcionamento a pilhas, da *CNS Farnel RM MK II* (Figura 3-14), que permite além de medir a resistividade eléctrica, medir a intensidade de corrente. Este aparelho tem uma sonda com 4 eléctrodos equidistantes, mas ajustáveis. Neste ensaio foram ajustados para 25 mm. O ensaio consiste em aplicar uma corrente alternada entre os eléctrodos exteriores e medir o potencial eléctrico entre os eléctrodos interiores. Na Figura 3-12, está representado um esquema de funcionamento dos eléctrodos [50].

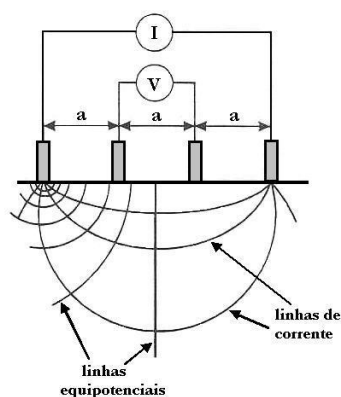


Figura 3-12 – Esquema de funcionamento dos eléctrodos

A resistividade eléctrica do provete é medida aplicando as seguintes expressões. Da lei de Ohm sabemos:

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{eq. 3.10})$$

então:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{eq. 3.11})$$

resolvendo:

$$\rho = \frac{V \cdot A}{L \cdot I} \quad (\text{eq. 3.12})$$

ou:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot V}{I} \quad (\text{eq. 3.13})$$

onde:

- R resistência eléctrica (Ohm);
- ρ resistividade eléctrica ($\Omega \cdot m$);
- V diferença de potencial (V);
- I intensidade da corrente (A);
- A área (cm^2);
- L comprimento (cm);

Antes de se realizadas as medições secou-se a superfície de cada provete. Nos provetes cúbicos foram efectuadas duas leituras perpendiculares por face, em duas faces opostas. Nos provetes cilíndricos foram efectuadas duas leituras com sentidos opostos, em três divisões equidistantes do provete. Na Figura 3-13 esquematizam-se estes procedimentos descritos.

As leituras da resistividade eléctrica são lidas directamente pelo equipamento, e o resultado de cada provete é a média aritmética dos resultados de cada leitura: 8 leituras para os provetes cúbicos e 6 leituras para os provetes cilíndricos. Os resultados são apresentados com uma casa decimal.

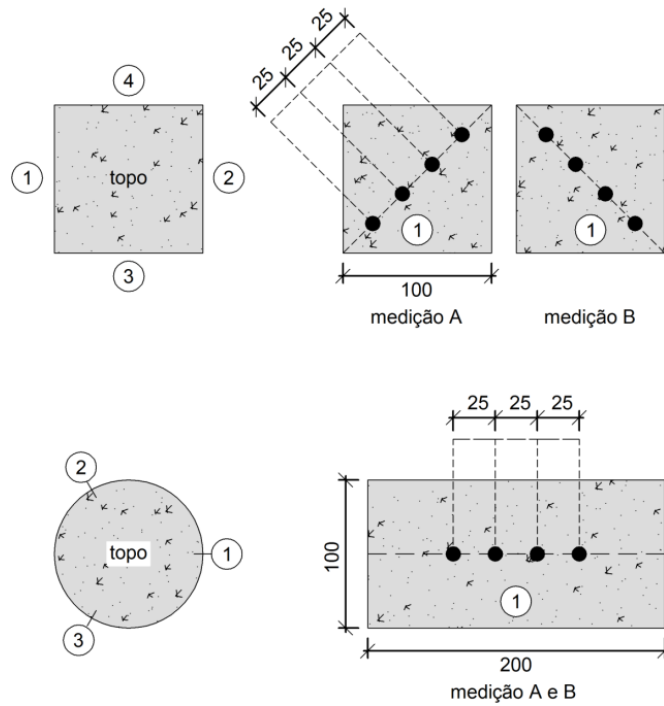


Figura 3-13 - Critérios de medida da resistividade eléctrica



Figura 3-14 - Equipamento para o ensaio de resistividade eléctrica

3.6.7 Difusão dos cloretos

A resistência à difusão dos cloretos das argamassas produzidas foi avaliada por intermédio da realização do ensaio de migração em regime não estacionário, segundo os procedimentos da Norma E 463 [51].

Para calcular o coeficiente de difusão utiliza-se a seguinte equação:

$$D = \frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot E} \quad (\text{eq. 3.14})$$

sendo:

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (\text{eq. 3.15})$$

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot E}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_0} \right) \quad (\text{eq. 3.16})$$

onde:

- D coeficiente de difusão em regime não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);
- z valor absoluto da valência do ião, para os cloretos, $z=1$;
- F constante de Faraday: $F=9.648 \times 10^{-4} \text{ (J/V.mol)}$;
- U valor absoluto da voltagem aplicada (V);
- R constante dos gases perfeitos: $R=8.314 \text{ (J/K.mol)}$;
- T valor médio das temperaturas inicial e final, na solução anódica (graus Kelvin);
- L espessura do provete (m);
- x_d valor médio da profundidade de penetração (m);
- t duração do ensaio (segundos);
- erf^{-1} inverso da função erro;
- c_d concentração de cloretos para a qual ocorre mudança de cor: $c_d \approx 0.07 \text{ N}$ para betão com cimento CEM I;
- c_0 concentração de cloretos na solução catódica: $c_0 \approx 2 \text{ N}$

$$\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot 0.07}{2} \right) = 1.28 \quad (\text{eq. 3.17})$$

Substituindo as constantes na fórmula geral, obteve-se a seguinte expressão simplificada, que foi utilizada:

$$D = \frac{0.0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(x_d - 0.0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L x_d}{U - 2}} \right) \quad (\text{eq. 3.18})$$

onde:

- D coeficiente de difusão em regime não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);
- U valor absoluto da voltagem aplicada (V);
- T valor médio das temperaturas inicial e final, na solução anódica ($^{\circ}\text{C}$);
- L espessura do provete (mm);

x_d valor médio da profundidade de penetração (mm);
 t duração do ensaio (horas);

Neste ensaio foram utilizados 3 provetes de cada amassadura, testados às idades de 28 e 90 dias. Os provetes são cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, provenientes do corte de provetes cilíndricos de 10 cm de diâmetro com 20 cm de altura.

Após o corte e lavagem dos provetes, estes foram submetidos num excicador à acção do vácuo durante 3 horas (a cerca de 0.8 bar). Seguidamente, com a bomba de vácuo em funcionamento, encheu-se o excicador com água para cobrir todos os provetes. Manteve-se o vácuo durante mais uma hora (a cerca de 0.6 bar), antes de deixar entrar ar no recipiente. Manteve-se o provete durante 18 horas em repouso.

Seguidamente, prepararam-se as soluções anódica e catódica, bem como os provetes e a respectiva instalação (Figura 3-15). Registou-se a temperatura inicial e aplicou-se a corrente inicial. Conforme os casos, foram efectuadas as correcções necessárias à corrente inicial, e ficou o ensaio a decorrer: ou 24 ou 48 horas. Após este período mediu-se a temperatura final, lavaram-se os provetes e partiram-se ao meio com auxílio de uma máquina universal de ensaio. Pulverizou-se sem demora com uma solução de AgNO_3 0.1N. Aguardou-se até ser visível o precipitado branco de cloreto de prata, pelo que mediu-se a penetração dos cloretos com recurso a uma fita métrica e esquadro, segundo sete pontos centrais equidistantes (Figura 3-16).



Figura 3-15 - Instalação do ensaio do coeficiente de difusão dos cloretos

Os resultados foram calculados com a expressão simplificada (eq. 3.18), arredondados com duas casas decimais. O valor da difusão dos cloretos em cada amassadura, numa determinada idade, é obtido com a média aritmética dos valores individuais.



Figura 3-16 - Medição da penetração dos cloretos

3.6.8 Porosidade aberta

Para determinar a porosidade aberta, adoptou-se um ensaio acelerado, cujo equipamento baseia-se no princípio da saturação por vácuo, e descrito na E 395 [52], citado por *Ferreira* [53]. Os provetes utilizados foram séries de três cubos com 50 mm de aresta, por cada amassadura, e por cada idade de 28 e 90 dias.

Os provetes foram numa primeira fase preparados: limpeza das faces com um pano húmido, de forma a eliminar a sujidade e a água em excesso; depois foram pesados e colocados na estufa a cerca de 110 °C, até se obter provetes com massa constante (M_0). Para se conseguir esse estado, foi necessário que em duas pesagens consecutivas, com 24 horas de intervalo, a perda de massa dos provetes fosse inferior a 0.2% da massa total.

Após esta preparação, o ensaio consistiu em submeter os provetes à acção do vácuo (a cerca de 0.8 bar), num excicador durante três horas (Figura 3-17). Após esse período, deixou-se entrar no excicador a água da rede pública, até cobrir os provetes cerca de 1 cm. Manteve-se o vácuo durante mais três horas. Por fim desligou-se a bomba e restabeleceu-se a pressão atmosférica no excicador, o que resulta numa pressão adicional, obrigando a água a entrar mais facilmente nos poros [53].



Figura 3-17 - Equipamento para ensaio de porosidade aberta

Assim, a porosidade aberta é determinada pela seguinte expressão:

$$A = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (\text{eq. 3.19})$$

onde:

- A porosidade aberta (%);
- m_1 massa no provete saturado no ar (g);
- m_2 massa submersa do provete saturado (g);
- m_3 massa do provete seco (g);

Os resultados são arredondados a uma casa decimal. O valor da porosidade aberta em cada amassadura, numa determinada idade, foi obtido com a média aritmética dos valores individuais.

3.6.9 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio teve como referência a *Norma EN 1015-18* [54]. Foram utilizados três provetes cúbicos com 50 mm de aresta, por cada amassadura, e foram submetidos a ensaio nas idades de 7, 14, 21, 28 e 90 dias. Os provetes foram numa primeira fase preparados: limpeza das faces com um pano húmido, de forma a eliminar a sujidade e a água em excesso; depois foram pesados e colocados na estufa a cerca de 110 °C, até se obter provetes com massa constante (M_0). Para se conseguir esse estado foi necessário que em duas pesagens consecutivas, com 24 horas de intervalo, a perda de massa dos provetes fosse inferior a 0.2% da massa total.

Seguidamente retiraram-se da estufa e deixaram-se arrefecer. Posto isto, foram cuidadosamente colocados num recipiente com água, sobre suportes apropriados, e com a face mais perfeita (50x50 mm²) em contacto com a água. A partir deste momento iniciava-se o período de leituras a intervalos crescentes com o tempo: 2, 4, 8, 15, 30 minutos; 1, 2, 4, 8, 16 horas; 1, 2, 4, 7 dias, e por aí adiante até chegar aos 90 dias. Para controlar o nível da água, teve-se o cuidado de o manter sempre a uma cota de 2.5 ± 1 mm (metade da *Norma*) da face inferior do provete, desde o início até ao fim do ensaio.

Quadro 3.20 - Frequência programada do ensaio de absorção por capilaridade

Tempo	
Intervalo (var.)	Duração ti (var.)
<i>Ensaio</i>	0
2 min.	2 min.
2 min.	4 min.
4 min.	8 min.
7 min.	15 min.
15 min.	30 min.
30 min.	1 hora
1 hora	2 horas
2 horas	4 horas
4 horas	8 horas
8 horas	16 horas
8 horas	1 dia
1 dia	2 dias
2 dias	4 dias
3 dias	7 dias
7 dias	14 dias
7 dias	21 dias
7 dias	28 dias
7 dias	35 dias
7 dias	42 dias
7 dias	49 dias
7 dias	56 dias
7 dias	63 dias
7 dias	70 dias
7 dias	77 dias
7 dias	84 dias
7 dias	91 dias

Foram efectuadas leituras sistemáticas da massa dos provetes, de forma a avaliar a absorção até aos 90 dias. Nas paragens escoou-se a água superficial e colocaram-se os provetes em cima de material não absorvente (vidro), durante 30 segundos, e em seguida procedeu-se à sua pesagem.

Efectuaram-se dois tipos de leituras: leitura da massa ao longo do tempo, e leitura da ascensão capilar. Para esta última leitura, dado haver um grande grau de subjectividade e erro, foi adoptado um procedimento de forma a uniformizar os

resultados: leitura da ascensão máxima a meio da face. Os provetes ficaram sempre no mesmo local, ao abrigo da luz solar, durante todo o período de duração do ensaio.

Para calcular a absorção por capilaridade calcula-se o aumento de massa, dividido pela área em contacto com a água. Como não foi utilizado um mecanismo de impermeabilização das faces laterais dos provetes, tal como tinta epoxídica, foi considerada a área correspondente à altura da água de 2.5 mm em contacto com as 4 faces. Assim, a expressão que foi utilizada para o cálculo foi a expressão regulamentar, mas adaptada às condições deste ensaio

$$C = \frac{M_i - M_0}{3000} \times 1000 \quad (\text{eq. 3.20})$$

onde:

C absorção capilar (mg/mm²);

M₀ massa do provete antes do ensaio (g);

M_i massa do provete no instante *i* (g);

Foi determinado para cada instante de tempo a absorção capilar, permitindo realizar os diagramas representativos da cinética de absorção capilar, expressando-a em função da raiz quadrada do tempo. Estes diagramas são disponibilizados com escalas a 90 dias e com escalas nas idades iniciais, pois segundo *Camões* [27] as primeiras quatro horas são representativas da durabilidade das misturas uma vez que é nas idades jovens que se realiza o preenchimento dos poros de maior diâmetro, principais responsáveis pela penetração de fluidos líquidos e gasosos nos betões. Também determinou-se o coeficiente de capilaridade, que é representado pela regressão linear da absorção nas primeiras quatro horas de ensaio.

Análise de resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados, a recolha de dados dos vários ensaios, bem como a análise estatística. São também discutidos alguns destes resultados de forma a tentar despistar os efeitos das várias composições em estudo, assim como criticar os valores obtidos, salientando a sua eventual propensão para representar a realidade.

Tal como foi referido no capítulo 2 acerca das sinergias, os dados serão apresentados e trabalhados de acordo com várias abordagens disponíveis, desde a simples comparação de resultados, análises exploratórias, bem como aos relacionamentos de determinados parâmetros de forma a tentar despistar da melhor forma as características dos materiais ensaiados. Qualquer que seja a metodologia, o material gráfico apresentado foi pensado de modo a ser coerente, tanto em conteúdo como na forma, produzindo o menor ruído possível e destacando o que é fundamental [55]. A ferramenta utilizada para o efeito foi o programa *Excel* [56].

Não foi descurada uma análise dos custos envolvidos nas várias composições e a sua projecção nos resultados do produto acabado. Este é também um parâmetro de interesse no desenvolvimento e caracterização de um material.

4.2 Análise estatística dos resultados

A ciência não se pode compadecer com intuição, pelo menos quando se necessita de reflexões frias, pois não é fácil avaliar a certeza e a incerteza dos resultados sem a bengala qualitativa da estatística [57]. Por isso mesmo, os resultados apresentados são alvo de uma análise estatística, ou quanto muito de um enquadramento estatístico, pois um mero resultado não é com toda a certeza suficiente para o caracterizar devidamente. É necessário então dotar os resultados de componentes adequados, de forma a extrair a melhor informação possível destes e orientar melhor a compreensão da realidade.

Muitos dos resultados são obtidos directamente pelos respectivos ensaios, obedecendo a procedimentos normalizados, pelo que numa primeira fase, estes possuem por si só algum enquadramento. No entanto, não é excessivo representar esses mesmos resultados numa dimensão própria e estatisticamente comparativa. Já no que se refere aos erros ou “desvios” decorrentes do cumprimento das próprias *Normas*, estes não estão devidamente contemplados, embora sendo precisamente “*Norma*”, permitem uma comparação capaz dos resultados. O mesmo não poderá dizer-se do erro sistemático ou dos “desvios” em determinados resultados, que terão ser caracterizados com mais informação [58], saindo fora do âmbito desta dissertação.

A estatística aplicada ao presente estudo está englobada no que se denomina de “estatística descritiva”, “análise exploratória”, ou ainda “análise preliminar de dados”, em que o objectivo é reduzir a quantidade de informação das amostras, e de uma forma mais resumida, descrever as características mais proeminentes. Uma ferramenta para conseguir isso é o cálculo numérico de medidas amostrais, que poderão ser de vários tipos: tendência ou localização, dispersão, localização relativa, assimetria, etc. Neste trabalho foram utilizados principalmente os dois primeiros tipos, que serão descritos neste seguimento.

4.2.1 Tendência ou localização central

As medidas de localização são indicadores, que representam de uma forma global um conjunto de números. Destas medidas interessa a este estudo a média.

4.2.1.1 Média

A média representa o centro de massa de vários valores, podendo ser calculada pela seguinte expressão:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{eq. 4.1})$$

onde:

- \bar{x} média aritmética;
- x_i elementos da amostra;
- n dimensão da amostra;

4.2.2 Dispersão

As medidas de dispersão permitem quantificar a variabilidade de uma amostra. Estas medidas devem ser usadas juntamente com as medidas de localização, pois estas por si só não são suficientes para caracterizar um resultado [53] [59]. Este tipo de medidas decorre da paridade de conceitos precisão/exactidão: por exemplo, uma determinada medida de localização poderá ser exacta, mas o espaço amostral ser demasiadamente alto, evidenciando dados muito pouco coerentes, logo pouco precisos. Com as medidas de dispersão é possível quantificar este tipo de acontecimentos.

4.2.2.1 Variância

A variância é medida de dispersão mais importante, e poderá ser determinada como a média dos quadrados dos desvios dos resultados:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (\text{eq. 4.2})$$

onde:

- s^2 variância;
- \bar{x} média aritmética;
- x_i elementos da amostra;
- n dimensão da amostra;

4.2.2.2 Desvio padrão

O desvio padrão tem a vantagem de ser apresentado na mesma unidade das observações, pelo que é muito útil para relacionar resultados da mesma natureza. Poderá ser determinado como a raiz quadrada da dispersão:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (\text{eq. 4.3})$$

onde:

- s desvio padrão;
- \bar{x} média aritmética;
- x_i elementos da amostra;
- n dimensão da amostra;

4.2.2.3 Coeficiente de variação

O coeficiente de variação é uma medida relativa de dispersão e tem a virtude de poder ser utilizada para comparar distribuições diferentes. No presente estudo é uma medida fundamental precisamente porque os tipos de resultados obtidos pertencem a distribuições completamente distintas:

$$cv = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (\text{eq. 4.4})$$

onde:

- cv coeficiente de variação;
- s desvio padrão;
- \bar{x} média aritmética;

4.3 Constituição da argamassa

Apresenta-se um resumo da nomenclatura das várias composições e os seus constituintes. A descrição mais detalhada dos constituintes de cada amassadura já foi abordada no capítulo 3 (Quadro 3.14).

Apresenta-se um resumo da nomenclatura das várias composições e os seus constituintes (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Composições

Comp.	Designação	
I	C100+MTK0+CV0-0,55	C quantidade de massa de cimento relativamente à quantidade de massa ligante (%);
II	C90+MTK10+CV0-0,55	MTK quantidade de massa de metacaulino relativamente à quantidade de massa ligante (%);
III	C80+MTK0+CV20-0,55	CV quantidade de massa de cinzas volantes relativamente à quantidade de massa ligante (%);
IV	C60+MTK0+CV40-0,55	0,55 relação água/ligante;
V	C40+MTK0+CV60-0,55	
VI	C70+MTK10+CV20	
VII	C50+MTK10+CV40-0,55	
VIII	C30+MTK10+CV10-0,55	
IX	C75+MTK8.3+CV16.7-0,46	

Com os volumes já determinados para o cálculo dos vários constituintes das composições, segundo a metodologia descrita no capítulo 3, pode-se calcular o volume da pasta ligante como sendo o somatório do volume do ligante, aditivos, adjuvantes, água e vazios:

$$\text{Volume pasta ligante} = vl = V_L + V_A + V_{ADJ} + V_V \quad (\text{eq. 4.5})$$

desenvolvendo:

$$vl = V_C + V_{MTK} + V_{CV} + V_A + V_{ADJ} + V_V \quad (\text{eq. 4.6})$$

onde:

- vl volume da pasta ligante (litros);
- V_L volume do ligante (litros);
- V_C volume do cimento (litros);
- V_{MTK} volume do metacaulino (litros);
- V_{CV} volume das cinzas volantes (litros);
- V_A volume da água (litros);
- V_{ADI} volume dos aditivos (litros);
- V_{ADJ} volume dos adjuvantes (litros);
- V_{SP} volume do superplastificante (litros);

Nos dois diagramas seguintes apresenta-se o volume da pasta ligante e a sua variação relativamente à composição padrão (I).

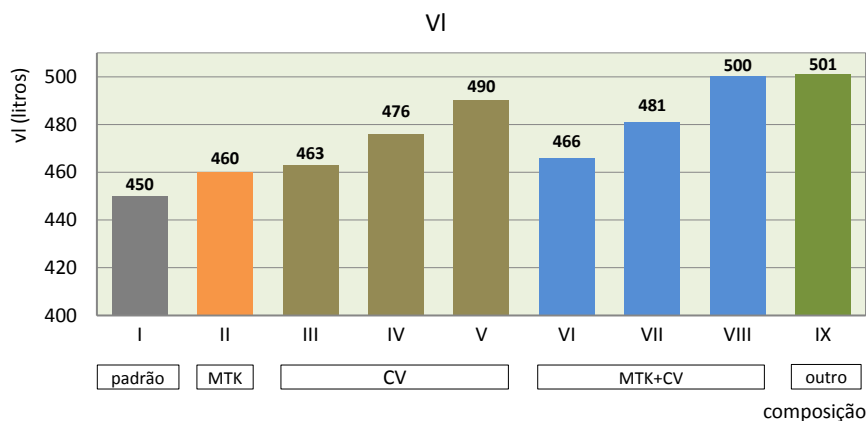


Figura 4-1 - Volume da pasta ligante

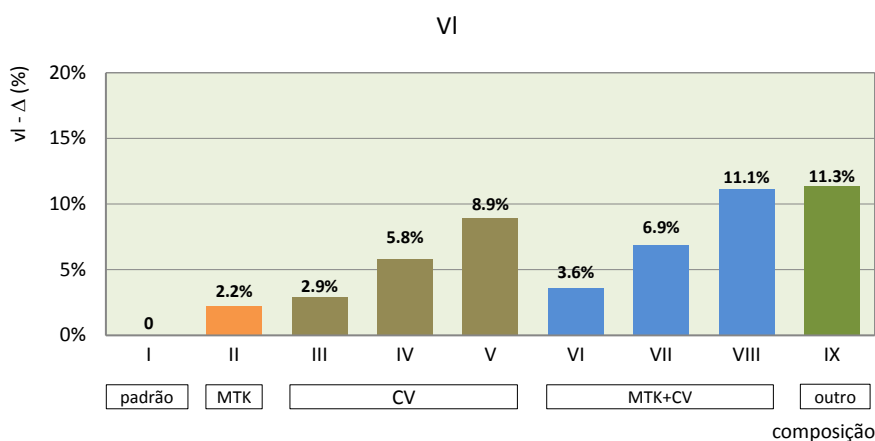


Figura 4-2 - Volume da pasta ligante – variação em função da composição padrão

4.4 Trabalhabilidade

O ensaio para medir a trabalhabilidade das pastas [43] forneceu os seguintes resultados (Quadro 4.2 e Figura 4-3).

Quadro 4.2 - Espalhamento

Resultados		COMPOSIÇÃO								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Espalham.	(cm)	17,5	30,0	14,0	18,0	20,0	15,5	22,0	20,0	20,0
variação	(%)	0,0	71,4%	-20,0%	2,9%	14,3%	-11,4%	25,7%	14,3%	14,3%

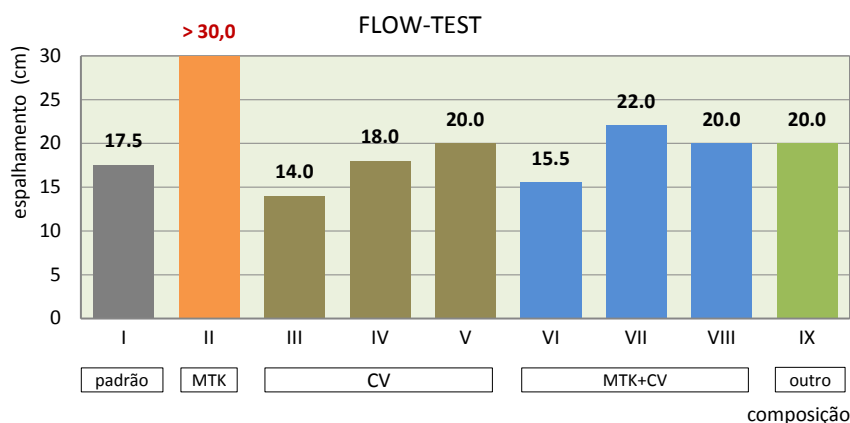


Figura 4-3 - Trabalhabilidade das composições

Este ensaio forneceu alguns valores atípicos porque, tal como se referiu no capítulo anterior, foi necessário utilizar superplastificante para se conseguir misturar convenientemente os constituintes da argamassa. Confirma-se que o superplastificante não seria necessário para a trabalhabilidade da pasta após a amassadura e a exagerada plasticidade da composição II é bem indicativa desse facto. Em pequenas percentagens de substituição do cimento por adição simples de metacaulino (cerca de 10%), a trabalhabilidade não será tão importante ou crítica.

A incorporação de cinzas volantes origina pastas de trabalhabilidade crescente em função da quantidade de cinzas. Este comportamento é o esperado. No entanto, este ensaio forneceu uma redução para a composição com adição simples de cinzas, o que poderá ser explicado pelas dificuldades de amassadura, pelo que não deverá ser dada muita importância.

A incorporação de cinzas e metacaulino origina pastas com trabalhabilidade inferior do que aquelas que tem apenas cinzas. Poderá verificar-se este facto ao comparar a mistura V (CV60) e VIII (MTK10+CV60). Na prática estes dois aditivos são complementares, pois a perda de trabalhabilidade resultante da adição de metacaulino é compensada pelas cinzas. As cinzas proporcionam um efeito mitigador desta desvantagem da utilização do metacaulino, sugerindo que para betões de elevado volume de cinzas volantes (BEVCV) poderia adicionar-se mais metacaulino (se necessário) sem perdas tão elevadas de trabalhabilidade. A este propósito, sugere-se um outro conceito mais interessante que será a utilização de grandes volumes de cinzas com metacaulino, e empregar superplastificante de forma a ter-mos razões A/L muito baixas (0.3 ou mesmo 0.2). Conseguia-se desta forma obter-se um material muito compacto, durável, com resistências iniciais promissoras, e acima de tudo com muito pouco cimento. Enfim, um betão eco-eficiente.

4.5 Resistências mecânicas

Para caracterizar as resistências mecânicas recorreu-se aos ensaios de flexão e compressão, mas tentou-se alargar-se a análise ao comparar e relacionar os resultados deste dois ensaios. Também examinou-se a evolução das massas dos provetes e comparou-se os erros dos ensaios através dos coeficientes de variação dos resultados ou dos coeficientes de correlação R^2 dos modelos matemáticos adoptados.

4.5.1 Resistência à flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram efectuados sobre provetes 40x40x160 mm³, utilizando-se no mínimo 3 provetes por composição e em cada idade. Determinou-se a massa de cada provete e calculou-se a média e o coeficiente de variação. Para determinar a resistência calculou-se a média da tensão individual de cada provete e o respectivo coeficiente de variação. No quadro seguinte apresenta-se um resumo de todos os resultados obtidos.

Quadro 4.3 - Massa dos provetes e resistência à flexão

Composição	Idade	Massa		Resistência à flexão	
		m _m	c. variação	Rf	c. variação
	(dias)	(g)	(%)	(MPa)	(%)
I	7	558,5	0,64%	4,4	6,96%
	14	576,9	0,19%	5,6	2,90%
	21	567,8	2,78%	5,7	12,46%
	28	582,0	1,93%	6,0	4,24%
	90	580,7	3,35%	6,8	3,29%
II	7	592,6	0,70%	6,3	1,41%
	14	592,3	1,32%	6,8	5,18%
	21	595,3	0,35%	7,1	5,63%
	28	597,6	0,41%	--	5,50%
	35	591,6	0,19%	7,1	5,72%
	90	588,6	0,47%	8,0	3,17%
III	3	557,9	0,26%	0,9	3,38%
	7	573,3	0,55%	3,1	4,83%
	14	567,0	0,80%	3,9	3,99%
	21	568,0	0,57%	4,2	3,99%
	28	561,9	1,92%	4,4	3,91%
IV	3	571,9	0,89%	0,9	7,22%
	7	570,5	1,14%	2,1	5,13%
	14	570,2	0,52%	3,0	2,84%
	21	578,8	0,31%	3,5	0,19%
	28	572,7	0,75%	3,5	4,82%
V	3	588,3	0,34%	0,8	0,89%
	7	582,4	0,99%	1,4	6,64%
	14	573,5	1,12%	2,1	5,53%
	21	580,9	0,92%	2,3	4,64%
	28	572,9	3,65%	2,7	1,84%
VI	3	556,9	0,50%	3,1	1,80%
	7	558,9	0,17%	4,6	6,79%
	14	571,9	0,39%	5,5	6,27%
	19	558,9	2,46%	6,4	1,53%
	35	560,0	0,59%	--	6,09%
	90	560,1	1,28%	6,3	3,11%
VII	4	569,5	0,41%	2,7	2,44%
	7	581,1	3,49%	3,8	0,74%
	14	573,1	1,43%	5,1	6,82%
	23	575,7	0,63%	5,9	1,63%
	39	578,8	2,59%	5,8	4,54%
	94	575,8	0,65%	6,4	3,75%
VIII	4	584,0	1,92%	1,5	10,35%
	7	557,7	2,05%	2,1	0,74%
	15	--	--	3,9	1,84%
	20	574,0	0,87%	3,9	1,71%
	25	579,4	0,16%	4,2	9,33%
	41	573,6	0,95%	4,1	2,04%
	96	576,0	0,72%	4,3	9,26%
IX	7	581,6	0,80%	5,3	11,65%
	14	596,7	0,52%	7,4	4,72%
	21	580,8	1,04%	--	2,97%
	28	591,9	2,05%	8,0	3,63%
	90	582,6	0,25%	9,7	3,94%

Também poderá ser interessante estudar a evolução das massas dos provetes ao longo do tempo e relativamente a cada tipo de composição. Efectuaram-se para esse efeito dois diagramas: o primeiro diz respeito à evolução no tempo da massa dos provetes (Figura 4-4). O segundo refere-se à variação da massa em função da composição padrão, I (Figura 4-5).

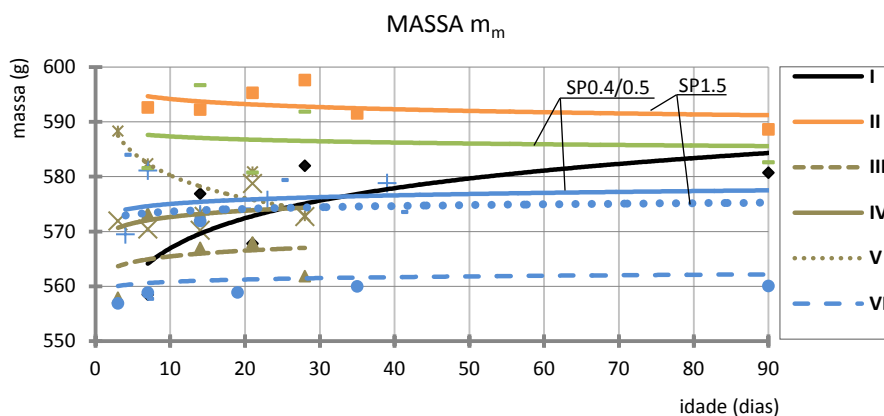


Figura 4-4 - Evolução no tempo da massa m_m

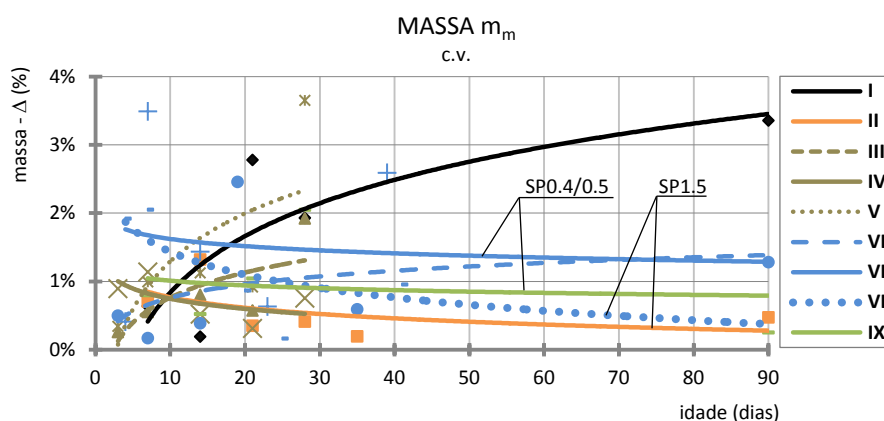


Figura 4-5 - Evolução no tempo da massa m_m - variação em função da composição padrão

Poderá desde logo verificar-se que de uma maneira geral os provetes mais pesados correspondem aos mais resistentes. Destacam-se como mais pesados e mais resistentes a composição II (MTK10) e a IX (menor A/L), se bem que a correspondência não seja directa. Deverá notar-se que a estas composições mais pesadas (com a excepção da composição padrão), correspondem às composições onde foi utilizado superplastificante. Este facto poderá relacionar-se com a maior compacidade do provete, e conseqüentemente com o menor índice de vazios.

Um dado estranho é o facto da composição padrão aparentemente aumentar de massa ao longo do tempo, acompanhado de uma subida do seu coeficiente de variação. Porém, os dados subjacentes às linhas de tendência sugerem que tal facto deve-se mais à dispersão de resultados e à reduzida amostragem, do que a uma

tendência vincada da composição. Aliás, para este tipo de análise seria conveniente dispor de um maior número de ensaios, pelo que deverá haver uma grande prudência nestas observações efectuadas.

Precisamente para analisar melhor o desempenho mecânico à flexão com os resultados deste ensaio, foram efectuados os cálculos das linhas de tendência para cada uma das composições, utilizando o método dos mínimos quadrados disponível no software *Excel*, cujas equações e parâmetros R^2 são apresentados no quadro seguinte. Com estas equações foram ainda elaborados dois diagramas que relacionam a resistência à flexão com a idade, sendo uma destas, a ampliação para o estudo nas idades mais jovens, até aos 28 dias (Figura 4-6 e Figura 4-7).

Quadro 4.4 - Resistência à flexão - características das linhas de tendência

Composição	Resistência à flexão	
	Equação da tendência	Aproximação
	$y=a(x)+b$	R^2
I	$y = 1,0209\ln(x) + 2,5313$	0,9919
II	$y = 1,1994\ln(x) + 3,2358$	0,9680
III	$y = 0,8028\ln(x) + 1,4603$	0,8468
IV	$y = 0,6335\ln(x) + 1,1594$	0,8612
V	$y = 0,4465\ln(x) + 0,8408$	0,8589
VI	$y = 1,0132\ln(x) + 2,5195$	0,9361
VII	$y = 0,9865\ln(x) + 2,1465$	0,9543
VIII	$y = 0,707\ln(x) + 1,4118$	0,8695
IX	$y = 1,4183\ln(x) + 3,2263$	0,9881

É patente neste quadro que as curvas de tendência apresentam coeficientes de R^2 acima dos 0.85. Os valores mais baixos correspondem às misturas com cinzas ou misturas ternárias com 60% de cinzas.

Nos diagramas seguintes poderá verificar-se um facto já conhecido e bem patente nestes resultados: é o atraso que as cinzas volantes provocam na resistência à flexão, reduzindo drasticamente a resistência nas primeiras idades, sendo esta redução mais elevada quanto maior a incorporação de cinzas. Isto deve-se por uma lado à reduzida disponibilidade de hidróxido de cálcio (proveniente da reacção do cimento) para reagir com as cinzas, e por outro lado pelo facto de esta reacção ser muito lenta [27].

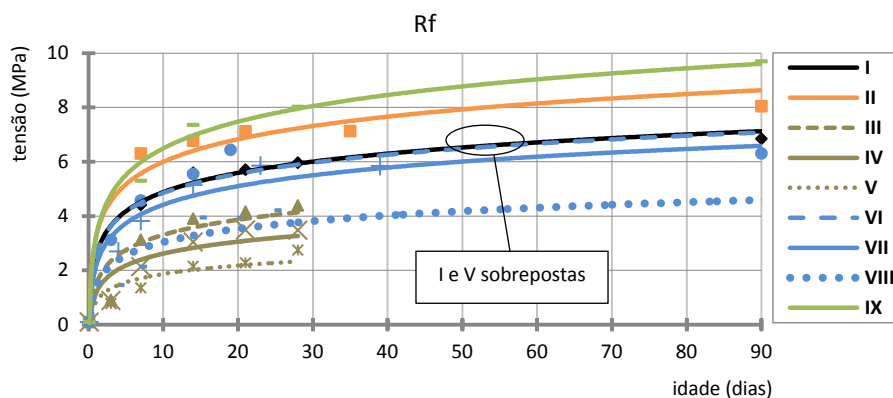


Figura 4-6 - Resistência à flexão até aos 90 dias

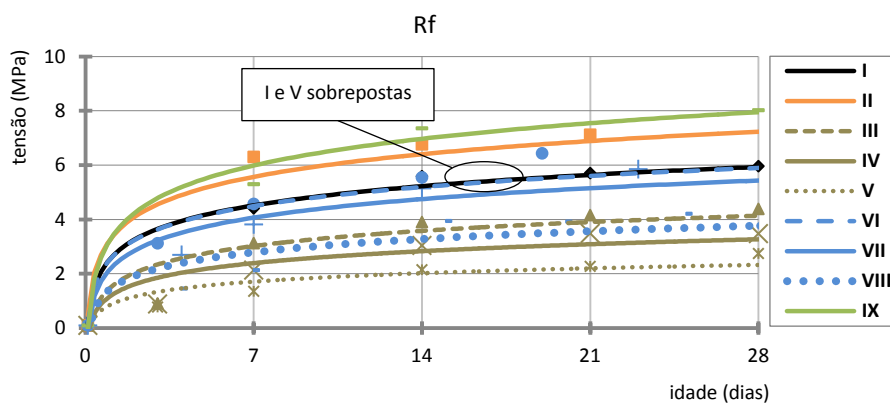


Figura 4-7 - Resistência à flexão até aos 28 dias

Verifica-se neste ensaio uma das grandes desvantagens da utilização de grandes quantidades deste aditivo, pois tal como já se referiu, penaliza em muito a resistência nas idades jovens. Pese embora a tendência poderá ser a de recuperar a resistência com o tempo (à medida que é disponibilizado mais hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento), mas mesmo assim dependendo sempre do tipo de cinzas usado, pois há cinzas que penalizam as resistências em todas as idades.

Poderá também observar-se que contrariamente às cinzas, o metacaulino potencia a resistência à flexão em todas as idades, e com todas as percentagens de substituição. Este facto é importante pois verifica-se na composição V (CV60) um decréscimo crítico da resistência aos 3 dias, mas com a incorporação de 10% de metacaulino (composição VIII) este valor foi substancialmente corrigido. O metacaulino ao contrário das cinzas, reage muito mais rapidamente com o hidróxido de cálcio. Fica aqui no entanto a dúvida muito interessante, se a introdução de metacaulino acelera as reacções das cinzas, pois os elementos disponíveis não são suficientemente conclusivos. Sabemos no entanto segundo *Camões* [27], que a uma maior

compacidade deverá esperar-se maior resistência à flexão, o que poderá indicar que as composições com melhor desempenho serão as mais compactas, e nesta perspectiva o metacaulino sendo um material muito mais fino e reactivo poderá ter um papel predominante.

Por fim, poderá relacionar-se a resistência à flexão com a evolução no tempo da massa e do seu coeficiente de variação. Verifica-se que as duas composições mais pesadas são as mais resistentes em todas as idades, e encontra-se correspondência para a terceira mais pesada (composição padrão), a partir dos 28 dias.

Relativamente à evolução no tempo, os resultados sugerem que o valor potencial do metacaulino poderá não decrescer significativamente, embora o efeito pozolânico não seja perfeitamente visível nesta janela de 90 dias. De forma a estudar melhor este aspecto foi determinado o índice de actividade em flexão (Figura 4-8). Este índice relaciona a tensão de cada composição em função da composição padrão, o que equivale a dizer que relaciona o potencial das adições.

Também foi efectuada uma previsão da evolução deste índice até 1000 dias pelo método dos mínimos quadrados (Figura 4-9). Se bem que esta seja algo grosseira, nomeadamente no que se refere às adições de cinzas (com ensaios apenas até aos 28 dias), é apenas um indício de uma possível evolução do efeito pozolânico.

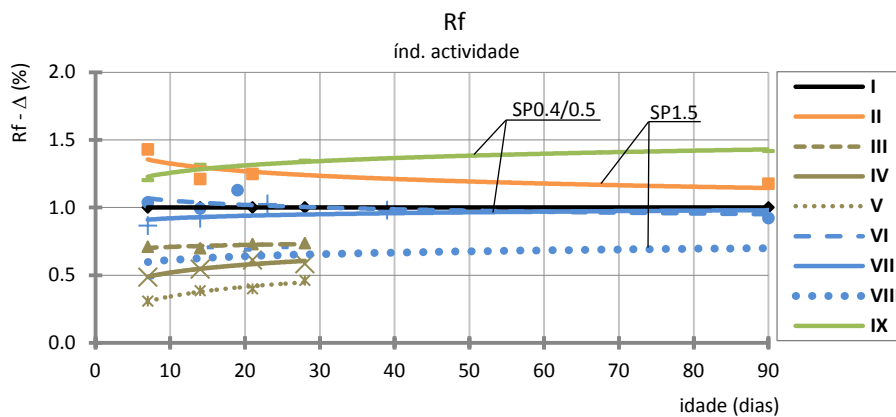


Figura 4-8 - Resistência à flexão - índice de actividade

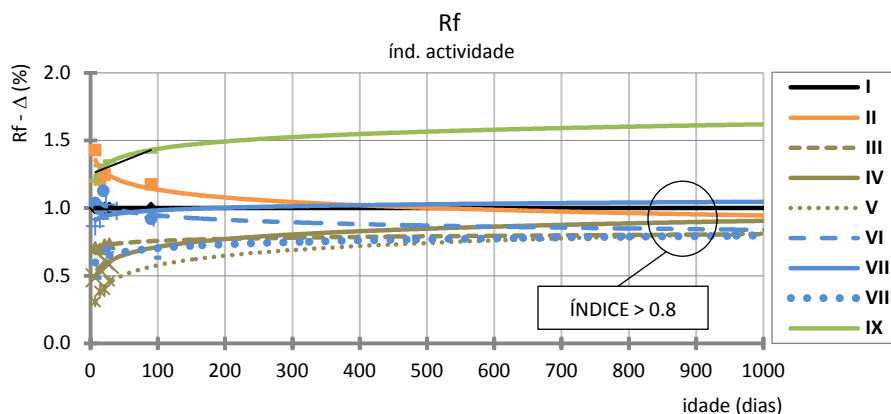


Figura 4-9 - Resistência à flexão - previsão do índice de actividade para 1000 dias

Constata-se mais uma vez e de forma clara, a redução das resistências devido à utilização de cinzas, e a correcção nas idades jovens proporcionada pelo metacaulino nas composições até 40% de cinzas, como acontece na composição V e VI (CV60 e MTK10+CV20 respectivamente). Repare-se que a proporção apresentada nas curvas com cinzas não é acompanhada de igual modo nas composições ternárias (VI, VII e VIII), talvez devido à sensibilidade deste ensaio ao superplastificante ou a outro parâmetro não despistado. De qualquer maneira, prevê-se que a longo prazo o coeficiente de redução seja sempre superior a 80%. O valor elevado apresentado para a composição IX deve-se à excelente compacidade que a diminuição da relação A/L e o metacaulino proporcionaram, resultando em ganhos muito elevados.

Poderá também anotar-se a correcção completa que a incorporação de metacaulino produziu na composição III (CV20) em relação à composição padrão, de modo semelhante para todas as idades, o que sugere uma vez mais o papel decisivo que o metacaulino poderá ter na mitigação das resistências iniciais baixas nos betões com grande incorporação de cinzas.

Estes efeitos poderão ser visualizados de forma mais clara através de diagramas de barras com as tensões obtidas aos 28 e 90 dias (Figura 4-10), e se os compararmos com os resultados da composição padrão (I), obtendo assim o índice de actividade de cada mistura (Figura 4-11).

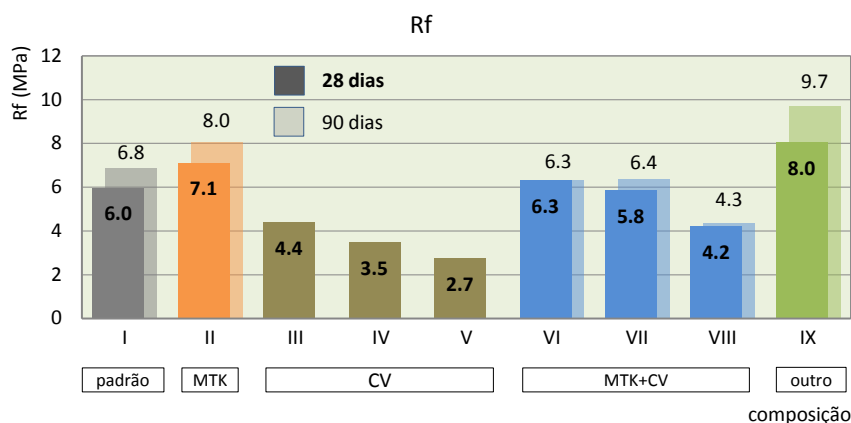


Figura 4-10 – Comparação da resistência à flexão aos 28 e 90 dias

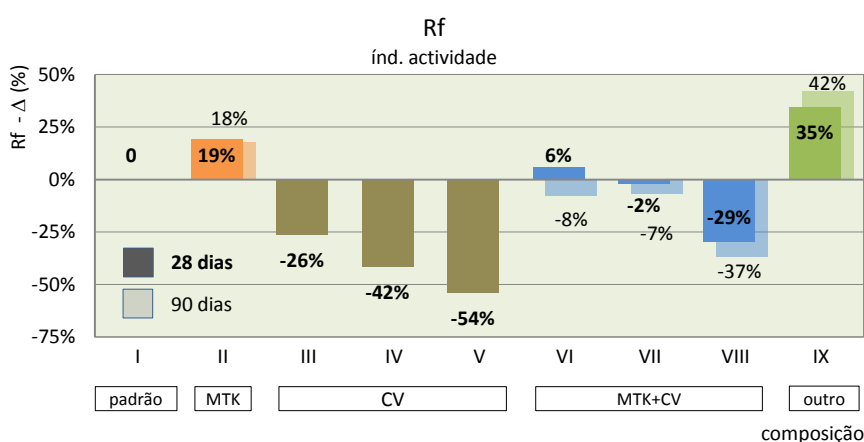


Figura 4-11 – Índice de actividade na resistência à flexão aos 28 e 90 dias

Poderá verificar-se quantitativamente o efeito que o metacaulino produz e a sua projecção para as composições com cinzas: o aumento de cerca de 20% da resistência final em adições simples, mantendo-se em todas as composições onde é incorporado. Na composição VII (MTK10 + CV40) poderia estar-se perante um caso particular de potencial máximo (mais de 50%).

Para analisar melhor este aspecto foi calculado o índice de desempenho da incorporação do metacaulino nas composições ternárias face às composições binárias de cimento e cinzas volantes. A este índice chamou-se “índice de eficiência ternária”, que na prática indica qual o ganho ou perda que apresentam as composições pelo facto de se adicionar 10% de metacaulino (Figura 4-12).

Os resultados evidenciam um ganho de 44% da resistência face à verificada sem metacaulino, e superior ao que se obteria pela simples redução da razão A/L numa composição ternária. Este facto é bastante interessante na medida em que sugere que para melhorar o desempenho mecânico de uma composição com incorporação

de cinzas (sem perder significativamente a trabalhabilidade), poderá ser preferível a incorporação de metacaulino do que reduzir a razão A/L e ser obrigado a utilizar adjuvantes para aumentar a plasticidade.

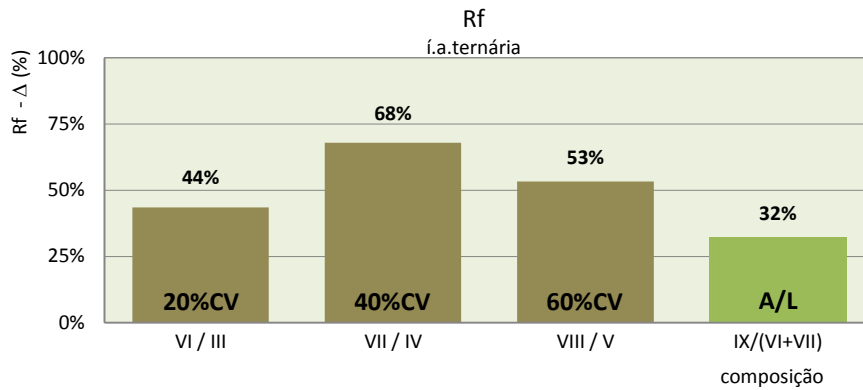


Figura 4-12 - Resistência à flexão - efeito da incorporação de metacaulino

4.5.2 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram efectuados sobre provetes resultantes do ensaio à flexão, obtendo-se prismas com cerca de 40x40x80 mm³, utilizando-se neste caso um mínimo de 6 provetes por composição e em cada idade. Para determinar a resistência calculou-se a média da tensão individual de cada provete e respectivo coeficiente de variação. No quadro seguinte apresenta-se um resumo de todos os resultados obtidos.

Quadro 4.5 - Massa dos provetes e resistência à compressão

Composição	Idade	Massa		Resistência à compressão	
		m _m	c. variação	Rf	c. variação
	(dias)	(g)	(%)	(MPa)	(%)
I	7	558,5	0,64%	33,0	3,11%
	14	576,9	0,19%	41,6	0,98%
	21	567,8	2,78%	42,4	3,53%
	28	582,0	1,93%	45,0	3,57%
	90	580,7	3,35%	47,3	6,01%
II	7	592,6	0,70%	48,9	1,63%
	14	592,3	1,32%	54,0	4,54%
	21	595,3	0,35%	55,3	4,16%
	28	597,6	0,41%	55,3	4,16%
	35	591,6	0,19%	56,5	2,37%
	90	588,6	0,47%	60,2	3,41%
III	3	557,9	0,26%	4,4	4,75%
	7	573,3	0,55%	18,3	2,46%
	14	567,0	0,80%	23,4	3,61%
	21	568,0	0,57%	25,5	2,77%
	28	561,9	1,92%	28,5	1,58%
IV	3	571,9	0,89%	4,4	6,60%
	7	570,5	1,14%	11,0	4,63%
	14	570,2	0,52%	16,7	5,16%
	21	578,8	0,31%	19,4	4,40%
	28	572,7	0,75%	20,9	1,75%
V	3	588,3	0,34%	3,4	3,29%
	7	582,4	0,99%	6,5	1,44%
	14	573,5	1,12%	9,9	0,67%
	21	580,9	0,92%	12,7	2,80%
	28	572,9	3,65%	13,4	2,73%
VI	3	556,9	0,50%	19,5	3,82%
	7	558,9	0,17%	30,7	0,98%
	14	571,9	0,39%	33,0	4,13%
	19	558,9	2,46%	36,1	3,00%
	35	560,0	0,59%	39,3	2,89%
	90	560,1	1,28%	43,9	2,89%
VII	4	569,5	0,41%	16,5	2,76%
	7	581,1	3,49%	21,9	2,46%
	14	573,1	1,43%	27,3	3,88%
	23	575,7	0,63%	30,7	2,56%
	39	578,8	2,59%	35,5	2,63%
	94	575,8	0,65%	36,9	1,24%
VIII	4	584,0	1,92%	7,1	7,92%
	7	557,7	2,05%	13,7	2,98%
	15	--	--	23,0	3,06%
	20	574,0	0,87%	24,2	6,14%
	25	579,4	0,16%	26,7	2,22%
	41	573,6	0,95%	28,6	5,50%
	96	576,0	0,72%	32,4	1,43%
IX	7	581,6	0,80%	40,3	1,82%
	14	596,7	0,52%	48,7	2,49%
	21	580,8	1,04%	--	4,42%
	28	591,9	2,05%	56,8	2,84%
	90	582,6	0,25%	64,1	3,93%

De forma idêntica ao estudo do ensaio à flexão, foram efectuados os cálculos das linhas de tendência para cada uma das composições utilizando o mesmo software (Excel), e cujas equações e parâmetros R² são apresentados no Quadro 4.6. Com estas equações foram elaborados dois diagramas que relacionam a resistência à flexão com a idade, sendo um deles uma ampliação para estudo nas idades mais jovens. Determinou-se também o desenvolvimento das tensões ao longo do tempo, o que originou dois diagramas, um para análise até aos 28 dias e outro para análise até aos 90 dias.

Quadro 4.6 - Resistência à compressão - características das linhas de tendência

Composição	Resistência à compressão	
	Equação da tendência	Aproximação
	$y=a(x)+b$	R ²
I	$y = 1,0209\ln(x) + 2,5313$	0,9746
II	$y = 1,1994\ln(x) + 3,2358$	0,9560
III	$y = 0,8028\ln(x) + 1,4603$	0,8279
IV	$y = 0,6335\ln(x) + 1,1594$	0,8427
V	$y = 2,3315\ln(x) + 3,8603$	0,8452
VI	$y = 1,0132\ln(x) + 2,5195$	0,9854
VII	$y = 0,9865\ln(x) + 2,1465$	0,9766
VIII	$y = 0,707\ln(x) + 1,4118$	0,8797
IX	$y = 1,4183\ln(x) + 3,2263$	0,9927

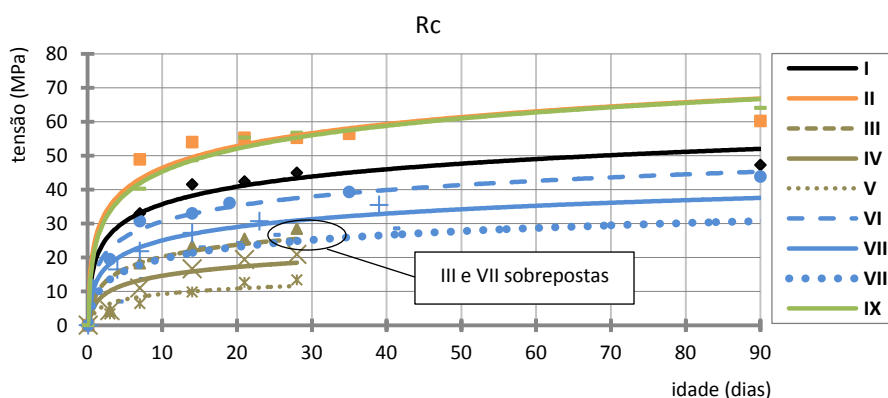


Figura 4-13 - Resistência à compressão – até aos 90 dias

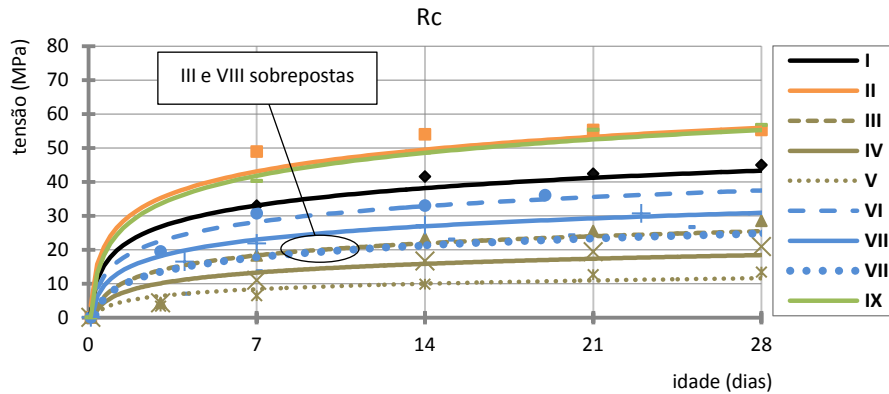


Figura 4-14 - Resistência à compressão - até aos 28 dias

Poderá verificar-se que tal como aconteceu com o ensaio à flexão, o metacaulino também aqui potencia todas as percentagens de substituição, em todas as idades e de uma forma proporcional. Desta feita já não se verifica a sensibilidade observada nos ensaios à flexão, talvez por não ser tão importante a compacidade ou a imperfeição dos provetes.

É muito interessante verificar que o efeito corrector ou regulador que o metacaulino produz nas composições com cinzas equivale, na perspectiva da resistência, a uma composição idêntica mas com menos 40% de cinzas. A sobreposição das linhas III (CV20) e VIII (MTK10+CV60), bem como a relação proporcional do desenvolvimento das resistências, assim o sugerem. Este facto é relevante na medida em que, verifica-se uma vez mais que o metacaulino poderá permitir mitigar uma das características negativas da utilização de grandes percentagens de cinzas. Além disso, estes resultados sugerem a possibilidade de regulação das resistências mecânicas dos betões com elevado volume de cinzas volantes (BEV) através da introdução criteriosa de metacaulino.

Para estudar melhor os efeitos das adições nas pastas e a sua projecção ao longo do tempo, extrapolou-se através do método dos mínimos quadrados e construiu-se também o diagrama com o índice de actividade, bem como a previsão deste índice para um período de 1000 dias, que como já foi referido deverá ser analisado com alguma prudência (Figura 4-15 e Figura 4-16).

Verifica-se tal como no ensaio à flexão, uma convergência a longo prazo para as resistências da composição padrão. No entanto, a composição V (CV60) não acompanha essa previsão. Aliás, segundo estudos efectuados por Camões [27], verifica-se que nas composições até 40% de cinzas existe uma tendência para estabilizar dos 90 aos 270 dias, e nas composições com 60% de cinzas essa tendência

não é visível, pelo menos a médio prazo. A quantidade diminuta de ensaios efectuados para esta mistura não ajuda a clarificar este fenómeno.

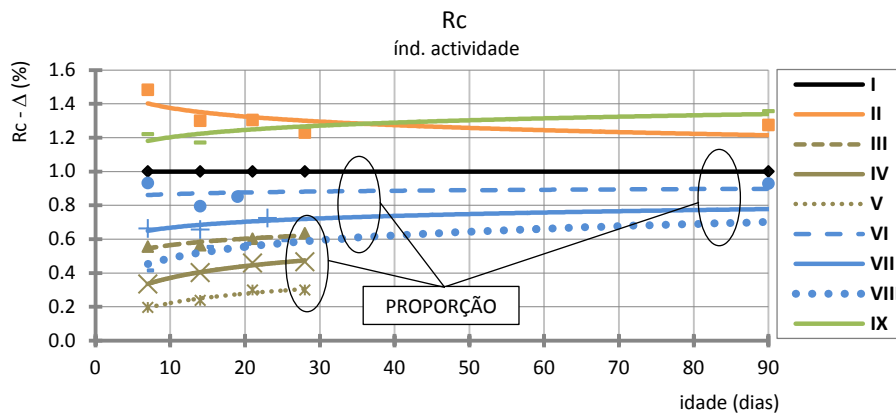


Figura 4-15 - Resistência à compressão - índice da actividade

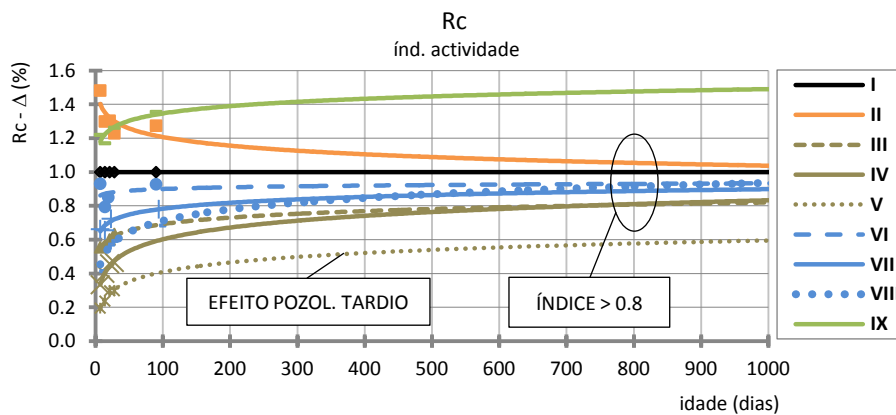


Figura 4-16 - Resistência à compressão - previsão do índice de actividade para 1000 dias

Verifica-se também um abrandamento da eficácia do metacaulino ao longo do tempo, que não é acompanhado pelas restantes misturas com cinzas. Como o metacaulino apresenta resistências iniciais elevadas, nas misturas ternárias este é responsável pela resistência numa primeira fase; e numa fase mais adiantada (à medida que as cinzas reagem lentamente com o hidróxido de cálcio), estas cinzas vão tendo crescentemente a sua cota parte de responsabilidade pelo desempenho mecânico. Mais um bom exemplo da complementaridade destes dois aditivos.

Se compararmos-mos as resistências aos 28 e 90 dias, e o índice de actividade também às mesmas idades (Figura 4-17 e Figura 4-18), fica espelhado mais uma vez o papel que o metacaulino poderá ter na regulação da tensão de rotura das misturas com cinzas.

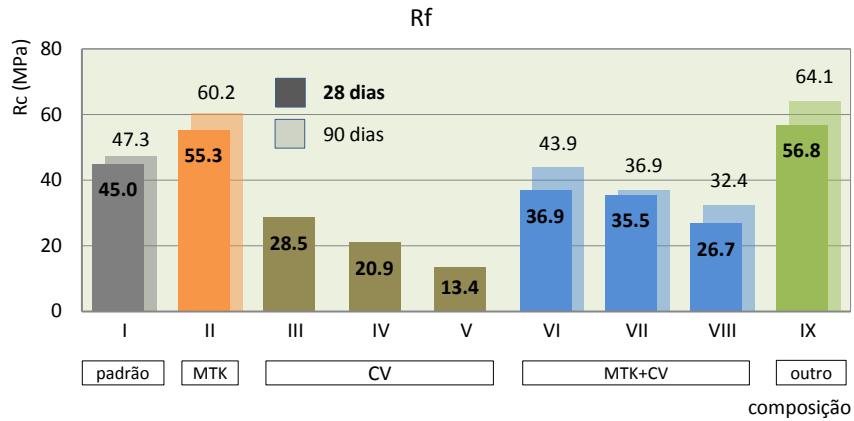


Figura 4-17 – Comparação da resistência à compressão aos 28 e 90 dias

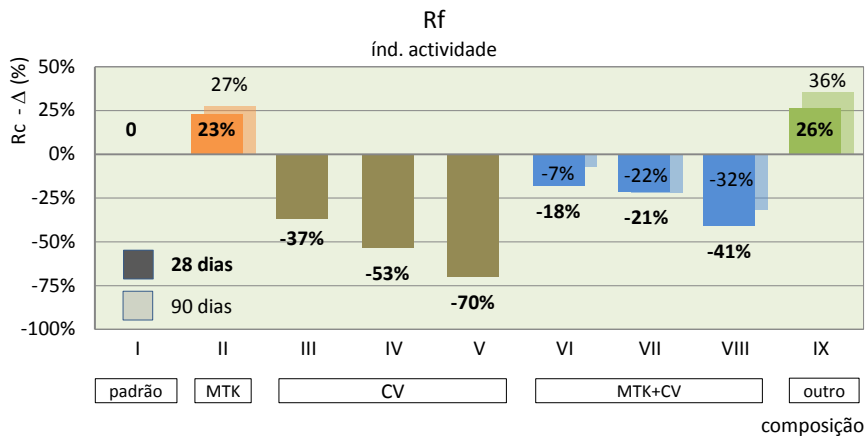


Figura 4-18 – Índice de actividade na resistência à compressão aos 28 e 90 dias

Para verificar o potencial ganho que a adição de metacaulino proporcionou nas misturas com cinzas, efectuou-se também um diagrama comparativo das resistências das misturas ternárias face às misturas binárias.

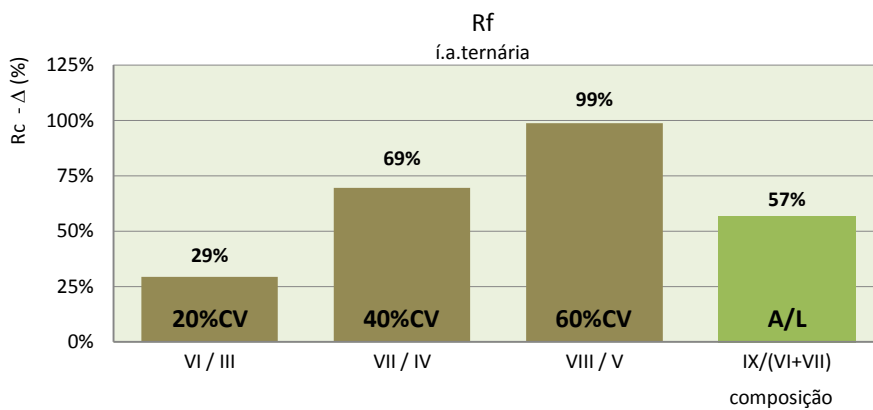


Figura 4-19 – Índice de actividade ternária na resistência à compressão aos 28 dias

Salienta-se um potencial de actividade do metacaulino, crescente com a percentagem de cinzas, chegando a obter-se desempenhos duas vezes superiores na composição V (CV60). Este facto já estava patente nos ensaios à flexão, se bem que de uma forma menos expressiva.

4.5.3 Relações entre resistência à flexão e tracção

Não é fácil relacionar de uma forma directa estes dois ensaios. Não há correspondência directa pois à medida que resistência à compressão aumenta, a resistência à flexão aumenta a uma taxa muito inferior. Equiparando a resistência à tracção pura com a resistência à tracção por flexão (o que na prática poderá ser da ordem dos 80 a 90% de diferença, dependendo dos métodos de ensaio ou tipo de provetes), é possível estudar a relação entre a resistência à tracção (R_t) e a resistência à compressão (R_c). De um modo quantitativo, além do nível geral das resistências à compressão existem outros factores que por efeito combinado alteram as propriedades da matriz na zona de interface pasta-agregado: Segundo *Metha e Monteiro* [2] os factores que contribuem para o rácio R_t / R_c :

- Cura;
- A/C;
- Tipo de agregado;
- Aditivos ou adjuvantes;
- Adições;
- Idade;

Segundo estes mesmos autores, verifica-se que com adições de cinzas volantes este rácio é mais elevado cerca de 7 a 8 % do que em misturas sem essas adições. A diminuição da porosidade da matriz cimentícia e na interface pasta-agregado, traduz-se num aumento da resistência à compressão (embora a resistência à tracção permaneça relativamente baixa), a menos que a resistência intrínseca dos produtos da hidratação que abrangem a zona de transição seja melhorada ao mesmo tempo. Isto quer dizer, que uma zona de interface de baixa porosidade apresentará uma resistência à tracção baixa enquanto existir uma grande quantidade de cristais orientados de hidróxido de cálcio (Figura 4-20). Mas o tamanho e a orientação destes cristais de hidróxido de cálcio na interface poderão ser modificados por reacções químicas com a presença de um agregado reactivo ou uma adição pozolânica.



Figura 4-20 - Cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição

Outros autores também verificaram modificações de rácios devido à utilização de adições. Segundo *Pinto* [8], a relação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão poderá reflectir o tipo de ligação que o ligante desenvolve com o agregado. Também foi verificado no *LNEC* por *Almeida* [60], que no caso de betões com elevada dosagem de cimento Portland (500Kg/m^3), a relação σ_t/σ_c aumentava quando se substituía 10% do cimento por pozolana de Sto. Antão (República de Cabo Verde).

Para analisar a existência de uma relação entre a resistência à compressão e a resistência à flexão, construiu-se um quadro comparativo com todos os valores das tensões registadas e respectivos coeficientes desde os 3 aos 90 dias (Quadro 4.7).

Efectuaram-se também dois gráficos com dois tipos de relação: a linear e exponencial (Figura 4-21 e Figura 4-22 respectivamente).

Quadro 4.7 - Relação entre resistência à flexão e à compressão - resumo

Composição	Idade	Rf	Rc	Rf / Rc	
	(dias)	(MPa)	(MPa)	(--)	Média
I	7	4,4	33,0	0,13	0,14
	14	5,6	41,6	0,13	
	21	5,7	42,4	0,13	
	28	6,0	45,0	0,13	
	90	6,8	47,3	0,14	
II	7	6,3	48,9	0,13	0,13
	14	6,8	54,0	0,13	
	21	7,1	55,3	0,13	
	35	7,1	56,5	0,13	
	90	8,0	60,2	0,13	
III	3	0,9	4,4	0,21	0,17
	7	3,1	18,3	0,17	
	14	3,9	23,4	0,17	
	21	4,2	25,5	0,16	
	28	4,4	28,5	0,15	
IV	3	0,9	4,4	0,20	0,18
	7	2,1	11,0	0,19	
	14	3,0	16,7	0,18	
	21	3,5	19,4	0,18	
	28	3,5	20,9	0,17	
V	3	0,8	3,4	0,23	0,21
	7	1,4	6,5	0,21	
	14	2,1	9,9	0,22	
	21	2,3	12,7	0,18	
	28	2,7	13,4	0,20	
VI	3	3,1	19,5	0,16	0,16
	7	4,6	30,7	0,15	
	14	5,5	33,0	0,17	
	19	6,4	36,1	0,18	
	90	6,3	43,9	0,14	
VII	4	2,7	16,5	0,16	0,18
	7	3,8	21,9	0,17	
	14	5,1	27,3	0,19	
	23	5,9	30,7	0,19	
	39	5,8	35,5	0,16	
	94	6,4	36,9	0,17	
VIII	4	1,5	7,1	0,21	0,16
	7	2,1	13,7	0,16	
	15	3,9	23,0	0,17	
	20	3,9	24,2	0,16	
	25	4,2	26,7	0,16	
	41	4,1	28,6	0,14	
	96	4,3	32,4	0,13	
IX	7	5,3	40,3	0,13	0,14
	14	7,4	48,7	0,15	
	28	8,0	56,8	0,14	
	90	9,7	64,1	0,15	

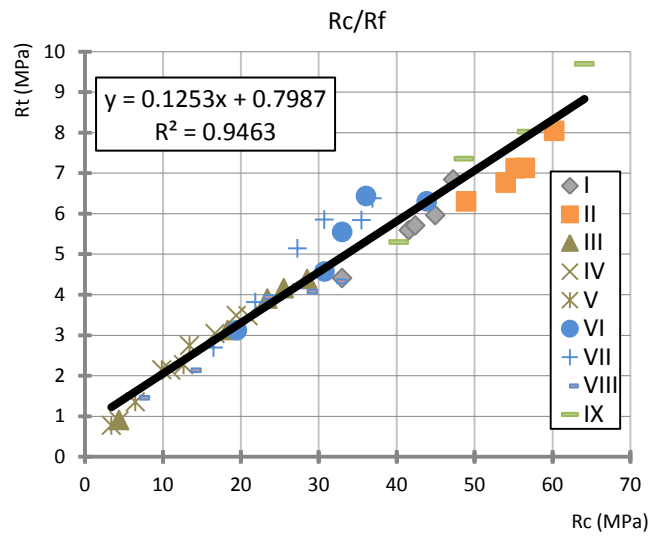


Figura 4-21 - Relação linear entre compressão e flexão

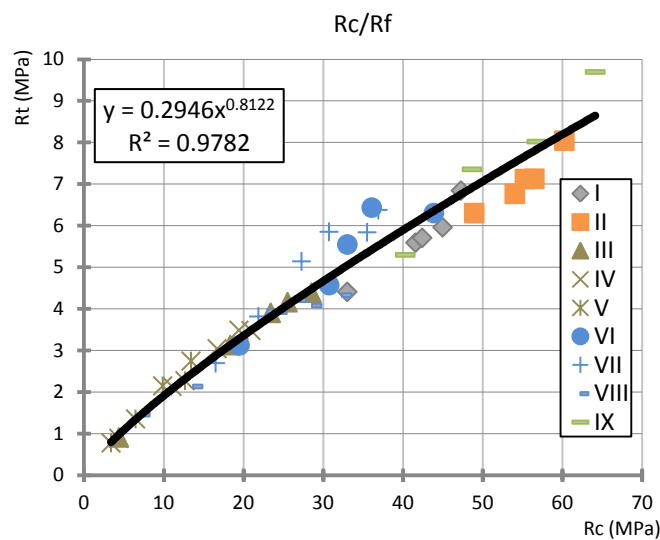


Figura 4-22 - Relação exponencial entre compressão e flexão

Poderá confirmar-se que existe uma relação bem vincada entre estes dois ensaios. No que se refere aos modelos matemáticos que comparam R_c e R_f , verifica-se que a relação exponencial apresenta um coeficiente de correlação mais elevado, o que está de acordo com o esperado pois normalmente traduz também um melhor modelo matemático. É de salientar que segundo a *Comissão Europeia do Betão* [61], a expressão proposta para relacionar estes dois ensaios é do tipo exponencial:

$$\sigma_c = K \cdot \sigma_t^\beta \tag{eq. 4.7}$$

onde:

σ_c tensão de rotura à compressão (MPa);

σ_t tensão de rotura à tracção (MPa);

K coeficiente que permite ajustar fórmula aos diferentes tipos de ensaio (para flexão, $K \approx 2$);

β coeficiente que varia com a forma do inerte e com o seu grau de aderência ao cimento ($\beta_{\text{médio}} = 2/3$);

Segundo estudos de Jose Bossi [62], a correlação entre estes dois ensaios é de 0.98, o que indica que os resultados obtidos são de certa forma os esperados e que a equação que descreve a sua relação é a correcta.

$$\sigma_c = 0.294 \cdot \sigma_t^{0.81222} \quad (\text{eq. 4.8})$$

Ao observar-se os dois diagramas e relacionar-se os coeficientes de variação dos dois ensaios, pode-se verificar que tal como se esperava, a dispersão dos resultados é genericamente maior no ensaio de flexão. A partir dos 50 dias, no ensaio à flexão quase todos os resultados apresentam coeficientes de variação acima do 4% (excepção da composição IX), enquanto no ensaio à compressão quase todos os resultados estão abaixo dos 4%. De qualquer forma pode-se considerar que os valores tendem a estabilizar com a idade.

Verifica-se que relação σ_t/σ_c tende a estabilizar com a idade, o que está de acordo com o esperado. Como depende da tensão à compressão e esta diminuiu com a idade, tendendo a estabilizar com o tempo, a relação terá também de seguir esta tendência. Assim, optou-se por calcular a média aritmética para cada composição e fazer um diagrama comparativo. (Figura 4-23).

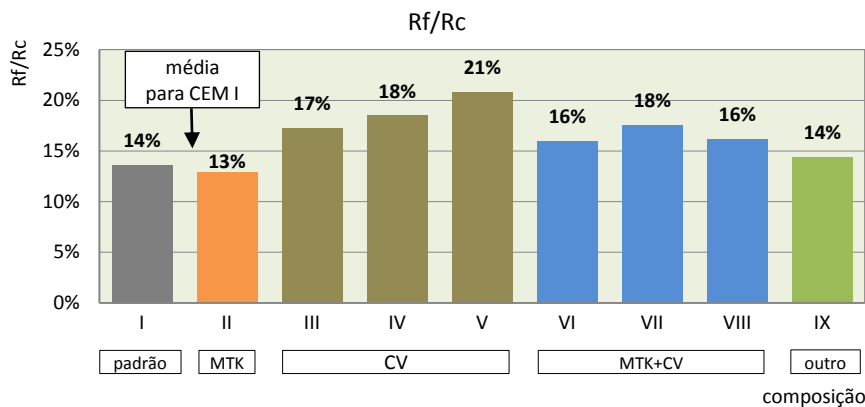


Figura 4-23 - Relação flexão/compressão - valores médios

A *Portland Cement Association* [63] sugere para o cimento Portland uma relação σ_t/σ_c (tração pura/compressão) dependente da tensão de rotura à compressão. Os valores podem variar entre 0.11 a 0.23, mas como valor médio representativo de um leque de tensões (desde os 26.5 a 59.2 MPa) será uma relação de 0.15. Aliás, este coeficiente é também referido por *Pinto* [8] e foi por isso situado no diagrama comparativo. Os resultados obtidos também estão de acordo com os pressupostos ao indicar que esta relação varia com a tensão de rotura à compressão, o que era esperado. As composições com maiores resistências mecânicas têm uma relação mais alta, e vice-versa.

4.6 Avaliação da durabilidade

Os ensaios para caracterizar a durabilidade das composições estudadas foram quatro: migração dos cloretos, porosidade aberta, absorção por capilaridade e resistividade eléctrica. Como já se referiu nos capítulos anteriores, estes ensaios são de extrema importância, pois as características mecânicas de um material não caracterizam convenientemente o desempenho deste, nem tão pouco o período de tempo em que este poderá estar em serviço, cumprindo as funções necessárias.

Segundo *Ferreira* [53], os parâmetros que influenciam a durabilidade são os seguintes:

- Razão água/ligante;
- Dosagem de cimento;
- Teor de ar no betão fresco;
- Tipo de cimento;
- Classes de resistência;
- Permeabilidade;

Como não é possível avaliar todos estes parâmetros, é necessário mantê-los constantes excepto um. Neste caso irá manter-se a quantidade de ligante, a razão água/ligante (excepto numa composição), o tipo de cimento e a classe de resistência. O teor de ar no betão fresco não será avaliado. Ao fazer variar a dosagem de cimento mantendo a quantidade de ligante e adicionando outros materiais pozolânicos, irá alterar-se a sua permeabilidade de tal forma, que do ponto de vista da durabilidade poderia dizer-se que os produtos acabados seriam completamente distintos.

4.6.1 Coeficiente de difusão dos cloretos por migração

Este ensaio forneceu os valores do coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário que se encontram no quadro seguinte (Quadro 4.8). Por motivos técnicos não foi possível efectuar o ensaio para todas as idades e amassaduras, tal como estava previamente estabelecido, pelo que alguns valores não foram preenchidos.

Para facilitar a leitura dos resultados construíram-se dois diagramas de barras com os valores nominais e a sua variação com a composição padrão (Figura 4-24 e Figura 4-25). Foi necessário efectuar uma estimativa para os valores da composição III (CV20), visto que o ensaio fracassou. Esta consistiu em interpolar linearmente os resultados da composição IV e V (CV40 e CV60 respectivamente), podendo-se verificar que para cada 10% de incorporação de cinzas, o coeficiente de difusão diminuiu proporcionalmente de $0,32 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, pelo que esta estimativa embora merecendo todas as cautelas não deverá diferir muito do valor encontrado.

Também foi necessário recorrer a uma simplificação importante no que respeita ao cálculo da variação com a composição padrão (I). Como não existem valores emparelhados das séries de 28 e 90 dias, foi necessário comparar a composição VII e VIII com valores resultantes de idades diferentes. O erro cometido é significativo, mas não impede uma análise comparativa.

Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de difusão dos cloretos por migração

Comp.	Idade	D	C. variação
(n.º)	(dias)	($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	(%)
I	28	2,40	1,89%
	90	1,88	12,80%
II	28	0,78	4,49%
	90	0,64	7,71%
III	28	--	--
	90	--	--
IV	28	1,08	20,55%
	90	--	--
V	28	0,45	--
	90	--	--
VI	28	0,23	9,83%
	90	0,28	0,44%
VII	28	--	--
	90	0,11	3,07%
VIII	28	--	--
	90	0,18	0,43%
IX	28	0,47	4,34%
	90	0,17	7,50%

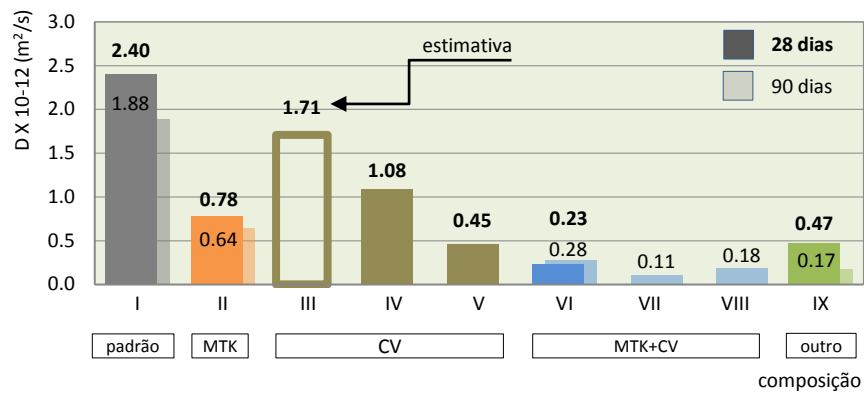


Figura 4-24 – Coeficiente de difusão dos cloretos por migração

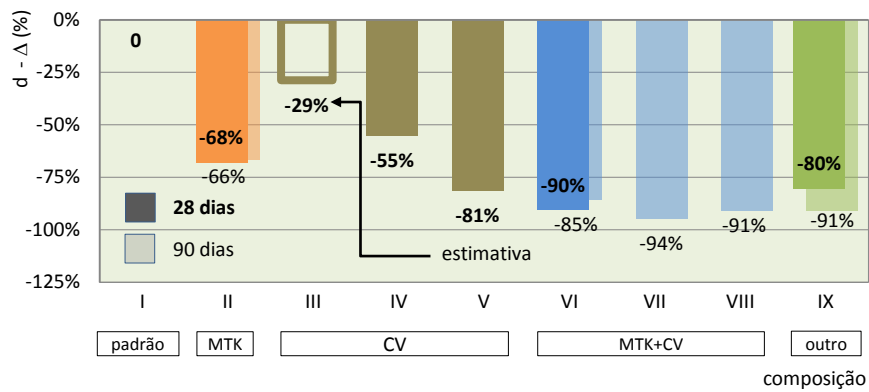


Figura 4-25 – Variação em relação à composição padrão do coeficiente de difusão dos cloretos por migração

Poderá numa análise rápida verificar-se que todas as composições apresentam melhor comportamento do que a composição padrão (I), o que era perfeitamente esperado, uma vez que as adições com cinzas aprisionam os cloretos [53]. Este aspecto é muito interessante e explica-se porque no ataque com iões cloro, apenas uma parte destes presentes no betão, são efectivamente responsáveis pela corrosão. Segundo *Ferreira* [53], uma primeira parte é fixada quimicamente ficando incorporada nos produtos da hidratação do cimento. Uma outra parte é fixada fisicamente e são absorvidos na superfície dos micro-poros. Apenas uma “terceira parte”, designada de “cloretos livres” (capazes de se movimentarem), são responsáveis pela destruição da camada passivante na superfície das armaduras. Segundo *Camões* [27], o aumento da quantidade de aluminatos proporcionada pelas cinzas é responsável pelo melhor desempenho das suas composições, pois estas reagem quimicamente com os iões cloro, diminuindo a sua quantidade na fase aquosa, a tal “terceira parte” que provoca a corrosão.

O que não seria de esperar é o potencial que 10% de metacaulino proporciona face às cinzas volantes: são necessárias substituições com quase 30% de cinzas para se conseguir o mesmo resultado que o metacaulino. Se fizermos o estudo da variação do coeficiente de difusão por migração relativamente às misturas binárias (Figura 4-26), verifica-se que a utilização do metacaulino aparece mais uma vez com vantagens, pelo menos no que respeita a substituições até 50% do cimento: o ganho das composições VI (MTK10+CV20) e VII (MTK10+CV40) face às respectivas misturas binárias III (CV20) e IV (CV40), é de mais de 85%. O mesmo ganho não acontece com substituições de 70%, mas não deixa de ser elevado (cerca de 60%).

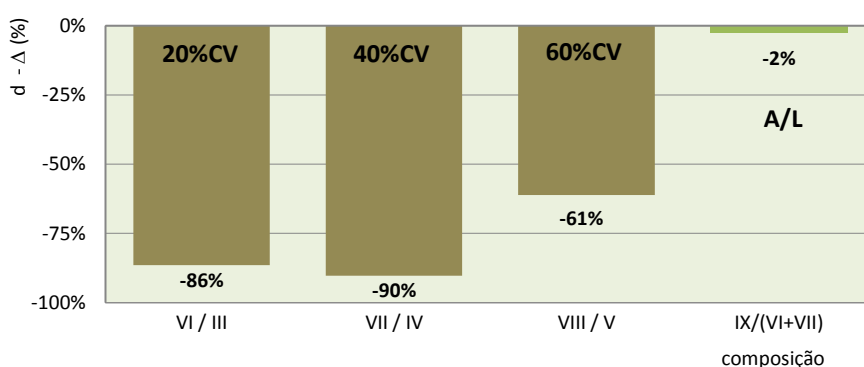


Figura 4-26 – Índice de eficiência ternária para o coeficiente de difusão de cloretos por migração

Devido à especificidade deste ensaio e às premissas utilizadas, estes resultados promissores terão de ser encarados com alguma cautela, pois pese embora seja de esperar grandes ganhos com as misturas ternárias, na realidade estes poderão não ser tão elevados como os resultados aqui apresentados sugerem. De referir a este propósito, que é estranho e atípico não se terem verificado ganhos na diminuição água/ligante, o que pode indiciar alguma imprecisão ou especificidade destes ensaios.

4.6.2 Porosidade aberta

O ensaio de porosidade aberta foi efectuado com três provetes por amassadura aos 28 e 90 dias de idade. Como os ensaios não originaram resultados animadores, como se verá mais adiante, resolveu-se parar a campanha de ensaios, não cumprindo o programa inicialmente previsto. De qualquer forma, foram fornecidos os seguintes resultados:

Quadro 4.9 - Porosidade aberta - resultados finais

Idade (dias)	Composição								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
28	19,3%	--	--	--	--	17,1%	16,8%	19,2%	--
90	17,9%	19,3	--	--	--	20,2%	21,0%	20,2%	20,2%

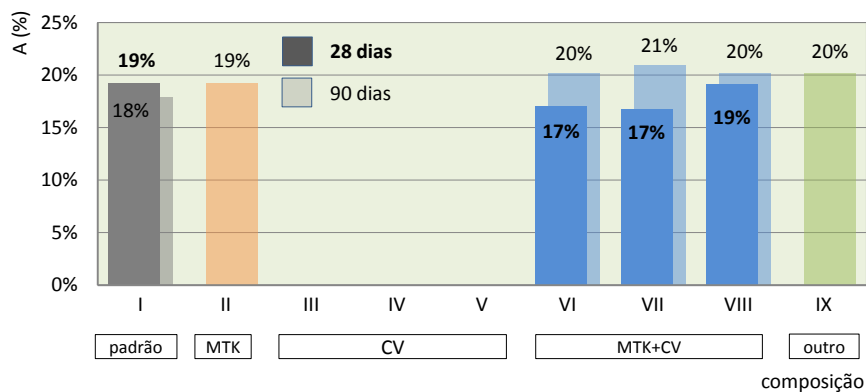


Figura 4-27 - Porosidade aberta

Verifica-se ao analisar o quadro dos resultados finais e o diagrama comparativo das várias composições, que os resultados obtidos foram muito elevados e não foram sensíveis nem à idade nem tão pouco às misturas das composições. Nas composições com cinzas e metacaulino, os resultados apresentam porosidades aos 90 dias superiores aos 28 dias. Refira-se também que relativamente à composição VI, a diminuição da razão A/L não alterou o valor da porosidade (IX), o que é um contra-senso pois sabe-se que a uma redução da razão A/L corresponde a um aumento da compacidade e a uma diminuição da porosidade.

Esperava-se também, segundo estudo de *Camões* [27], que a incorporação de cinzas diminuísse a porosidade. Poderá dizer-se que também aqui não se verificaram alterações vincadas de comportamento.

Também a este propósito, outros estudos com este mesmo ensaio e no mesmo laboratório, nomeadamente os estudos do doutoramento de *Camões* [27] e do mestrado de *Ferreira* [53], originaram resultados elevados para a permeabilidade aberta. Se bem que não tão elevados, referem-se a betões e argamassas ($\approx 10\%$ e 15% respectivamente), o que parece estar em consonância com o presente trabalho. Na mesma medida, estes estudos também revelaram resultados não sensíveis às composições e idades.

4.6.3 Absorção por capilaridade

O ensaio por absorção por capilaridade é um meio muito eficaz na avaliação de uma composição do ponto de vista da durabilidade: quanto mais baixo for o valor de absorção, maior a dificuldade de penetração de agentes exteriores [64]. A absorção por capilaridade depende dos seguintes factores [65]:

- Relação A/L. Aumenta quando A/L aumenta;
- Finura do ligante. Diminuiu quando a finura aumenta;
- Idade. Diminuiu quando a idade aumenta;
- Tempo de cura. Diminuiu quando o tempo de cura aumenta;
- Grau de consolidação. Elevadas percentagens de finos, inertes, sem reactividade pozolânica, aumentam a absorção capilar;

Nos ensaios de absorção por capilaridade podem desenhar-se digramas de absorção ao longo do tempo, onde será possível identificar uma curva com inclinação decrescente e com três partes distintas: uma primeira parte mais inclinada que representa o preenchimento dos capilares de maior diâmetro, ao longo de 1 ou 2 horas. Segue-se uma segunda curva menos acentuada, que representa o preenchimento dos capilares mais finos. E por fim, uma curva que corresponde à estabilização [66].

O ensaio de absorção por capilaridade foi efectuado com três provetes cúbicos para cada idade de 7, 14, 21, 28 e 90 dias, fornecendo o acréscimo de massa ao longo do tempo. Com estes valores foi possível determinar a absorção capilar no tempo, o coeficiente de absorção e a ascensão capilar. Aproveitou-se este ensaio para medir a ascensão capilar visível, medida pelas quatro faces laterais dos provetes. Relativamente aos factores que contribuem para a capilaridade, descritos acima, as grandes diferenças das composições estudadas residem essencialmente na quantidade de cimento e na introdução de adições pozolânicas.

O coeficiente de absorção capilar foi calculado para as primeiras quatro horas de ensaio, ou em caso de não haver leituras, para a idade imediatamente anterior. Segundo Camões [27], este parâmetro poderá ser considerado um indicador da durabilidade uma vez que é neste período de quatro horas que se realiza o preenchimento dos maiores poros, os principais repensáveis pela penetração de fluidos e líquidos nos betões.

Segundo Duriez [67], a pasta de cimento não tem praticamente capilaridade, sendo no inerte e principalmente na superfície da zona de interface que esta reside. Segundo Coutinho [68], a capilaridade é sensível à quantidade de cimento. Assim, como temos ensaios com argamassas, teremos de ter algumas reservas na sua análise.

Para cada composição foi ainda determinado o coeficiente de correlação R^2 da regressão da recta que fornece o coeficiente de capilaridade. Devido à normal absorção inicial excessiva dos provetes, não se obrigou a que esta recta passasse pela origem, eliminando o erro decorrente desse fenómeno. Desenharam-se os diagramas da absorção ao longo do tempo de forma a identificar as três partes da curva. Para melhor correlacionar a absorção, o coeficiente de absorção capilar e a ascensão capilar, foram também desenhados diagramas destas grandezas nas primeiras quatro horas de ensaio. No quadro seguinte foram reunidos todos os parâmetros, coeficientes de correlação R^2 e coeficientes de variação. Nas figuras que seguem o quadro estão os resultados por composição e com o envelhecimento dos provetes de betão.

Quadro 4.10 - Ensaio de absorção por capilaridade - resultados

Comp.	Idade	Coeficiente de absorção capilar				Ascensão capilar	
		Declive		R^2		média Ac	c. v.
	média Cm	c. v.	média	c. v.			
(dias)	Cm (kg/m ² /min.0.5)	(%)	(--)	(%)	(cm)	(%)	
I	21	0,30	4,13%	0,996	0,27%	3,33	5,37%
	28	0,33	16,22%	0,981	0,79%	3,58	9,49%
	90	0,25	8,21%	0,993	0,09%	3,55	2,62%
II	14	0,18	6,49%	0,986	0,70%	1,87	2,52%
	21	0,20	13,61%	0,964	3,31%	2,41	14,26%
	28	0,23	10,11%	0,976	1,14%	2,76	11,63%
	90	0,24	22,49%	0,971	3,77%	3,29	13,91%
III	28	0,17	1,74%	0,971	0,14%	1,84	4,48%
IV	28	0,22	15,22%	0,961	1,34%	2,17	11,07%
V	28	0,32	7,33%	0,981	0,66%	2,55	6,78%
VI	14	0,15	6,04%	0,908	9,64%	1,64	10,59%
	21	0,23	4,87%	0,955	1,90%	2,93	3,78%
	28	0,09	10,49%	0,966	0,66%	1,10	5,83%
	90	0,13	13,14%	0,918	1,13%	2,75	9,80%
VII	7	0,12	19,29%	0,913	3,42%	1,45	9,51%
	14	0,12	12,06%	0,913	4,00%	1,56	11,94%
	21	0,14	24,93%	0,861	2,81%	1,96	14,17%
	90	0,20	11,35%	0,942	0,97%	3,32	4,15%
VIII	7	0,16	3,28%	0,984	0,60%	2,01	7,37%
	21	0,07	10,06%	0,946	3,03%	1,44	17,40%
	28	0,22	20,63%	0,972	2,72%	3,04	11,83%
	90	0,32	11,55%	0,893	4,68%	4,22	9,21%
IX	7	0,25	1,92%	0,940	2,20%	2,28	2,36%
	14	0,16	37,96%	0,953	2,39%	1,90	8,92%
	21	0,08	18,14%	0,454	62,90%	1,95	18,09%
	28	0,30	7,29%	0,909	1,84%	3,29	6,64%
	90	0,18	17,62%	0,922	1,92%	2,48	13,09%

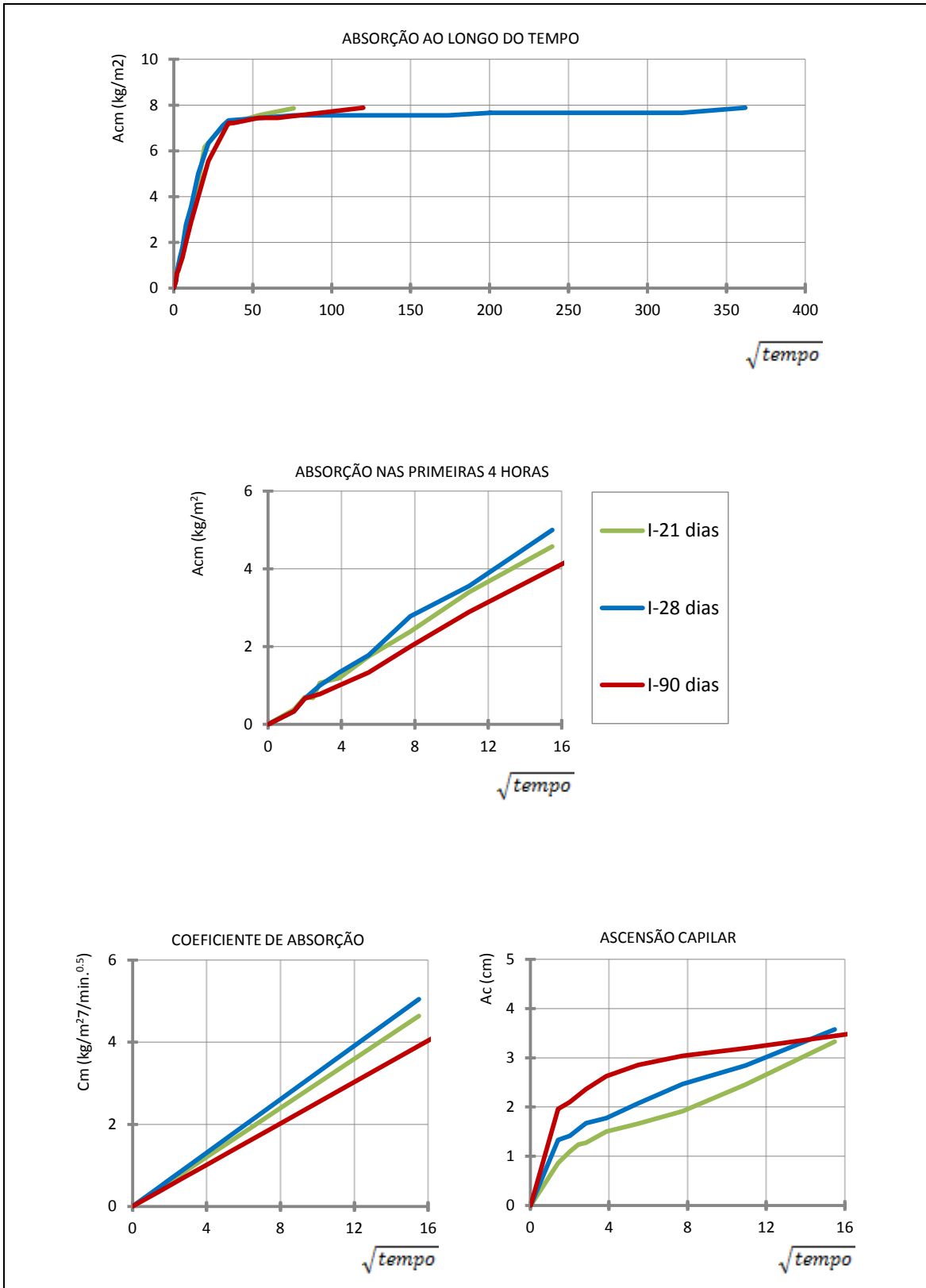


Figura 4-28 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição I

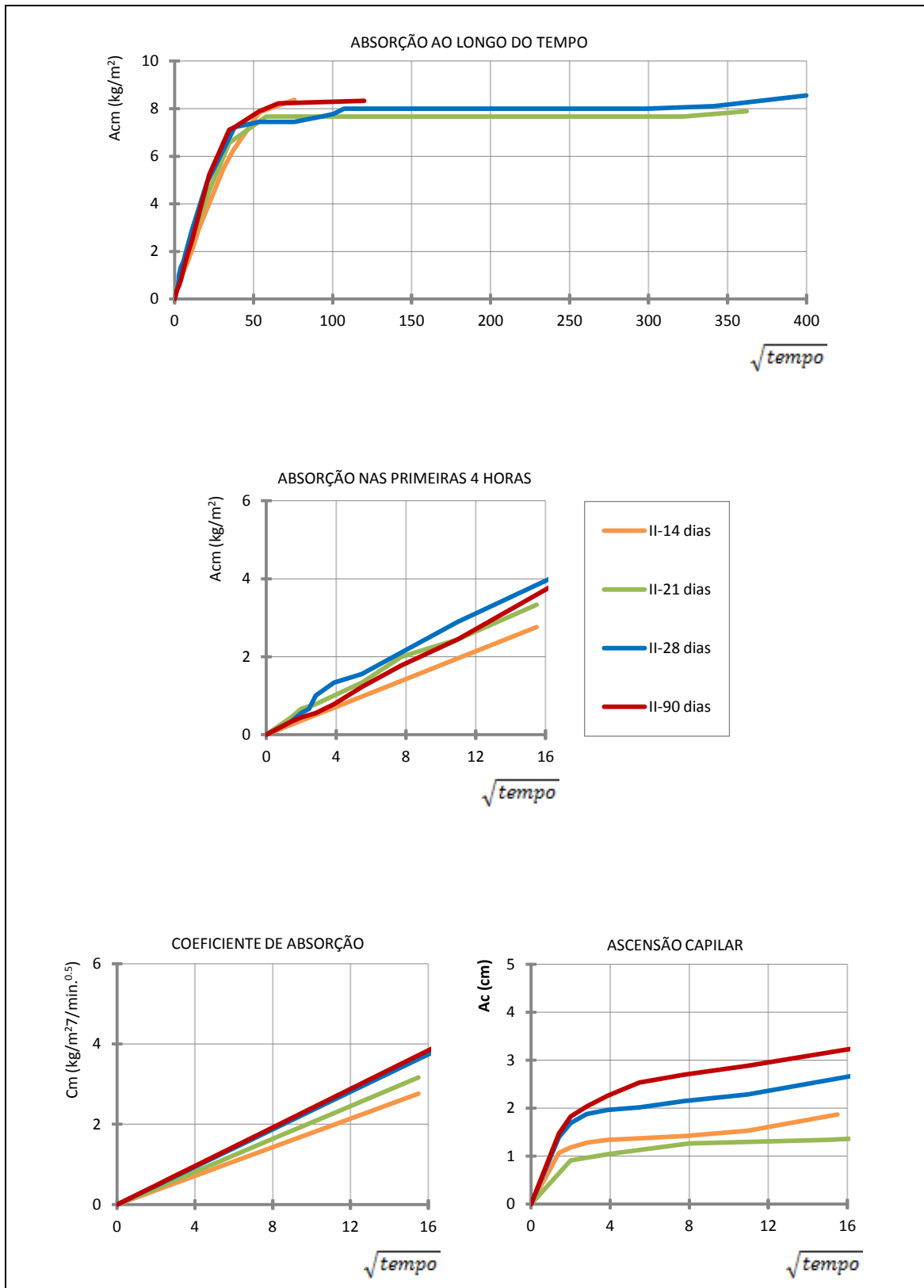


Figura 4-29 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição II

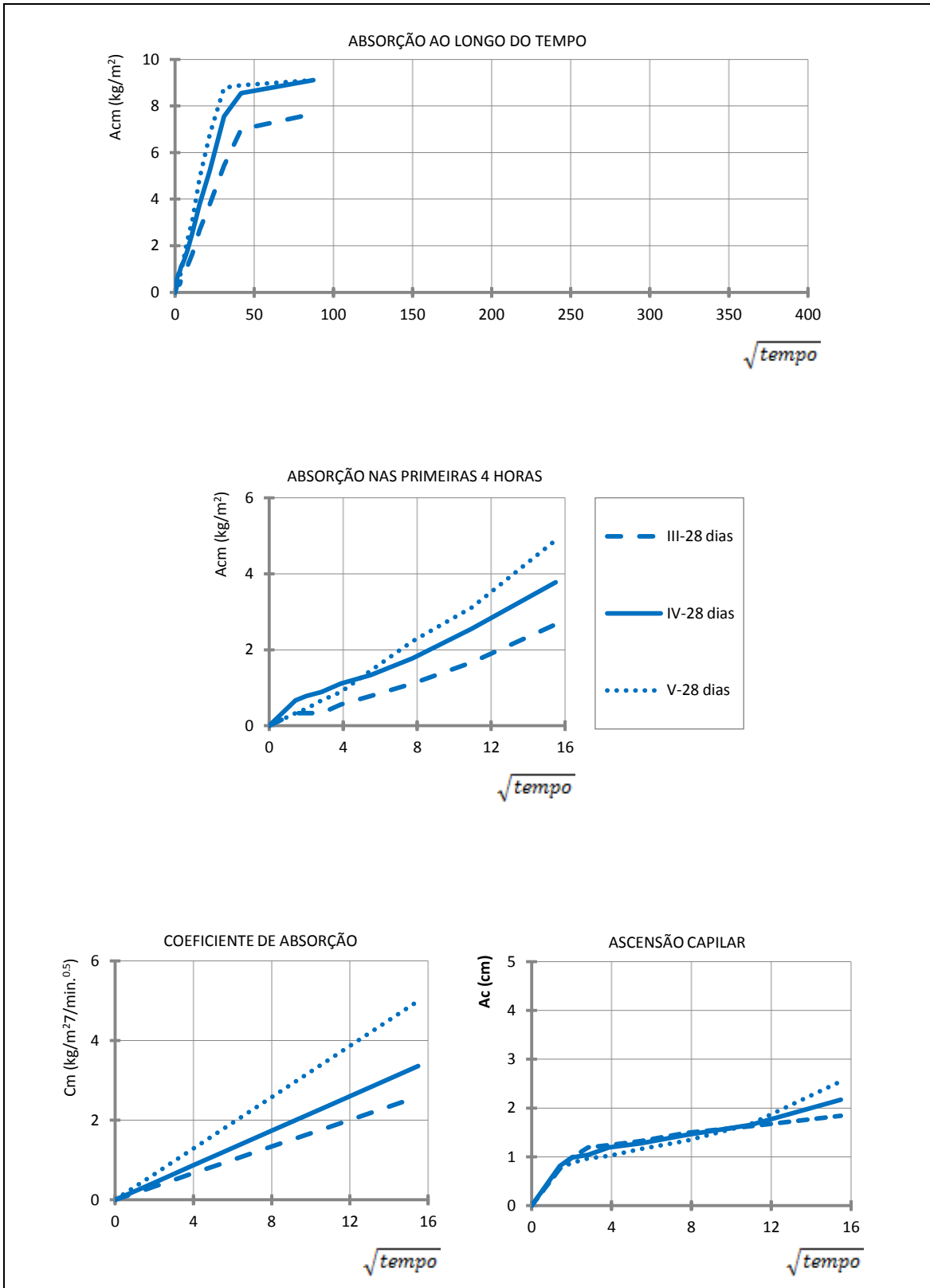


Figura 4-30 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição III, IV e V

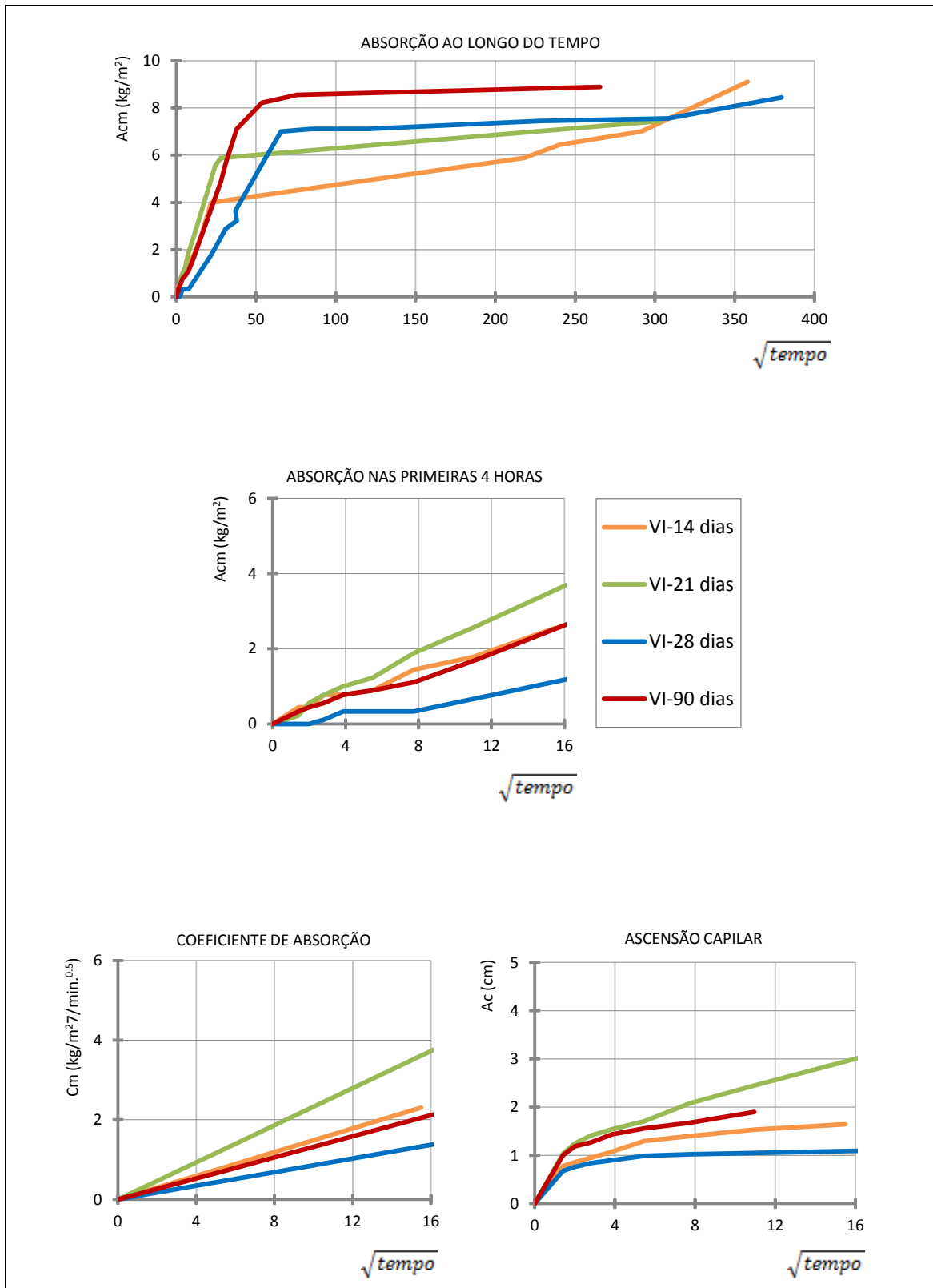


Figura 4-31 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição VI

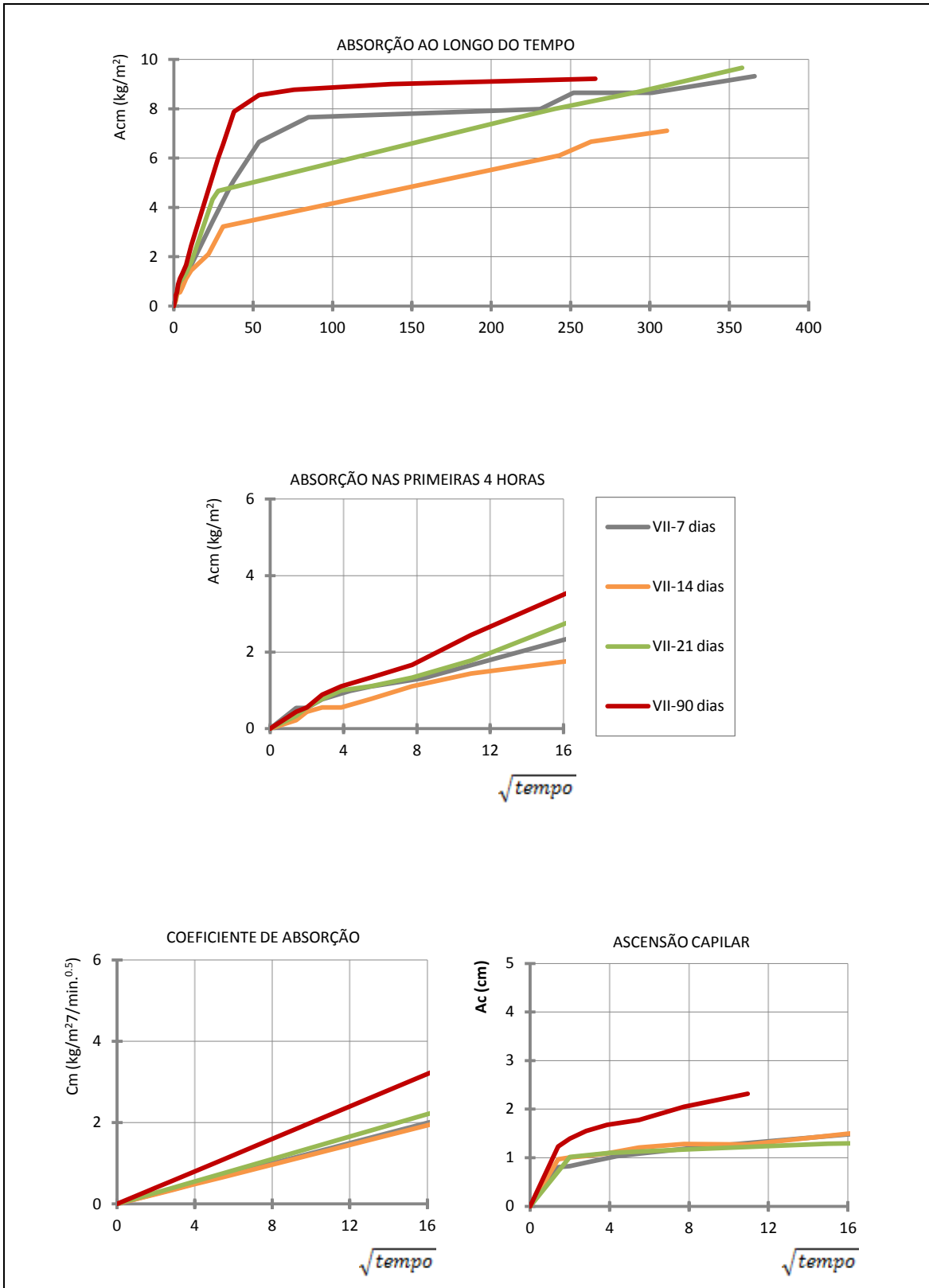


Figura 4-32 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição VII

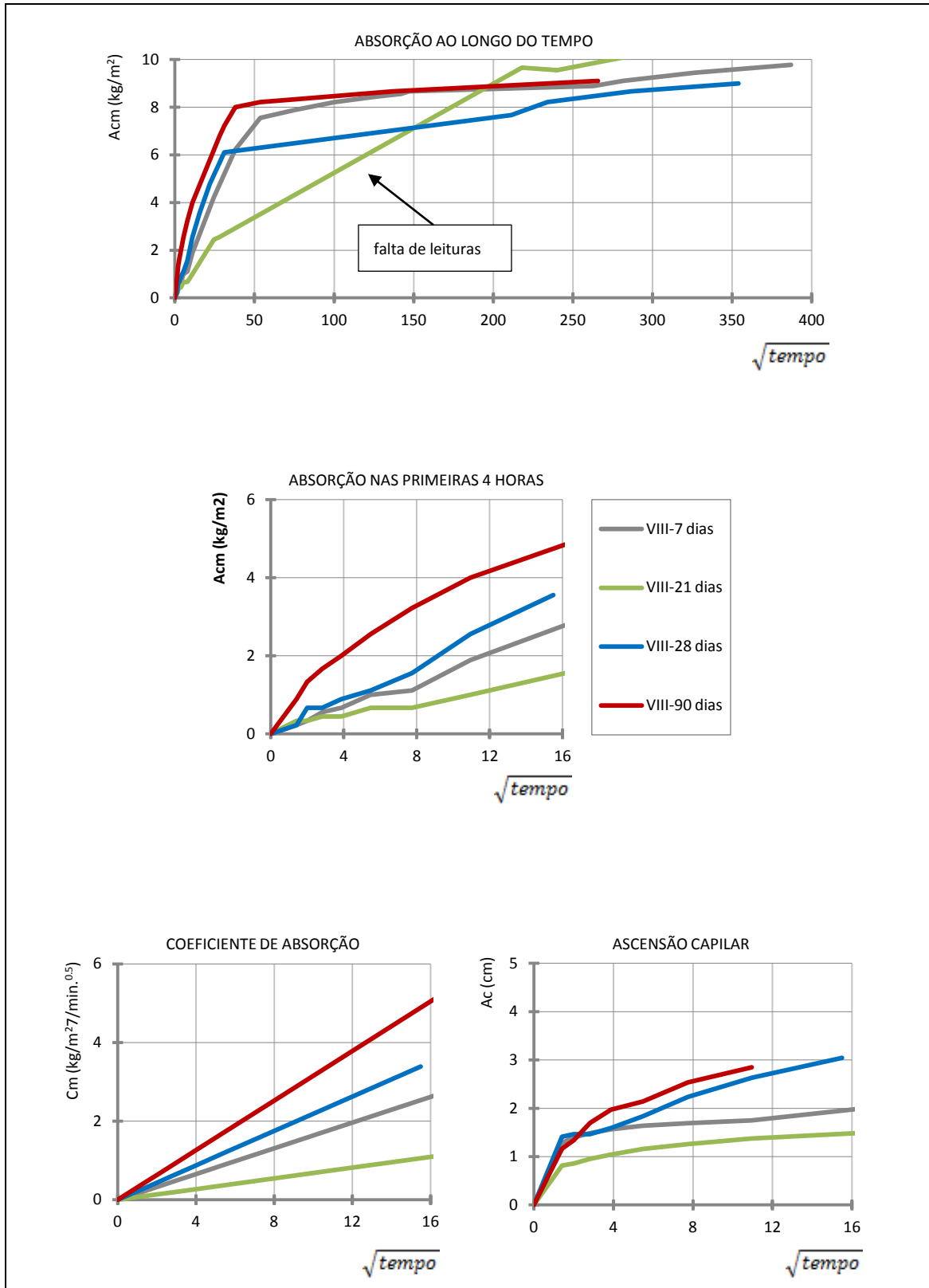


Figura 4-33 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição VIII

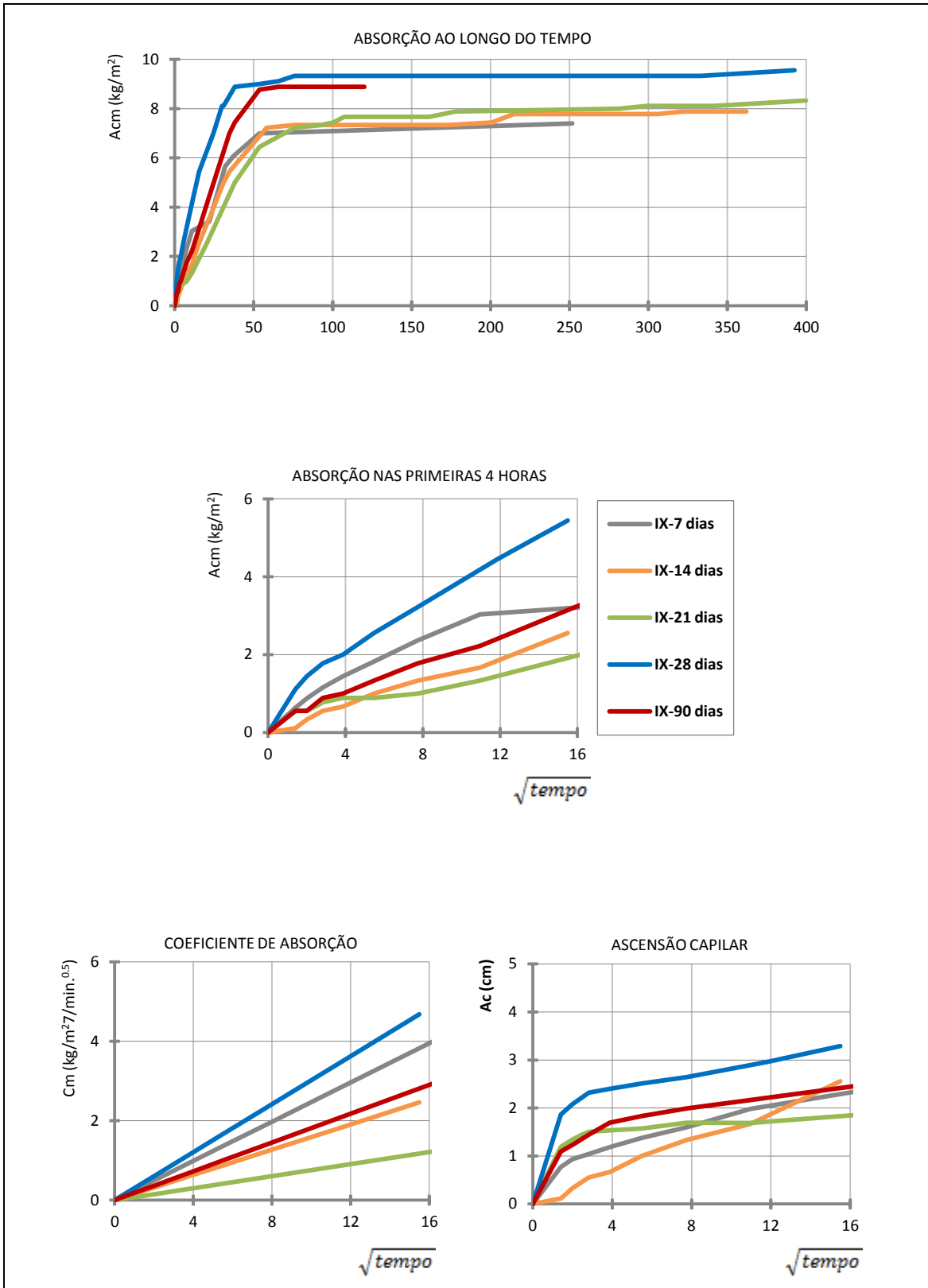


Figura 4-34 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar para a composição IX

Como nota, deverá dizer-se que a composição VI (MTK10+CV20) não possuiu resultados aos 28 dias, pelo que foi utilizado o resultado mais próximo (21 dias). Pode-se reparar que em algumas composições aparentemente os resultados pioram com o tempo. Tal facto deve ter acontecido em parte devido à não impermeabilização das faces laterais do provete. Esta ocorrência é corroborada pelos coeficientes de variação elevados, resultantes do cálculo do coeficiente de absorção.

O desenvolvimento dos diagramas é conforme o esperado, com inclinação decrescente, podendo na maior parte destes identificar as três partes da curva.

No que se refere à ascensão capilar, os resultados estão na sua maioria em consonância com o coeficiente de absorção, apresentando coeficientes de variação igualmente altos.

Outra forma de analisar este ensaio será visualizar o comportamento global das várias composições, pelo que se construiu mais quatro figuras com comparação de todas as amassaduras aos 28 e 90 dias. Note-se que como não há resultados aos 90 dias das misturas binárias com cinzas (III, IV e V), foram incorporados nestes diagramas os respectivos resultados, mas aos 28 dias.

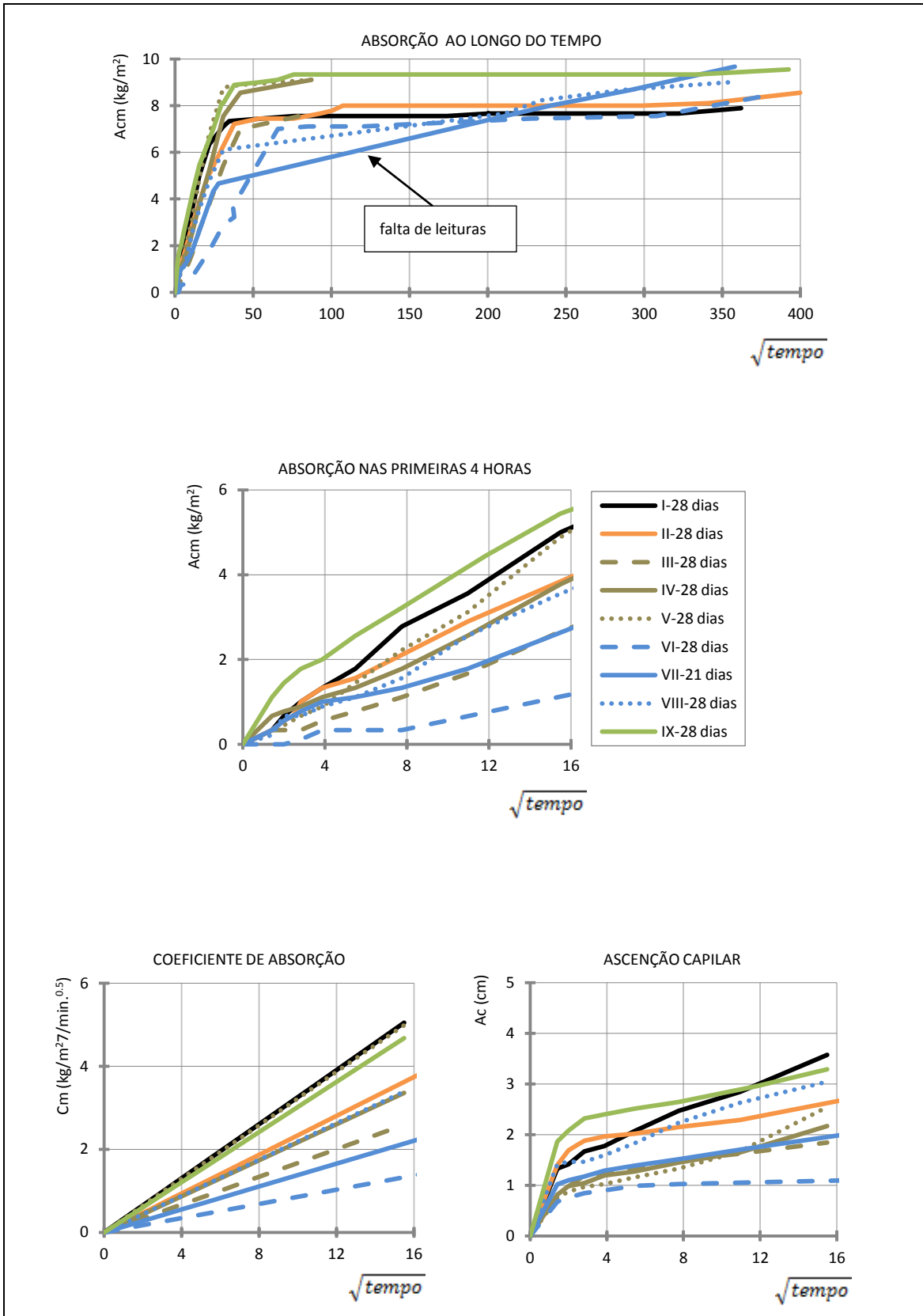


Figura 4-35 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar aos 28 dias

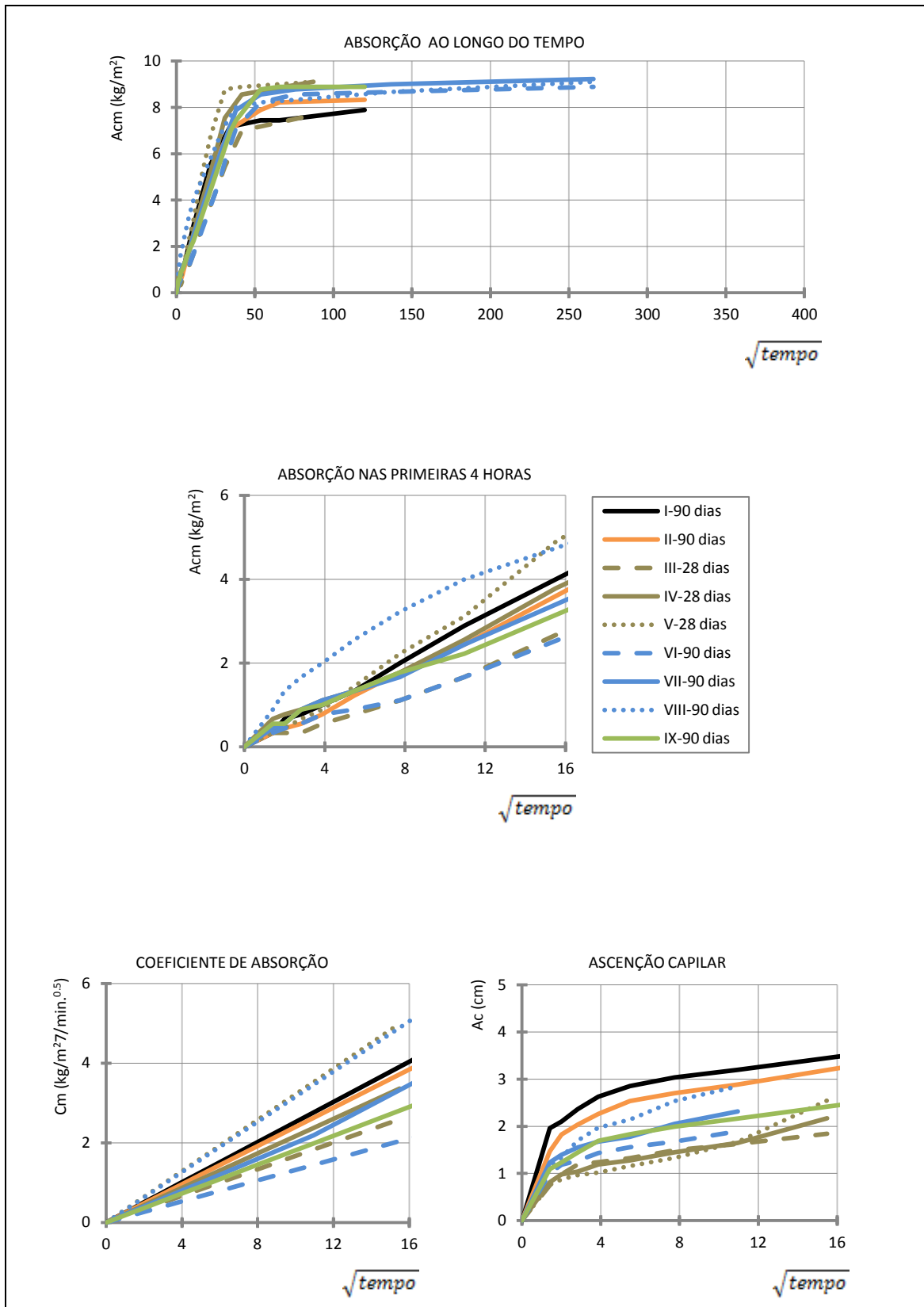


Figura 4-36 – Absorção capilar, coeficiente de capilaridade e ascensão capilar aos 90 dias

Muitos destes ensaios foram efectuados ao mesmo tempo, pelo que os erros decorrentes dos problemas do ensaio, já descritos, esbatem-se levemente para uma análise qualitativa.

Verifica-se assim que o coeficiente de absorção capilar comparativamente com a composição padrão (I) é inferior para todas as misturas, o que está em consonância com o esperado. Excepção apenas para a composição VI (MTK10+CV20) aos 90 dias, mas que deverá ser um erro do ensaio.

Observando o coeficiente de absorção aos 28 e 90 dias, verifica-se que a composição III (CV20) apresenta um comportamento muito melhor do que a composição padrão (I). Mas à medida que a incorporação de cinzas aumenta, o desempenho (leia-se coeficiente, absorção ou ascensão capilar) vai diminuindo até que com 60%, os valores são idênticos aos da composição padrão aos 28 dias (ou pior aos 90 dias). As cinzas deverão estar a funcionar como filler porque as reacções pozolânicas são muito lentas.

Na fase de estabilização do ensaio todas as composições tendem a mostrar absorção mais elevada, mas nesta janela de 90 dias.

O metacaulino apresenta valores intermédios entre a composição padrão e a composição III aos 28 dias (com 20% de cinzas), o que sugere que terá um comportamento semelhante às cinzas, pois este representa uma substituição do cimento também de metade (10%).

As composições ternárias apresentam valores muito mais baixos, tanto relativamente às composições binárias como também comparativamente a uma substituição de cimento de igual proporção com cinzas. O metacaulino sendo um material muito mais fino e reactivo consegue diminuir os poros capilares através de misturas mais compactas. Segundo *Barbosa et al.* [69], o metacaulino origina bons desempenhos desde as idades jovens devido ao efeito filler, consequência da grande finura do metacaulino (pelo menos no que toca a betões). Em argamassas este fenómeno também deverá reflectir-se.

Ainda relativamente às composições ternárias, verifica-se que a eficiência destas é muito superior às misturas binárias, sendo o ganho, uma "aparente" soma das eficiências das duas adições. O efeito combinado do metacaulino com as cinzas resulta num material muito mais eficiente em todas as idades, funcionando melhor para

a composição III (MTK10+CV20), o que encontra eco nos ensaios de resistências mecânicas relativamente às composições binárias.

De forma a analisar melhor a eficiência das misturas, apresentam-se os diagramas de barras do coeficiente de absorção capilar e ascensão capilar aos 28 e 90 dias, bem como a variação em função da composição padrão.

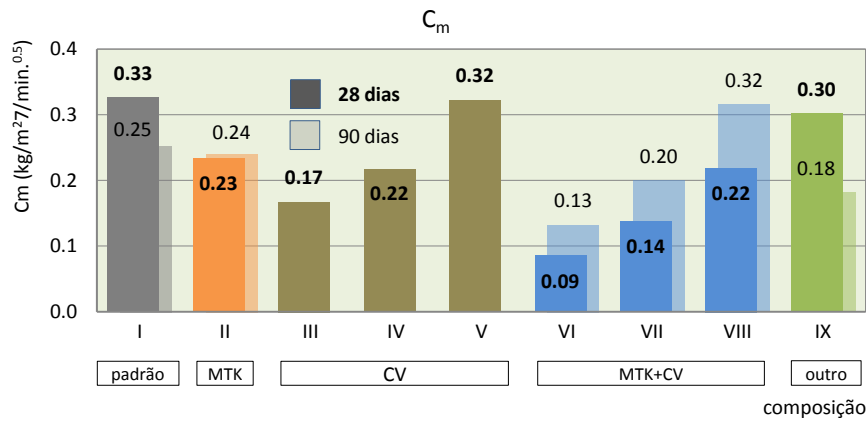


Figura 4-37 - Coeficiente de capilaridade aos 28 e 90 dias

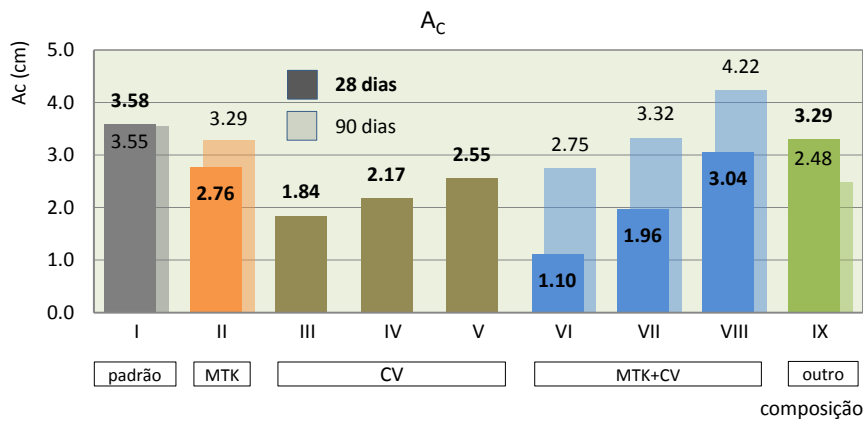


Figura 4-38 - Ascensão capilar aos 28 e 90 dias

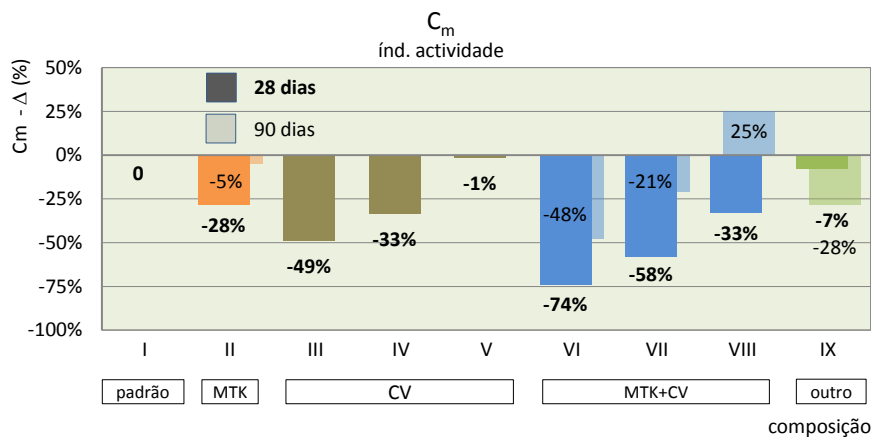


Figura 4-39 - Variação do coeficiente de capilaridade em relação à composição padrão aos 28 e 90 dias

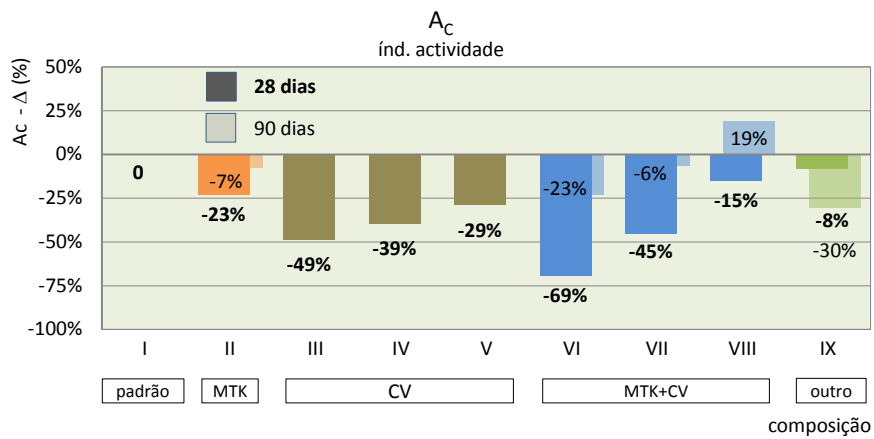


Figura 4-40 - Variação da ascensão capilar aos 28 e 90 dias

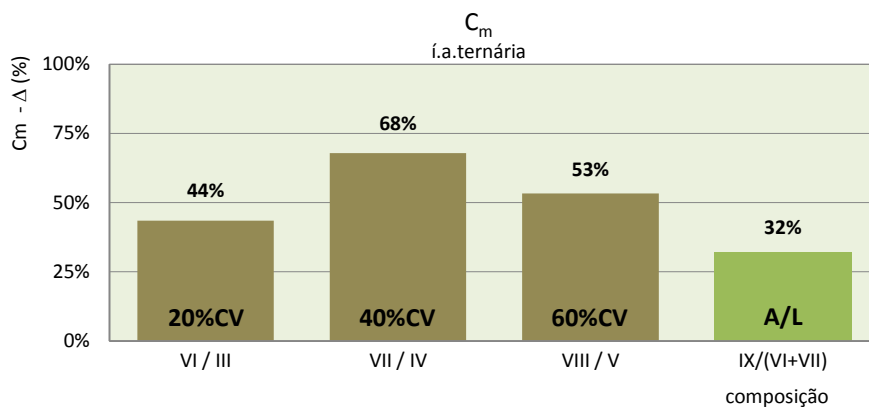


Figura 4-41 - Índice de eficiência ternária do coeficiente de absorção capilar aos 28 dias

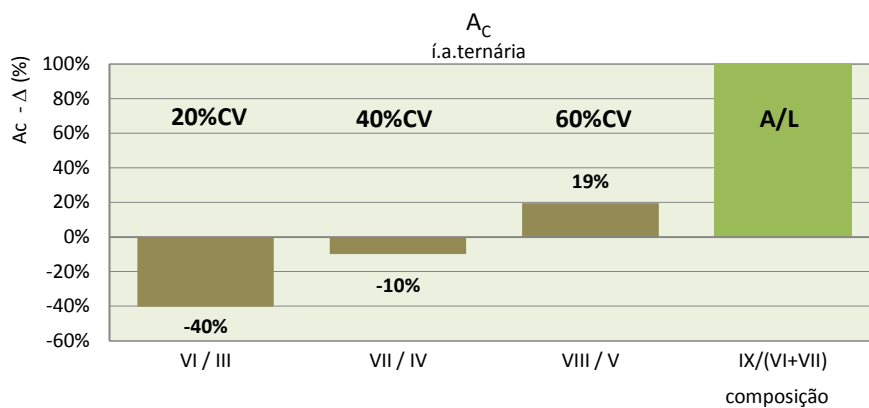


Figura 4-42 - Índice de eficiência ternária da ascensão capilar aos 28 dias

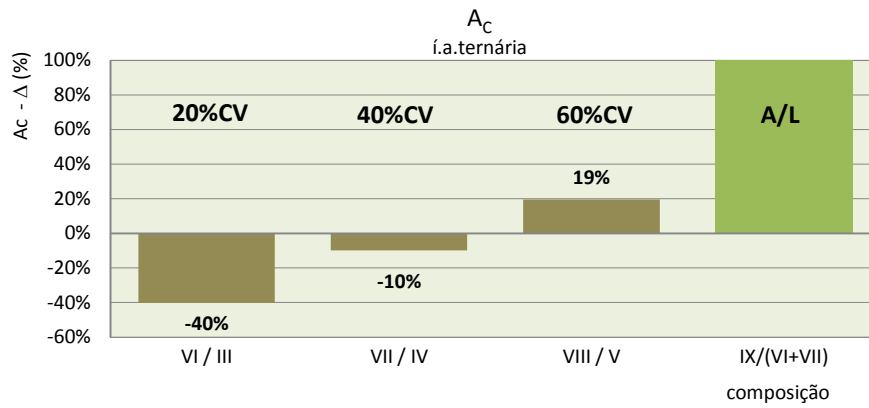


Figura 4-43 - Índice de eficiência ternária da ascensão capilar aos 28 dias

Para além do que já foi referido, poderá depreender-se que não há para a maior parte dos resultados grande sensibilidade com a idade. Fica confirmado que a maior eficiência tanto em termos relativos como absolutos, é para a composição VI (MTK10+CV20), correspondente a uma substituição de 30%. Fica também um indício de que o mecanismo de funcionamento do metacaulino e das cinzas não seja exactamente o mesmo, pois este origina sempre um efeito benéfico. Seria interessante saber relativamente a este ponto se há hidróxido de cálcio disponível, mas com estes elementos não é possível determinar essa questão.

Independentemente da quantidade de cinzas presente na mistura, o metacaulino produz sempre algum efeito benéfico, mesmo não havendo hidróxido de cálcio disponível. Enquanto o metacaulino é mais fino do que as cinzas, funciona melhor como fíler, diminuindo o tamanho dos poros de maiores dimensões e proporcionando misturas mais compactas, logo menos permeáveis.

4.6.4 Resistividade eléctrica

O ensaio de resistividade forneceu os seguintes resultados.

Quadro 4.11 - Resultados da resistividade eléctrica

Composição	Idade	Resistividade			
		Rcubo	c. variação	Rcilindro	c. variação
	(dias)	(W.m)	(%)	(W.m)	(%)
I	7	--	--	--	--
	14	1,9	1,75%	2,8	2,05%
	21	--	--	--	--
	28	1,9	15,89%	2,7	2,99%
	35	1,8	21,67%	2,8	4,24%
	77	2,0	3,54%	2,9	3,78%
	90	--	--	--	--
113	2,6	313,50%	--	--	
II	7	4,8	--	6,9	--
	14	--	--	--	--
	21	6,4	5,76%	8,5	1,23%
	28	7,1	2,56%	9,0	6,13%
	35	12,2	2,55%	15,2	1,35%
	67	19,1	2,20%	--	--
	70	--	--	--	1,20%
	90	--	--	--	--
	106	2,4	4,03%	11,9	1,55%
III	3	0,7	1,55%	0,9	3,11%
	7	1,8	1,12%	2,2	2,22%
	14	2,4	1,43%	3,0	3,43%
	21	3,1	1,74%	4,0	3,12%
	28	3,1	3,25%	4,0	2,32%
IV	3	--	--	--	--
	7	1,3	2,59%	1,7	9,12%
	14	1,8	3,51%	2,2	9,62%
	21	2,6	3,79%	3,3	10,35%
28	2,9	2,25%	3,6	9,68%	
V	3	--	--	--	--
	7	1,1	2,40%	1,3	2,71%
	14	1,8	2,40%	2,2	5,85%
	21	3,0	1,10%	3,5	3,28%
28	3,3	3,42%	3,9	4,21%	
VI	3	1,5	2,72%	3,5	4,30%
	7	5,5	1,28%	7,0	6,70%
	14	12,5	30,07%	--	--
	19	--	--	--	--
	35	14,0	3,74%	18,0	2,84%
	41	--	--	--	--
90	29,6	9,51%	55,4	5,04%	
VII	4	2,2	2,60%	7,0	cucho
	7	4,1	4,04%	5,7	1,87%
	14	7,3	44,82%	--	--
	23	--	--	--	--
	39	28,3	5,84%	38,1	6,84%
	94	82,6	3,69%	82,8	12,05%
VIII	4	--	--	--	--
	7	7,5	1,73%	9,7	2,83%
	15	11,2	4,49%	13,1	8,77%
	20	11,4	1,06%	8,6	33,01%
	25	--	--	--	--
	41	28,5	3,17%	31,7	5,40%
	96	--	--	--	--
109	50,3	--	--	--	
IX	7	8,2	1,84%	9,9	3,71%
	14	--	--	--	--
	21	--	--	--	--
	28	11,2	2,89%	13,7	1,96%
	63	18,8	2,98%	23,0	2,10%
	90	--	--	--	--

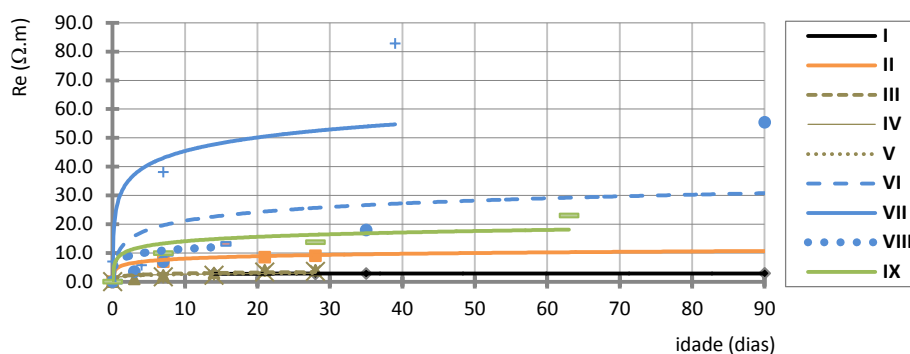


Figura 4-44 - Resistividade eléctrica em provetes cilíndricos até aos 90 dias

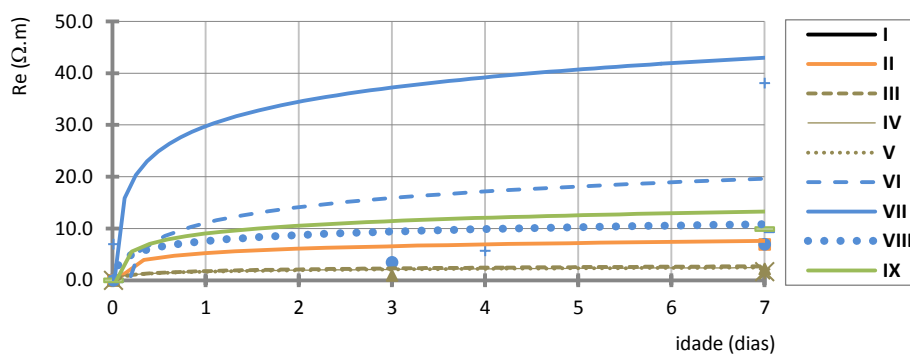


Figura 4-45 - Resistividade eléctrica em provetes cilíndricos até aos 7 dias

Os resultados demonstram alguns coeficientes de correlação elevados, mas na generalidade é possível enquadrar o diagrama da resistividade ao longo do tempo com os restantes resultados de durabilidade. Todas as composições apresentam valores mais elevados que a composição padrão, o que é um possível indicador da maior compacidade destas composições face ao padrão.

Verifica-se que tal como no ensaio de capilaridade, a composição com melhor comportamento é a VII (MTK10+CV60), e em todas as idades. O mesmo acontece em relação ao ensaio de difusão dos cloretos por migração.

Mais uma vez também se poderá verificar que o metacaulino potencia os valores das misturas primárias, sendo desproporcional o ganho destas composições relativamente às cinzas. A menor porosidade destas tem indicado em todos os ensaios de durabilidade, ganhos elevados em relação às misturas binárias.

Segundo *WEI Xiaosheng et al.* [70], o metacaulino além do efeito filler, preenchendo os poros de maior diâmetro que são responsáveis pela passagem de líquidos ou fluidos pelos betões, poderá acelerar as reacções das cinzas. Com os ensaios efectuados não há maneira de estimar de um modo quantitativo essas reacções, mas de uma forma mais ligeira, qualitativamente, os resultados apresentados indiciam que tal possa estar a acontecer.

4.7 Análise de custos

Para custo das argamassas considerou-se apenas os custos dos materiais, sem considerar custos indirectos. De qualquer forma sabe-se que preço do cimento é actualmente competitivo [71], e que futuros aditivos que suscitem grande interesse e procura, terão também de ser competitivos ou então verão o seu preço condicionado face à conjuntura dos mercados. Numa primeira análise de sensibilidade não é crítico a sua flutuação no mercado. Os preços foram adaptados de um estudo sobre análise de argamassas sob efeitos pozolânicos com metacaulino [46]: tendo considerado o preço das cinzas volantes cerca de quatro vezes mais barato que o do cimento, e o preço do metacaulino idêntico ao do cimento. Para o preço da areia foram utilizados os valores de um estudo recente sobre considerações económicas de betões no mercado de carbono [71] (Quadro 4.12). Claro que é meramente uma adaptação, mas de este modo está a acautelar-se, digamos pelo lado da segurança, as vantagens de uma hipotética vantagem da incorporação de metacaulino, onde o mercado fará, com alguma certeza, valer de uma forma onerosa as vantagens directas e ambientais da substituição do cimento.

Quadro 4.12 - Custos dos materiais

C	MTK	CV	M	A
(€/kg)	(€/kg)	(€/kg)	(€/kg)	(€/kg)
0,08	0,08	0,02	0,01	0

Efectuou-se o cálculo dos custos de cada composição (Quadro 4.3) e o cálculo da relação custo em função do desempenho mecânico, aos 28 e 90 dias (Figura 4-46).

Numa análise não qualitativa poderá dizer-se que as cinzas apresentam um fraco desempenho custo/resistência, pelo menos em idades até aos 90 dias. Este facto era de esperar uma vez que as reacções pozolânicas das cinzas são muito lentas.

Quadro 4.13 - Custos por composição e variação destes em relação à composição padrão

Composição	Custo	
	(€/m ³)	Δ(%)
I	53,3	0
II	53,2	-0,2%
III	47,1	-11,6%
IV	41,0	-23,1%
V	34,8	-34,7%
VI	47,1	-11,7%
VII	41,5	-22,2%
VIII	34,7	-34,8%
IX	47,2	-11,5%

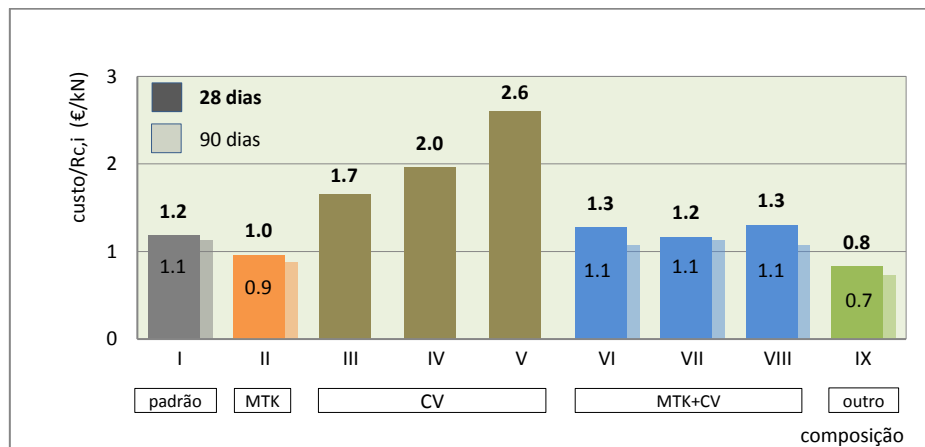


Figura 4-46 - Custos em função do desempenho mecânico

A incorporação de metacaulino isoladamente apresenta valores ligeiramente mais baixos, mas que poderá considerar-se que é semelhante à composição padrão. O que é realmente interessante é verificar que para incorporações de cinzas até 60% (eventualmente mais), o metacaulino corrige de uma forma pragmática todas as composições binárias. Além de todos os ganhos que temos verificado no desempenho, também nas questões económicas notam-se vantagens.

Isto significa que há fortes indícios que seja possível fabricar betões com elevado volume de cinzas, apresentando desempenhos iguais ou superiores aos betões correntes, sendo no entanto mais ecológicos e mais baratos porque as misturas são mais eficientes. Poderá dizer-se que seriam betões eco-eficientes.

Análise do desempenho numa estrutura de betão armado

5.1 Introdução

Um processo pragmático para estudar o potencial sinérgico tanto das adições como da eficiência das misturas ternárias, poderá ser a simulação de vários cenários eventuais e verificar o comportamento de uma característica do produto acabado em função de um parâmetro de desempenho. É evidente que não tem de ser obrigatoriamente um parâmetro de desempenho, mas com estes é muito mais simples efectuar uma correlação mais credível com a realidade.

De entre todos os parâmetros de desempenho, um dos mais comuns e mais fáceis de obter é a resistência mecânica. Esta pode por si só ser uma característica do produto acabado, ou então ser correlacionado com o tamanho de uma viga, a percentagem mecânica de uma secção, o peso final de uma estrutura, etc. As possibilidades são imensas, e dependem do objectivo final do estudo.

Outro parâmetro de desempenho muito interessante é o coeficiente de difusão dos cloretos por migração, que poderá ser relacionado com o recobrimento final de uma peça de betão, o tempo de vida espectável, a corrosão das armaduras, o custo de uma estrutura, facilidade de betonagem, etc. É precisamente este parâmetro de desempenho que irá ser utilizado neste estudo, pelo que se seguirá a descrição e os cálculos necessários a aplicar com este tipo de metodologia.

No presente estudo irá efectuar-se uma análise do desempenho potencial das várias composições, aplicadas em elementos estruturais de betão armado, baseado no recobrimento nominal e na vida útil, segundo a especificação *E 465* [72] e a *EN-1992-1-1* [73]. Esta metodologia pretende determinar num cenário em que algumas composições demonstraram elevadas eficiências, uma projecção de qual poderá ser o desempenho numa situação de projecto. Trata-se apenas de um estudo de sensibilidade da avaliação das composições aos cloretos, no âmbito dos regulamentos e especificações nacionais.

Deverá haver o cuidado de verificar que a análise de uma característica como o recobrimento é redutora na sua verdadeira grandeza, mas fornece elementos de comparação mais pragmáticos. A análise da vida espectável é menos filtrada e fornece elementos de comparação que poderão por vezes não ter interesse prático. Exemplo disso é o facto de dois materiais com o mesmo recobrimento mínimo, apresentarem vidas espectáveis de 500 e 1000 anos. Caso se trate de uma construção corrente, os ganhos na longevidade poderão não encontrar repercussão na sua eficiência real.

5.2 Metodologia

Para colocar em prática este método será necessário primeiro, definir os cenários de exposição e os respectivos parâmetros de acordo com a *Norma E 465* [72]. De entre as várias possibilidades, será mais interessante escolher dois cenários antagónicos, de forma a obter-se um leque de possibilidades mais alargado e daí obter um estudo mais lato. Assim, irá simular-se um edifício de habitação comum situado no litoral português, perto do mar; e um elemento de uma obra de arte de grande importância, em ambiente marinho numa zona submersão permanente, mas que durante um longo período da construção não irá estar submerso, o que implicará uma cura normalizada, tal e qual como o edifício:

- t_g vida útil pretendida (anos);
- CC classe de consequência;
- γ factor de segurança;
- t_p período de propagação (anos) (sim ou não);

Escolhe-se um período de vida útil de 50 e 100 anos, correspondente a "Edifícios e outras estruturas comuns (v.g., hospitais, escolas)." e "Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil", respectivamente (Quadro 5.1).

No que se refere às classes de consequência, a *Norma* prevê 3 classes, mas no mesmo seguimento da escolha do período de vida pretendido, apenas interessam duas, pois estas dependem do nível de controlo da obra: CC2 e CC3 [75], correspondendo a primeira a uma vida útil pretendida de 50 anos (edifício) e a segunda de 100 anos (obra de arte).

Quanto às classes de exposição, para cada vida útil pretendida (t_g) e respectiva classe de consequência (CC) escolhe-se a classe XS1 e XS2, correspondentes ao edifício e à obra de arte, respectivamente (Quadro 5.2). Também define-se a "distância" como 0 km, o tipo de cura como "normalizada", e a temperatura do betão a 15 °C. Ainda no caso da classe XS2 é necessário escolher para o cálculo do K_{vert} , a profundidade de 24 metros, pois é a mais desfavorável.

Quadro 5.1 - Quadro 1 da Norma E 465 [72]

t_g (anos)	t (a utilizar)	Categoria	Exemplos
10	10	1	Estruturas temporárias.
10 a 25	25	2	Partes estruturais substituíveis.
15 a 30	30	3	Estruturas para a agricultura e semelhantes.
50	50	4	Edifícios e outras estruturas comuns (v.g., hospitais, escolas).
100	100	5	Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil.

Quadro 5.2 - Classes de exposição aos cloretos da E 465 [72]

XC	Comentários
XS1	Ar transportando sais marinhos, mas sem contacto directo com a água do mar
XS2	Submersão permanente
XS3	Zona de marés, de rebentação e de salpicos.

Quadro 5.3 - Resumo do nível selecção da segurança da E 465 [72]

Classes de consequências	Classe de fiabilidade	Mínimos índices de fiabilidade	Probab.	Fact. de seg. da vida útil	Exemplos
CC	RC	β	--	γ	--
CC1	RC1	1,2	12,0E-02	2	Elevadas consequências económicas, sociais e ambientais ou para a vida humana, v.g., a edifícios altos, pontes principais, hospitais, teatros;
CC2	RC2	1,5	6,70E-02	2,3	Médias consequências, aplicável, v.g., a edifícios de habitação, industriais e de escritórios.
CC3	RC3	2	2,30E-02	2,8	Pequenas conseq., aplicável v.g., a armazéns ou construções pouco frequentadas.

Postos estes parâmetros de entrada e considerando que para o período de iniciação não se considera o período de propagação, segundo o método da especificação determina-se o período de iniciação de cálculo, t_{ic} . É com este período que irá calcular-se o coeficiente de difusão e a profundidade de penetração de cloretos em cada composição.

$$t_d = \gamma \cdot t_g \quad (\text{eq. 5.1})$$

onde:

t_d vida útil de cálculo (anos);

γ factor de segurança;

t_g vida útil pretendida (anos);

e também:

$$t_{ic} = \gamma \cdot (t_g - t_p) \quad (\text{eq. 5.2})$$

onde:

t_{id} período de iniciação de cálculo (anos);

t_p período de propagação (anos);

As restantes opções da *Norma* são referentes a cada composição em análise, tal como o tipo de ligante, razão A/L, coeficiente de difusão potencial dos cloretos e respectivo período de referência.

5.3 Cálculos

5.3.1 Dados iniciais

Assim, de acordo com a metodologia apresentada foram elaborados 4 estudos por composição, correspondentes aos dois cenários: edifício e obra de arte. Os restantes elementos foram atribuídos de acordo com cada composição. No seguimento apresenta-se um resumo das hipóteses de entrada do cálculo.

Quadro 5.4 - Cenários estudados

Cenário	Edifício	Obra arte
Categoria	4	5
RC - Classe de fiabilidade	RC2	RC3
Exposição	XC1 e XC2	
Distancia à costa	0 km	
Profundidade	n.a.	24 m
β	1,5	2
Probabilidade	0,067	0,023
γ	2,3	2,8
t_g	50 anos	100 anos
t_d	115 anos	280 anos
t_p	0 anos	0 anos
t_{ic}	115 anos	280 anos

5.3.2 Concentração de cloretos

Com estes elementos foi possível calcular para cada amassadura o coeficiente de difusão $D_a(t)$ e o $C(x,t)$.

$$D_a(t) = D_a(t_0)\gamma \cdot (t_g - t_p) \quad (\text{eq. 5.3})$$

$$C(x,t) = C_s \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \quad (\text{eq. 5.4})$$

onde:

$D_a(t)$ coeficiente de difusão dos cloretos no tempo t (m^2/s);

$D_a(t_0)$ coeficiente de difusão dos cloretos no tempo t_0 (m^2/s);

$C(x,t)$ concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, à profundidade $X(m)$, após ter decorrido o tempo t (s) de exposição aos cloretos;

C_s concentração dos cloretos, em % da massa ligante, na superfície do betão ($X=0$), para $t=0$, suposta constante (%);

erf função erro;

D coeficiente de difusão dos cloretos (m^2/s);

X profundidade de penetração dos cloretos (m);

t tempo de exposição (s);

Para o cálculo da “função erro” foi utilizado o método patente na especificação E-465 - anexo D. Para o cálculo do “inverso da função erro”, foi utilizada uma expressão aproximada, de forma a ser programada em Excel:

$$\text{erf}^{-1} \approx -\text{INV.NORMP}((1-((C_s - C_R) / C_s))/2)/\text{RAIZQ}(2) \quad (\text{eq. 5.5})$$

onde:

C_s concentração dos cloretos, em % da massa ligante, na superfície do betão ($X=0$), para $t=0$, suposta constante (%);

C_R concentração dos cloretos, em % da massa ligante (%);

Sendo t o período em estudo, efectuaram-se cálculos e diagramas com a previsão do $C(x,t)$ ao longo da profundidade da argamassa, ou eventual elemento de betão equivalente. Sabendo que numa exposição aos cloretos é necessário haver uma concentração crítica (C_{cr}) a partir da qual se admite que há corrosão [76], será possível verificar-se a que profundidade o valor dessa concentração crítica não é ultrapassado. Isto é o mesmo que dizer, qual o recobrimento mínimo para proteger um elemento de betão ou argamassa a um ataque por cloretos. Este é o motivo da construção dos diagramas seguintes.

Quadro 5.5 - Cálculos de durabilidade

Cenário	Edifício		Obra de arte	
	0.55	0.45	0.55	0.45
A/L	0.55	0.45	0.55	0.45
Cb	2%	2%	3%	3%
$K_{A/C}$	1,375	1,125	1,375	1,125
Ktemp	1,2	1,2	1,2	1,2
Kvert	0,7	0,7	1,4	1,4
Khor	1	1	1	1
Cs	2,31%	1,89%	6,93%	5,67%
C_R	0,40%	0,40%	0,40%	0,40%
ξ	0,96	0,88	1,34	1,28
$K_{D,C}$	2,4	2,4	2,4	2,4
$K_{D,RH}$	0,4	0,4	1	1
$K_{D,T}$	0,8	0,8	0,8	0,8
n	0,65	0,65	0,55	0,55

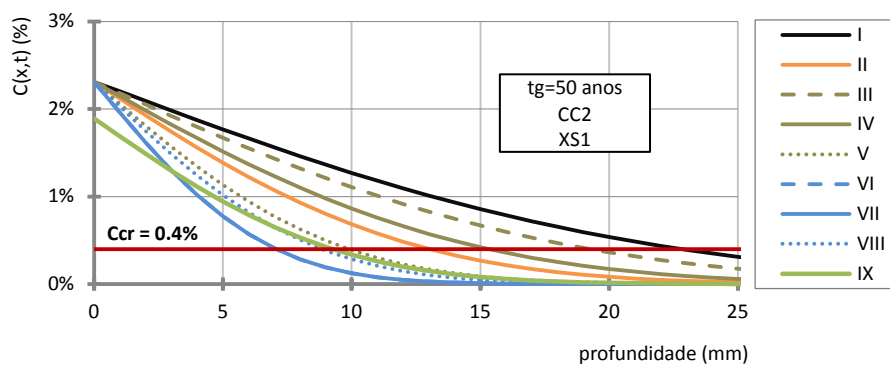


Figura 5-1 - Perfil de cloretos totais, para tg=50 anos, CC2 e exposição XS1

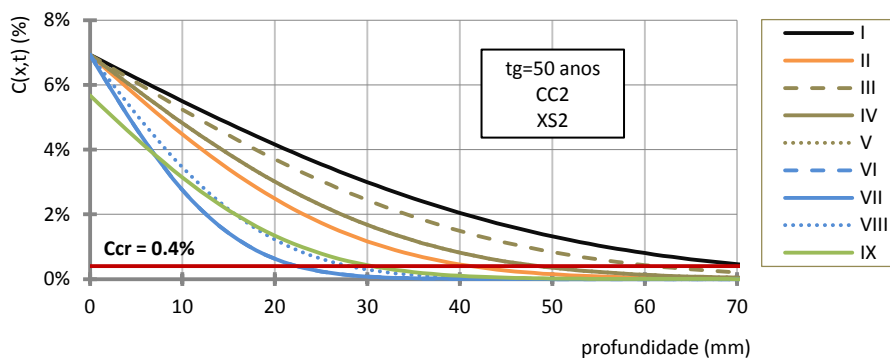


Figura 5-2 - Perfil de cloretos totais, para tg=50 anos, CC2 e exposição XS2

A linha vermelha refere-se à concentração crítica de cloretos, acima da qual se admite ocorrer a corrosão. Fica bem evidenciado que todas as composições são

melhores neste parâmetro do que a composição padrão. Existe uma grande diferença entre as composições binárias e ternárias, e de uma forma mais subtil entre a composição VII e a IX, podendo haver eventualmente vantagem da incorporação de mais cinzas em detrimento da razão A/L. A composição VI (MTK10+CV20) e VII (MTK10+CV40), visto que apresentam o mesmo coeficiente de difusão, tem o mesmo desempenho. Aliás, os resultados são qualitativamente semelhantes aos verificados para o coeficiente potencial dos cloretos por migração, já descrito anteriormente. Também aqui a melhor composição é a VI (MTK10+CV40).

Para uma vida útil pretendida de 100 anos os aspectos são idênticos (Figura 5-3 e Figura 5-4).

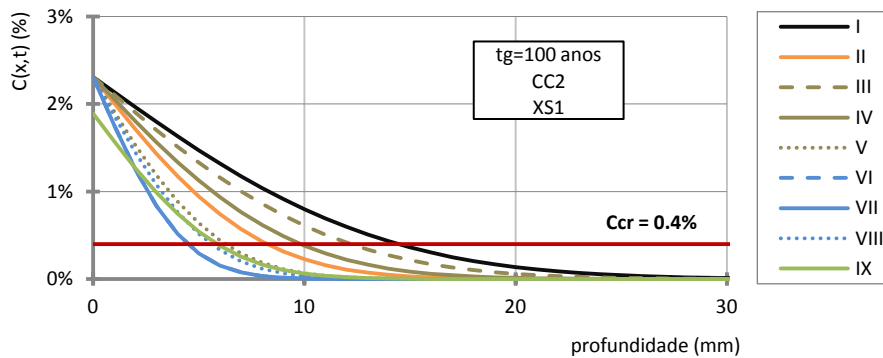


Figura 5-3 - Perfil de cloretos totais, para tg=100 anos, CC2 e exposição XS2

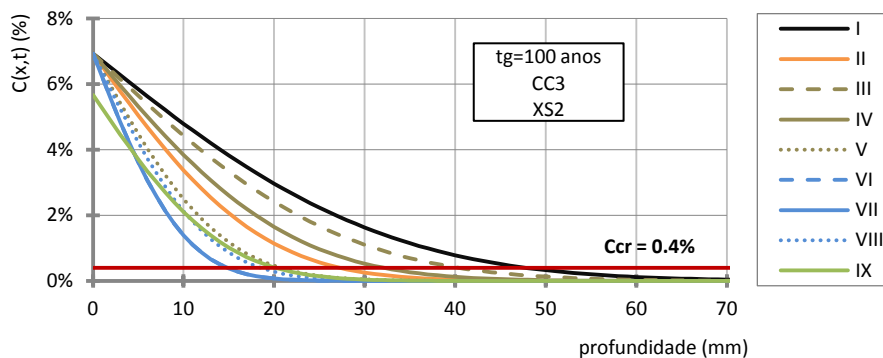


Figura 5-4 - Perfil de cloretos totais, para tg=50 anos, CC3 e exposição XS3

5.3.3 Recobrimento nominal

Um parâmetro de interesse é o recobrimento nominal. Para a sua determinação é necessário calcular o recobrimento mínimo capaz de cumprir os requisitos da durabilidade, impostos na especificação *LNEC E 465* [72] (ataque por cloretos neste caso).

$$C_{\text{nom}} = C_{\text{min}} + \Delta C_{\text{dev}} \quad (\text{eq. 5.6})$$

e

$$C_{\text{min}} = \max\{C_{\text{min},b}; C_{\text{min},\text{dur}} + \Delta C_{\text{dur},y} - \Delta C_{\text{dur},\text{st}} - \Delta C_{\text{dur},\text{add}}; C_{\text{min},f}; 10\text{mm}\} \quad (\text{eq.5.7})$$

onde:

C_{nom} recobrimento nominal (mm);

C_{min} recobrimento mínimo (mm) de forma a garantir:
 - transmissão das forças de aderência aço-betão;
 - adequada resistência ao fogo;
 - protecção do aço contra a corrosão;

$C_{\text{min},b}$ recobrimento mínimo de forma a garantir transmissão das forças de aderência aço-betão (mm);

$C_{\text{min},\text{dur}}$ recobrimento mínimo de forma a garantir adequada protecção do aço contra a corrosão; (mm);

$C_{\text{min},f}$ recobrimento mínimo de forma a garantir adequada resistência ao fogo; (mm);

$\Delta C_{\text{dur},\text{st}}$ redução no recobrimento para uso de aço inoxidável; (mm);

$\Delta C_{\text{dur},\text{add}}$ redução no recobrimento no caso de haver protecção adicional; (mm);

ΔC_{dev} margem de segurança (mm). segundo a *Norma NP ENV 13660-1* [75], para Portugal é de 10mm;

Segundo a especificação E-465 [72], não é possível utilizar as reduções de recobrimento quando este é determinado por uma metodologia de desempenho, pelo que não se considera no presente estudo. Considerando que se trata de uma estrutura de betão armado, com presença de varões com diâmetro de 25mm, o valor mínimo de $C_{\text{min},b}$ é de 25mm. Apenas será maior para acautelar o ataque por cloretos, ou seja devido a $C_{\text{min},\text{dur}}$.

Foi calculado o recobrimento devido à exposição ambiental para vários cenários, com o auxílio das seguintes expressões, onde X representa $C_{min,dur}$:

$$X = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{D \cdot t} \quad (\text{eq. 5.8})$$

sendo

$$\xi = \text{erf}^{-1} \frac{C_s - C(x, t)}{C_s} \quad (\text{eq. 5.9})$$

onde:

X profundidade de penetração dos cloretos (m);

D coeficiente de difusão dos cloretos (m^2/s);

t tempo de exposição (s);

erf^{-1} inverso da função erro;

C_s concentração dos cloretos, em % da massa ligante, na superfície do betão ($X=0$), para $t=0$, suposta constante (%);

$C(x, t)$ concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, à profundidade X (m), após ter decorrido o tempo t (s) de exposição aos cloretos;

Com os valores de recobrimento calculados (Quadro 5.6) foi possível desenharem-se diagramas que traduzem características do desempenho do material em serviço (Figura 5-5 e Figura 5-6).

No que respeita ao recobrimento nominal, é fácil verificar-se que a vantagem do metacaulino é tão dominante que bastará 10% deste material, usado individualmente ou em conjunto com cinzas volantes, para se atingir a máxima eficiência possível no espectro das composições estudadas. Para um período de vida útil pretendida de 50 anos e uma classe de consequência menos penalizadora, as diferenças esbatem-se um pouco, mas o metacaulino continua a fazer efeito para composições até 40% de cinzas, sendo a sua eficiência máxima para misturas com incorporações de cinzas mais baixas, neste caso a composição III (CV20).

No que respeita ao aspecto central deste trabalho, conclui-se que é possível substituir grandes volumes de cimento e obter betões de desempenho melhorado ou até elevado.

Quadro 5.6 - Cálculo do recobrimento nominal

Recobrimento		tg=50 anos; CC2; XS1								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Cmin,dur	(mm)	14,6	8,3	12,3	9,8	6,3	4,5	4,5	5,7	5,9
Cmin, b	(mm)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Cnom	(mm)	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0

Recobrimento		tg=50 anos; CC2; XS2								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Cmin,dur	(mm)	46,4	26,5	39,2	31,2	20,1	14,4	14,4	18,0	19,6
Cmin, b	(mm)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Cnom	(mm)	56,4	36,5	49,2	41,2	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0

Recobrimento		tg=100 anos; CC3; XS1								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Cmin,dur	(mm)	17,1	9,7	14,4	11,5	7,4	5,3	5,3	6,6	6,9
Cmin, b	(mm)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Cnom	(mm)	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0

Recobrimento		tg=100 anos; CC3; XS2								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Cmin,dur	(mm)	56,7	32,3	47,9	38,1	24,6	17,6	17,6	22,0	23,9
Cmin, b	(mm)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Cnom	(mm)	66,7	42,3	57,9	48,1	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0

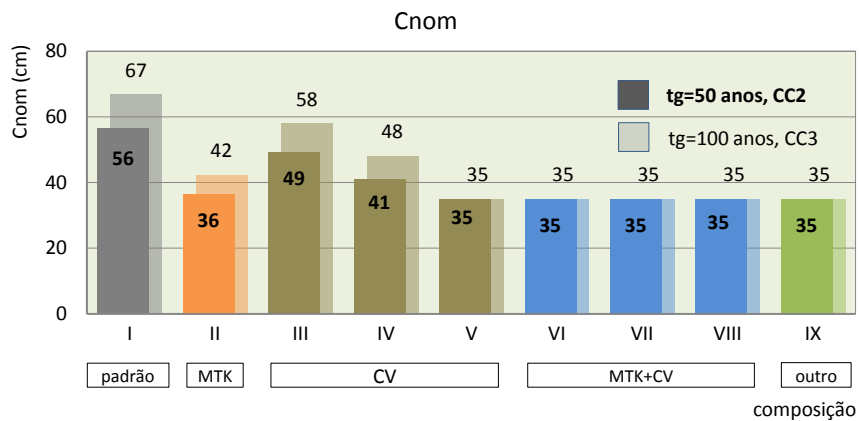


Figura 5-5 - Recobrimento nominal para exposição XS2 e XS3

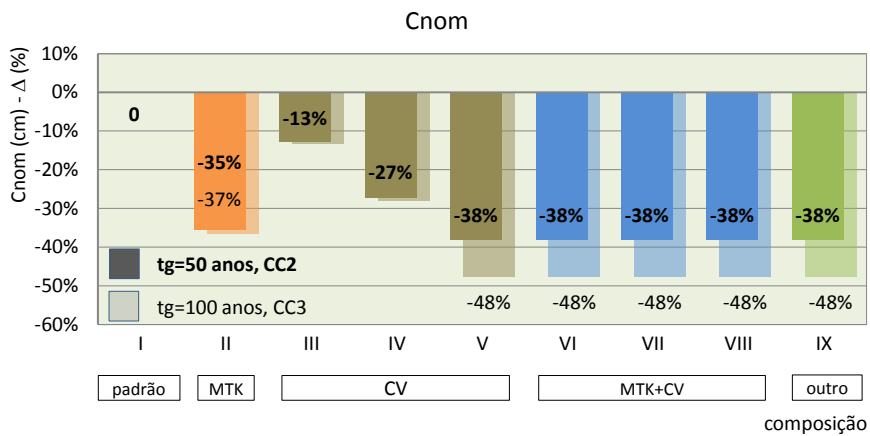


Figura 5-6 – Variação com a composição padrão do recobrimento nominal para exposição XS2 e XS3

5.3.4 Previsão da vida útil

O recobrimento nominal é um parâmetro importante, mas poderá ser visto como redutor, na medida em que o facto de duas composições cumprirem as especificações com o mesmo recobrimento, a durabilidade esperada poderá ser muito diferente. Esse potencial poderá ser analisado relativamente à vida útil espectável.

Para calcular a previsão da vida útil utilizou-se o conceito de vida útil pretendida t_g .

$$t_{ic} = \left(\frac{X^2}{4 \cdot D \cdot \xi^2} \right) \quad (\text{eq. 5.10})$$

e

$$D_a(t) = k \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot D_0 \quad (\text{eq. 5.11})$$

onde os parâmetro tem o significado já descrito atrás, e:

D_0 coeficiente de difusão potencial, determinado em laboratório de acordo com a especificação *LNEC E 463* [51], com betão na idade de referência $t_0=28$ dias (m^2/s);

t_0 idade de referência (s);

k factor para ter consideração alguns parâmetros da especificação *E 465*;

Com estas duas equações, através de um processo interactivo é possível determinar o período de iniciação de cálculo, sabendo que para um dado instante t , o coeficiente de difusão obtido origina um igual instante t_{ic} . Após isto, a determinação do período de vida pretendida é obtido rapidamente, dividindo o t_{ic} pelo índice de fiabilidade β , tendo em consideração as classes de consequências. No Quadro 5.7 está o resumo dos resultados obtidos. Poderá ver-se que para a classe de exposição XS1 os resultados são superiores a 800 anos, pelo que optou-se por realizar diagramas apenas da classe XS2, que neste caso é a exposição mais interessante para analisar este aspecto.

Quadro 5.7 - Previsão da vida útil pretendida - resumo

Cenário	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
CC2; XS1	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
CC2; XS2	3	39	7	19	131	574	574	216	148
CC3; XS1	879	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
CC3; XS2	3	32	5	15	108	472	472	177	121

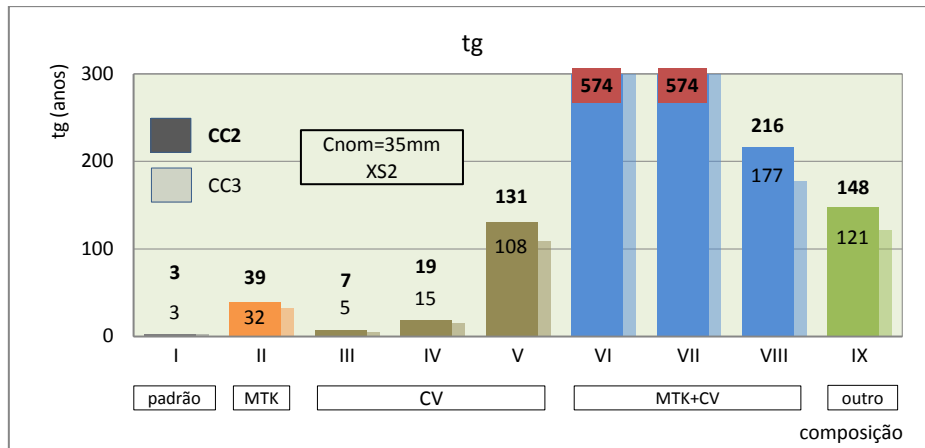


Figura 5-7 - Previsão da vida útil com exposição XS2

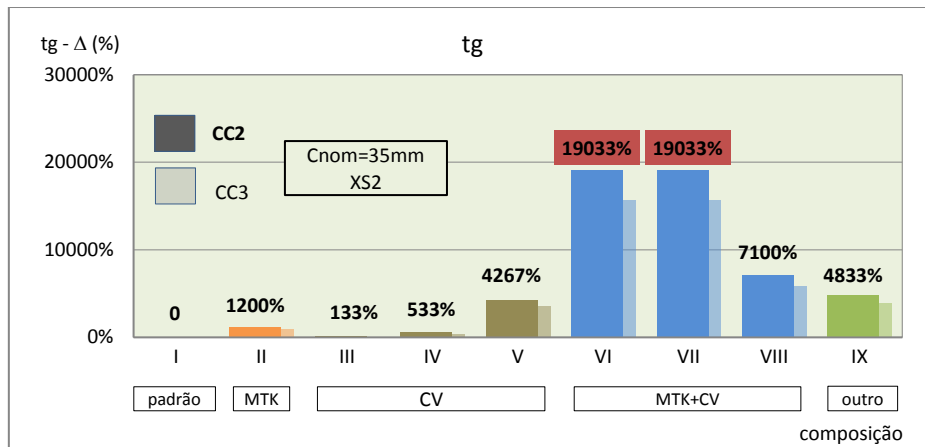


Figura 5-8 - Variação em relação à composição padrão da previsão da vida útil com exposição XS2

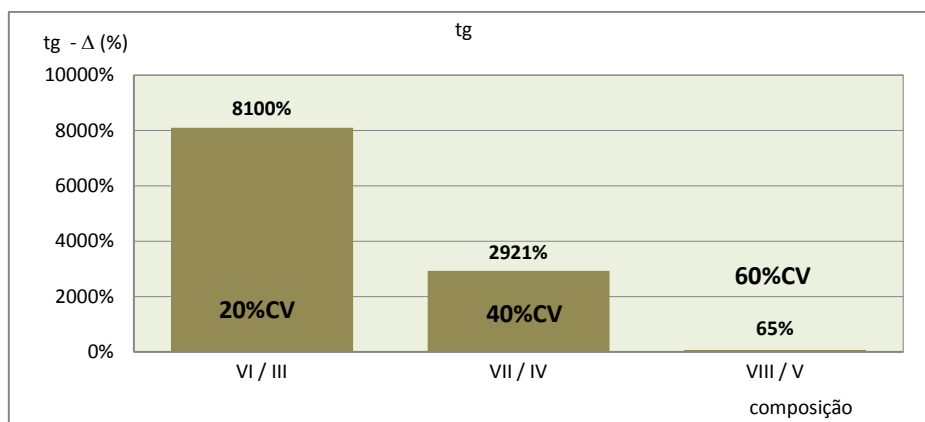


Figura 5-9 - Índice de actividade ternária em relação à composição padrão da previsão da vida útil com exposição XS2

Os resultados são bastante claros: para a classe XS1 o recobrimento de 35 mm é bastante superior ao necessário para todas as hipóteses colocadas. Mas no que se refere à classe XS2 as coisas são bem diferentes, evidenciando a grande vantagem das misturas ternárias e de todas as adições.

O índice de eficiência ternária deverá ser analisado com alguma ponderação. Qualitativamente, o metacaulino proporciona ganhos elevados para incorporações até 40% de cinzas. Entre os 40 e 60% de cinzas, o metacaulino ainda gera ganhos adicionais, mais modestos mas promissores: cerca de 54%.

5.4 Conclusão

Como conclusão, poderá afirmar-se o seguinte:

- O metacaulino proporciona a substituição de grandes volumes de cimento, obtendo-se betões de desempenho melhorado ou até elevado.
- Na classe mais comum de exposição XS1, para a construção de edifícios de habitação no litoral português (CC2), não há grande diferença ao nível do recobrimento nominal das armaduras. Esta "indiferença" poderá não se verificar para o cimento tipo CEM I, pois como se sabe os cimentos compostos tem maior resistência às acções químicas, tais como sulfatos, ácidos, álcalis-agregado, e cloretos [53].
- Para classes de exposição aos cloretos mais severas e controlo de obra mais exigente, a eficiência do metacaulino, isolado ou com cinzas, é superior às composições binárias com cinzas. Apenas se verifica um equilíbrio face às composições com 60% de cinzas.
- As composições ternárias com metacaulino e cinzas poderão ser uma solução interessante, como por exemplo, para betões de elevado desempenho em ambientes agressivos ao nível de ataque com cloretos.

6

Conclusões

6.1 Introdução

Após o desfecho de todo o processo, desde a preparação e planeamento, da campanha de ensaios e da análise de resultados, considera-se que desta dissertação contabiliza-se um saldo bastante positivo, promitente e estimulante. Os objectivos foram cumpridos e ultrapassados relativamente ao programa inicial, deixando abertas várias janelas para desenvolver futuras investigações promissoras.

6.2 Conclusões mais relevantes

Após a crítica efectuada aos resultados no capítulo anterior, purgou-se o conhecimento obtido e resumiu-se nas seguintes conclusões, mais relevantes:

Talvez seja possível fabricar betões com elevados volumes de cinzas volantes e com uma percentagem reduzida de metacaulino, com desempenhos mecânicos e de durabilidade tão bons ou melhores que os betões "normais". Estes betões poderiam ser usados em aplicações correntes a um custo muito mais reduzido para o promotor, diminuindo os custos de construção mas sobretudo diminuindo drasticamente o consumo de cimento ao nível global, com vantagens ambientais imensas. A grande incorporação de cinzas teria ainda a vantagem de reaproveitar um subproduto industrial, que de outro modo teria de ser armazenado, tratado, podendo também ser um foco de poluição. Todos os impactes negativos associados à indústria do cimento seriam reduzidos, desde as emissões de CO₂, consumo de energia, as cicatrizes na paisagem das explorações, os problemas com os aquíferos, etc. Sendo a indústria do

cimento uma das mais intensivas, e sendo o seu produto, o mais consumido pelo homem (apenas ultrapassado pela água), estaremos a falar de reduções do consumo de cimento em proporções planetárias. Isto seria sem dúvida um betão eco-eficiente.

Também há indícios da capacidade de produzir estas misturas ternárias com elevados volumes de cinzas e uma fracção mais reduzida de metacaulino, com razões A/L muito baixas (0.3 ou até mesmo 0.2), juntamente com superplastificante e com inertes resistentes. Isto, com o propósito de obter-se um material ultra-compacto, muito resistente e durável, a custos relativamente baixos, e com boa trabalhabilidade.

Será possível utilizar o metacaulino como factor corrector ou regulador do desempenho mecânico das cinzas volantes, nomeadamente nas idades mais jovens. Haverá contudo uma incorporação óptima que terá de ser estudada e articulada com os vários regulamentos.

Será possível utilizar betões com misturas ternárias de cinzas volantes e metacaulino, com uma eficiência mecânica mais elevada do que a preconizada na *Norma NP EN-206-1*, pelo *factor-K*, actualmente muito penalizador [77].

As resistências mecânicas obtidas com as adições ternárias chegam ao mesmo patamar que as composições correntes. Estes resultados são mais interessantes na medida que em estudos efectuados com estas mesmas cinzas da central do Pego [27], verificou-se que precisamente estas não apresentavam boas características relativamente às resistências mecânicas. Isso demonstra o potencial de correcção das composições que o metacaulino proporciona, podendo ser um meio mitigador nas composições com elevadas incorporações de cinzas ou com cinzas de desempenho mecânico fraco. A incorporação de metacaulino proporciona um ganho significativo na resistência em todas as idades. Provavelmente com efeito melhorado ao longo da idade.

A incorporação do metacaulino poderá ser interessante numa perspectiva de correcção do comportamento mecânico, quando se está presente com composições pozolânicas de reacção lenta ou com grande volume de substituição do cimento.

6.3 Trabalhos futuros

De forma a confirmar e quantificar estes indícios, será necessário efectuar campanhas com betões e com vários tipos de cimento. Espera-se que o desempenho seja algo sensível à quantidade de clínquer e à presença de determinados compostos.

É muito importante verificar com o maior cuidado o verdadeiro valor potencial das misturas ternárias face às binárias, caso estes resultados se confirmem. Tanto nas resistências mecânicas, mas especialmente na durabilidade. Os valores de elevada resistência ao ataque de cloretos, absorção por capilaridade e resistividade eléctrica, indiciam uma outra utilidade para este tipo de betões para ambientes muito expostos a ataques químicos ou betões de grande longevidade para edifícios relevantes ou de longevidade importante, tais como os templos.

É importante investigar a aplicação deste conhecimento nos betões de elevadas resistências, comparando o desempenho potencial do metacaulino com a sílica de fumo.

Seria interessante verificar o consumo e a presença de hidróxido de cálcio, de forma a quantificar se o metacaulino proporciona a aceleração das reacções das cinzas volantes, e qual o seu mecanismo. Também se haverá de tornar essa aceleração mais eficiente de forma a obterem-se betões ainda mais resistentes e duráveis.

É importante despistar qual quantidade óptima de metacaulino e quais os factores decisivos dessa mesma quantidade. Poderá ser o volume de cinzas, a sua qualidade, o tipo de cimento, etc.

Terá de ser avaliado do ponto de vista da *Norma NP EN 206-1* [77], qual o *factor-k* a utilizar neste tipo de misturas.

Também a qualidade do metacaulino e o método de fabrico terá de ser avaliada, de forma de averiguar a influência que terá neste tipo de misturas.

6.4 Desenvolvimento do estado do conhecimento

Após este pequeno contributo, há fortes indícios de que seja possível a produção de betões eco-eficientes de uma forma generalizada na construção. Além das aplicações muito específicas onde já se utilizam com vantagens os betões com grande volume de incorporação de cinzas ou outros materiais pozolânicos de

reactividade lenta, poderá não ser difícil a “democratização” da sua utilização para toda a construção.

Mais do que a mera imergência para as questões ambientais, este tipo de misturas poderiam ser mais económicas, mais eficientes no desempenho, mais duráveis, mais resistentes, amigas do ambiente, menos patológicas, etc. Caso se venha a comprovar em estudos com betões estas e outras características, muito dificilmente o *lobby* das cimenteiras poderia travar este produto. Tal como se referiu nos capítulos anteriores, as metas que as próprias cimenteiras traçam de forma a mitigar os impactes negativos da sua indústria, poderiam ter grandes ganhos com este tipo de betões, com perdas significativas financeiras é claro, mas justificando até a existência e o empenho da sua própria indústria perante a sociedade. Afinal, justificando o esforço de todos nós por melhorar a nossa condição humana e o ambiente que o rodeia.

Bibliografia

1. **E., Gordon J.** Estructuras: o por qué las cosas no se caen. SPAIN : Calamar ediciones, 2004.
2. **METHA, P. Kumar e MONTEIRO, Paulo J.M.** 3ª edição *CONCRETO - Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo : IBRACON, Maio de 2008. pp. 77, 234.
3. **Miret, Eduardo Torroja.** Razón y ser de los tipos estructurales. Madrid : Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 2007. Vols. Colección ciencias, humanidades e ingeniería, 87.
4. **Pagnussat, Daniel T., et al.** Avaliação das Manifestações Patológicas em Fachadas de Prédio Histórico na Cidade de Porto Alegre. São Paulo : s.n., 2003. V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas - SBTA.
5. **IAPMEI - Rede de Gabinetes de Empresa - Branca Soares.** Contributo para o conhecimento no contexto internacional do sector OPMNM - vidro e artigos de vidro, produtos cerâmicos e do barro, cimento e betão, trabalho de pedra e OPMNM diversos. s.l. : IAPMEI - Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas, 2007.
6. **World Business Council for Sustainable Development; Internacional Energy Agency.** Cement roadmap targets 2010. s.l. : OECD/IEA and The World Business Council for Sustainable Development, 2009.
7. —. Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. s.l. : OECD/IEA and The World Business Council for Sustainable Development, 2009.
8. **Pinto, Amândio Teixeira.** *Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina*. Guimarães : Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Fevereiro de 2004. Tese de doutoramento, pp. 77, 196, 241, 242, 295.

9. **CIMPOR**. Turquia - Utilização de cinzas volantes e melhora das emissões de CO₂. s.l. : CIMPOR TEC - Assessoria para o desenvolvimento sustentável.
10. **Sampaio, Joaquim, Coutinho, J. Sousa e Sampaio, M. Noémia**. Melhoria do desempenho de betões por metacaulino. Foz do Iguaçu, Brasil : Instituto Brasileiro do Concreto, Agosto de 2001. 43º Congresso Brasileiro do concreto.
11. **MARTIN-CALLE, S.** Pouzzolanicité d'argiles thermiquement actives: Influence de la mineralogie et des conditions de calcination. France : INSA – Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1989. Tese. citado por Sampaio Joaquim; Coutinho J. Sousa Sampaio M. Noémia.
12. **Pera, J., Ambroise, J, E Messi, A.** Pozzolanic Activity of Calcined Laterite. July-August de 1998. Vols. 63 Nr 7-8, Silicates Industriels. Ceramic Science and Technology, pp. 107-111. citado por Sampaio Joaquim; Coutinho J. Sousa Sampaio M. Noémia.
13. **Galopim de Carvalho, A. M.** Sopas de Pedras. 1ª edição s.l. : Gradiva, Setembro de 2000. Vols. Volume I - De Mineralibus, pp. 279,280.
14. **Korbel, Petr e Novák, Milan**. Enciclopédia de minerais. 1º edição s.l. : Livros e livros, Outubro de 2000.
15. **Eduardo Ferraz, Celso S.F. Gomes, Piotr Wyszomirski**. Kaoliny Północno-Zachodniej. *MATERIAŁY CERAMICZNE* 2/2008. s.l. : SUROWCE, Fevereiro de 2008. Vol. tom LX.
16. **NP EN 450-1**. *Cinzas volantes para betão - Parte1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa : Instituto Português da Qualidade, 2006.
17. **NP EN 450-2**. *Cinzas volantes para betão - Parte2: Avaliação da conformidade*. Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Setembro de 2006.
18. **ASTM C618**,. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *Annual Book for ASTM Standards*. s.l. : American Society for Testing and Materials, February de 1998. Vol. 04.02, pp. 301-303.
19. **ASTM C618 SUMMARY**. *Summary - ASTM C-618, Pozzolan*. s.l. : ISG Resources.
20. **Metha, P.K., and P.C.Aintcin**. Cem., Concr. Aggregates,v.12, n.1. Philadelphia, PA : American Society for Testing Materials, 1990. pp. 47-52.

-
21. **Camões, Aires e Ferreira, Rui Miguel.** Inovação em betões: Nova normalização e produção de betões especiais. s.l. : Departamento de Engenharia Civil - Universidade do Minho, 2006. Comunicações do seminário.
22. **NP EN 197-1.** *Cimento parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Abril de 2001. p. 16.
23. **CIMPOR - Indústria de cimentos, SA.** *Cimento - Ficha de dados de segurança.* Agosto de 2009.
24. **Coutinho, A. de Sousa.** *Fabrico e propriedades do betão.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006. pp. 9, 94-99, 117. Vol. II.
25. **NP EN 196-1.** 3ª edição *Métodos de ensaios de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Outubro de 2006.
26. **CIMPOR.** Ficha técnica: Cimento Portland de Calcário - CEM II/B-L 32,5N. s.l. : CIMPOR, Indústria de cimentos, SA.
27. **Camões, Aires.** *Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes.* Guimarães : Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2002. Dissertação de doutoramento, pp. 54, 184-188, 235, 253, 289-298, 402.
28. **E 64.** *Cimentos - determinação da massa volúmica.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Dezembro de 1979. Documentação normativa, especificação LNEC, p. 2.
29. **NP EN 196-6.** *Métodos de ensaio de cimentos - determinação da finura.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Junho de 1990. p. 17.
30. **NP EN 196-3.** *Métodos de ensaio de cimentos - determinação do tempo de presa e da expansibilidade.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Junho de 1990. p. 12.
31. **Eng.º Fernando Queirós.** MIBAL - Minas de Barqueiros, SA. 2009.
32. **NP EN 933-1.** *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Novembro de 2000.

33. **NP EN 933-2.** *Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Dezembro de 1999.
34. **ISO 3310-1.** *Test sieves - Technical requirements and testing. Part 1: Test sieves of metal wire cloth.* 1990.
35. **ISO 3310-2.** *Test sieves - Technical requirements and testing. Part 1: Test sieves of perforate metal plate.* s.l. : International Organization for Standardization, 1990.
36. **NP EN 933-5.** *Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 5: Equipamento comum e calibração.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Maio de 2004.
37. **Dreux.** *Connaissance du béton.* Paris : Ed. Soc. Dif. Tech. Bat. Trav. Publ., 1964. p. 74. citado por Coutinho, A. de Sousa.
38. **Faury.** *Le Béton.* 3^a ed. Paris : Ed Dunod, 1958. citado por Coutinho, A. de Sousa.
39. **AM. CONC. INST.** *Cement and concrete terminology.* s.l. : Am. Conc. Inst. Publication, SP 19. Reported by ACI Committee 116, p. 79. citado por Coutinho, A. de Sousa.
40. —. *Standard Specifications for concrete aggregates.* ASTM Designation C33. citado por Coutinho, A. de Sousa.
41. **NP EN 1097-3.** *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, 2002.
42. **NP EN 1008.** *Água de amassadura para betão - Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Abril de 2004. p. 17.
43. **EN 1015-3.** *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).* Brussels : CEN, March de 2004. European Standard.

44. **NP EN 934-2.** *Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Novembro de 2006.
45. **Lourenço, Jorge F.** O ensino das argamassas nas escolas de engenharia civil. comunicação.
46. **Lourenço, Jorge F, Ferraz, Eduardo J. M. O e Coroadó, João P. P. F.** Metodologia para a determinação das vantagens de argamassas sob efeito pozolânico de metacaulinos. Lisboa, 2005 : s.n., 2005. comunicação do 1^a congresso nacional de argamassas de construção, pp. 2,3.
47. **Coutinho, Joana de Sousa.** *Materiais de construção 2: apoio às aulas.* s.l. : Feup, 2002.
48. **Joisel, A.** L'Homogénéité du béton et les bétonnières. II: Essais de bétonnières à tambour basculant. Série Matériel de Chantier n.º 5 s.l. : Ann. Inst. Tech. Bat. Trav. Publ., Jan de 1951. Vol. n.º 169. citado por Coutinho, A. de Sousa.
49. **EN ISO 7500-1.** *CEN EN ISO 7500-1 Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system.* s.l.: European Committee for Standardization, August de 2004. Document Information.
50. **PE-002.** *(Betão) Resistividade eléctrica - Medição da resistividade eléctrica de uma superfície de um elemento de betão armado.* Guimarães : Laboratório de materiais de construção - Universidade do Minho, Maio de 2005. Procedimento de ensaio.
51. **E 463.** *Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Novembro de 2004. Documentação normativa, especificação LNEC.
52. **E 395.** *Betões - Determinação da Absorção de água por imersão - Ensaio no vácuo.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Maio de 1993. Documentação normativa, especificação LNEC.
53. **Ferreira, Rui Miguel.** *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão.* Setembro de 2000. Dissertação de doutoramento, pp. 2.17, 2.19, 3.30, 6.22, 7.4.

54. **EN 1015-18.** *Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.* Brussels : CEN, December de 2002. European Standard.
55. **Silva, Ana Alexandre.** Gráficos e mapas: representação de informação estatística. s.l. : Lidel, Fevereiro de 2006.
56. **Cabral, Paulo.** Erros e incertezas nas medições. s.l. : IEP - Instituto Electrotécnico Portugues - Laboratório de Metrologia e Ensaios, ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto - Departamento de Física, Julho de 2004. Documento de apoio aos alunos, pp. 39-50.
57. **Mlodinow, Leonard.** O Passeio do bêbado. 1ª edição Lisboa : Editorial Bizâncio, Julho de 2009.
58. **Rodrigues, José Alberto.** Métodos numéricos: Introdução, Aplicação e Programação. 1ª edição Lisboa : Edições Sílabo, 2003. p. 19.
59. **Santos, F. Correia.** Fundamentos da análise numérica. 1ª edição Lisboa : Edições sílabo, Outubro de 2002.
60. **Almeida, Ivan.** Betões de alta resistência e durabilidade. Composição e características. s.l. : IST, 1990. Tese, p. 321. citado por Coutinho, A. de Sousa.
61. **CEB-FIP.** Préposition de compléments aus principes et recommandations internationales CEB-FIP-1970. Jan. de 1971. Bull. d'information, nº 4, pp. 17, 96. citado por Coutinho, A. de Sousa.
62. **Bossi, J.** Recherches expérimentales sur le comportement des éprouvettes de béton à l'essai brésilien. s.l. : RILEM, Março de 1964. Mat. Const., nº 22, pp. 9, 96. citado por Coutinho, A. de Sousa.
63. **Price, W.H.** Factors influencing concrete strength. s.l. : J. Am Conc Inst., Fev. de 1951. p. 417. citado por Coutinho, A. de Sousa.
64. **Ferreira, Rui Miguel.** Durabilidade do betão: processos de transporte, degradação e mecanismos da corrosão. Universidade do Minho - Departamento de Engenharia Civil 2008. Sebenta da cadeira de Durabilidade das Construções.
65. **Coutinho, A. de Sousa.** *Fabrico e propriedades do betão.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006. pp. 95-96, 308. Vol. II.

66. <http://www.ecoba.com>. [Online] Associação Europeia para a Utilização de Produtos de Combustão do Carvão, ECOBA. <http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>.

67. **Duriez, M.** Ciments opposer, avec efficacité, à la corrosion des armatures ou des fils d'acier, au sein des bétons armés ou précontraints. Julho-Agosto de 1964. Vol. n. 356, Travaux, p. 618. citado por Coutinho, A. de Sousa.

68. **E 393.** Betões - *Determinação da absorção de água por capilaridade*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Maio de 2003. Documentação normativa, especificação LNEC.

69. **Barbosa, Fred R., Mota, João M.F. e M.P., Carneiro Arnaldo.** A influência no teor de adição metacaulin das propriedades no estado endurecido: capilaridade e resistência mecânica de argamassas inorgânicas para recuperação de monumentos históricos. Florianópolis : s.n., Agosto de 2006. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído.

70. **Wei Xiaosheng, Zhu Hongping, Li Guowei, Zhang Changqing, Xiao Lianzhen.** Properties of High Volume Fly Ash Concrete Compensated by Metakaolin or Silica Fume. Vol. 22 No.4, Properties of High Volume Fly Ash Concrete.

71. **Torgal, Fernando Pacheco, Castro-Gomes, J. P. e Jalali, Saïd.** Cimento Portland Versus Ligantes Geopoliméricos: Considerações Económicas Sobre as Implicações do Mercado do Carbono. s.l. : Universidade da Beira Interior. Comunicação.

72. **E 465-2005.** Betões - Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS. s.l. : MOPTC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Março de 2005. documentação normativa - Especificação LNEC.

73. **EN 1992-1-1.** Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004. citado pelar E 464.

74. **E 464-2005.** Betões - Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais. s.l. : MOPTC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Março de 2005. documentação normativa - Especificação LNEC.

75. **NP ENV 13670-1.** Execução de estruturas em betão - Parte 1: Regras gerais. 2ª edição [compil.] CT 101 (ATIC). s.l. : Instituto Português da Qualidade, Julho de 2007.

76. **Salta, Maria Manuela.** introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas. s.l., Lisboa : LNEC, laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. Seminário - prevenção da corrosão em estruturas de betão armado, p. 22.

77. **NP EN 206-1.** 2ª edição *Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.* Lisboa : Instituto Português da Qualidade, Junho de 2007.