Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Luís Correia Santos

Eficiência de misturas ternárias – Aplicação do conceito do fator-k

Novembro de 2012

Eficiência de misturas ternárias – Aplicação do conceito do fator-k
Bruno Luís Correia Santos
UMinho | 2012

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Luís Correia Santos

Eficiência de misturas ternárias – Aplicação do conceito do fator-k

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite Camões

Novembro de 2012

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar por agradecer ao meu ilustre Orientador, Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo, que desde sempre me acompanhou na elaboração da presente dissertação com demais orientações e partilha de conhecimentos numa sempre disponibilidade que tornaram esta dissertação um desafio ímpar com uma paralela boa disposição e camaradagem. A ele toda a minha admiração.

Agradeço aos meus pais que me apoiaram nesta jornada chamada vida a qual me entregaram com todo o seu amor e carinho assim como o meu irmão Patrício Santos pela natural amizade e aventura com que se faz o dia-a-dia na sua simples surpresa.

Endereço aos meus amigos inseparáveis o meu maior apreço pela partilha, apoio, companhia e agitação com que me brindam indeterminadamente ao longo da vida. Simão Cunha, Rodolfo Castro, José Borges, Pedro Ribeiro, José Marinho, David Silva, Samuel Pereira, Rui Rodrigues, Hélder Sousa, Filipe Castro, Maurício Pereira, Tiago Vale entre todos que sabem quem são e valem muito mais que meras palavras, o meu profundo obrigado pelo privilégio da estimável amizade. Acrescento ainda os meus "parceiros do crime" e amigos desta mui nobre Academia, João Cunha, Davide Lourenço, Ricardo Azevedo, Ricardo Rocha, João Costa, Pedro Pereira, Davide Santos, Bruno Marinho, Pedro Chaves, Francisco Pinto, Marcos Oliveira, Jorge Bastos, José Sousa e Júlio Ferraz, obrigado a todos pela partilha e companheirismo ao longo destes anos.

Uma referência de maior estima e gratidão a todos os técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, à equipa do Departamento de Materiais de Construção, em especial ao Engenheiro Carlos Jesus.

Por último, entrego as minhas palavras de amor e carinho à pessoa que me apoiou incondicionalmente desde o primeiro minuto até que mais linhas na vida sejam escritas. Lara Santos, na doença e na saúde, na alegria e na tristeza, mais que palavras de amor, entrego-te o meu coração no mais puro e simples sentido da palavra amor. “2gether 4ever”.

"Success is not final, failure is not fatal:
it is the courage to continue that counts." - Winston Churchill

RESUMO

A indústria de produção de cimento é atualmente uma das indústrias mais poluentes, contribuindo negativamente e de forma considerável na emissão de gases tóxicos para atmosfera. Existe, portanto, uma necessidade geral de redução da dependência e utilização do cimento a fim de minorar os seus efeitos no ambiente. Uma forma de diminuir a sua necessidade, é a sua substituição parcial por adições minerais.

Neste sentido, o estudo realizado incide sobre um conceito de eficiência na substituição do cimento por adições minerais no fabrico de argamassas. Este conceito, designado por fator de eficiência k, visa, através de uma relação com características de uma argamassa padrão, obter um valor para a eficiência da aplicação de uma determinada quantidade de adição mineral na composição de uma mistura de matriz cimentícia. Os materiais minerais incorporados alvo de estudo foram as cinzas volantes (CV) e o metacaulino (MTK). O estudo compreende no total, o fabrico e ensaio de 600 provetes constituídos por argamassas padrão; 20%, 40% e 60% de substituição de cimento por CV; 10%, 20% e 30% de substituição de cimento por MTK e argamassas de 10%CV+10%MTK, 30%CV+10%MTK e 50%CV+10%MTK, produzidas com razões de água/ligante de 0,35, 0,4, 0,5, 0,6 e 0,7. Foram realizados ensaios de espalhamento e de compressão no decorrer da determinação do fator k. O fator k é analisado segundo a idade, percentagem de substituição e nível de tensão nas idades de 7, 28, 90 e 180 dias. O presente estudo é igualmente elaborado de forma a estudar o comportamento do fator k em composições não previstas na norma NP EN 206-1. Verificou-se que a resistência à compressão aumenta com a idade assim como o fator k de modo geral é maior comparando o seu valor na idade inicial e final permitindo concluir o benefício da incorporação de adições minerais em argamassas. Foram obtidos valores de eficiência, em média, de 0,8, 0,9 e 1 nas argamassas com 20%CV, 40%CV e 60%CV, respetivamente. Nas argamassas 10%, 20% e 30%MTK os valores situaram-se em 0,6, 1,2 e 1, respetivamente. As adições conjuntas de CV e MTK obtiveram valores de k médios de 1,2, 1 e 1,4 para 10%CV+10%MTK, 30%CV+10%MTK e 50%CV+10%MTK, respetivamente.

Palavras-Chave: Fator-k, Cimento, Cinzas Volantes, Metacaulino, Adições Minerais.

ABSTRACT

Cement production is currently among the most polluting industries, significantly contributing to the emission of toxic gases into the atmosphere. The global need to reduce the dependence on using cement, in order to minimize environmental impact, is therefore widely recognized. One of the means of reducing the need for cement is to partially replace it with mineral admixtures.

In light of this, the study approaches a concept on the efficiency of substituting cement with mineral admixtures when making mortar. This efficiency concept, called k-value, aims to obtain - based on the ratio of features on a standard mortar reference - a specific efficient quantity for the mineral admixture when mixing mortars with equivalent characteristics. The mineral admixtures studied are fly ash (CV) and metakaolin (MTK). The study in total included the manufacturing and tests of 600 test cubes consisting of mortars: standard, 20%, 40% and 60% of substituting of cement with fly ash, 10%, 20% and 30% of substituting of cement with metakaolin; and mortars with 10% fly ash + 10% metakaolin, 30% fly ash + 10% metakaolin and 50% fly ash + 10% metakaolin produced with binder/water ratios of 0,35, 0,4, 0,5, 0,6 and 0,7. In the process of determining the k- value, slump flow and compressive strength tests are carried out. The k-value was analyzed by specimens' age, replacement percentage and tension level for ages of 7, 28, 90 and 180 days. The study also aims to analyze k-value behavior on composites that are not covered by the NP EN 206-1 Standard. It was found that the compressive strength increases with age and also in general the k value comparing its initial and final age value allowing to confirm the benefits of mineral admixture in mortars. Efficiency values were obtained on average of 0,8, 0,9 and 1 in mortar with 20%CV, 40CV and 60%CV, respectively. In mortars with MTK in 10%, 20% and 30% values were 0,6, 1,2 and 1, respectively. The mixtures with CV and MTK obtained k values in a average of 1,2, 1 and 1,4 for 10%CV+10%MTK, 30CV+10%MTK, 50%CV+10%MTK, respectively.

Keywords: K-value, Cement, Fly Ash, Metakaolin, Mineral Admixture.

ÍNDICE GERAL

1.INTRODUÇÃO 1

1.1 Contextualização do problema 1

1.2 Motivações e objetivos 2

1.3 Organização da dissertação 4

2 ESTADO DO CONHECIMENTO 6

2.1 Fator de eficiência k 7

2.1.1 Conceito do fator de eficiência k 7

2.1.2 O que é o fator de eficiência k? 7

2.1.3 Eficiência das adições 11

2.2 Adições de cinzas volantes 12

2.3 Adições de metacaulino 16

2.4 Adições de escórias de alto-forno 18

2.5 Enquadramento normativo do fator k 21

2.6 Novas abordagens de cálculo do fator k com vista à sua atualização normativa 22

3 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL 32

3.1 Local de trabalho 32

3.2 Materiais utilizados no fabrico das argamassas 32

3.2.1 Cimento 32

3.2.2 Agregados 34

3.2.3 Água 37

3.2.4 Cinzas volantes 37

3.2.5 Metacaulino 39

3.2.6 Superplastificante 41

3.3 Fabrico, moldagem e conservação dos provetes 43

3.3.1 Descrição das composições 43
3.3.2 Fabrico das amassaduras 48
3.3.3 Ensaio de espalhamento 50
3.3.4 Moldagem, desmoldagem e conservação dos provetes 53
3.4 Ensaio de resistência à compressão 55
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 57
4.1 Ensaio de espalhamento 57
4.1.1 Análise dos resultados 62
4.2 Resistência à compressão 65
4.2.1 Resistência à compressão segundo a razão água/cimento para cada idade 65
4.2.2 Resistência à compressão segundo a idade 68
4.2.2 Análise dos resultados 78
4.3 Cálculo do fator k 86
4.3.1 Curvas de aproximação do comportamento da resistência à compressão das argamassas para cálculo do fator k 86
4.3.2 Valores de água/ligante para cálculo do fator k 101
4.3.3 Fator de eficiência k 103
4.3.3.1 Análise das argamassas contendo cinzas volantes 103
4.3.3.1.1 Evolução do fator k com a idade 105
4.3.3.1.2 Evolução do fator k com a percentagem de substituição 113
4.3.3.1.3 Evolução do fator k com o nível de tensão 119
4.3.3.2 Análise das argamassas contendo metacaulino 123
4.3.3.2.1 Evolução do fator k com a idade 125
4.3.3.2.2 Evolução do fator k com a percentagem de substituição 133
4.3.3.2.3 Evolução do fator k com o nível de tensão 139
4.3.3.3 Análise das argamassas contendo cinzas volantes e metacaulino 144
4.3.3.3.1 Evolução do fator k com a idade 146

4.3.3.3.2 Evolução do fator k com a percentagem de substituição 154

4.3.3.3.3 Evolução do fator k com o nível de tensão 160

4.4 Fator k previsível com base nos k obtidos para os níveis de tensão 165

4.4 Análise geral do fator k 175

4.5 Relação do fator k nas argamassas mistas 180

5 CONCLUSÕES 183

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 189

ANEXOS 192

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre a resistência à compressão e a razão a/c das misturas de betão, sem adição e com adição incorporada, respetivamente, para determinação do fator k. 9
Figura 2: Princípio de cálculo do fator k para a razão w/(c+a). 25
Figura 3: Exemplo da relação resistência à compressão vs. água/(cimento+adição). 27
Figura 4: Relação entre o fator k aos 28 dias e a razão água/cimento da composição com 20% de cinzas volantes. 28
Figura 5: Determinação do fator k com base no intervalo de valores de k obtidos em ensaios de compressão. 30
Figura 6: Resultados do ensaio de gelo/degelo em avaliação do valor adotado por previsão do fator k. 30
Figura 7: Resultados do ensaio de carbonatação. 31
Figura 8: Laboratório de Engenharia Civil, secção de Materiais de Construção. 32
Figura 9: Areia 0/4 (0 a 4mm de diâmetro) 35
Figura 10: Curva granulométrica do agregado. 36
Figura 11: Estufa de secagem de materiais. 37
Figura 12: Cinzas volantes. 38
Figura 13: Metacaulino. 40
Figura 14: Curva granulométrica de um metacaulino tipo. 41
Figura 15: Superplastificante Glenium Sky 526 (Embalagem). 42
Figura 16: Balança de precisão. 49
Figura 17: Misturadora mecânica. 49
Figura 18: Balde da misturadora em aço inoxidável com amassadura concluída. 49
Figura 19: Mesa de espalhamento. 50
Figura 20: Medição do espalhamento da amassadura. 52
Figura 21: Ensaio de espalhamento na composição 0,35CV60. 52
Figura 22: Compactação da argamassa em mesa vibratória. 53
Figura 23: Moldes cúbicos de 50 mm^3. 53
Figura 24: Desmoldagem dos provetes. 54
Figura 25: Identificação dos provetes. 55
Figura 26: Conservação dos provetes imersos, em câmara húmida. 55

Figura 27: Prensas de ensaio à compressão. 56
Figura 28: Provetes colocados a secar 30 minutos antes do ensaio. 56
Figura 29: Espalhamento da argamassa padrão. 58
Figura 30: Espalhamento das argamassas contendo cinzas volantes. 59
Figura 31: Espalhamento das argamassas contendo metacaulino. 60
Figura 32: Espalhamento das argamassas contendo cinzas volantes e metacaulino. 61
Figura 33: Espalhamento de todas as argamassas segundo razão água/ligante. 62
Figura 34: Espalhamento das argamassas em cada razão água/ligante. 62
Figura 35: Evolução da resistência à compressão relativamente à razão a/c, aos 7 dias de idade. 66
Figura 36: Evolução da resistência à compressão relativamente à razão a/c, aos 28 dias de idade. 66
Figura 37: Evolução da resistência à compressão relativamente à razão a/c, aos 90 dias de idade. 67
Figura 38: Evolução da resistência à compressão relativamente à razão a/c, aos 180 dias de idade. 67
Figura 39: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição padrão. 68
Figura 40: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 20% de cinzas volantes. 69
Figura 41: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 40% de cinzas volantes. 70
Figura 42: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 60% de cinzas volantes. 71
Figura 43: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 10% de metacaulino. 72
Figura 44: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 20% de metacaulino. 73
Figura 45: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 30% de metacaulino. 74
Figura 46: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 10% de cinzas volantes + 10% de metacaulino. 75
Figura 47: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 30% de cinzas volantes + 10% de metacaulino. 76

Figura 48: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 50% de cinzas volantes + 10% de metacaulino. 77
Figura 49: Evolução da resistência à compressão com a idade na razão a/l 0,5, em todas as composições. 78
Figura 50: Relação entre a resistência à compressão e a razão a/c das misturas de betão, sem adição e com adição incorporada, respetivamente, para determinação do fator k. 85
Figura 51: Aproximação linear para a resistência à compressão das argamassas aos 7 dias de idade. 89
Figura 52: Aproximação hiperbólica para a resistência à compressão das argamassas aos 7 dias de idade. 90
Figura 53: Aproximação linear para a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade. 91
Figura 54: Aproximação hiperbólica para a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade. 92
Figura 55: Aproximação linear para a resistência à compressão das argamassas aos 90 dias de idade. 93
Figura 56: Aproximação hiperbólica para a resistência à compressão das argamassas aos 90 dias de idade. 94
Figura 57: Aproximação linear para a resistência à compressão das argamassas aos 180 dias de idade. 95
Figura 58: Aproximação hiperbólica para a resistência à compressão das argamassas aos 180 dias de idade. 96
Figura 59: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 5 MPa na aproximação linear. 105
Figura 60: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 10 MPa na aproximação linear. 105
Figura 61: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 15 MPa na aproximação linear. 106
Figura 62: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 20 MPa na aproximação linear. 106
Figura 63: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação linear. 107
Figura 64: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação hiperbólica. 107

Figura 65: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 30 MPa na aproximação hiperbólica..... 108
Figura 66: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 35 MPa na aproximação hiperbólica..... 108
Figura 67: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 40 MPa na aproximação hiperbólica..... 109
Figura 68: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 45 MPa na aproximação hiperbólica..... 109
Figura 69: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 5 MPa, na aproximação linear..... 113
Figura 70: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 10 MPa, na aproximação linear..... 113
Figura 71: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 15 MPa, na aproximação linear..... 114
Figura 72: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 20 MPa, na aproximação linear..... 114
Figura 73: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação linear..... 115
Figura 74: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica..... 116
Figura 75: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 30 MPa, na aproximação hiperbólica..... 116
Figura 76: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 35 MPa, na aproximação hiperbólica..... 117
Figura 77: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 40 MPa, na aproximação hiperbólica..... 117
Figura 78: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 45 MPa, na aproximação hiperbólica..... 118
Figura 79: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação linear. ... 119
Figura 80: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação hiperbólica. 119
Figura 81: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação linear. . 120
Figura 82: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação hiperbólica..... 120

Figura 83: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação linear. ..121
Figura 84: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação hiperbólica. ..121
Figura 85: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação linear. 122
Figura 86: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação hiperbólica. ..122
Figura 87: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 5 MPa na aproximação linear. ..125
Figura 88: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 10 MPa na aproximação linear. ..126
Figura 89: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 15 MPa na aproximação linear. ..126
Figura 90: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 20 MPa na aproximação linear. ..127
Figura 91: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação linear. ..127
Figura 92: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação hiperbólica. ..128
Figura 93: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 30 MPa na aproximação hiperbólica. ..129
Figura 94: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 35 MPa na aproximação hiperbólica. ..129
Figura 95: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 40 MPa na aproximação hiperbólica. ..130
Figura 96: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 45 MPa na aproximação hiperbólica. ..130
Figura 97: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 5 MPa, na aproximação linear. ..133
Figura 98: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 10 MPa, na aproximação linear. ..134
Figura 99: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 15 MPa, na aproximação linear. ..134
Figura 100: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 20 MPa, na aproximação linear. ..135

Figura 101: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação linear..... 135
Figura 102: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica..... 136
Figura 103: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 30 MPa, na aproximação hiperbólica..... 137
Figura 104: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 35 MPa, na aproximação hiperbólica..... 137
Figura 105: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 40 MPa, na aproximação hiperbólica..... 138
Figura 106: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 45 MPa, na aproximação hiperbólica..... 138
Figura 107: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação linear. . 139
Figura 108: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação hiperbólica..... 140
Figura 109: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação linear. 140
Figura 110: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação hiperbólica..... 141
Figura 111: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação linear. 141
Figura 112: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação hiperbólica..... 142
Figura 113: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação linear. 142
Figura 114: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação hiperbólica..... 143
Figura 115: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 5 MPa na aproximação linear. 146
Figura 116: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 10 MPa na aproximação linear. 147
Figura 117: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 15 MPa na aproximação linear. 147
Figura 118: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 20 MPa na aproximação linear. 148

Figura 119: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação linear. 148
Figura 120: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação hiperbólica. 149
Figura 121: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 30 MPa na aproximação hiperbólica. 150
Figura 122: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 35 MPa na aproximação hiperbólica. 150
Figura 123: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 40 MPa na aproximação hiperbólica. 151
Figura 124: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 45 MPa na aproximação hiperbólica. 151
Figura 125: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 5 MPa, na aproximação linear. 154
Figura 126: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 10 MPa, na aproximação linear. 155
Figura 127: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 15 MPa, na aproximação linear. 155
Figura 128: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 20 MPa, na aproximação linear. 156
Figura 129: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação linear. 156
Figura 130: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica. 157
Figura 131: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 30 MPa, na aproximação hiperbólica. 158
Figura 132: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 35 MPa, na aproximação hiperbólica. 158
Figura 133: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 40 MPa, na aproximação hiperbólica. 159
Figura 134: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 45 MPa, na aproximação hiperbólica. 159
Figura 135: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação linear. 160

Figura 136: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação hiperbólica. 161
Figura 137: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação linear. 161
Figura 138: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação hiperbólica. 162
Figura 139: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação linear. 162
Figura 140: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação hiperbólica. 163
Figura 141: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação linear. 163
Figura 142: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação hiperbólica. 164
Figura 143: Exemplo de cálculo da previsão do fator k na argamassa 20%CV aos 140 dias, na aproximação linear. 165
Figura 144: Intervalos para estimativa de k de 20%CV, na aproximação linear. 166
Figura 145: Intervalos para estimativa de k de 20%CV, na aproximação hiperbólica. 166
Figura 146: Intervalos para estimativa de k de 40%CV, na aproximação linear. 167
Figura 147: Intervalos para estimativa de k de 40%CV, na aproximação hiperbólica. 167
Figura 148: Intervalos para estimativa de k de 60%CV, na aproximação linear. 168
Figura 149: Intervalos para estimativa de k de 60%CV, na aproximação hiperbólica. 168
Figura 150: Intervalos para estimativa de k de 10%MTK, na aproximação linear. 169
Figura 151: Intervalos para estimativa de k de 10%MTK, na aproximação hiperbólica..... 169
Figura 152: Intervalos para estimativa de k de 20%MTK, na aproximação linear. 170
Figura 153: Intervalos para estimativa de k de 20%MTK, na aproximação linear. 170
Figura 154: Intervalos para estimativa de k de 30%MTK, na aproximação linear. 171
Figura 155: Intervalos para estimativa de k de 30%MTK, na aproximação hiperbólica..... 171
Figura 156: Intervalos para estimativa de k de 10%CV+10%MTK, na aproximação linear. 172
Figura 157: Intervalos para estimativa de k de 10%CV+10%MTK, na aproximação hiperbólica. 172
Figura 158: Intervalos para estimativa de k de 30%CV+10%MTK, na aproximação linear. 173
Figura 159: Intervalos para estimativa de k de 30%CV+10%MTK, na aproximação hiperbólica. 173
Figura 160: Intervalos para estimativa de k de 50%CV+10%MTK, na aproximação linear. 174

Figura 161: Intervalos para estimativa de k de 50%CV+10%MTK, na aproximação hiperbólica. 174
Figura 162: Evolução do fator k médio com a idade, na aproximação linear. 176
Figura 163: Evolução do fator k médio com a idade, na aproximação hiperbólica. 177

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Valores do fator k para substituição de 70% de GBBS. 19
Quadro 2: Análise química do cimento. 33
Quadro 3: Características mecânicas do cimento. 34
Quadro 4: Características físicas do cimento. 34
Quadro 5: Características do agregado. 35
Quadro 6: Análise granulométrica da areia 0/4. 36
Quadro 7: Composição Química das cinzas volantes. 39
Quadro 8: Características físicas das cinzas volantes. 39
Quadro 9: Composição química típica do metacaulino. 41
Quadro 10: Caraterísticas do superplastificante Glenium Sky 526. 43
Quadro 11: Quantidade total dos materiais no programa experimental. 44
Quadro 12: Razões água/cimento. 44
Quadro 13: Idades de Ensaio (dias). 44
Quadro 14: Composições realizadas. 44
Quadro 15: Composição padrão. 45
Quadro 16: Composições com cinzas volantes. 45
Quadro 17: Composições com metacaulino. 46
Quadro 18: Composições de cinzas volantes e metacaulino. 47
Quadro 19: Resultados do espalhamento na composição padrão. 58
Quadro 20: Resultados do espalhamento na composição com adição de CV. 59
Quadro 21: Resultados do espalhamento na composição com adição de MTK. 60
Quadro 22: Resultados do espalhamento na composição com adição de CV e MTK. 61
Quadro 23: Resistência à compressão da composição padrão. 68
Quadro 24: Resistência à compressão da composição 20% CV. 69
Quadro 25: Resistência à compressão da composição 40% CV. 70
Quadro 26: Resistência à compressão da composição de 60% CV. 71
Quadro 27: Resistência à compressão da composição de 10% MTK. 72
Quadro 28: Resistência à compressão da composição de 20% MTK. 73
Quadro 29: Resistência à compressão da composição de 30% MTK. 74
Quadro 30: Resistência à compressão da composição 10% CV + 10% MTK. 75

Quadro 31: Resistência à compressão da composição 30% CV + 10% MTK. 76
Quadro 32: Resistência à compressão da composição 50% CV + 10% MTK. 77
Quadro 33: Ensaios à compressão na razão a/c 0,5 em todas as idades, e argamassas. 79
Quadro 34: Equações das retas e curvas de aproximação com respetivo coeficiente de correlação para a argamassa padrão e argamassas contendo cinzas volantes. 98
Quadro 35: Equações das retas e curvas de aproximação com respetivo coeficiente de correlação para as argamassas contendo metacaulino. 99
Quadro 36: Equações das retas e curvas de aproximação com respetivo coeficiente de correlação para as argamassas contendo cinzas volantes e metacaulino. 100
Quadro 37: Valores de a/l na aproximação linear. 102
Quadro 38: Valores de a/l na aproximação hiperbólica. 102
Quadro 39: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação linear. 103
Quadro 40: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação hiperbólica. 103
Quadro 41: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação linear. 103
Quadro 42: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação hiperbólica. 103
Quadro 43: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação linear. 104
Quadro 44: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação hiperbólica. 104
Quadro 45: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação linear. 104
Quadro 46: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação hiperbólica. 104
Quadro 47: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica. 110
Quadro 48: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica por M. João Brito (2007). 111
Quadro 49: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação linear. 123
Quadro 50: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação hiperbólica. 123
Quadro 51: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação linear. 123
Quadro 52: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação hiperbólica. 123
Quadro 53: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação linear. 124
Quadro 54: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação hiperbólica. 124
Quadro 55: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação linear. 124
Quadro 56: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação hiperbólica. 124
Quadro 57: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica. 131

Quadro 58: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica obtido por M. João Brito (2007). 132
Quadro 59: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação linear. 144
Quadro 60: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação hiperbólica. 144
Quadro 61: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação linear. 144
Quadro 62:Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação hiperbólica. 144
Quadro 63: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação linear. 145
Quadro 64: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação hiperbólica. 145
Quadro 65: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação linear. 145
Quadro 66:Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação hiperbólica. 145
Quadro 67: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica. 152
Quadro 68: Fator k médio na aproximação linear nas respetivas idades. 175
Quadro 69: Fator k médio na aproximação hiperbólica nas respetivas idades. 176
Quadro 70: Relação de linearidade entre argamassas 10%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação linear. 180
Quadro 71: Relação de linearidade entre argamassas 10%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica. 180
Quadro 72: Relação de linearidade entre argamassas 30%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação linear. 181
Quadro 73: Relação de linearidade entre argamassas 30%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica. 181
Quadro 74: Relação de linearidade entre argamassas 50%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação linear. 181
Quadro 75: Relação de linearidade entre argamassas 50%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica. 182

1.INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do problema

Atualmente, a eficiência é um conceito cimeiro na pirâmide de características que os produtos e serviços devem apresentar. O mínimo de desperdício, maior e melhor aproveitamento com elevado desempenho e qualidade são alguns dos objetivos a atingir na elaboração de qualquer atividade, seja prestadora de serviços ou um produto em si. Estes objetivos não são apenas exigências económicas do mercado mas igualmente do ambiente. Hoje em dia, as questões ambientais atingiram um patamar de preocupação na sociedade, sendo os problemas ambientais atualmente um flagelo sério e, portanto, alvo de atenção. O impacto ambiental tem vindo a manifestar-se com um aumento da temperatura de aquecimento global e diminuição da camada do ozono, entre outros problemas. A definição de produtos mais eficientes do ponto de vista energético e ambiental leva-nos à procura de uma maior qualidade com eficiência de desempenho. A indústria de cimento caracteriza-se pelo consumo intensivo de energia, seja na forma de calor, utilizado nos fornos rotativos para a produção de clínquer, seja na forma de energia elétrica, consumida em todo o processo industrial para movimentar máquinas, fazer girar os fornos rotativos e os moinhos. A maior parte do consumo de energia para o fabrico de cimento, porém, ocorre na produção de clínquer: cerca de 63% segundo Santi (1997). Além do custo de produção associa-se o elevado impacto ambiental provocado pelo processo de produção com elevadas emissões de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera (Camões, 2006). Devido às elevadas quantidades de betão utilizadas na construção, este é um dos veículos ideais para a incorporação segura e económica de aproveitamento de milhões de toneladas de resíduos e subprodutos industriais na construção (Malhotra e Mehta, 2002). Segundo Malhotra e Mehta (2002), mencionados por Camões (2006), a produção de cada tonelada de cimento Portland origina a libertação de cerca de uma tonelada de CO_2 e a indústria do cimento contribui com cerca de 7% do total de emissões do mesmo para a atmosfera.

Posto isto, é inquestionável a procura de soluções alternativas ao cimento para o fabrico de betão de forma a produzir um betão mais "amigo do ambiente" (Camões, 2005).

Atualmente, existem diversos estudos que apoiam a incorporação de adições minerais que substituem quantidades parciais de cimento no fabrico de betões e argamassas. A utilização de materiais que representam menor poluição e resultem em níveis qualitativos equivalentes à utilização corrente de cimento é um claro caminho a seguir. A substituição parcial de cimento pode ser conseguida através do uso de cinzas volantes, escória granulada de alto-forno, sílica de fumo, metacaulino ou cinzas de casca de arroz (Camões, 2006). No caso das cinzas volantes, resultantes da queima do carvão, representam um excelente exemplo de aproveitamento de um subproduto industrial com um custo virtual diminuto enquanto a sílica de fumo representa uma alternativa pouco convidativa, com preços estimados dez vezes superiores ao cimento. Uma vez assumida a importância da utilização de materiais que possam substituir parcialmente o cimento nas misturas sem comprometer, ou até melhorando as características destas, fica em falta a forma como avaliar as adições em termos quantitativos no produto final, isto é, a melhor quantidade de substituição ou qual a "qualidade" final resultante associada a determinada substituição.

É neste sentido que foi criado o conceito de fator de eficiência k, foco de estudo da presente dissertação. Este conceito visa, através de uma relação entre as características de uma mistura padrão (sem quaisquer adições) obter um valor para a eficiência da aplicação de uma determinada adição mineral na composição de um material cimentício. As características de comparação para obtenção do fator k no presente estudo, bibliograficamente apoiadas, são: a resistência à compressão e a razão água/cimento (a/c). Os materiais minerais incorporados alvo de estudo foram as cinzas volantes (CV) e o metacaulino (MTK).

1.2 Motivações e objetivos

A procura de soluções alternativas mais eficientes é só por si um fator de motivação que deve proliferar pela indústria e pela sociedade em geral. A procura de soluções ecológicas e económicas eficientes faz com que a sua procura tome um sentido de responsabilidade e de maior importância. Num mundo em constante evolução, o meio ambiente é muitas vezes esquecido pelas grandes industrias produtoras que contribuem negativamente com o seu impacto ambiental. É essencial que se unam esforços para que a evolução seja processada de forma sustentável para todos. A realização da presente dissertação vai de encontro ao referido anteriormente, esperando-se que os resultados obtidos no programa experimental possam

contribuir para uma melhor compreensão e aplicação do conceito de fator de eficiência k na utilização de adições minerais, nomeadamente, cinzas volantes e metacaulino. A melhor compreensão na sua aplicação leva necessariamente a impulsionar a utilização de subprodutos industriais ou materiais menos poluentes como substitutos parciais do cimento na confeção de betões e argamassas.

A alternativa em estudo representa a diminuição da quantidade de cimento utilizada com substituição da mesma porção por adições de cinzas volantes e metacaulino, e avaliação da eficiência que estas representam nas misturas através do fator de eficiência k. Este fator traduz a eficácia das incorporações nas misturas e está, portanto, associado ao uso de adições, dependendo o seu valor do tipo de adição em consideração. É um parâmetro determinado experimentalmente, através da análise de diversas misturas de betão, fazendo variar a percentagem de adição utilizada e a razão água/cimento da mistura. Este fator depende, para além do tipo de adição, do tipo de cimento, das condições de cura e do valor da tensão de compressão aplicada no betão. A escassez de informação sobre valores de eficiência de modo geral e na norma NP EN 206-1 são uma fundamental motivação de referência para o presente estudo.

Foram constituídos 600 provetes de dimensão 50x50x50 mm^3 de argamassas nas razões 0,35; 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7 de água/cimento (a/c) para as seguintes composições: composição padrão; 20%, 40% e 60% de cinzas volantes; 10%, 20% e 30% de metacaulino 10% de cinzas volantes + 10% de metacaulino, 30% de cinzas volantes + 10% de metacaulino e 50% de cinzas volantes + 10% de metacaulino. Realizaram-se ensaios à compressão nos provetes aos 7, 28, 90 e 180 dias de idade. Sabe-se, através da respetiva literatura, que o efeito pozolânico das cinzas volantes é potenciado para idades acima de cerca de 90 dias, razão pela qual se justificou o prolongamento do programa experimental e a sua extensão de forma a construir um estudo mais rico, especialmente nas composições contendo cinzas volantes. Foram definidos, sucintamente, os seguintes objetivos:

- Avaliação do efeito das adições em provetes de argamassa, que se pretendem ser representativos da matriz ligante dos betões correspondentes;

A avaliação tem como objetivo apurar a evolução da resistência à compressão dos provetes em estudo, variando a percentagem de substituição e a relação água/ligante das

misturas. A comparação das resistências é realizada relativamente a uma argamassa de referência classificada como padrão, e que não contém quaisquer adições.

– Avaliação da eficiência das adições através do conceito de eficiência – fator k;

A avaliação da eficiência das adições consistiu na realização de 50 argamassas com diferentes razões água/cimento, percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes, metacaulino ou cinzas volantes e metacaulino, analisadas num espetro de diferentes idades para que haja uma maior variedade de características a avaliar, sendo a idade de cura uma variável importante nas características finais do betão.

– Avaliação da sinergia decorrente da incorporação simultânea de CV e MTK;

A avaliação da sinergia na incorporação simultânea de cinzas volantes e metacaulino pretende apurar de que forma estas se comportam em termos de potenciadores das características do betão no seu tempo de cura, sabendo que as adições de metacaulino (MTK), geralmente, surtem efeito após dois dias aumentando a resistência logo a partir de idades baixas enquanto o efeito das cinzas volantes, geralmente, tem efeito a partir dos 90 dias. Esta avaliação é de particular interesse uma vez que não foi de momento encontrado bibliograficamente um estudo que a contemplasse e é uma mistura que carece igualmente de representação normativa, nomeadamente, na NP EN 206-1.

1.3 Organização da dissertação

O presente documento encontra-se organizado em cinco capítulos.

O Capítulo 1 contempla uma breve introdução ao tema em estudo, apresentação de fundamentos para a motivação apresentada na realização da dissertação e breve explicação do conceito do fator k utilizado.

O Capítulo 2 apresenta o Estado do Conhecimento com descrição de estudos realizados sobre os materiais utilizados como adições minerais e as suas propriedades, nomeadamente, cinzas volantes, metacaulino, sílica de fumo e escórias de alto-forno assim

como diferentes abordagens e necessariamente estudos realizados com respeito ao cálculo do fator de eficiência k para as respetivas adições minerais. É exposta a norma NP EN 206-1 que contempla o uso de adições do tipo I e tipo II, adições inertes e adições pozolânicas ou hidráulicas latentes, respetivamente, verificando-se a sua limitação para aplicação a outros materiais não sendo cinzas volantes e sílica de fumo.

O Capítulo 3 compreende o programa experimental realizado com a descrição do espaço e ferramentas utilizadas assim como respetivas metodologias na sua operação, e descrição das principais propriedades dos materiais utilizados (cimento, agregado, água, cinzas volantes, metacaulino e superplastificante).

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de espalhamento e ensaios à compressão necessários para o cálculo do fator de eficiência segundo a abordagem adotada no presente estudo. São taxativamente apresentados: resultados e análise do ensaio de espalhamento, resultados e análise dos ensaios à compressão, determinação e análise do fator de eficiência k para cinco níveis de tensão segundo aproximações lineares e aproximações hiperbólicas para as respetivas composições, análise da relação do fator k com a idade, análise da relação do fator k com a percentagem de substituição, análise do fator k com o nível de tensão e análise da relação do fator k nas misturas com adição simultânea de cinzas volantes e metacaulino.

Por último, o Capítulo 5 contempla as conclusões depreendidas do estudo realizado ao longo da elaboração da presente dissertação assim como a sugestão para futuros estudos que possam potenciar a utilização de materiais "amigos do ambiente" e subprodutos industrias, com um sentido nobre sobre o ambiente e economia pela Engenharia Civil.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

A eficiência de adições, por forma a substituir a utilização de cimento na composição de betão, é um tema de estudo que tem vindo a ser encarado com enorme interesse. Como foi referido, a produção de cimento é um processo que possui um elevado impacto ambiental que naturalmente deve ser reduzido. A redução deste impacto ambiental passa pela diminuição da sua dependência, substituindo-o em parte, preferencialmente, por subprodutos industriais com características pozolânicas. Estas medidas traduzem os esforços realizados por forma a conduzir o sector da construção pela via da sustentabilidade das suas ações sobre o ambiente, sociedade e economia, reconhecendo-se como construção sustentável. Estas linhas racionais promoveram o aparecimento dos betões eficientes, que, se traduzem em betões fabricados através de elevadas percentagens de subprodutos industriais tais como cinzas volantes, escórias de alto-forno, sílicas de fumo e metacaulino, entre outros em substituição parcial do cimento (Aitcin, 2000; Swamy, 2000 e Mehta, 2001). Durante a última década foram realizados vários esforços para que a eficiência das substituições assentasse em valores desejáveis a cumprir os correntes requisitos do betão na construção. Inicialmente estes esforços não conduziram a conclusões quantitativas sobre a eficiência da utilização de cinzas volantes como adição mineral, especialmente devido à variedade de misturas de betão e diferentes percentagens de substituição. A quantificação da eficiência de cinzas como adição mineral no betão é essencial para uma devida utilização das mesmas. Estes betões, para além da vantagem implícita da utilização de subprodutos industriais, contribuindo para menor impacto ambiental, possuem ainda maior durabilidade comparativamente a betões correntes (Metha, 2001).

2.1 Fator de eficiência k

2.1.1 Conceito do fator de eficiência k

O conceito de eficiência traduzido pelo fator k surge na base das necessidades anteriormente descritas relativamente à quantificação do efeito da substituição de cimento por adições minerais. Este conceito foi introduzido por A. Smith pela primeira vez em 1967 num estudo de avaliação do comportamento de betões com introdução de 25% de cinzas volantes. Este fator tem como objetivo traduzir a eficiência das adições minerais no fabrico dos betões como um indicador universal que nos pode traduzir a eficiência de cada tipo de adição e, consequentemente, dar indicações sobre quais as adições com melhores prestações, substituindo assim parte do cimento utilizado, minimizando a sua necessidade e impacto dele proveniente. A utilização de adições minerais representa uma solução extremamente viável resultando em betões com melhores características como durabilidade e resistência, e que será cada vez mais uma exigência em vez de uma alternativa. As adições são aplicadas essencialmente para substituir parcialmente a quantidade de cimento necessária a incluir nos betões. Existe, atualmente, um leque variado de materiais considerados aptos a serem utilizados como adições, designados de materiais cimentícios suplementares (*Supplementary Cementitious Materials - SCM*). Dos materiais classificados como SCM destacam-se as cinzas volantes (CV), o metacaulino (MTK), as escórias granuladas de alto-forno (GBBS), a sílica de fumo (SF), entre outros. Assim, com o vasto leque de adições existentes surgiu, como referido anteriormente, a necessidade de um indicador universal de desempenho de determinada adição na composição do betão, o que levou à criação do conceito de fator k.

2.1.2 O que é o fator de eficiência k?

O fator de eficiência k é o valor que traduz a eficiência da adição nas misturas cimentícias. Este define-se como a parte da adição que reage com o cimento. Desta forma, o objetivo é que as misturas com adições conduzam a valores de k elevados que traduzem maiores eficiências na reação das adições enquanto potenciadores das características do betão, melhorando-as, comparativamente, a um betão padrão sem quaisquer adições. A eficiência do fator k é determinada experimentalmente analisando-se várias misturas com diferentes

propriedades e condições de mistura. O valor do fator k pode ser estimado através de várias formas e expressões. Esta possibilidade encontra-se devidamente apresentada na norma NP EN 206-1, onde se deixa claro, que, caso se pretenda utilizar outros conceitos, tais como, o conceito de betão equivalente, modificações das regras do conceito do fator k, valores mais elevados do fator k do que os definidos na norma, outras adições (inclusive do tipo I) ou combinações de adições, a sua aptidão deve ser estabelecida. Este estabelecimento deve resultar de uma aprovação técnica europeia ou norma nacional relevante, que se refira, especificamente, ao uso da adição conforme com a NP EN 206-1. Atualmente, a norma NP EN 206-1 encontra-se em revisão, com a inclusão de regras para utilização de cimento CEM II/A e CEM II/B, que não constavam até à data na norma NP EN 206-1. São alvo de revisão, também, a inclusão de valores do fator k para adições de escórias de alto-forno e regras a cumprir para esta adição. Existe, assim, a possibilidade de várias abordagens e estudos de como este valor pode ser obtido variando, assim, conforme o tipo de adição.

Inicialmente, os investigadores defenderam a substituição total do betão por materiais SCM, que, no entanto, foi racionalizada por outros investigadores como devendo ser uma substituição parcial e sustentada. Segundo Smith (1967), esta racionalização defende que, considerando dois betões, um com adição mineral e outro sem quaisquer adições, é possível obter a mesma resistência para ambos a uma determinada idade ajustando a relação água/cimento do betão modificado. Este refere que no caso de cinzas volantes, é possível determinar a quantidade de cimento equivalente à quantidade de cinzas volantes introduzidas na mistura, como anteriormente referido, pela multiplicação do fator de eficiência k por CV, isto é, kCV representa a quantidade de cimento equivalente à respetiva adição mineral. Desta forma a razão água/cimento (a/c) toma a forma A/(C + kCV). O valor de k é geralmente obtido através da resistência à compressão embora seja possível obter o valor de k para outras propriedades, nomeadamente, indicadores de durabilidade. Os valores de eficiência foram já determinados para variados materiais em vários estudos, estando os valores de k compreendidos num intervalo de 0,2 a 5, com a escala mais baixa para cinzas volantes e pozolanas naturais, e valores de k mais elevados obtidos para adições de sílica de fumo (A.Bentur, 1988). Segundo Kosmatka, Kerkoff e Panarense (2002), a sílica de fumo é um material utilizado essencialmente para potenciar as características de durabilidade e de resistência do betão não sendo indicado especificamente como material para substituição do cimento. A avaliação do fator k foi, até à data, realizada por diversos estudos, sendo um indicador que depende necessariamente das características de cada adição, destacando-se a

quantidade de sílica ativa e o índice de atividade pozolânica do material pozolânico em estudo.

No presente estudo, a metodologia utilizada para determinação do fator k vai de encontro à utilizada no trabalho experimental realizado por M. João Brito (2007), apoiada num estudo elaborado por M. J. Esteves Ferreira e Arlindo F. Gonçalves (1998). O fator k é obtido através de uma relação entre a resistência à compressão (fc) e a razão a/c, comparando a composição com adição incorporada e uma de referência, sem quaisquer adição. Assim, para determinação do fator k será necessário realizar amassaduras sem adição, correspondente a um amassadura de referência, e outras com a respetiva adição a estudar para obtenção do correspondente fator k. Note-se que a incorporação da adição na mistura resulta unicamente na alteração da razão a/c. Desta forma, para cada valor de tensão, podemos obter o valor correspondente da razão a/c da mistura com adição e sem adição, respetivamente, como apresentado na Figura 1.

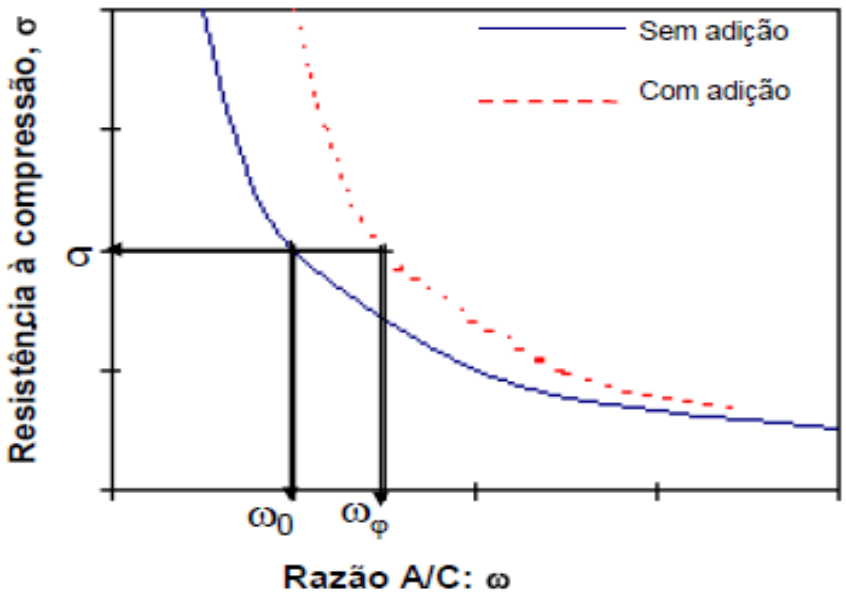


Figura 1: Relação entre a resistência à compressão e a razão a/c das misturas de betão, sem adição e com adição incorporada, respetivamente, para determinação do fator k.

Assim, e de acordo com a Figura 1, para determinada tensão, podemos retirar o valor da razão a/c para o betão sem adição (ω_0) e com adição incorporada (ω_φ), respetivamente. O valor do fator k é obtido através da relação direta entre a razão a/c, com a relação adição/cimento (φ), através da seguinte equação:

$$\frac{(\omega\varphi - \omega_0)}{\omega_0} = k \times \varphi \quad (1)$$

$$k = \frac{\frac{\omega\varphi}{\omega_0} - 1}{\varphi} \quad (2)$$

Onde,

ω_0 – razão água/cimento da mistura sem adição (composição de referência).
ω_φ – razão água/cimento da mistura com adição incorporada.
φ – razão adição/cimento
k – fator de eficiência

A modelação para obtenção do fator k resulta, assim, de uma aproximação hiperbólica para a relação tensão compressiva, σ, vs. relação a/c, ω, ou, que é o mesmo, assumindo que a tensão é uma função linear de 1/w.

2.1.3 Eficiência das adições

O valor obtido para o fator k, a eficiência das adições, é necessariamente dependente de cada adição e características da mesma. No entanto, destacam-se duas características partilhadas das adições que definem em grande parte a sua eficiência, nomeadamente, a sílica ativa e o índice de atividade pozolânica (IA). A sílica ativa é fundamental no desenvolvimento da reação pozolânica. Pelas suas propriedades químicas, a sílica ativa melhora as condições de aderência da pasta/agregado, diminui a lixiviação e a porosidade quando combinada com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), produto resultante da hidratação do cimento Portland, origina um composto, designado por silicato de cálcio hidratado (CSH) que contribui, fundamentalmente, para uma maior resistência do betão. Foi realizado um estudo experimental por Papadakis, Antiohos e Tsimas (2002), em que os resultados obtidos para o fator k foram correlacionados analiticamente com o índice de sílica reativa, permitindo, segundo os autores, estimativas para o valor k de forma rápida assim como valores de resistência do betão em idades futuras. No decorrer do programa experimental verificou-se que a substituição dos agregados por SCM's resulta em resistências mais elevadas quando comparadas com misturas de referência. Porém, a substituição de cimento por SCM's não surte efeitos imediatos, verificando-se, para idades jovens, resistências muitas vezes inferiores à dos betões de referência. No entanto, a resistência à compressão aumenta com a idade, ultrapassando geralmente os valores de resistência à compressão de betões correntes para idades maiores. A resistência do betão e a sua durabilidade é altamente dependente da razão água/cimento, devendo-se para tal, diminuir a quantidade de água em relação à quantidade de ligante por forma a obter melhores resistências já em idades precoces (Joachim Schultz, 1999). É devido a este conceito que surgiu a necessidade da avaliação da eficiência através do conceito de fator k. A norma NP EN 450-1 especifica que os valores de IA para CV devem ultrapassar 75% e 85% para 28 e 90 dias, respetivamente.

2.2 Adições de cinzas volantes

Inicialmente, o uso de cinzas volantes começou por ser implementado como substituição direta do cimento por cinzas volantes para fabrico de betão, linha que ainda é defendida por alguns investigadores. Posteriormente, os esforços realizados para uma efetiva utilização das adições levou à racionalização da incorporação das adições, considerando que para dois betões, um com cinzas volantes e outro sem cinzas, é possível obter a mesma resistência a uma determinada idade ajustando a relação água/cimento. Segundo Babu e Rao (1995), observa-se, geralmente, que as cinzas volantes possuem baixa capacidade de ligante para idades reduzidas, comportando-se como agregado fino na mistura (fíler). No entanto, em idades adultas, isto é, com um elevado tempo de cura foi apurado que as cinzas volantes despertam as propriedades pozolânicas promovendo um bom desempenho enquanto ligante e originam resistências à compressão consideráveis (Babu e Rao, 1995). Verificou-se, ainda, que a eficiência da adição de cinzas volantes depende de várias característica tais como a forma, tamanho e distribuição das partículas, propriedades químicas, entre outras. Segundo Babu e Rao (1995), a eficiência das CV depende, não somente da razão a/l da mistura, como referido anteriormente, mas também da percentagem de substituição. O trabalho experimental levado a cabo por Babu e Rao (1995) dividiu o fator de eficiência k em dois fatores de eficiência por forma a avaliar o peso da razão água/ligante (a/l) e a percentagem de substituição. O fator de eficiência k foi dividido num fator geral de eficiência (kE), que depende da idade em estudo, e num fator de eficiência de percentagem (kP), que depende da percentagem de substituição em estudo. O trabalho experimental levado a cabo consistiu na análise de diversas misturas com diferentes idades (7, 28 e 90 dias) e com percentagens de substituição variáveis entre 15% e 75%. Foi observado que betões com percentagens de substituição de 20% de cinzas volantes obtiveram resistências à compressão ligeiramente superiores às resistências à compressão para os betões de referência enquanto para percentagens de substituição superiores a 20% os valores de resistência se situaram ligeiramente abaixo dos de referência. (Babu e Rao, 1995), concluíram que será aconselhável limitar a percentagem de substituição até, no máximo, 50%, sendo que, para percentagens superiores o efeito das cinzas volantes torna-se contrário ao pretendido, tendo sido obtido valores negativos para o fator de eficiência. A percentagem de substituição de cinzas volantes é naturalmente uma questão pertinente que claramente deve ser abordada sendo que é de

maior interesse potenciar ao máximo o seu valor, sem no entanto, não comprometer as características de durabilidade e resistência à compressão dos betões.

Oner, Akyuz e Yildiz (2005), realizaram igualmente um trabalho experimental que permitiu sustentar as conclusões obtidas por Babu Rao (1995). Segundo Oner, Akyuz e Yildiz (2005) o que na realidade acontece quando os materiais pozolânicos são adicionados ao cimento pode ser explicado de uma forma sucinta. O hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) resultante da hidratação do cimento é transformado num gel secundário, silicato de cálcio hidratado (CSH), causando a transformação dos poros maiores em poros mais pequenos, em consequência da reação pozolânica da mistura. A presença de $CaOH_2$, afeta a qualidade do betão negativamente originando cavidades no seu interior, que diminuem consequentemente a sua resistência à compressão. Desta forma conclui-se que as adições minerais tem um efeito positivo nas misturas, ligando o $CaOH_2$, reduzindo, significativamente, o tamanho dos poros capilares e teor de $Ca(OH)_2$ na matriz ligante. Conclui-se, assim, que betões produzidos com cinzas volantes possuem melhores prestações em termos de durabilidade e resistência pelo facto que uma matriz mais coesa e sólida permite uma diminuição da permeabilidade a agentes agressivos tais como sais e carbonatação. Note-se, ainda, que uma redução elevada do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) pode originar um problema grave, diminuindo a alcanidade do betão levando à deterioração da camada de despassivação, potenciando assim a corrosão das armaduras, e portanto, reduzir a resistência à carbonatação. Foi ainda investigado, no âmbito da percentagem de cinzas volantes, o efeito das mesmas segundo os teores em cálcio das cinzas volantes, por Papadakis (2000). Foi verificado que o efeito da adição de cinzas volantes com baixo teor em cálcio em betões atinge a maior resistência à compressão após 14 dias, quando estas substituem 30% do agregado. O efeito das cinzas volantes com baixo teor em cálcio, substituindo em 30% o cimento, atinge valores de resistência mais elevados a partir dos 91 dias. Papadakis (2000) concluiu ainda que existe uma relação de proporcionalidade entre a resistência à compressão e o índice de sílica ativa presente na mistura, aproximadamente de 0,12 vezes. O valor de resistência mais elevado foi encontrado para uma percentagem de 40% de sílica ativa presente nas cinzas volantes.

Oner, Akyuz e Yildiz (2005), referidos anteriormente, procuraram obter experimentalmente o valor ótimo de cinzas volantes a utilizar em substituição do cimento que permita a obtenção dos melhores resultados do ponto de vista de resistência à compressão e durabilidade. No decorrer do trabalho experimental verificaram que a relação (CV/C) é um

fator muito importante para a determinação da eficiência das CV na mistura. Esta conclusão foi obtida através da utilização das curvas de referência de Bolomey e Feret, que, a partir de um determinado valor de CV utilizadas, a resistência à compressão dos betões diminuía e apresentava, consequentemente, uma menor eficiência k. A presença de cinzas volantes numa mistura que apresenta resultados de eficiência baixos representa um comportamento das mesmas como agregado fino (fíler). Oner, Akyuz e Yildiz (2005) concluíram que o valor ótimo de cinzas volantes é de aproximadamente 40%, estando em consonância com o valor limite ótimo de 50% concluído por Babu e Rao (1995). A relação CV/C representa uma relação direta, sendo assim de extrema importância. Esta relação determina a eficiência das CV, sendo que o aumento do índice de cimento representa uma aumento no índice de hidratação, portanto, aumento da quantidade de $Ca(OH)_2$ que entra em reação com as CV e da quantidade de CSH representando uma eficácia superior. Oner Akyuz e Yildiz (2005) concluíram, ainda, que o decréscimo do valor de resistência após o pico poderá estar relacionado com a existência de CV não incorporadas na reação, comportando-se estas como fíler na mistura.

Relativamente ao tamanho das partículas de cinzas volantes utilizadas foi igualmente realizado um estudo como estas podem influenciar a capacidade de resistência à compressão do betão, porosidade e tamanho dos poros necessariamente ligado à eficiência das mesmas. Prinya Chindaprasirt, Chai Jaturapitakkul, Theerawat Sinsiri (2004), concluíram, de forma experimental, que a utilização de cinzas volantes classificadas segundo o tamanho das partículas (19,1 e 6,1 μm) produziu melhores resultados de resistência comparativamente às cinzas volantes correntes. Foram utilizadas dois tipos de cinzas volantes, nomeadamente CV correntes e CV classificadas segundo dois tamanhos de partículas (19,1 e 6,1 μm). Executaram-se ensaios para as percentagens de substituição de cinzas volantes de 20 e 40% do cimento utilizando uma razão a/l de 0,35. Verificou-se que a mistura produzida com cinzas classificadas conduziu, como referido anteriormente, a resistências de compressão maiores. O tamanho dos poros e porosidade da pasta de cimento foi significativamente afetada. A substituição do cimento por cinzas volantes correntes (sem classificação) conduziu a um aumento de porosidade mas diminui o tamanho médio dos poros. A porosidade total e os poros capilares diminuíram enquanto a porosidade do gel aumentou para todas as percentagens de substituição. Foi ainda concluído no âmbito de Tese de Mestrado de Anna Knutsson (2010), um estudo realizado sobre o comportamento de betões com cinzas volantes em ciclos de gelo/degelo com vários resultados representados pelo fator de eficiência k.

Teoricamente, com um aumento de pressão hidráulica nos poros de tamanho reduzido, o betão com fator k igual à unidade, deve funcionar melhor que o betão com fator de eficiência 0,4. Isto, desde que, a razão a/c seja igual para ambos casos considerados, 0,45. No entanto, o betão com menor teor de ligante para a mistura com fator k maior possui poros capilares de tamanhos grandes o que permite a passagem de água por capilaridade, diminuindo a pressão hidráulica existente. Por outro lado, betões com adições em que os fatores k maiores são menos densos, o que conduz a menor resistência e mais água possível de congelar nos poros, logo betões com menor durabilidade face a ciclos de gelo/degelo. Foram realizadas cinco misturas de betões com 20% de cinzas volantes, para diferentes fatores de eficiência, temperatura e tempo de cura. Após avaliação experimental verificou-se que os provetes de betão com 20% de cinzas volantes e fator de eficiência k=1, curados por 56 e 90 dias, apresentaram menor durabilidade face a ciclos de gelo/degelo em comparação com o betão com cinzas volantes com k=0,4. Para betões curados a 55ºC, o resultado foi inverso. O provete de betão curado a 90 dias apresentou maior durabilidade comparativamente ao betão curado a 56 dias.

Como foi possível concluir através dos vários estudos realizados, o fator k medido entre a relação da resistência à compressão e razão a/c, para cinzas volantes (CV), encontra-se numa faixa de valores de 0,2 a 1, valores superiores aos recomendados na NP EN 206-1 (k=0,2 para CEM I 32.5 e k=0,4 para CEM II 42,5). Segundo A.Bentur e D.Mitchell (2008), utilizar o fator k como indicador de durabilidade pode resultar em erro visto a eficiência da adição depender necessariamente da classe de exposição a que vai estar sujeita, por exemplo, um betão com cinzas volantes apresenta um bom desempenho num ambiente sujeito ao ataque de cloretos e menor eficácia num ambiente sujeito ao ataque por carbonatação. Segundo A.Bentur e D.Mitchell (2008), deve ser prestada particular atenção nas condições de cura em betões com adições de cinzas volantes (CV), visto curas deficientes poderem comprometer o recobrimento final do betão, onde segundo o autor, é a zona onde as cinzas volantes devem materializar o seu desempenho. Simulações laboratoriais das condições de cura concluíram que o ambiente de cura é extremamente importante e que pode condicionar de forma severa o fator de eficiência (k=1,5) determinado relativamente à tensão de compressão, k =0,8 determinado relativamente à carbonatação, k= 1,8 determinado relativamente à penetração de cloretos, aos 28 dias, respetivamente. Através destes valores, podemos concluir que a utilização do fator k tem as suas limitações, não sendo indicado como indicador de durabilidade, dependendo, necessariamente, da classe de exposição a que o betão com adições

vai estar sujeito. Segundo A.Bentur e D.Mitchell (2008), existe assim a necessidade de abordagens mais eficazes de forma a determinar o potencial das adições enquanto indicadores de durabilidade. Segundo o autor, é necessário elaborar especificações de desempenho que incluem métodos aceitáveis, bem como critérios a adotar. Encontra-se em estudo uma abordagem do fator de eficiência enquanto indicador de durabilidade, que reflete as propriedades do betão *in situ* relativamente a diferentes classes de exposição.

2.3 Adições de metacaulino

No presente trabalho é, igualmente, abordado o conceito do fator k derivado de adições de metacaulino (MTK). O metacaulino é atualmente outra solução económica e ambientalmente favorável de substituição de parte do cimento utilizado no fabrico de betão. O tratamento do caulino resulta de menor consumo de energia relativamente ao cimento e melhor aproveitamento dos recursos existentes para a sua obtenção. Badogiannis, Papadakis, Chaniotakis e Tsivilis (2004) realizaram um estudo experimental de forma a conhecer melhor o comportamento do betão com adição de metacaulino. O trabalho experimental foi realizado com metacaulino pobre (MTK) resultante de caulino grego pobre e metacaulino comercial (MCK) em substituições de 10% e 20%. Badogiannis, Papadakis, Chaniotakis e Tsivilis (2004) verificaram que a resistência à compressão aumenta quando parte do cimento ou areia é substituído por metacaulino (MTK) relativamente a um betão de referência, sem quaisquer adições, avaliado até 90 dias. Observou-se que existe uma distribuição razoável no aumento de resistência à compressão em função do índice de MTK. Relativamente ao metacaulino utilizado, verificou-se que o metacaulino pobre apresenta um efeito mais considerável no desenvolvimento da resistência do betão, comparativamente, ao metacaulino comercial. Segundo Badogiannis, Papadakis, Chaniotakis e Tsivilis (2004), o desenvolvimento da resistência do betão com metacaulino depende de vários fatores como o efeito de enchimento (comportamento do metacaulino como fíler), o efeito da diluição devido ao aumento efetivo da razão a/c e da reação pozolânica do MTK com o $Ca(OH)_2$. Face aos dois tipos de substituição realizados experimentalmente, substituindo a areia por MTK, verificaram um aumento de resistência relativa em 2 dias, facto devido ao comportamento do metacaulino como fíler, que acelerou, consequentemente a hidratação do cimento. No caso de a substituição ser feita em parte do cimento por metacaulino (MTK), o efeito de enchimento é

ultrapassado pelo efeito de diluição, conduzindo a um decréscimo da resistência relativa. A resistência relativa resulta da razão entre a resistência à compressão do betão com adição de metacaulino (MTK) e o betão equivalente sem adições. A resistência relativa apresentou valores elevados nas primeiras idades (2 a 28 dias), facto devido, principalmente, à reação pozolânica desencadeada pela presença do metacaulino (MTK). O aumento da resistência relativa é ainda mais significativo quando existe substituição da areia por metacaulino (MTK), devido à anulação do efeito de diluição. Para idades superiores a 28 dias verificou-se um decréscimo da resistência relativa devido ao término da reação pozolânica. Relativamente à eficiência das adições, utilizando o conceito do fator k, foram estimadas eficiências de valores k aproximadamente de k=3 aos 28 dias que traduzem o excelente desempenho destas adições. O valor de k elevado assegura o estatuto de material pozolânico altamente reativo. Quando se substitui parte da areia por metacaulino (MTK), a resistência relativa, apresentou valores elevados em todas as idades até aos 90 dias. Para ambos os metacaulinos foi concluído que a sua prestação é em todo similar. Os valores obtidos do fator de eficiência k no trabalho experimental realizado deixam claro que as adições de metacaulino (MTK), devido às suas características de alta reatividade pozolânica, são uma adição de elevado potencial na obtenção de um betão mais amigo do ambiente, económico e de alto desempenho.

H.Wong e Abdul Razak (2005), realizaram, igualmente, um trabalho experimental direcionado ao estudo do fator de eficiência k em betões com adições de metacaulino (MTK) e sílica de fumo (SF). O trabalho experimental foi assente na utilização da lei de *Abrams* que relaciona a resistência à compressão com a/c, calculando a eficiência em termos de resistência relativa e capacidade ligante do material. Esta avaliação utilizou apenas duas misturas na determinação do fator k. Os ensaios realizados demonstraram que o fator de eficiência varia segundo o tipo de pozolana, idade e percentagem de substituição. Nas primeiras idades o metacaulino (MTK) apresentou valores de eficiência k de 1,6 a 2,3 enquanto a sílica de fumo 2,1 a 3,1. Para idades superiores, aos 180 dias, o valor de k para o metacaulino (MTK) situou-se no intervalo 1,8 a 4. Os valores obtidos por Badogiannis, Papadakis, Chaniotakis e Tsivilis (2004) encontram-se, assim, dentro dos previsíveis e obtidos anteriormente por H.Wong e Abdul Razak (2005). Foi igualmente observado que o fator de eficiência k aumenta com a idade e ainda que uma mudança na razão a/c de 0,33 para 0,27 não afetou significativamente os fatores de eficiência resultantes.

Relativamente à utilização do metacaulino (MTK) no betão em Portugal, foi elaborado um estudo por J. Sampaio, J.Coutinho e M.Sampaio (2000) de forma a determinar os benefícios da utilização destas adições. O programa de ensaios consistiu no fabrico de um betão com uma adição de 10% de metacaulino (MTK), um betão com 10% de sílica de fumo e um betão de referência equivalente, sem adição. O conjunto de ensaios para comparação do desempenho dos betões inclui a resistência à compressão, absorção por capilaridade, resistência à carbonatação acelerada, resistência à penetração de cloretos através do ensaio rápido para determinação da permeabilidade aos cloretos definido pela ASTM (1202-94) e, também, pelo ensaio rápido CTH. Verificou-se que as adições de metacaulino obtiveram, de modo geral, melhores prestações relativamente ao betão com sílica de fumo, excetuando-se a resistência à compressão que foi ligeiramente superior no betão com sílica de fumo. Os ensaios permitiram concluir que o metacaulino apresenta, como já referido, grandes vantagens. Os benefícios face ao betão de referência foram os seguintes: 4% de benefício na resistência à compressão, 23% para o coeficiente de absorção, 58% para a resistência à carbonatação, 66% para a resistência à carbonatação pela ASTM 1202-94 e AASHTO 217-83 e 74% pelo método rápido CTH, respetivamente. Conclui-se assim que a utilização de adições de metacaulino (MTK) deve ser claramente potenciada.

2.4 Adições de escórias de alto-forno

Relativamente à aplicação do fator k no estudo da eficiência de adições de escórias de alto-forno (GBBS), foi recentemente realizado um estudo de como este deve ser obtido, sendo que, até à data, este tipo de adição ainda não se encontra devidamente contemplada na norma NP EN 206-1. Atualmente, ainda que provisoriamente, esta adição é utilizada na Irlanda em percentagens de 70%, com utilização de cimento CEM II/A. No estudo da Ecocem (2010), foram obtidos valores de eficiência para vários tipos de cimento e percentagens de substituição de escórias de alto-forno. Os fatores k foram obtidos relativamente a betões de referência, sem qualquer adição. O fator k foi obtido através de uma relação entre a resistência à compressão e a razão a/c, comparando o betão com adição incorporada e um betão de referência, sem quaisquer adição. Assim para um mesmo valor de tensão de compressão, o valor do fator k foi obtido pela equação (2) anteriormente apresentada.

O valor de eficiência k mais elevado com utilização do cimento CEMI 32,5 foi de 1,06, para uma percentagem de substituição de 25% de GBBS. Para substituição de 50% e 60%, os valores do fator k foram 0,94 e 0,95, respetivamente. Na avaliação da adição de GBBS com cimento CEMII/B-S 32,5, o valor de eficiência foi menor, comparativamente, ao uso de GBBS com CEM I 32,5, obtendo-se o valor de k de 1,05. Numa percentagem de substituição de 31% de GBBS, num estudo levado a cabo pela Ecocem (2010), obteve, para o CEM III/A e CEM III/B, 0,92 e 1,08, respetivamente. Verificou-se, no decorrente estudo, que a proveniência da adição teve importância nos valores obtidos, remetendo-se para a qualidade das mesmas. Ainda, relativamente ao uso de adições de GBBS, a Intron Technologies, inc. (2011), empresa de renome na reabilitação de betão, efetuou igualmente um estudo comparativo entre vários países sobre valores obtidos para o fator k neste tipo de adição. A Intron avaliou a adição de GBBS numa percentagem de substituição do cimento de 70%, com cimento CEM I 42,5 R e com CEM 52,5, relativamente, a uma mistura de referência de CEM III/B 32,5, sem qualquer adição. Apresenta-se no Quadro 1, em síntese, os valores médios obtidos para o fator k nos países, Bélgica, Alemanha e Holanda, respetivamente.

Quadro 1: Valores do fator k para substituição de 70% de GBBS.

País	**Fator-k (70% GBBS + CEM I 42,5 R)**	**Fator-k (70% GBBS + CEM I 52,5 R)**
Bélgica	1,09	1,42
Alemanha	1,19	1,62
Holanda	0,98	1,32

De acordo com o Quadro 1, observa-se que os valores variam ligeiramente, dependendo os valores de k da qualidade da adição, variando esta de local para local. No decorrer do estudo conclui-se que o valor do fator k para este tipo de adições deve ser considerado igual à unidade, e medido relativamente a um cimento com as mesmas características.

O presente tema foi já alvo de estudo por M. João Brito (2007), sendo o seu estudo um ponto de partida para a presente dissertação. O estudo elaborado por M. João Brito (2007), no laboratório de materiais da construção da Universidade do Minho, consistiu na avaliação da eficiência do fator k para adições de cinzas volantes (CV) e metacaulino (MTK) no betão. O trabalho experimental compreendeu a análise de 192 provetes com diferentes condições de

mistura, fazendo variar a percentagem de substituição de cimento em 20 e 60%. As adições utilizadas foram cinzas volantes (20% e 60%) e metacaulino (20%). No fabrico das composições fez-se variar também a razão água/cimento a/l, tendo sido estudadas misturas com razões a/l iguais a 0,4, 0,5, 0,6 e 0,65, para cada uma das adições. Relativamente à avaliação da resistência à compressão, verificou-se que foi possível realizar argamassas com resistências aceitáveis recorrendo à adição de materiais correntes, de custo e qualidade reduzidas, como as CV e a materiais como o MTK, corroborando os resultados, igualmente, obtidos por outros investigadores. Verificou-se que o efeito destas adições, devido à morosidade da reação pozolânica, seria mais evidente para idades mais avançadas. Assim, segundo a autora, pode dizer-se que, com o evoluir da idade, é expectável que as composições tendam a atingir resistência igual ou até mesmo superior à das composições sem adições. Verificou-se ainda um decréscimo acentuado de resistência nas composições com 60% de cinzas volantes (CV). M. João Brito (2007) conclui que a resistência diminui com o aumento da percentagem de substituição, aspeto que pode ser justificado pela falta de cimento na mistura, especialmente na composição com a/c de 0,65 e 60% de CV, e à demora dos efeitos da reação pozolânica. Outro aspeto que influenciou a resistência das argamassas, foi a maior ou menor quantidade de água existente na composição. Com o aumento da razão a/c verificou-se um decréscimo da resistência, para todas as composições. Relativamente à determinação dos valores do fator de eficiência, os resultados obtidos não foram os previstos. Este facto deveu-se, principalmente, ao tempo de cura e ensaio dos provetes limitada aos 28 dias como idade máxima de estudo. É sabido, segundo a bibliografia que sustenta o presente documento, que as reações pozolânicas das adições de CV, são lentas e os seus efeitos são evidenciadas para idades mais avançadas. Consequentemente, a eficiência destas adições, traduzidas pelo fator k, é igualmente influenciada. O uso de apenas quatro razões a/c no seu estudo foi igualmente penalizador na determinação do fator k. A determinação do fator k foi realizada pela metodologia já referida no presente documento, recorrendo a gráficos que relacionam a resistência à compressão com as razões a/c proposta por M. J. Esteves Ferreira e Arlindo F. Gonçalves. A construção destes gráficos foi baseada em apenas quatro pontos. Assim, as aproximações escolhidas tiveram como referência poucos pontos, o que originou curvas condicionadas na sua definição. Verificou-se que para as composições com 60% de CV deveriam ser realizadas razões a/c mais pequenas para assim a relação tensão vs. a/c ficar mais próxima da mesma relação para as composições padrão e com 20% de CV. O afastamento desta curva (60% de CV) obrigou, em diversas situações, ao uso de extrapolações para a determinação da razão a/c para os níveis de tensão adotados. Este facto deverá assim

ter especial atenção por forma a evitar extrapolações que possivelmente condicionaram os valores de fator k obtidos, não correspondendo aos previstos. Deste modo, com apoio no trabalho realizado por M. João Brito (2007), deverá ser utilizado um maior número de razões a/c para a determinação do fator k no programa experimental levado a cabo na presente dissertação.

2.5 Enquadramento normativo do fator k

Relativamente à aplicação do fator k em Portugal, este encontra-se descrito na norma NP EN 206-1. O fator k permite ter em conta as adições do tipo II em betões. Entende-se por adição, de acordo com o definido na NP EN 206-1, um material inorgânico finamente divido, usado no betão a fim de melhorar determinadas propriedades ou conseguir propriedades especiais. Em termos normativos estão definidos dois tipos de adições, tipo I e tipo II, adições inertes e adições pozolânicas ou hidráulicas latentes, respetivamente. As adições a qual se aplica o fator k, adições tipo II, são, por exemplo, cinzas volantes, metacaulino, escórias de alto-forno, sílica de fumo, entre outras. As adições do tipo II são consideradas na composição do betão relativamente à dosagem de cimento e à razão água/cimento, desde que aptidão para tal se encontre estabelecida. Na norma portuguesa encontra-se estabelecida a aptidão do fator k para adições de sílica de fumo e cinzas volantes. O conceito do fator k é tido em conta pela substituição do termo "razão água/cimento" por "razão água/(cimento+k*adição)", e ainda na dosagem mínima de cimento. O conceito fator k para cinzas volantes baseia-se na norma NP EN 206-1, onde é definido o limite máximo de utilização de cinzas volantes numa razão inferior a 0,33 em massa das cinzas volantes e cimento. Para quantidades maiores de cinzas volantes, estas não são consideradas. Define, ainda, os valores de eficiência k, segundo NP EN 206-1, de 0,2 para CEM I 32,5 e de 0,4 para CEM II 42,5 e superiores. Os valores de k são claramente baixos quando comparados com os resultados obtidos na bibliografia existente, deixando claro que é possível uma maior eficiência e avaliação do fator k a apresentar. Define ainda, para cinzas volantes, que a dosagem mínima requerida para determinada classe ambiental de exposição pode ser reduzida de uma quantidade k vezes a dosagem mínima de cimento (200 kg/m^2), mas a soma da quantidade cimento e cinzas volantes não deve ser inferior à dosagem mínima requerida. Relativamente à aplicação do fator k para adições de sílica de fumo, a NP EN 206-1 também apresenta valores para o fator k, desde que estas estejam de acordo com a prEN 13263: 1998. É igualmente definido um

valor máximo de utilização de sílica de fumo, que não deve ser superior a 11% da massa de cimento. Para valores superiores de sílica de fumo, esta não será considerada. Para betões fabricados com cimento CEM I conforme com a NP EN 197-1, os valores do fator k são determinados em função da razão água/cimento. Para razões água/cimento inferiores ou iguais a 0,45, k toma o valor de 2. Para valores de razão água/cimento superiores a 0,45, k toma o mesmo valor de 2, exceto para classes de exposição XC e XF, onde k é igual à unidade. Verifica-se que a discriminação do fator k para ambos casos é limitada. A quantidade (cimento x sílica de fumo) não deve ser inferior à mínima dosagem de cimento requerida pela classe de exposição relevante. A mínima dosagem de cimento não deve ser reduzida em mais do que 30 kg/m^3 no betão a usar para classes de exposição ambiental para quais a mínima dosagem de cimento é menor ou igual a 300 kg/m^3.

É assim notório que a contabilização do conceito do fator k previsto na norma NP EN 206-1 carece de outras abordagens ao mesmo, nomeadamente, outras percentagens de adições e limites de utilização, entre outras. A dissertação a realizar visa assim elaborar um estudo sobre as situações em falta na norma NP EN 206-1, com vista a uma melhor compreensão do conceito do fator k, como aplicar e para que valores são possíveis de aplicar.

2.6 Novas abordagens de cálculo do fator k com vista à sua atualização normativa

Com o decorrer dos anos o fator de eficiência foi alvo de diversos estudos como foi possível apurar através da revisão bibliográfica. Atualmente, o fator de eficiência k encontra-se em progresso para atualização das suas disposições normativas. A sua atualização está a ser estudada atualmente em sede própria por um grupo de investigadores, CEN/TC104/SC/TG5 (2012). Esta necessidade de atualização do fator k em termos normativos vai de encontro às motivações que despertaram a realização da presente dissertação, isto é, o aproveitamento e aplicação de subprodutos ou materiais menos poluentes com vista a redução da dependência e utilização de cimento. Os valores de eficiência k segundo os investigadores devem permitir uma avaliação uniforme para qualquer tipo de adição mineral em toda a Europa com a utilização de classes de cimento *standard* e certificados que não necessitem de controlo de qualidade aquando da sua utilização. Como visto anteriormente noutros estudos, o valor de k permite a utilização de adições minerais do tipo II realizando a substituição da razão

água/cimento por água/(cimento+k*adição) onde a parcela de ligante (cimento+k*adição) não deve ser inferior à quantidade de cimento necessária para a classe de exposição ambiental onde o betão ou argamassa for colocada. No decorrer da pesquisa realizada verificou-se os seguintes aspetos:

- O valor de k foi obtido na sua maioria experimentalmente;
- A resistência à compressão evolui positivamente a partir dos 28 dias de idade em betões e argamassas;
- O valor do fator k foi determinado através da relação entre a força de compressão a determinado nível de tensão e a razão água/cimento dos provetes realizados;
- A percentagem de cimento utilizado e a máxima percentagem de substituição do mesmo por adições minerais variou significativamente nas normas nacionais específicas a cada país membro da União Europeia;
- As cinzas volantes são passíveis de utilização com diversos tipos de cimento;
- O fator k para as cinzas volantes varia de 0,2 a 0,8, de 1,0 a 2,0 para a sílica de fumo e de 0,4 a 1 para as escórias de alto-forno;
- Onde o fator k foi determinado, foi igualmente avaliado a prestação dos betões e argamassas em termos de durabilidade;
- O fator k é essencialmente utilizado na avaliação da eficiência em cinzas volantes e sílica de fumo. Poucos países utilizam o fator k na avaliação de adições de escórias de alto-forno.

As adições do tipo II contribuem para as características do betão de diversas formas dependendo das características dos mesmos, tempo de cura, ambiente de exposição, entre outros parâmetros. Os valores e indicações normativas na NP EN 206-1 são apresentados para o tempo de cura de betões. No entanto, quando o fator de eficiência é definido, a durabilidade deve ser considerada. Isto é ainda mais importante em avaliação do fator k em cinzas volantes, uma vez que as suas potencialidades são despertadas acima dos 90 dias de cura e permitem, com base em vários estudos, obter melhores prestações em termos de durabilidade

relativamente a composições padrão com utilização exclusiva de cimento como ligante (Camões, 2002).

O valor do fator k pode ser obtido de forma análoga ao estudo de M. João Brito (2007) e proposto por M. J. Esteves Ferreira e Arlindo F. Gonçalves, através da expressão (2) já apresentada.

O valor do fator k é, naturalmente, dependente de vários parâmetros como referido anteriormente: qualidade e propriedades das adições; percentagem de substituição; tipo de cimento e suas propriedades; razão a/c; idade, temperatura entre outros parâmetros. O fator k é, assim, calculado pela relação água/cimento e a tensão de compressão de betões sem adições, que funcionam como referência, e de betões com adições. O método estudado é o proposto por Smith (1967), em que o fator k é calculado pela relação água/cimento *vs*. resistência à compressão em betões com a mesma quantidade de adições. O estudo define que uma aproximação linear para definição do comportamento de resistência à compressão em restritas áreas apresenta bons resultados. Refere-se que no programa experimental a aproximação linear é igualmente tido em conta. No entanto, devido à grande variação das composições das argamassas e razões água/cimento, a aproximação hiperbólica pode resultar num melhor ajuste com valores do coeficiente de correlação de modo geral mais próximos da unidade. A utilização de outras aproximações (Hiperbólica, Lei de Abrams, Bolomey) permite igualmente resultados adequados segundo os investigadores, CEN/TC104/SC/TG5 (2012). A variação do fator k é mais notória com a variação da resistência à compressão do que na variação das aproximações utilizadas. A equação linear utilizada (3) é portanto adaptada da seguinte forma (4):

$$y = a - bx \tag{3}$$

$$fc = b - m \cdot \left(\frac{\text{água}}{\text{cimento}}\right) \tag{4}$$

Como podemos observar na Figura 2, o método de cálculo apresentado diferencia-se do método utilizado no presente programa experimental, e proposto por M. J. Esteves Ferreira

e Arlindo F. Gonçalves, uma vez que a curva de referência padrão se situa acima da curva do betão com adições.

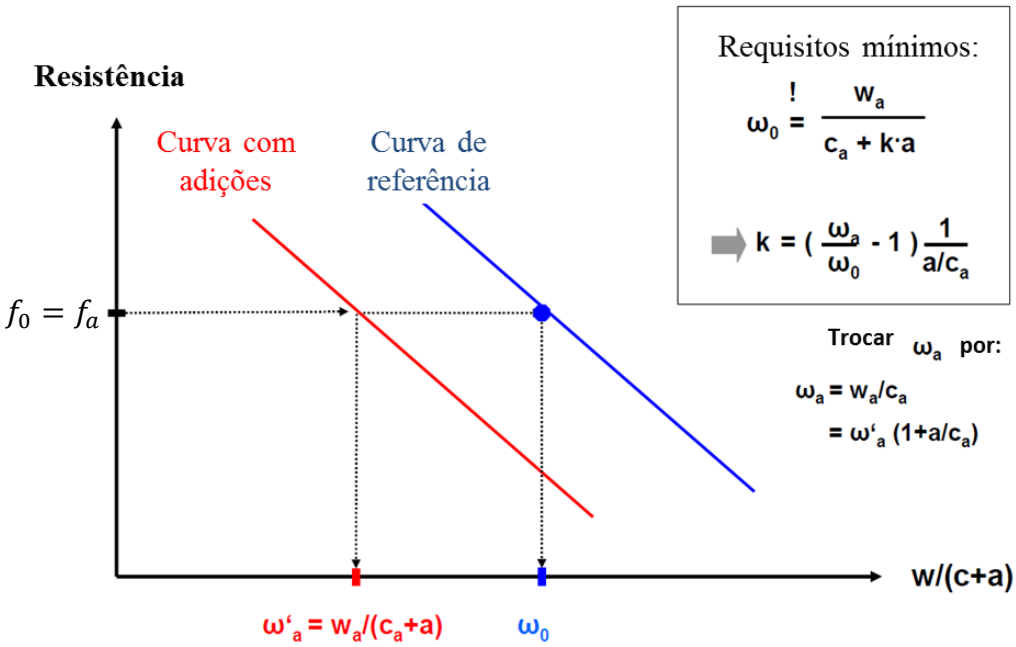


Figura 2: Princípio de cálculo do fator k para a razão w/(c+a).

Este princípio de cálculo é diferenciado pela forma como a curva representativa das adições é modelada. A modelação das curvas é obtida da seguinte maneira:

$$\text{Curva de referêcnia} \rightarrow f_0 = A_0 - B_0 \cdot \omega_0 \tag{5}$$

$$\text{Curva com adição} \rightarrow f_a = A_a - B_a \cdot \left(\frac{w}{c+a}\right) \tag{6}$$

$$f_{0\,(referência)} = f_{a\,(com\ adição)}$$

$$f_0 = f_a \rightarrow f_a = A_0 - B_0 \cdot \omega_0 = A_a - B_a \left(\frac{w}{c+a}\right) \tag{7}$$

$$\omega_0 = \frac{w}{(c + k \cdot a)} \rightarrow w = \omega_0 \cdot (c + k \cdot a) \tag{8}$$

$$A_0 - B_0 \cdot \omega_0 \ = A_a - B_a \cdot \omega_0 \cdot \frac{(\mathrm{c} + k \cdot a)}{(c + a)} \tag{9}$$

Ou

$$A_0 - B_0 \cdot \omega_0 \ = A_a - B_a * \omega_0 \cdot \frac{(1 + k \cdot \frac{a}{c})}{(1 + \frac{a}{c})} \tag{10}$$

Como podemos verificar, o princípio base é o mesmo, isto é, a avaliação do fator k é realizada para um nível de tensão igual ($\mathrm{f}_0 = \mathrm{f}_a$) para ambas as misturas (com e sem adição) (Figura 2). Utilizando a equação (11), é possível determinar o fator k:

$$\mathrm{k} = \frac{A_0 - B_0 \cdot \left(1 + \frac{a}{c}\right)}{B_a \cdot \frac{a}{c}} \cdot \frac{1}{\omega_0} + \left[\frac{B_0 \cdot \left(1 + \frac{a}{c}\right)}{B_a} - 1\right] \cdot \frac{1}{\frac{a}{c}} \tag{11}$$

Onde,

ω_0 – razão água/cimento do betão sem adição (argamassa de referência).

ω_a – razão água/cimento do betão com adição incorporada.

w_a – quantidade de água no betão com adição.

c_a – quantidade de cimento no betão com adição [kg/m^3].

f_0 – resistência à compressão do betão de referência [MPa].

f_a – resistência à compressão do betão com adição [MPa].

a – quantidade de adição [kg/m^3].

A_0, A_a, B_0, B_a – coeficientes da relação linear entre a razão água/cimento e a resistência à compressão dos betões sem adições e com adições.

A título de exemplo apresenta-se o procedimento de cálculo adotando a metodologia apresentada anteriormente:

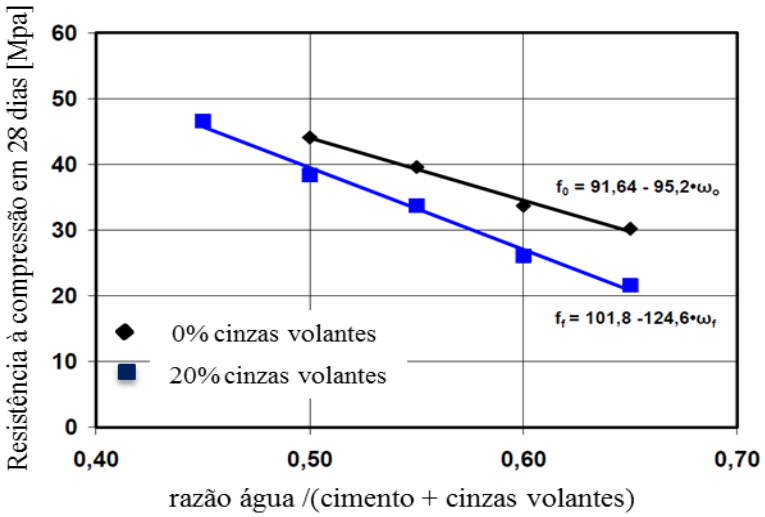


Figura 3: Exemplo da relação resistência à compressão vs. água/(cimento+adição).

$$f_0 = 91,64 - 95,20 \cdot \omega_0 \tag{12}$$

$$f_f = 101,8 \times 126,6 \cdot \frac{w}{(c+f)}, com \frac{f}{c} = 0,25\ (20\%\ CV) \tag{13}$$

$$\mathrm{k} = \frac{101,8 - 91,64 \cdot (1 + 0,25)}{124,6 \cdot 0,25} \cdot \frac{1}{\omega_0} + \left[\frac{95,20 \cdot (1 + 0,25)}{125,6} - 1\right] \cdot \frac{1}{0,25} \tag{14}$$

$$\mathrm{k} = 0,408 \cdot \frac{1}{\omega_0} - 0,180 \tag{15}$$

Uma vez realizados os cálculos apresentados, é possível relacionar o fator k com a razão água/cimento padrão, e para cada razão, obter o respetivo valor do fator k, como podemos verificar atendendo à Figura 3.

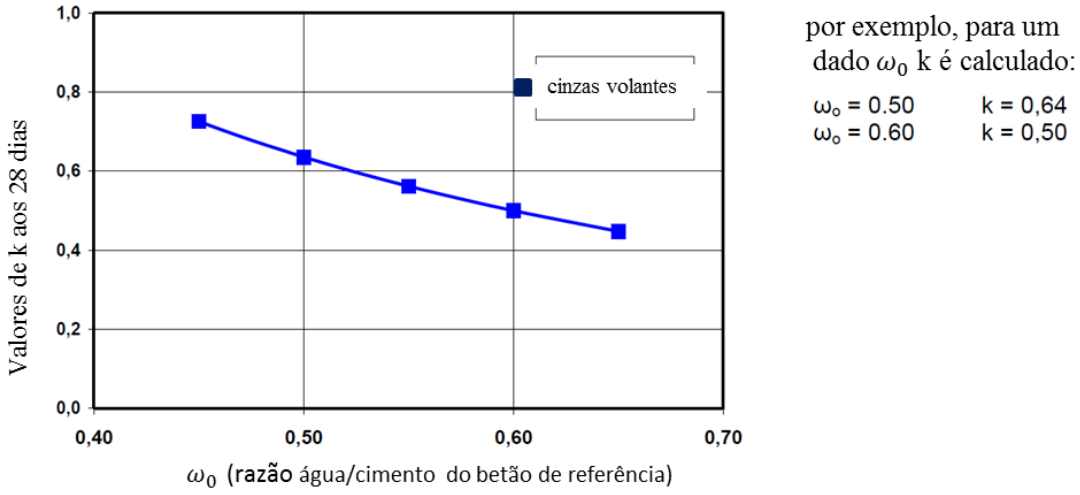


Figura 4: Relação entre o fator k aos 28 dias e a razão água/cimento da composição com 20% de cinzas volantes.

A metodologia de cálculo apresentada permite dois tipos de abordagem para o cálculo do fator k. A abordagem apresentada na Figura 4, em que é dado uma razão água/cimento padrão e obtemos o fator de eficiência para a composição com adição, e uma segunda abordagem que vai de encontro ao realizado no programa experimental da presente dissertação, o cálculo do fator k pela relação entre a resistência à compressão e a razão água/cimento, dado um determinado nível de tensão. Apresentam-se dois exemplos de formar a apresentar as duas abordagens, atendendo à equação (19):

Abordagem 1: Selecionar um valor para a razão água/cimento (w/c)

Por exemplo, w/c= 0,5:

$$k(\omega_0 = 0{,}5) = \frac{0{,}408}{0{,}5} - 0180 = 0{,}636 \tag{16}$$

Podendo-se ainda obter o valor para que tensão esta eficiência acontece, através de:

$$f_0(\omega_0 = 0{,}5) = 91{,}64 - 95{,}20 \cdot 0{,}5 = 44\ MPa \tag{17}$$

$$f_f(\omega_0 = 0{,}5) = 101{,}8 - 124{,}6 \cdot 0{,}5 \cdot \left(\frac{1 + 0{,}636 \cdot 0{,}25}{(1 + 0{,}25)}\right) = 44\ MPa \tag{18}$$

Abordagem 2: Selecionar um nível de tensão (resistência à compressão)

Por exemplo, f = 35MPa

$$f_0 = A_0 - B_0 \cdot \omega_0 \rightarrow 35 = 91{,}64 - 95{,}20 \cdot \omega_0 \tag{19}$$

$$\omega_0 = \frac{(91{,}64 - 35)}{95{,}20} = 0{,}595 \tag{20}$$

$$f_f = A_f - B_f \cdot \frac{w}{(c+f)} \rightarrow 35 = 101{,}8 - 124{,}6 \cdot \frac{w}{(c+f)} \tag{21}$$

$$\frac{w}{(c+f)} = \frac{(101{,}8 - 35)}{124{,}6} = 0{,}536 \tag{22}$$

$$k = \frac{\left(\frac{\omega_f}{\omega_0} - 1\right)}{\left(\frac{f}{c}\right)}, com\ \omega_f = \frac{w}{(c+f)} \cdot \left(1 + \frac{f}{c}\right) \tag{23}$$

$$k = \frac{\left[\frac{\left(0{,}536(1+0{,}25)\right)}{0{,}595} - 1\right]}{0{,}25} = 0{,}504 \tag{24}$$

Esta abordagem é ainda utilizada em termos comparativos no final do programa experimental, no Capítulo 4, nomeadamente, no subcapítulo 4.4. O valor do fator k, como referido, encontra-se em estudo para uma melhor definição na sua determinação. Por exemplo, no caso de adições com cinzas volantes, o fator k poderá mesmo ser calculado tendo em conta a eficiência das adições do ponto de vista da durabilidade, o que até agora era refutado por alguns investigadores, CEN/TC104/SC/TG5 (2012). O fator k deverá ser inicialmente calculado, segundo o grupo de investigadores, pela metodologia apresentada anteriormente, onde são considerados os parâmetros mais importantes na obtenção da resistência e o seu comportamento ao longo da idade, nomeadamente, tipo de cimento, classe de resistência obtida, qualidade das adições, razão/água cimento, entre outras) para um cálculo aproximado através de uma previsão do fator k a longo prazo. Esta é uma abordagem de previsão tendo em conta os resultados obtidos em ensaios à compressão que definem um intervalo para o fator k. É aconselhado adotar um fator k abaixo do intervalo por razões de segurança. As cinzas volantes utilizadas na definição deste intervalo foram selecionadas entre

trinta tipos de cinzas volantes e cumprem os devidos requisitos da norma NP EN 405-1. Com base nos resultados obtidos, pode-se prever um fator k de k=0,4, para os 28 dias de idade, como podemos observar na Figura 5.

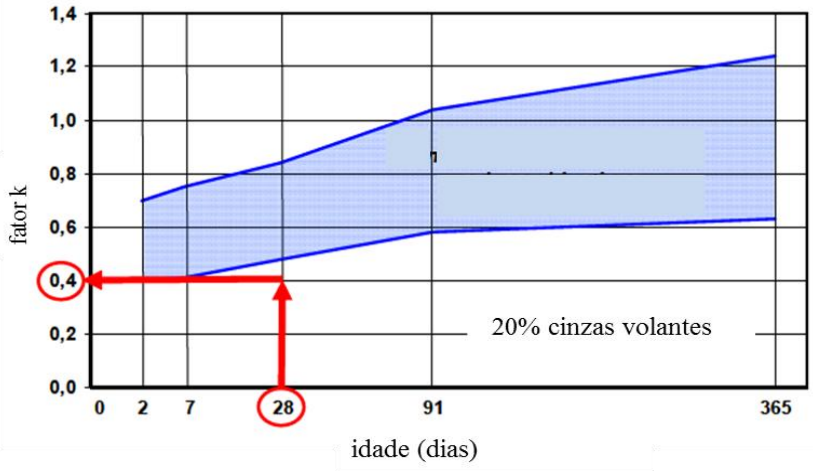


Figura 5: Determinação do fator k com base no intervalo de valores de k obtidos em ensaios de compressão.

Em seguida, utilizando composições com valores de k=0,4, foi avaliado o seu comportamento de durabilidade em termos de resistência aos efeitos de gelo/degelo e carbonatação que definidos com base na metodologia de perspetiva/valor aproximado de k, apresentaram o resultado esperado, com as argamassas contendo 20%de cinzas volantes a ultrapassar a resistência a 100 ciclos gelo/degelo (Figura 6) e à carbonatação relativamente à argamassa padrão (Figura 7).

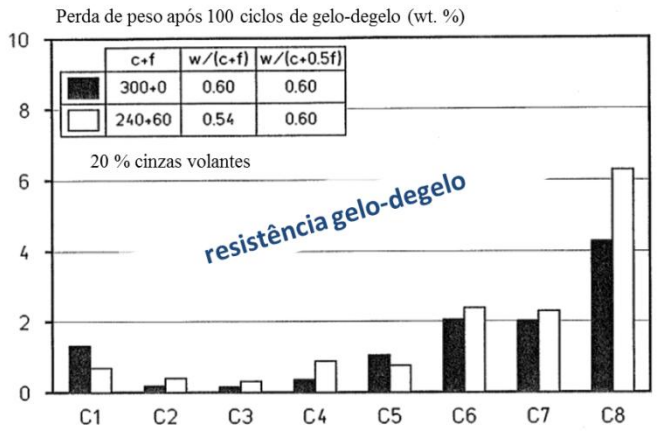


Figura 6: Resultados do ensaio de gelo/degelo em avaliação do valor adotado por previsão do fator k.

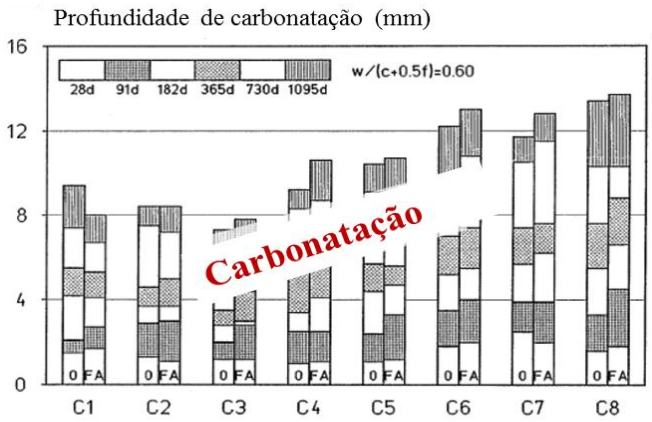


Figura 7: Resultados do ensaio de carbonatação.

Analisando os resultados e a metodologia proposta, poder-se-á concluir que o conceito de eficiência conhecido como fator k, se encontra com excelentes perspetivas de definição que possam apoiar a utilização de subprodutos industriais. A definição do fator k e metodologia de como este deve ser obtido é assim de enorme importância, uma vez que é necessário um indicador simples e direto que possa potenciar e facilitar o processo de inclusão de adições na redução do cimento no fabrico de betões e argamassas.

3 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Local de trabalho

O programa experimental teve lugar no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho no Campus de Azurém, Guimarães (Figura 8).



Figura 8: Laboratório de Engenharia Civil, secção de Materiais de Construção.

3.2 Materiais utilizados no fabrico das argamassas

3.2.1 Cimento

O cimento (c) é um ligante hidráulico, isto é, um material que ativa as suas propriedades ligantes quando é misturado e amassado com água. Uma vez misturado convenientemente com água existe a formação de uma pasta que por reação de hidratação leva à presa, endurecimento e a uma resistência mecanicamente estável, em ambientes de imersão em água ou expostos ao ar, NP 2064 (1991). O cimento tipo I constituído por 95%

a 100% de clínquer Portland. É um produto de elevada qualidade sujeito a um rigoroso controlo de qualidade em todo o seu processo de fabrico e armazenamento. Descritivamente, apresenta cor cinzenta, composição granular muito fina, homogéneo com elevadas temperaturas de hidratação que se forem controladas de forma a não consumir a água contribuem para um acelerar das reações de presa e endurecimento. O cimento permite adquirir a sua resistência típica aos 28 dias no intervalo de valores de 42,5 e 62,5 MPa.

No presente programa experimental foi utilizado um cimento Portland do tipo I, classe 42.5 R (CEM I 42.5R), certificado de acordo com a NP EN 197-1 (2001), fabricado pela SECIL Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., fornecido a granel e numa só remessa de forma a salvaguardar e minorar eventuais variações nas suas características. Uma vez recebido foi armazenado em devidas condições de forma a manter as suas características intactas.

A escolha do cimento CEM I 42,5 R recaiu face à necessidade de utilização de um cimento não composto que possibilitasse de forma mais apurada analisar e observar os efeitos das adições nas composições. Apresentam-se as respetivas características químicas, mecânicas e físicas no Quadro 2, Quadro 3 e Quadro 4, respetivamente. Os valores apresentados dizem respeito ao controlo estatístico do fabricante e correspondem a médias anuais englobando o período de fornecimento de cimento.

Quadro 2: Análise química do cimento.

	Propriedades	**Método de Ensaio**	**Valor obtido**
Características químicas	Perda ao fogo (%)	NP EN 196-2	2,57
	Resíduo insolúvel (%)	NP EN 196-2	1,53
	Teor de sulfatos (%)	NP EN 196-2	3,49
	Teor de cloretos (%)	NP EN 196-2	0,06
Composição química	**Composição**	**Símbolo**	**%**
	Óxido de silício	SiO_2	19,94
	Óxido de alumínio	Al_2O_3	4,82
	Óxido de ferro	Fe_2O_3	3,12
	Óxido de cálcio	CaO	62,39
	Óxido de magnésio	MgO	2,11

Quadro 3: Características mecânicas do cimento.

Características mecânicas	**Resistência à compressão (MPa), NP EN 196-1**		
	2 dias	7 dias	28 dias
	31,9	46,9	57,4

Quadro 4: Características físicas do cimento.

Características físicas	**Propriedades**	**Método de ensaio**	**Valor obtido**
	Peso específico (g/cm^3)	LNEC E 64	3,13
	Tempo de presa (min)	NP EN 196-3	Início:148; Fim: 255;
	Expansibilidade (mm)	NP EN 196-3	1,15

3.2.2 Agregados

Os agregados ocupam grande quantidade das misturas no fabrico de argamassas e betões, ocupando sensivelmente 70 a 75% do seu volume

Uma vez que o programa experimental incidiu sobre a avaliação de misturas ternárias em argamassas, foi utilizada, exclusivamente, uma areia de dimensão compreendida entre 0 a 4mm, geralmente conhecida por areia 0/4 (Figura 9).



Figura 9: Areia 0/4 (0 a 4mm de diâmetro)

A areia foi fornecida pela pedreira Britaminho, Granitos e Britas do Minho, Lda. "Sorte do Mato das Lagedas" localizada na freguesia de Gonça e com sede em S. Torcato, Concelho de Guimarães. A Britaminho possui atualmente três pedreiras em exploração com devida certificação de qualidade que garante a qualidade dos agregados. Apresentam-se no Quadro 5 as principais caraterísticas do agregado de acordo com a norma NP EN 12620 (2004) assim como a respetiva análise granulométrica no Quadro 6 e Figura 10 segundo a EN NP 933-1 (2000).

Quadro 5: Características do agregado.

Agregado	**$D_{máx.}$ (mm)**	**Módulo de finura**	**Teor de finos (EN 933-1)**	**Massa Volúmica (kg/m^3) (EN 1097-6)**	**Absorção de água (%) (EN 1097-6)**
Areia 0/4	5,6	3,28	≤ 3	2660	0,2

Quadro 6: Análise granulométrica da areia 0/4.

Peneiro (mm)	**% retidos acumulados Areia**
63	0
31,5	0
16	0
8	0
4	8
2	32
1	53
0,5	68
0,25	78
0,125	89
0,063	97

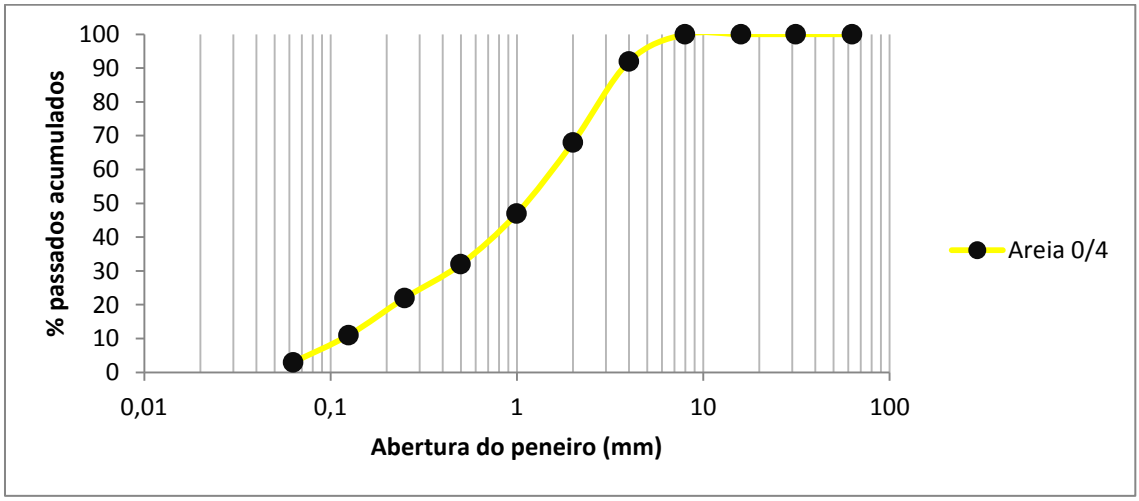


Figura 10: Curva granulométrica do agregado.

As características avaliadas estão de acordo com o estipulado na NP EN 206-1 indicando a sua adequabilidade para a utilização na produção de betões. Os baixos teores de absorção de água dos agregados, inferiores a 0,2%, indicam uma baixa porosidade do material, o que significa que é necessário um menor consumo de água para garantir a trabalhabilidade. A dimensão máxima do agregado é de 5.6 mm.

A areia utilizada no programa experimental passou ainda por um processo de secagem em estufa a 102ºC (Figura 11) antes de utilização durante aproximadamente 12 horas de forma a garantir que não exista água acumulada no agregado e a uniformizar toda a sua constituição para iguais condições de utilização. Após secagem foi colocada em tabuleiros, arrefecendo à temperatura ambiente para, uma vez estabilizada, ser utilizada.



Figura 11: Estufa de secagem de materiais.

3.2.3 Água

A água nas amassaduras tem como função hidratar o cimento, provocando uma reação química que permite o ganho de presa e endurecimento aglomerando os agregados e despertando a característica de ligante do cimento.

A água utilizada no trabalho experimental foi a existente no laboratório, cuja canalização está a cargo da Vimágua, Empresa de Água e Saneamento de Guimarães e Vizela, E.I.M. S.A.. A água utilizada é potável cumprindo em 100% as características de qualidade exigidas legislativamente para o consumo e, portanto, passível de utilização para o fabrico das respetivas amassaduras segundo a norma EN 1008 (2005), que considera apta a utilização de água potável para fabrico de amassaduras e betões.

3.2.4 Cinzas volantes

As cinzas volantes são um subproduto industrial resultado da queima de carvão mineral. É portanto um material com um custo de fabrico virtualmente nulo uma vez que é

resultado de um processo industrial e representa, portanto, uma excelente opção ecológica de aproveitamento uma vez que a sua disposição no meio ambiente é negativa. As cinzas volantes pertencentes às adições do tipo II (adição pozolânica) têm coloração cinzenta (Figura 12) e são mineralogicamente constituídas por: quartzo, hematita e material amorfo. Quimicamente, são compostas por elementos como Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cr, Cd e Ni.



Figura 12: Cinzas volantes.

As cinzas resultantes da queima do carvão podem ser de dois tipos: volantes (cerca de 80%) e pesadas (cerca de 20%). As cinzas volantes são de textura fina e são arrastadas pelos gases da combustão das fornalhas da caldeira e retidas por precipitadores electroestáticos.

De um modo geral, as cinzas volantes melhoram a trabalhabilidade, diminuem o calor de hidratação, reduzem a permeabilidade e permitem uma melhoria da durabilidade substancial. Apresentam uma hidratação lenta o que justifica os valores reduzidos de resistência à compressão nos primeiros dias de idade, aumentando consideravelmente para idades superiores aos 90 dias de cura, ultrapassando muitas vezes as resistências à compressão para betões e argamassas correntes fabricadas apenas com cimento como ligante.

No programa experimental foram utilizadas cinzas volantes provenientes da Endesa Generation S.A. de Compostela, Espanha. As cinzas volantes foram classificadas de acordo com a NP EN 450-1 (2008), com uma perda ao fogo compreendida entre 2 a 7 %, pertencendo à classe B, sendo o objetivo deste requisito limitar a quantidade de carbono não queimado nas cinzas volantes e o seu módulo de finura pertencente à classe N com a percentagem de retidos inferiores a 40 % em massa no peneiro de 0,045 mm. As cinzas volantes são constituídas em 80% de carvão e 20% de coque de matéria prima. Apresentam-se no Quadro 7 e Quadro 8 as características químicas e físicas das cinzas volantes utilizadas, respetivamente.

Quadro 7: Composição Química das cinzas volantes.

Análise Química									
P.C	**Cl^-**	**SO_3**	**CaO_{livre}**	**$CaO_{reativo}$**	**$SiO_{2reativo}$**	**$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$**	**Alacális**	**MgO**	**P_2O_5**
[2,7]%	**≤ 10%**	**≤ 3%**	**≤ 2,5%**	**≤ 10%**	**≥ 25%**	**≥ 70%**	**≤ 5%**	**≤ 4%**	**≤ 100 mg/kg**
4,85	0	0,12	0,1	2,7	40,8	89,9	0,25	1,9	7,92

Quadro 8: Características físicas das cinzas volantes.

Análise Física							
Finura-1 (%>0,045 mm)	**Finura-2 (%>0,045 mm)**	**Densidade**	**Tempo de fixação inicial (min)**			**Índice de atividade (%)**	
≤ 40%	**≤ 40%**	**±200 kg/m³ (V.D.)**	**t_{100}**	**$t_{75/25}$ ≤ 120 min t_{100}**	**Variação de t (%)**	**$I.A._{28d}$ ≥ 70%**	**$I.A._{90d}$ ≥ 80%**
12,35	12,07	2420	240	220	109	79	99

3.2.5 Metacaulino

O metacaulino é um material possível para adição e substituição parcial do cimento, pertencente ao tipo II de adições (adição pozolânica). O caulino é um material natural e abundante na natureza com uma vasta aplicação. O principal componente do caulino é a caulinite pertencente ao grupo de filo-silicatos. O tratamento térmico do caulino a temperaturas de 500 °C leva à desidroxilação (desidratação) da caulinite o que resulta na formação de metacaulinite e metacaulinita. É ainda de referir que esta temperatura é relativamente baixa quando comparada à de processamento do clínquer o que representa, face ao cimento, uma alternativa mais económica com menores gastos de energia para a sua produção. Dependendo das condições de tratamento térmico, bem como a composição de caulino bruto, são adquiridos diferentes graus de desidroxilação de caulinita O grau de desidroxilação da caulinite é um parâmetro importante que influencia diretamente as suas propriedades hidráulicas latentes. No ambiente de hidróxido de cálcio, que tipicamente se origina durante a hidratação do cimento Portland, a metacaulinite é submetida a uma reação pozolânica onde são formados hidratos de alumínio de cálcio e hidratos de silício de alumínio. Em resultado desta reação, contendo menor quantidade de cimento, obtêm-se tipicamente

maior resistência à compressão logo aos primeiros dias, bem como uma maior durabilidade em diversos ambientes de exposição.

Foi utilizado o metacaulino D. Fradique fornecido pela FRADICAL – Fábrica de Transformação de Cal, Lda. com coloração rosa (Figura 13), com uma massa volúmica de 1700 kg/m^3 e com diâmetro máximo das partículas de 710 µm com patente ECO-ETIC SUBERLYME. Uma vez que não foi possível recolher os dados detalhados do produto utilizado, apresenta-se no Quadro 9 uma composição química típica do metacaulino assim como uma curva granulométrica típica do metacaulino (Figura 14).



Figura 13: Metacaulino.

Quadro 9: Composição química típica do metacaulino.

Composição	**%**
SiO_2	54.25
AL_2O_3	39.90
P_2O_5	0.11
SO_3	0.03
Fe_2O_3	1.51
CaO	0.09
Na_2O	0.08
K_2O	1.79
TiO_2	0.41
MgO	0.18

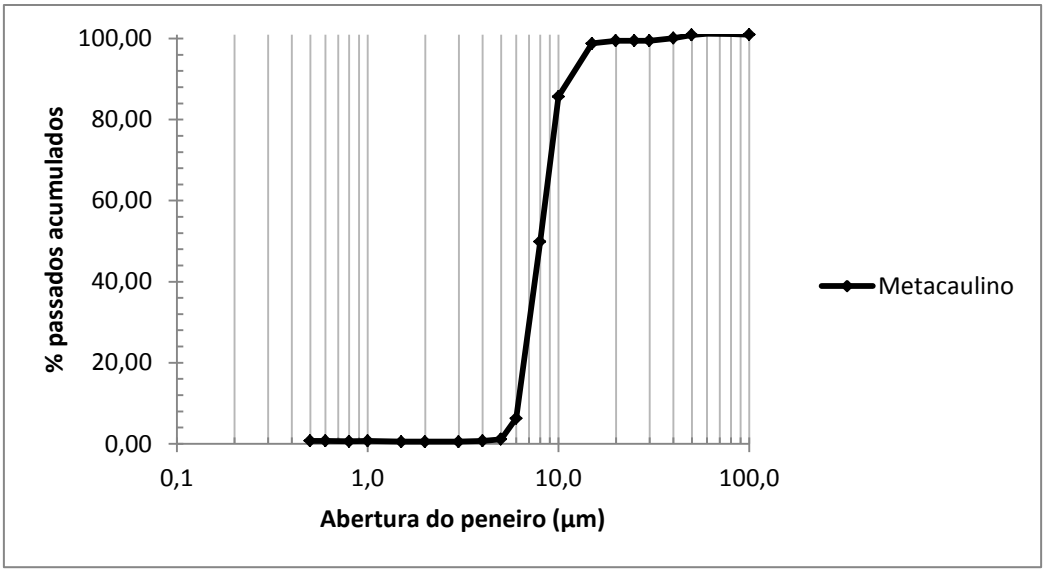


Figura 14: Curva granulométrica de um metacaulino tipo.

3.2.6 Superplastificante

Os superplastificantes são adjuvantes que, uma vez adicionados nas misturas, em cerca de 2% do peso do cimento permitem adquirir uma maior trabalhabilidade e fluidez reduzindo a necessidade de água na mistura o que pode levar à viabilidade de razões água /cimento (a/c) menores, que representam, necessariamente, misturas com maior capacidade de resistência à compressão.

Uma vez que no presente programa experimental se optou por um leque amplo de razões a/c, foi necessário a utilização de um superplastificante para as menores razões a/c, nomeadamente, 0,35 e 0,4. O superplastificante utilizado nas composições foi o Glenium Sky 526 (Figura 15) que é um superplastificante de segunda geração, à base de polímeros de éter policarboxilico (PCE), recomendado para betões de elevado desempenho com especial relevância sobre as resistências inicias. Este produto foi gentilmente cedido pela BASF Portugal e, segundo a sua ficha técnica, a dosagem normalmente recomendada situa-se entre 0,4 e 1,0 Litro por 100kg de ligante, sendo que outras dosagens poderão ser utilizadas, podendo reduzir-se ou aumentar-se em função das necessidades de fluidez, redução de água e resistências iniciais e finais estabelecidas.



Figura 15: Superplastificante Glenium Sky 526 (Embalagem).

A adição do superplastificante tem necessariamente uma determinada metodologia na sua aplicação, devendo este ser adicionado somente quando todos os elementos estejam previamente misturados, isto é, só é adicionado quando existe uma mistura relativamente homogênea de cimento, areia e água. Assim sendo, o superplastificante foi adicionado após as misturas apresentarem determinada homogeneidade, lentamente, com a misturadora em movimento contínuo.

A sua aptidão geral está conforme a norma EN NP 934-2 (2009), apresentando-se as suas características no Quadro 10.

Quadro 10: Caraterísticas do superplastificante Glenium Sky 526.

Função principal	Superplastificante / Forte redutor de água
Função secundária	Acelerador de endurecimento
Aspeto	Líquido castanho
Densidade relativa (20ºC)	1,07 ± 0,02 g/cm^3
pH, 20ºC	5 ± 1
Viscosidade (20ºC)	< 100 cps
Teor de sólidos	≤ 30%
Teor de cloretos	≤ 0,1 %

3.3 Fabrico, moldagem e conservação dos provetes

3.3.1 Descrição das composições

Uma vez definidos os objetivos do programa experimental, definiram-se as composições a fabricar. No Quadro 11 são apresentadas as quantidades totais dos materiais utilizados no programa experimental. Foram constituídos 600 provetes de dimensão 50x50x50 mm^3 resultantes do fabrico de argamassas nas razões 0,35, 0,4, 0,5, 0,6 e 0,7 de água/cimento e água/ligante (composições contendo adições minerais) para as seguintes composições: padrão; 20%, 40% e 60% de cinzas volantes; 10%, 20% e 30% de metacaulino; 10% de cinzas volantes + 10% de metacaulino, 30% de cinzas volantes + 10% de metacaulino e 50% de cinzas volantes + 10% de metacaulino, sinteticamente no Quadro 12 ao Quadro 18. Realizaram-se ensaios à compressão nos provetes aos 7, 28, 90 e 180 dias de idade. Cada composição foi designada por razão a/l-adição-percentagem de substituição, isto é, por exemplo, 0,35CV20. As composições foram consideradas atendendo à norma NP EN 196-1, realizadas ao traço 1:3, isto é, a areia é três vezes a quantidade de cimento nas composições. As quantidades e informações adicionais encontram-se em anexo.

Quadro 11: Quantidade total dos materiais no programa experimental.

Materiais	**Quantidade Total**
Superplastificante BASF Glenium Sky 526	0,369 kg
Cimento CEM I 42,5 Secil	31,876 kg
Areia 0/4	136,233 kg
Cinzas Volantes (Endesa)	9,437 kg
Metacaulino (D.Fradique)	4,097 kg
Água	22,525 L

Quadro 12: Razões água/cimento.

Razões a/c				
0,35	0,4	0,5	0,6	0,7

Quadro 13: Idades de Ensaio (dias).

Idade de Ensaio (dias)			
7	28	90	180

Quadro 14: Composições realizadas.

Composições
Padrão
20% de Cinzas Volantes (20%CV)
40% de Cinzas Volantes (40%CV)
60% de Cinzas Volantes(60%CV)
10% de Metacaulino (10%MTK)
20% de Metacaulino (20%MTK)
30% de Metacaulino (30%MTK)
10% de Cinzas Volantes + 10% de Metacaulino (10%CV+10%MTK)
30% de Cinzas Volantes + 10% de Metacaulino (30%CV+10%MTK)
50% de Cinzas Volantes + 10% de Metacaulino (50%CV+10%MTK)

Apresentam-se em detalhe a constituição das composições ensaiadas aos 7, 28, 90 e 180 dias, no Quadro 15, Quadro 16, Quadro 17 e Quadro 18.

Quadro 15: Composição padrão.

Composição	**a/c**	**C (kg/m^3)**	**Areia (kg/m^3)**
0,35	0,35	997,359	2992,077
0,4	0,4	970,473	2911.418
0,5	0,5	923,297	2769,890
0,6	0,6	878,248	2634,743
0,7	0,7	837,390	2512,170

Quadro 16: Composições com cinzas volantes.

Composição	**a/l**	**%CV**	**C (kg/m^3)**	**CV (kg/m^3)**	**Areia (kg/m^3)**
0,35CV20	0,35	20	788,600	197,150	2957,251
0,4CV20	0,4		767,582	191,896	2740,019
0,5CV20	0,5		730,672	182,668	2740,019
0,6CV20	0,6		695,387	173,847	2607,701
0,7CV20	0,7		663,353	165,838	2487,574
0,35CV40	0,35	40	584,645	389,764	2923,226
0,4CV40	0,4		569,238	379,492	2846,189
0,5CV40	0,5		542,157	361,438	2710,785
0,6CV40	0,6		516,242	344,161	2581,209
0,7CV40	0,7		492,691	328,461	2463,455
0,35CV60	0,35	60	385,330	577,995	2889,976
0,4CV60	0,4		375,288	562,932	2814,658
0,5CV60	0,5		357,622	536,434	2682,168
0,6CV60	0,6		340,700	511,050	2555,249
0,7CV60	0,7		325,307	487,960	2439,799

Quadro 17: Composições com metacaulino.

Composição	**a/l**	**%MTK**	**C (kg/m^3)**	**MTK (kg/m^3)**	**Areia (kg/m^3)**
0,35MTK10	0,35	10	894,295	99,366	2980,985
0,4MTK 10	0,4		870,274	96,697	2900,914
0,4MTK 10	0,5		828,114	92,013	2760,382
0,6MTK 10	0,6		787,841	87,538	2626,138
0,7MTK 10	0,7		751,304	83,478	2504,346
0,35MTK 20	0,35	20	791,993	197,998	2969,974
0,4MTK 20	0,4		770,796	192,699	2890,487
0,5MTK 20	0,5		733,583	183,396	2750,938
0,6MTK 20	0,6		698,024	174,506	2617,589
0,7MTK 20	0,7		665,752	166,438	2496,571
0,35MTK 30	0,35	30	690,444	295,905	2959,045
0,4MTK 30	0,4		672,031	288,013	2880,134
0,5MTK 30	0,5		639,697	274,16	2741,559
0,6MTK 30	0,6		608,789	260,910	2609,096
0,7MTK 30	0,7		508,730	248,884	2488,844

Quadro 18: Composições de cinzas volantes e metacaulino.

Composição	**a/l**	**%CV**	**%MTK**	**C (kg/m^3)**	**CV (kg/m^3)**	**MTK (kg/m^3)**	**Areia (kg/m^3)**
0,35CV10+MTK10	0,35	10	10	790,293	98,787	98,787	2963,599
0,4CV10+MTK 10	0,4			769,186	96,148	96,148	2884,448
0,5CV10+MTK 10	0,5			732,125	91,516	91,516	2745,467
0,6CV10+MTK 10	0,6			696,703	87,088	87,088	2612,636
0,7CV10+MTK 10	0,7			664,551	83,069	83,069	2492,064
0,35CV30+MTK 20	0,35	30	10	585,886	292,943	97,648	2929,429
0,4CV30+MTK 20	0,4			570,414	285,207	95,069	2852,069
0,5CV30+MTK 20	0,5			543,224	271,612	90,573	2716,118
0,6CV30+MTK 20	0,6			517,209	258,604	86,201	2586,044
0,7CV30+MTK 20	0,7			493,572	246,786	82,262	2467,859
0,35CV50+MTK 30	0,35	50	10	386,138	482,673	96,535	2896,038
0,4CV50+MTK 30	0,4			376,054	470,068	94,014	2820,408
0,5CV50+MTK 30	0,5			358,318	447,90	89,580	2687,389
0,6CV50+MTK 30	0,6			341,332	426,665	85,333	2559,987
0,7CV50+MTK 30	0,7			325,882	407,353	81,471	2444,118

3.3.2 Fabrico das amassaduras

A preparação e o fabrico das argamassas foi realizado segundo a metodologia descrita na norma NP EN 196-1.

Para a realização do programa experimental, para além dos materiais descritos no presente capítulo, foram utilizados diversos equipamentos e ferramentas necessárias para a seguinte sequência de trabalhos:

- Fabrico das argamassas;
- Ensaio de espalhamento;
- Moldagem dos provetes;
- Desmoldagem dos provetes 24h após constituição dos mesmos;
- Conservação dos provetes em câmara húmida até data do ensaio;
- Ensaio à compressão.

Uma vez caraterizados os materiais utilizados e devidamente conservados, procedeu-se seguidamente ao fabrico das amassaduras.

As amassaduras foram previamente definidas nas suas quantidades conforme os quadros apresentados em anexo. Após a sua definição, as misturas foram realizadas pesando cada material na balança de precisão de ±1g (Figura 16) e colocados na misturadora mecânica (Figura 17) com balde em aço inoxidável (Figura 18), de eixo vertical e pás rotativas devidamente normalizada a cumprir com a NP EN 206-1.



Figura 16: Balança de precisão.



Figura 17: Misturadora mecânica.



Figura 18: Balde da misturadora em aço inoxidável com amassadura concluída.

As amassaduras foram realizadas através da seguinte sequência padronizada:

1. Pesagem de todos materiais na balança de precisão, colocando-os em diversos recipientes previamente limpos e secos;
2. Colocação do cimento e adições de cinzas volantes e/ou metacaulino consoante composição no balde da misturadora;
3. Introduzir a determinada quantidade de água previamente pesada segundo a razão a/c ou a/l em estudo colocando imediatamente a misturadora em funcionamento durante 30 segundos;
4. Colocar a areia na sua totalidade após 30 segundos e deixar misturar;
5. Completo o processo de mistura, colocar novamente em rotação a misturadora em velocidade lenta e acrescentar lentamente o superplastificante nas razões a/c e a/l que assim o exijam (0,35 e 0,4) misturando durante 180 segundos de forma a tornar homogénea a mistura e permitir a formação da argamassa.

3.3.3 Ensaio de espalhamento

Uma vez realizadas as amassaduras, procedeu-se ao ensaio de espalhamento para avaliação da trabalhabilidade das amassaduras com utilização da mesa de espalhamento (Figura 19).



Figura 19: Mesa de espalhamento.

A realização do ensaio de espalhamento teve por base a norma NP EN 1015-3. Este ensaio consiste na determinação da consistência da argamassa através do seu espalhamento numa superfície plana resultante de um número normalizado de pancadas. No ensaio de espalhamento foi utilizada a mesa de espalhamento existente no laboratório e devidamente normalizada. A mesa de espalhamento possui uma superfície circular plana de diâmetro de 250 mm que é elevada e baixada, conferindo pancadas à argamassa, segundo um mecanismo posto em marcha manualmente através da rotação de uma manivela.

O procedimento para o ensaio de espalhamento foi o seguinte:

1. Limpar a mesa e molde tronco-cónico, aplicando de seguida uma camada leve de óleo doméstico corrente. Limpar o excesso do óleo de forma a uniformizar todas as superfícies. Misturar com uma colher a amassadura logo após fabrico na misturadora de forma a anular qualquer falso ajustamento;
2. Colocação da argamassa no molde tronco-cónico em cima da mesa até metade da sua altura com a ajuda de uma espátula;
3. Estando o molde preenchido até sua metade, dá-se 10 pancadas com o varão de aço normalizado de forma a compactar a primeira camada;
4. Uma vez compactada a primeira camada, colocar a segunda camada até preencher na totalidade o molde, retirando-se o excesso com uma espátula, alisando a superfície;
5. Com a superfície lisa, são aplicadas 10 pancadas com o varão de aço de forma a compactar a segunda camada;
6. Estando a argamassa compactada, retira-se lentamente e com cuidado o molde tronco-cónico num movimento vertical. Uma vez retirado são aplicadas 15 pancadas igualmente espaçadas por meio da rotação da manivela no espaço de 15 segundos, fazendo com que o mecanismo por elevação-queda aplique as pancadas na argamassa colocada no prato.
7. Finalizando, mede-se com uma régua em duas direções perpendiculares entre si, o diâmetro da argamassa espalhada.

O espalhamento da argamassa resulta da média dos diâmetros medidos perpendicularmente entre si (Figura 20 e Figura 21).

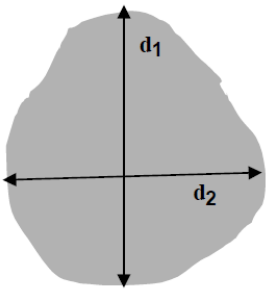


Figura 20: Medição do espalhamento da amassadura.

Portanto, o espalhamento resulta da aplicação da seguinte formulação:

$$Espalhamento\ (mm) = \frac{d1 + d2}{2} \tag{25}$$



Figura 21: Ensaio de espalhamento na composição 0,35CV60.

Os resultados obtidos no ensaio de espalhamento são apresentados no Capítulo 4, nomeadamente, no subcapítulo 4.1, referente à apresentação e discussão dos resultados.

3.3.4 Moldagem, desmoldagem e conservação dos provetes

Uma vez realizado o ensaio de espalhamento, as amassaduras são colocadas novamente no balde de aço inoxidável para introdução nos moldes previamente preparados antes do fabrico das amassaduras. Esta introdução é imediata. A sua compactação foi levada a cabo com a utilização da mesa vibratória (Figura 22). Para a constituição dos provetes de ensaio à resistência à compressão foram utilizados moldes cúbicos de dimensão de 50x50x50 mm^3 (Figura 23). Foram fabricados por composição, 60 provetes, totalizando 600 provetes ensaiados em todo o programa experimental.



Figura 22: Compactação da argamassa em mesa vibratória.



Figura 23: Moldes cúbicos de 50 mm^3.

Descreve-se detalhadamente o procedimento adotado na moldagem dos provetes:

1. Limpar e olear lentamente os moldes antes da fabricação das amassaduras;
2. Colocar com uma colher a primeira camada de argamassa até metade do preenchimento do molde;
3. Colocar em funcionamento a mesa vibratória durante 15 segundos de forma a compactar a primeira camada;
4. Com uma pequena espátula raspar suavemente a superfície da primeira camada de forma a evitar a criação de interfaces entre as camadas;
5. Introduzir a segunda camada, preenchendo na totalidade o molde, alisando a superfície retirando a argamassa em excesso;
6. Colocar novamente a mesa em vibração durante 15 segundos;
7. Alisar e retirar eventuais excessos da superfície dos moldes;
8. Etiquetar os moldes para posterior identificação e marcação aquando a desmoldagem;
9. Colocação dos moldes em câmara húmida até ao dia seguinte (24h) para desmoldagem.

No dia seguinte à moldagem, procede-se à desmoldagem dos provetes (Figura 24). A desmoldagem passa por uma desassemblagem meticulosa dos moldes, utilizando as ferramentas necessárias para o seu desaperto e para remoção dos provetes. Uma vez retirados os provetes, os moldes são devidamente limpos, oleados e colocados no seu lugar para nova utilização.



Figura 24: Desmoldagem dos provetes.

Os provetes retirados dos moldes são etiquetados através de inscrição com marcador permanente (Figura 25). Uma vez marcados foram imersos em água a 23°C, em câmara húmida (Figura 26) até à data do ensaio (7, 28, 90 ou 180 dias).



Figura 25: Identificação dos provetes.



Figura 26: Conservação dos provetes imersos, em câmara húmida.

3.4 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado através das prensas de compressão uniaxial ELE (Figura 27). Os ensaios foram realizados cumprindo a norma NP EN 12390-3 (2003). Os provetes foram retirados da câmara húmida ficando a secar à temperatura ambiente do laboratório durante 30 minutos antes do ensaio (Figura 28). Os ensaios realizaram-se a uma velocidade de aplicação de carga de 2,4 kN/s. Os resultados do ensaio são a média do ensaio de três provetes, para cada composição. O procedimento detalhado do ensaio de resistência à compressão foi o seguinte:

1. Retirar os provetes da imersão e colocá-los a secar à temperatura ambiente durante 30 minutos antes do ensaio;
2. Colocar o provete com as faces lisas no prato devidamente centrado e alinhado;
3. Introduzir a dimensão do provete na máquina (b=50, d=50 e h=50);
4. Introduzir a velocidade de aplicação de carga no valor de 2,4 kN/s;
5. Iniciar o ensaio com o pressionar da tecla *run*;
6. Uma vez destruído o provete, anotar o resultado da resistência à compressão (kN);
7. Retirar o provete destruído e limpar o equipamento;
8. Introduzir novo provete a ensaiar repetindo o processo descrito.



Figura 27: Prensas de ensaio à compressão.



Figura 28: Provetes colocados a secar 30 minutos antes do ensaio.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de espalhamento, ensaio de compressão assim como a determinação do fator k. São realizadas várias análises do fator k e a sua evolução, nomeadamente, com a idade, percentagem de substituição, nível de tensão e linearidade entre as composições contendo adições simultâneas de cinzas volantes e metacaulino. É ainda apresentado um cálculo comparativo do fator k entre a abordagem adotada no programa experimental e uma outra constante na atualização normativa do fator k, CEN/TC104/SC/TG5 (2012).

4.1 Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento teve a sua maior importância na definição da viabilidade do fabrico das argamassas tendo em conta a sua trabalhabilidade. Estes ensaios foram realizados previamente ao fabrico dos provetes e permitiram a definição final do programa experimental a realizar. Foi verificado que para todas as composições, foi necessário adicionar 2% de superplastificante para as composições com razões a/c e a/l de 0,35 e 0,4 serem passíveis de realizar. Estas, na ausência de superplastificante, apresentavam inconsistência nas composições com elevada substituição pela falta de água existente na amassadura. De forma geral, as amassaduras foram realizadas com sucesso. A trabalhabilidade foi boa, tendo o único problema surgido para as composições com razão 0,7 com alguma amassaduras a ultrapassar o diâmetro da mesa de espalhamento (250mm), nomeadamente, a composição 60%CV nas razões 0,4 e 0,7 assim como a composição 50%CV+10%MTK na razão a/l igual a 0,4. Verifica-se que existe uma tendência de aumentar o espalhamento da razão 0,35 para a 0,4 baixando a partir deste para um patamar inferior e subindo a partir deste, o que materializa um pico nas curvas de espalhamento. Este pico é, na sua maioria, próximo do valor máximo possível no prato, isto é, um espalhamento de 250 mm. Apresentam-se os valores obtidos no espalhamento das 10 composições realizadas no Quadro 19 ao Quadro 22, assim como as respetivas curvas de espalhamento segundo a razão a/c e a/l para cada composição (Figura 29 à Figura 32).

Quadro 19: Resultados do espalhamento na composição padrão.

Padrão	
Razão água/cimento (a/c)	**Espalhamento (mm)**
0,35	100
0,4	215
0,5	100
0,6	160
0,7	242,5

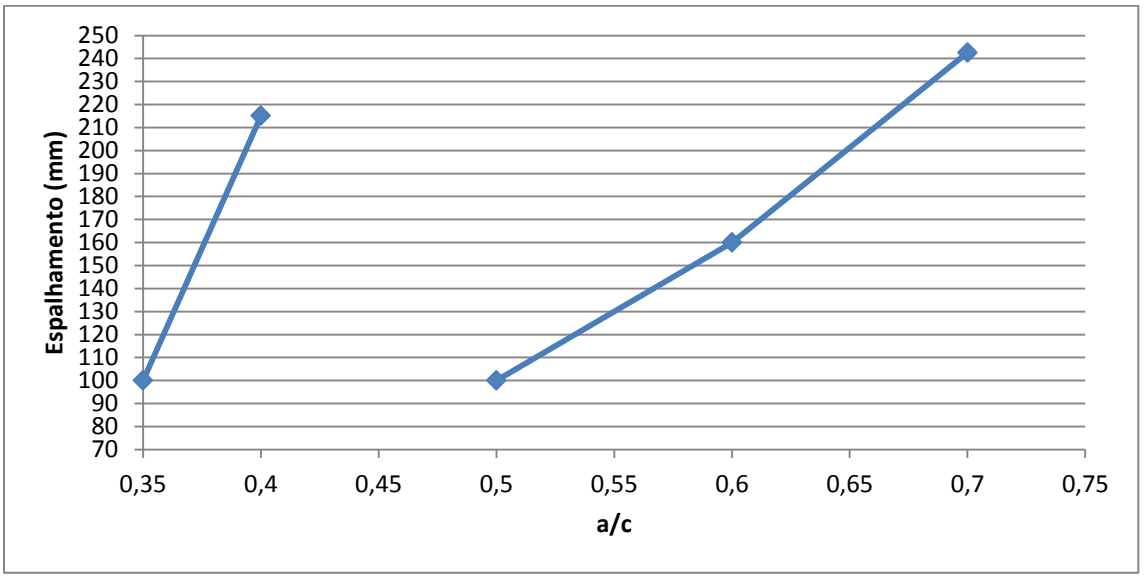


Figura 29: Espalhamento da argamassa padrão.

Como referido anteriormente, verifica-se um pico na razão a/c de 0,4 (Figura 29), o que pode justificar-se pela menor necessidade de superplastificante a introduzir. Uma vez que foi adotado a introdução de 2% de superplastificante para as composições 0,35 e 0,4 devido a algumas composições com elevada percentagem de substituição, optou-se por manter transversal a quantidade de superplastificante introduzida para todas as composições.

Quadro 20: Resultados do espalhamento na composição com adição de CV.

20% Cinzas Volantes	
Razão água/ligante (a/l)	**Espalhamento (mm)**
0,35	117,5
0,4	245
0,5	110
0,6	175
0,7	215
40% Cinzas Volantes	
0,35	135
0,4	250
0,5	115
0,6	180
0,7	235
60% Cinzas Volantes	
0,35	142,5
0,4	250
0,5	122,5
0,6	185
0,7	250

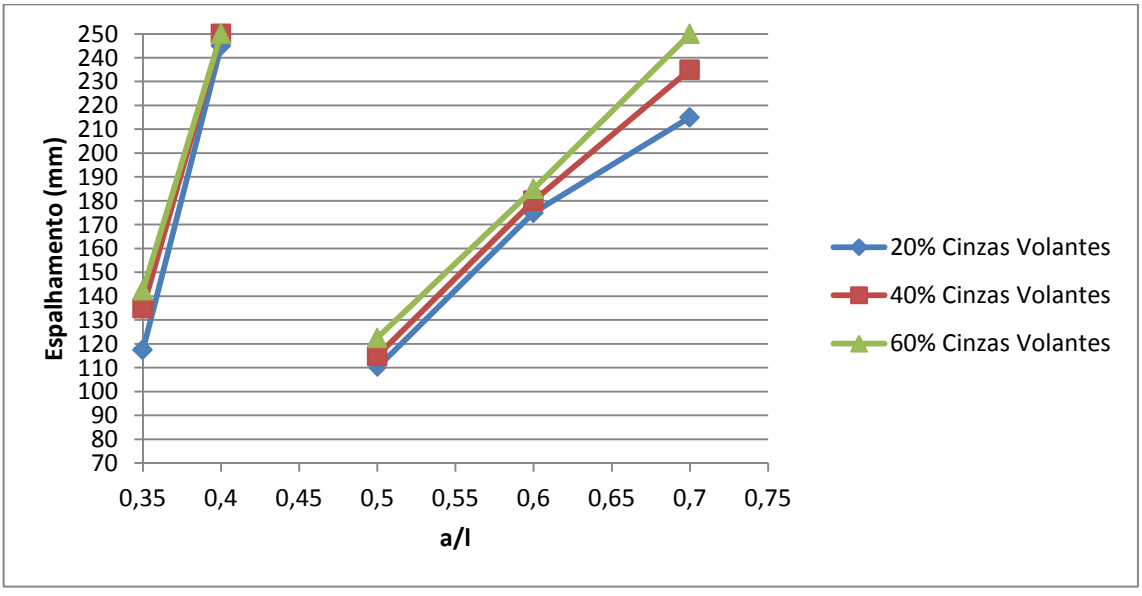


Figura 30: Espalhamento das argamassas contendo cinzas volantes.

Quadro 21: Resultados do espalhamento na composição com adição de MTK.

10% Metacaulino	
Razão água/ligante (a/l)	**Espalhamento (mm)**
0,35	130
0,4	217,5
0,5	110
0,6	170
0,7	217,5
20% Metacaulino	
0,35	143,5
0,4	217,5
0,5	106,5
0,6	162,5
0,7	222,5
30% Metacaulino	
0,35	120
0,4	142,5
0,5	90
0,6	125
0,7	172,5

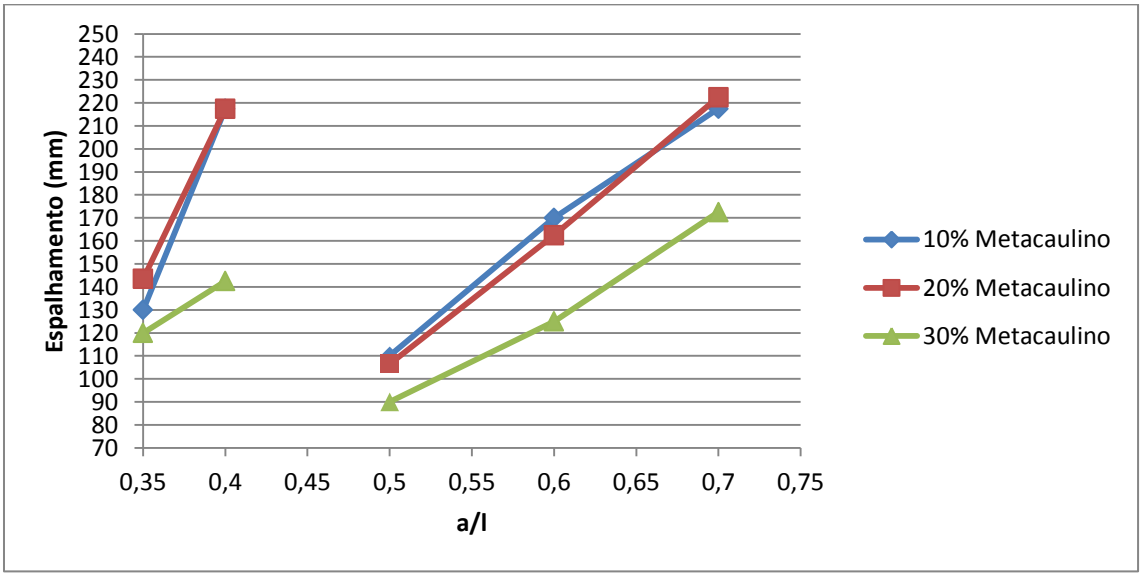


Figura 31: Espalhamento das argamassas contendo metacaulino.

Quadro 22: Resultados do espalhamento na composição com adição de CV e MTK.

10% Cinzas Volantes + 10% Metacaulino	
Razão água/ligante (a/l)	**Espalhamento (mm)**
0,35	130
0,4	245
0,5	107,5
0,6	132,5
0,7	215
30% Cinzas Volantes + 10% Metacaulino	
0,35	137,5
0,4	212,5
0,5	117,5
0,6	205
0,7	240
50% Cinzas Volantes + 10% Metacaulino	
0,35	155
0,4	250
0,5	140
0,6	227,5
0,7	245

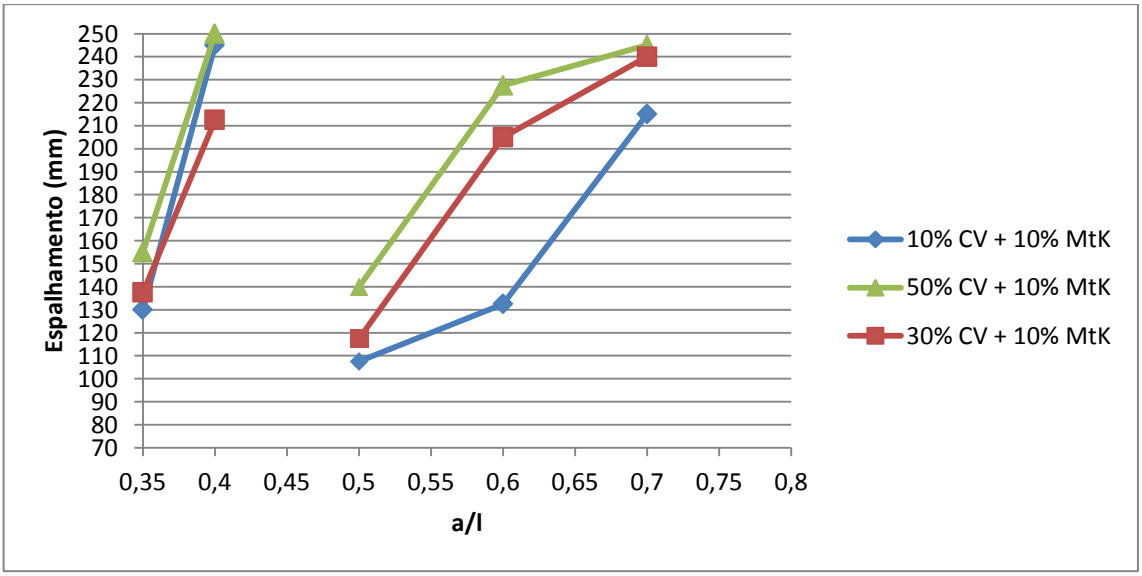


Figura 32: Espalhamento das argamassas contendo cinzas volantes e metacaulino.

4.1.1 Análise dos resultados

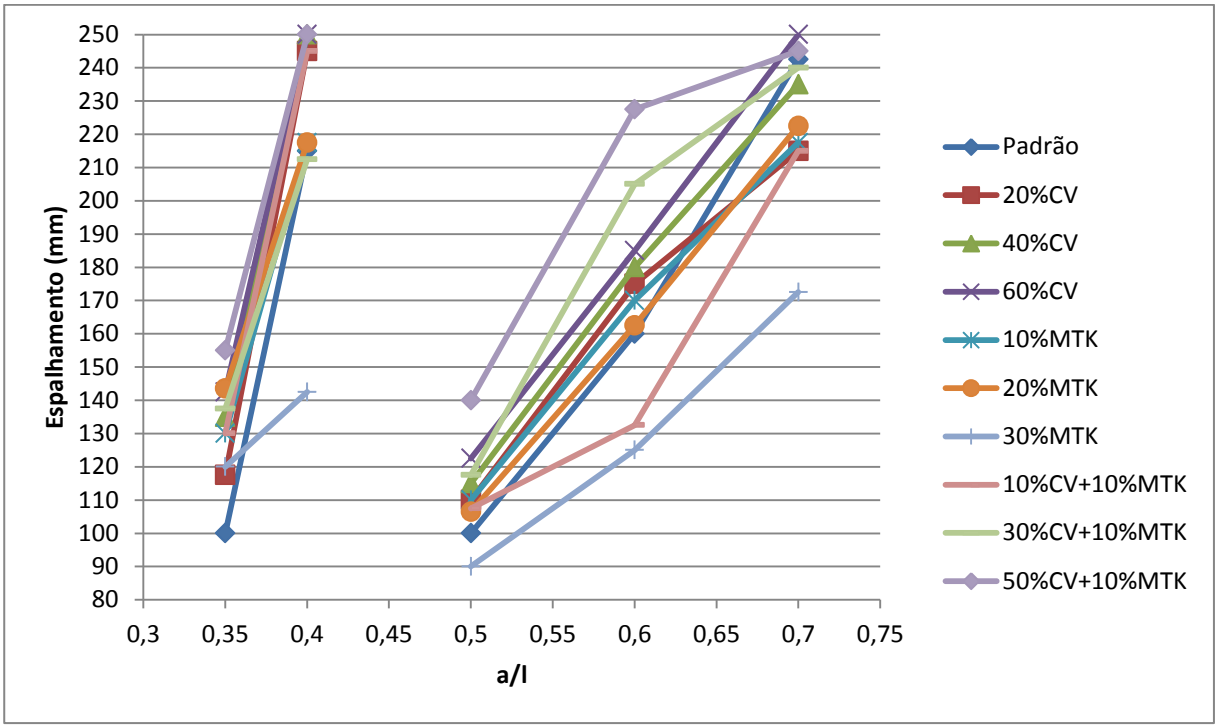


Figura 33: Espalhamento de todas as argamassas segundo razão água/ligante.

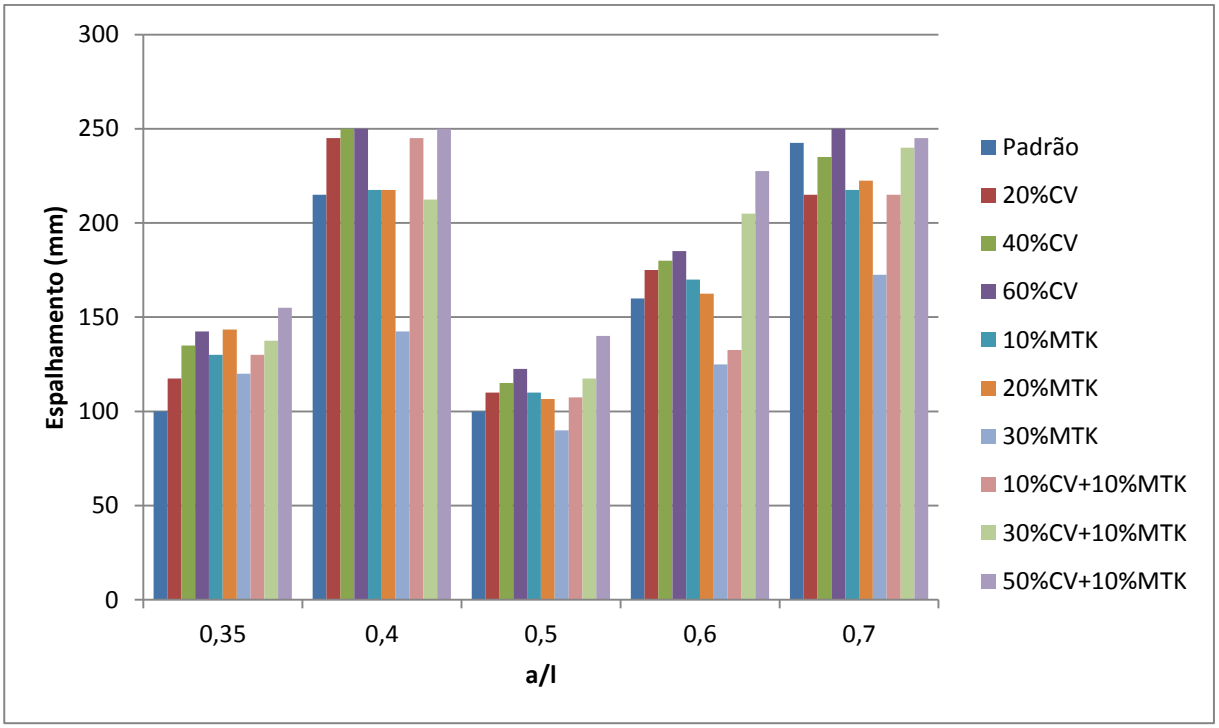


Figura 34: Espalhamento das argamassas em cada razão água/ligante.

Como podemos observar na Figura 33 e na Figura 34, efetivamente, existe um pico no espalhamento na razão a/l 0,4 para todas as composições, descendo o espalhamento para a razão a/l 0,5 e subindo a partir deste. Esta questão revelou-se pertinente uma vez que na ausência de superplastificante a maior parte das amassaduras na razão 0,4 não apresentavam trabalhabilidade nem consistência adequada. Como referido, de forma a uniformizar o nível de comparação, optou-se por aplicar a todas as composições o superplastificante nas razões a/l 0,35 e 0,4. Verificou-se que a presença de adições alterou o comportamento do espalhamento face à composição padrão. A inclusão de cinzas volantes provocou um aumento no valor de espalhamento de acordo com a percentagem de substituição. Verificou-se um aumento de 6,15% no espalhamento da composição 20%CV para a composição 40%CV, e de 6% entre 40%CV e 60%CV, saindo a argamassa de maior substituição do prato de ensaio, para a razão a/l de 0,7. Relativamente à composição padrão, para a razão intermédia de a/c 0,5, verifica-se um acréscimo de 9,09% no valor de espalhamento na composição 20%CV, 13,04% na composição 40%CV e 18,37% na composição 60%CV concluindo-se que a inclusão de cinzas aumenta o espalhamento.

Relativamente às composições com adição de metacaulino verificou-se que estas têm um comportamento variável relativamente à composição padrão. As composições 10%MTK, 20%MTK apresentaram valores de espalhamento superiores à composição padrão nas razões a/l 0,35 a 0,5, exceto na composição 30%MTK em que a razão 0,5 apresenta um valor inferior de espalhamento relativamente à padrão, 90 mm e 100 mm, respetivamente. Nas razões a/l 0,6 e 0,7, o comportamento é diferente. As composições 10%MTK e 20%MTK apresentam um espalhamento superior de 5,88% e 1,54% na razão a/l relativamente à argamassa padrão. No entanto, a argamassa 30%MTK apresenta um espalhamento 21,87% inferior relativamente à argamassa para a razão 0,6. Na razão 0,7 os valores de espalhamento são inferiores quando comparados com a argamassa padrão em 10,31% (25 mm) na argamassa 10%MTK, 8,25% (20mm) na argamassa 20%MTK e 28,87% (70 mm) na argamassa 30%MTK.

Nas argamassas contendo incorporação simultânea das adições, os resultados apresentam igualmente variações, estando abaixo do espalhamento da argamassa padrão nas razões 0,6 e 0,7 na argamassa de 10%CV+10%MTK e acima destas nas restantes razões desta composição, 130 mm, 245 mm e 107,5 mm comparado com 100 mm, 215 mm e 100 mm nas razões a/c de 0,35, 0,4 e 0,5 da argamassa padrão. Esta argamassa apresenta ainda um comportamento variável relativamente à argamassa de 20%CV estando acima na razão a/l de

0,35, igualando em 0,4 e apresentando um espalhamento inferior na razão de 0,5 a 0,7, que se pode justificar pela presença de metacaulino. Em comparação com a argamassa 20%MTK obteve-se igualmente resultados variáveis. Na razão 0,35 encontra-se abaixo (130 mm face a 143,5) da argamassa 20%MTK, sendo superior em 0,4 e 0,5, voltando a estar abaixo na razão a/l 0,7 (215 mm face a 222,5 mm). A argamassa 30%CV+10%MTK apresenta um espalhamento superior nas razões a/l de 0,35, 0,5 e 0,6 relativamente à padrão com um aumento de 26,90%, 14,89% e 1,03%, respetivamente. Esta argamassa, comparada com a argamassa de 40%CV apresenta uma tendência de um maior espalhamento, exceto na razão 0,4 em que a argamassa 40%CV tem um espalhamento superior em 15%. Nas restantes razões a/l, a argamassa 30%CV+10%MTK apresenta um espalhamento superior, nomeadamente de 117,5, 205 e 240 mm face a 115, 180 e 235 mm obtidos nas razões a/l 0,5, 0,6 e 0,7, na argamassa a 40%CV, respetivamente. A argamassa 50%CV+10%MTK apresenta, para todas as razões, valores de espalhamento superiores à argamassa padrão na ordem de 35,48%, 14%, 28,57%, 29,67% e 1,02% nas razões a/l de 0,35, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, respetivamente. Verifica-se que, nesta composição, a presença de cinzas em 50% de substituição do cimento acresce o valor do espalhamento relativamente à composição padrão ainda contendo a adição de metacaulino. Relativamente à composição com 60% de cinzas volantes, que representa a mesma substituição total de cimento, apresenta resultados variáveis. Nas razões a/l 0,35, 0,5 e 0,6 o espalhamento foi inferior na argamassa 60%CV, com valores de 142,5, 122,5 e 185 mm comparados com 155, 140 e 227,5 mm na argamassa 50%CV+10%MTK. Na razão 0,4, contendo superplastificante, o resultado foi igual, com a argamassa a ultrapassar o limite de 250 mm do prato. Na razão a/l 0,7, a argamassa contendo cinzas volantes em 60% da substituição do cimento apresentou um espalhamento superior de 2% (5 mm) relativamente à argamassa 50%CV+10%MTK.

4.2 Resistência à compressão

O processo de ensaio à compressão dos provetes apresentam-se detalhadamente descrito no subcapítulo 3.4. Uma vez realizados os ensaios, apresenta-se os resultados de resistência à compressão médios obtidos para todas as composições no Quadro 23 ao Quadro 32 para as idades de ensaio de, 7, 28, 90 e 180 dias, respetivamente. Os resultados apresentados resultam da média do ensaio à compressão de três provetes por dada composição e respetiva razão a/c. Os resultados detalhados são apresentados em anexo. Os resultados obtidos no ensaio na prensa são expressos em kilo Newton (kN), sendo necessário a sua conversão. A conversão é realizada mediante a aplicação da seguinte formulação:

$$fc\ (MPa) = \frac{fc(kN) \times 1000}{Área_{provete}(mm^2)} \tag{26}$$

Apresentam-se, ainda neste subcapítulo, os gráficos correspondentes à evolução da resistência à compressão segundo a razão água/cimento para cada idade (Figura 35 à Figura 38) e a evolução da resistência à compressão segundo a idade, para as respetivas composições (Figura 39 à Figura 48).

4.2.1 Resistência à compressão segundo a razão água/cimento para cada idade

São apresentados graficamente os resultados da resistência à compressão relativamente ao aumento da razão água/cimento na Figura 35 à Figura 38 para as respetivas idades, 7, 28, 90 e 180 dias.

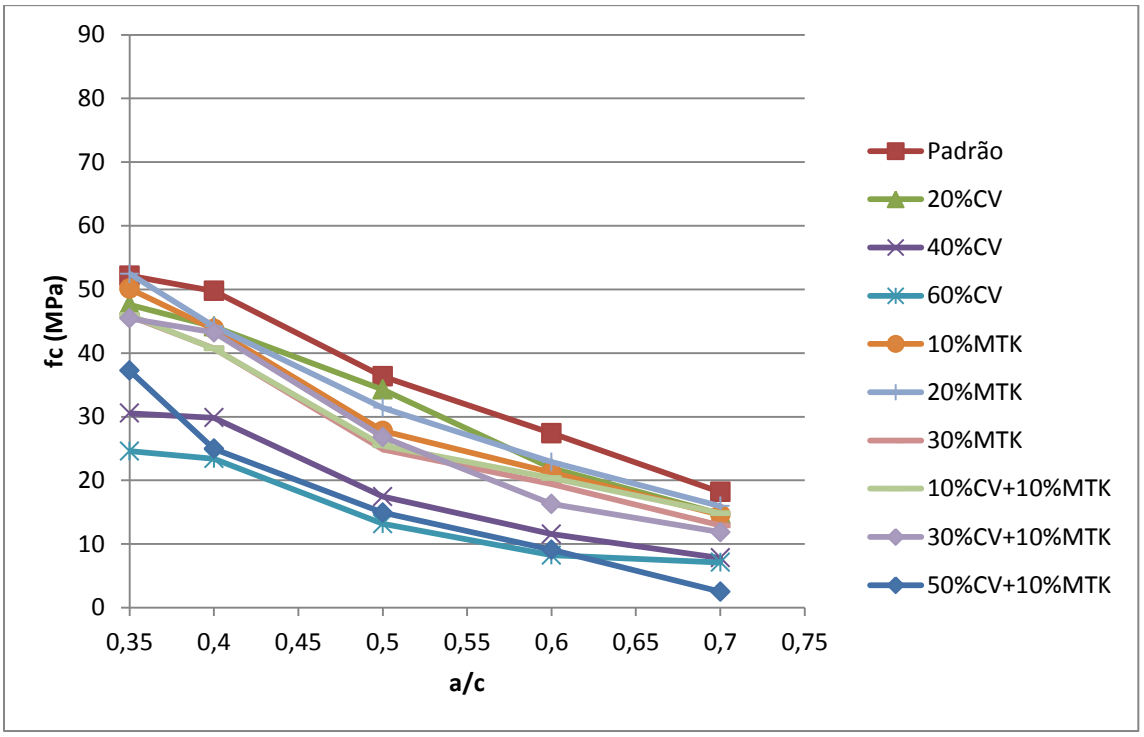


Figura 35: Evolução da resistência à compressão relativamente à razão a/c, aos 7 dias de idade.

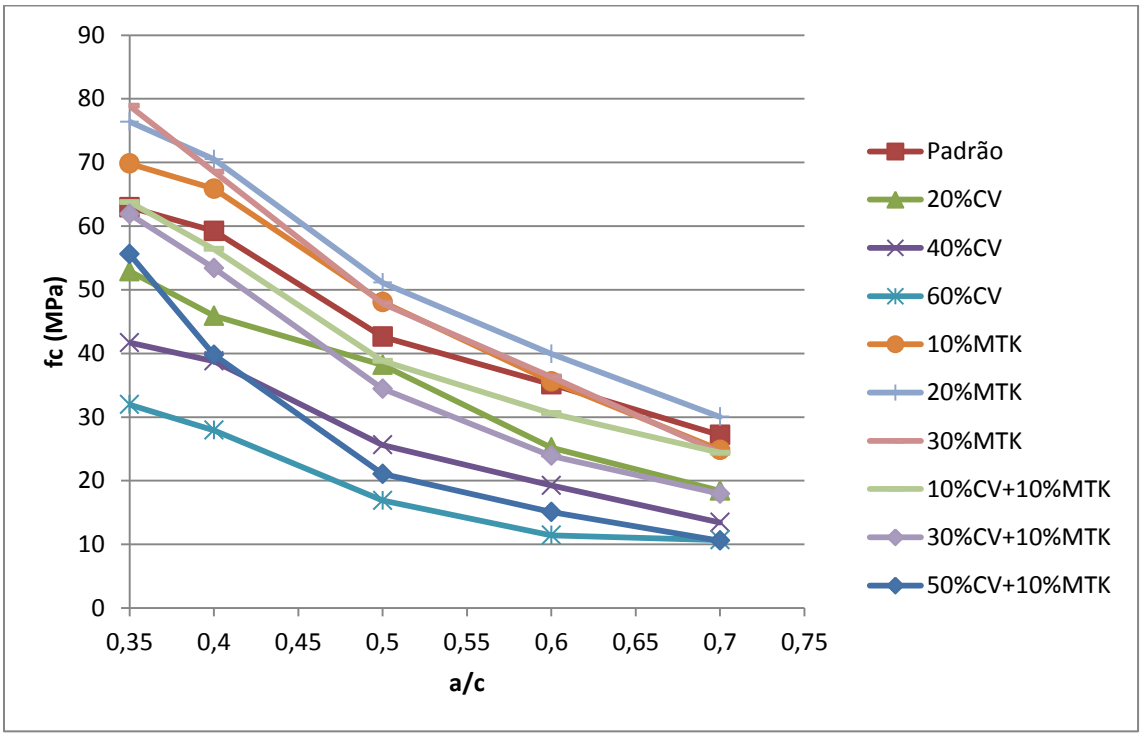


Figura 36: Evolução da resistência à compressão relativamente à razão a/c, aos 28 dias de idade.

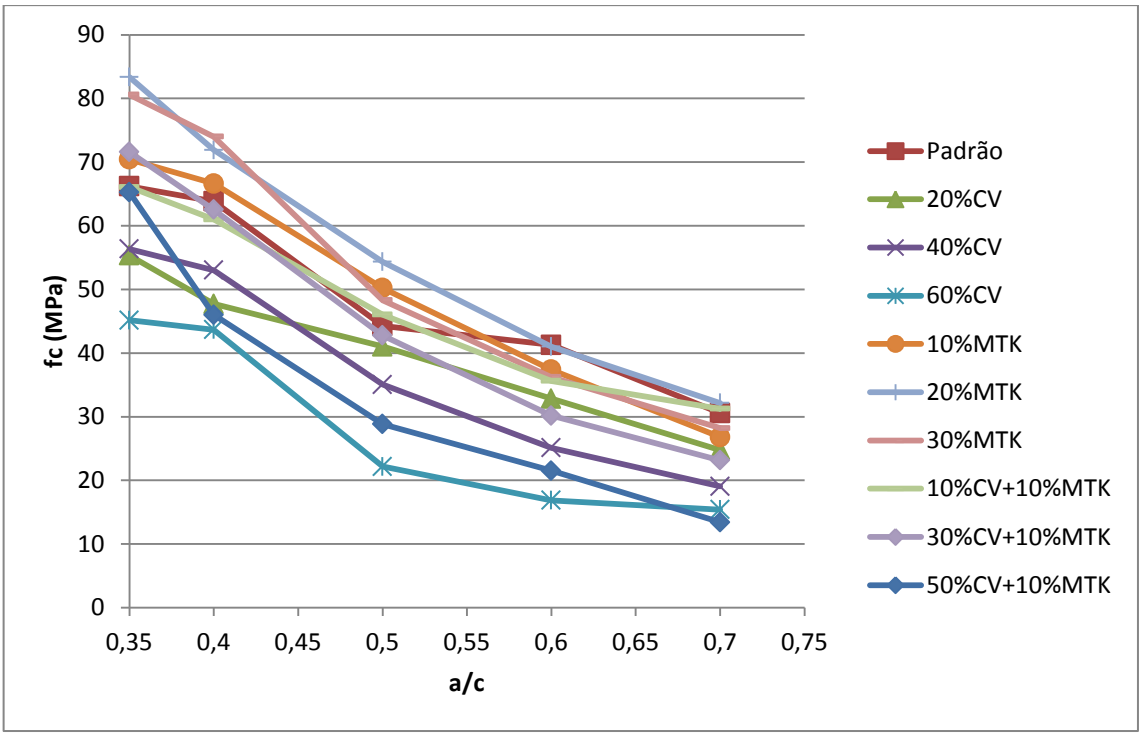


Figura 37: Evolução da resistência à compressão relativamente à razão a/c, aos 90 dias de idade.

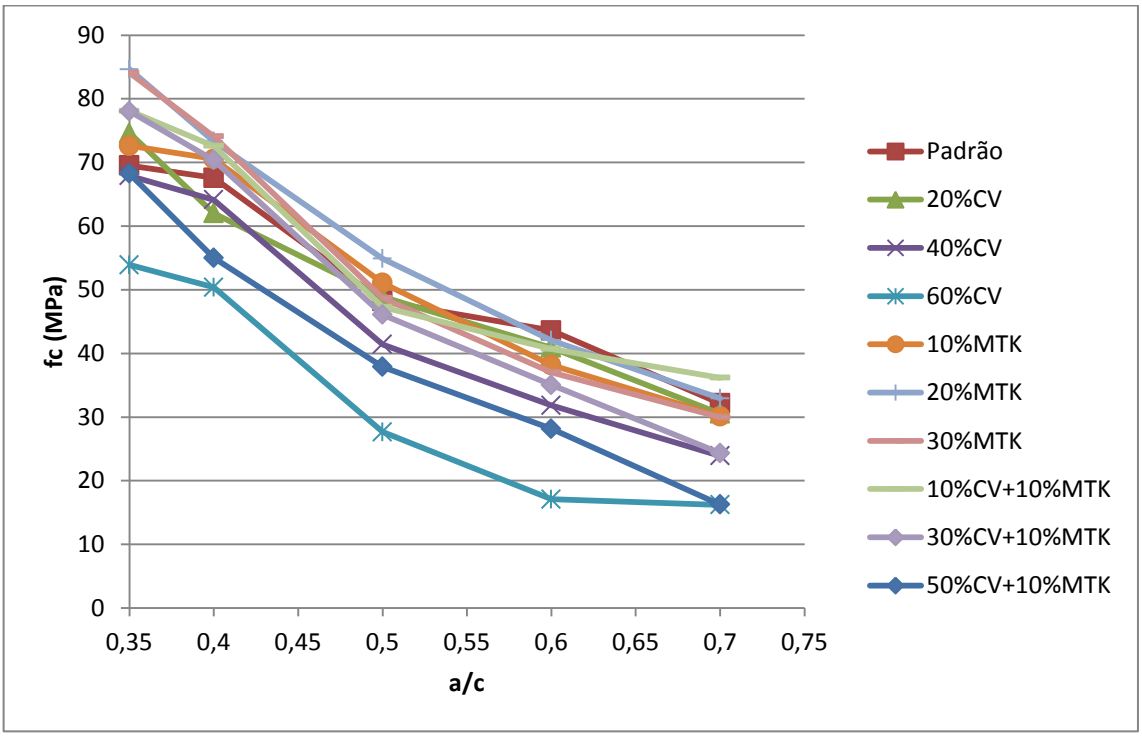


Figura 38: Evolução da resistência à compressão relativamente à razão a/c, aos 180 dias de idade.

4.2.2 Resistência à compressão segundo a idade

Quadro 23: Resistência à compressão da composição padrão.

Idade	7	28	90	180
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	52,143	62,947	66,200	69,507
C.Variação (%)	2,42	1,72	0,42	4,8
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	49,763	59,227	63,827	67,587
C.Variação (%)	1,06	0,27	0,37	0,89
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	36,320	42,600	44,267	48,187
C.Variação (%)	1,17	4,27	1,34	0,63
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	27,409	35,147	41,280	43,600
C.Variação (%)	0,78	2,83	3,37	0,24
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	18,167	27,173	30,560	32,160
C.Variação (%)	6,31	2,25	3,17	1,19

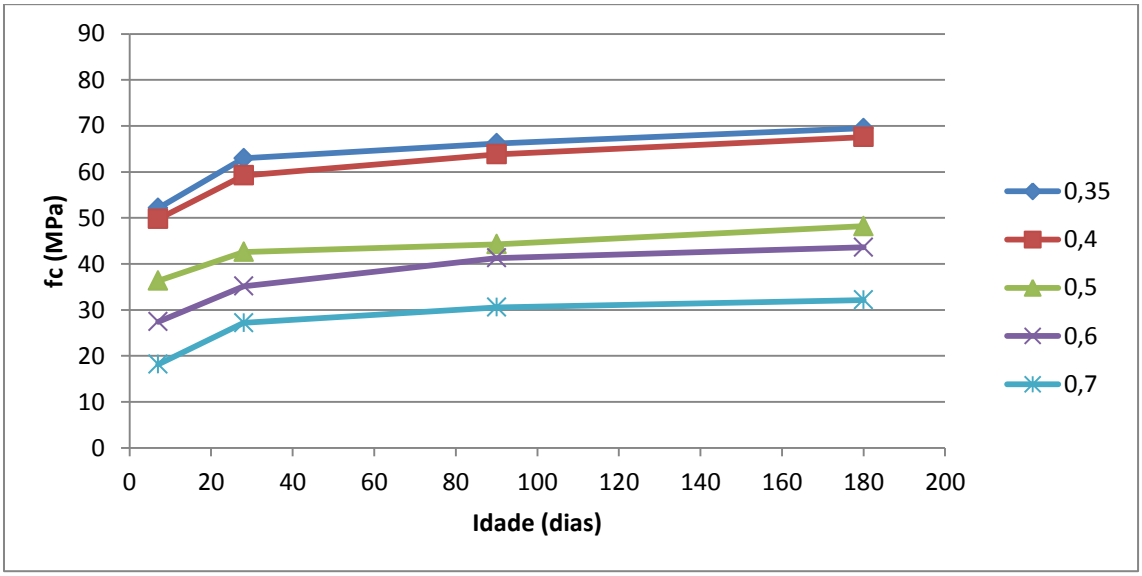


Figura 39: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição padrão.

Quadro 24: Resistência à compressão da composição 20% CV.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	47,600	52,893	55,333	74,627
C.Variação (%)	1,46	3,55	0,55	0,66
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	44,173	45,907	47,720	62,013
C.Variação (%)	0,46	0,59	0,51	0,61
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	34,253	38,187	41,027	48,893
C.Variação (%)	2,82	0,53	1,63	0,82
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	21,907	25,213	32,827	40,907
C.Variação (%)	3,04	5,71	3,00	2,62
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	14,747	18,409	24,747	30,547
C.Variação (%)	8,65	5,70	5,86	2,50

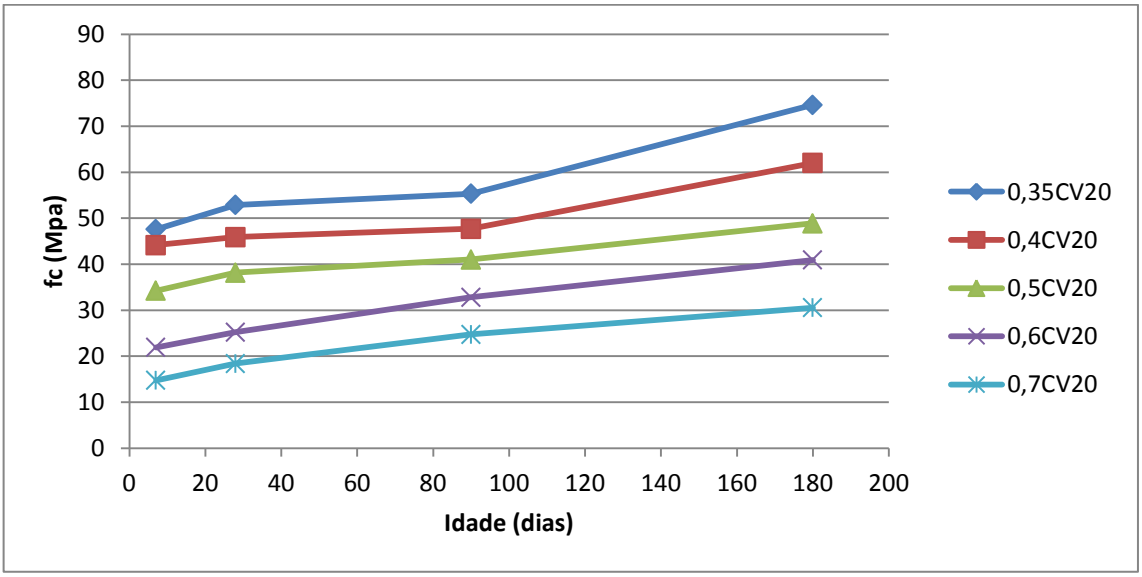


Figura 40: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 20% de cinzas volantes.

Quadro 25: Resistência à compressão da composição 40% CV.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	30,547	41,693	56,333	67,920
C.Variação (%)	3,70	0,59	1,12	0,56
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	29,840	38,800	53,013	64,133
C.Variação (%)	0,88	2,32	1,52	0,72
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	17,441	25,619	35,053	41,400
C.Variação (%)	3,17	0,69	3,47	2,94
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	11,549	19,252	25,107	31,813
C.Variação (%)	5,01	4,54	1,69	4,48
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	7,820	13,449	19,060	23,907
C.Variação (%)	0,23	0,48	2,02	2,21

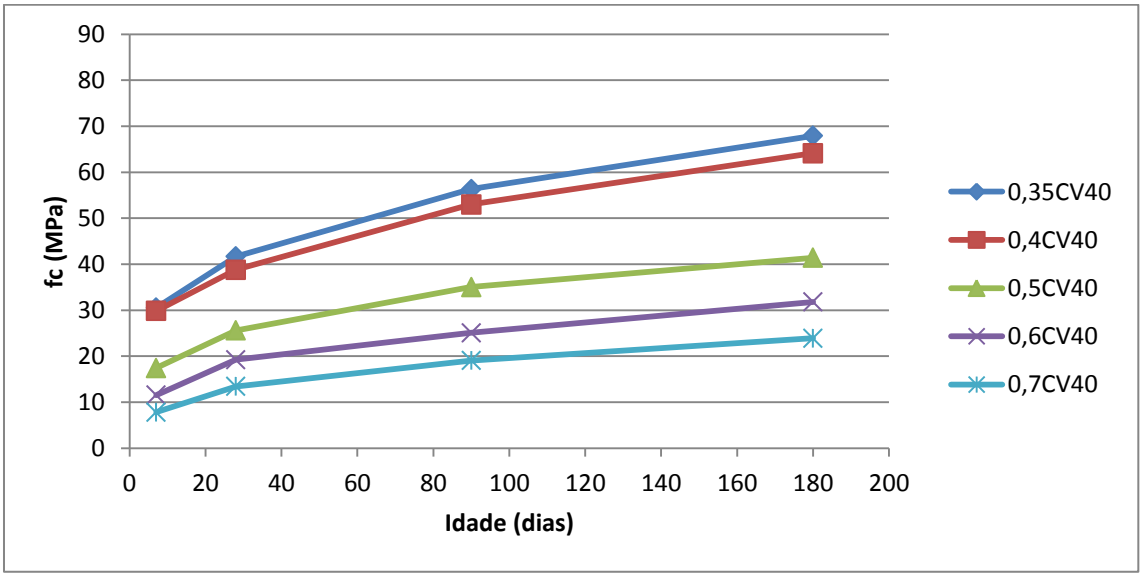


Figura 41: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 40% de cinzas volantes.

Quadro 26: Resistência à compressão da composição de 60% CV.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	24,595	31,947	45,147	53,893
C.Variação (%)	2,20	1,29	3,14	0,43
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	23,395	27,920	43,667	50,387
C.Variação (%)	3,19	1,90	0,83	2,59
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	13,169	16,893	22,160	27,640
C.Variação (%)	5,88	1,62	0,18	3,06
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	8,244	11,435	16,868	17,084
C.Variação (%)	3,80	1,33	3,00	1,07
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	7,112	10,672	15,415	16,213
C.Variação (%)	5,46	1,59	1,37	4,94

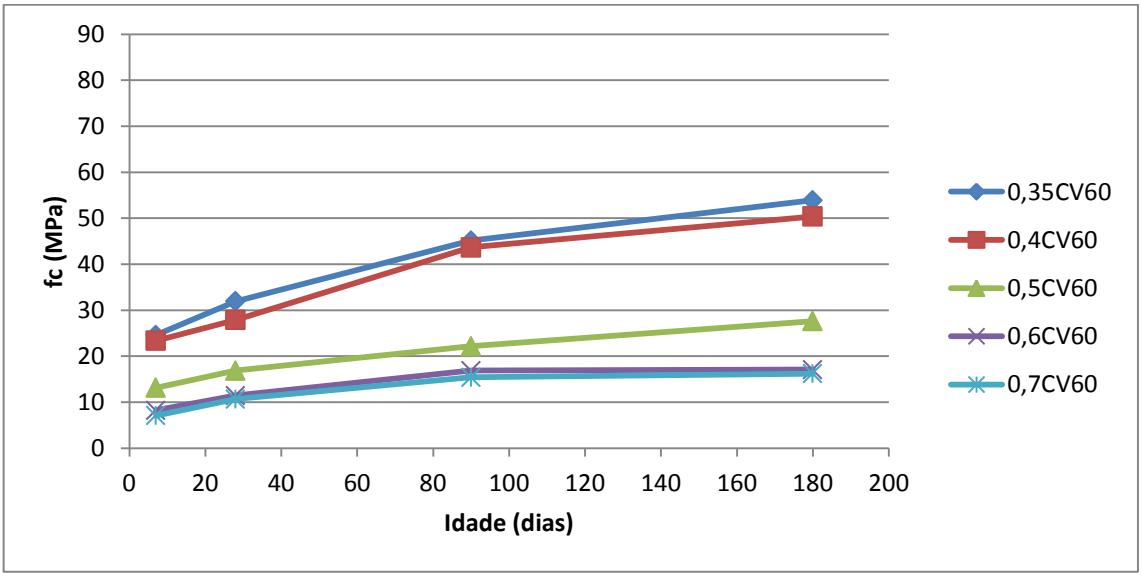


Figura 42: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 60% de cinzas volantes.

Quadro 27: Resistência à compressão da composição de 10% MTK.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	50,107	69,827	70,413	72,613
C.Variação (%)	2,57	0,76	1,07	0,75
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	43,760	65,880	66,631	70,560
C.Variação (%)	0,73	0,79	0,48	0,91
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	27,755	48,067	50,213	51,053
C.Variação (%)	5,74	1,22	0,85	1,84
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	21,207	35,587	37,373	38,160
C.Variação (%)	2,70	1,04	1,87	1,58
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	14,587	24,840	26,800	30,107
C.Variação (%)	7,18	5,30	1,13	2,21

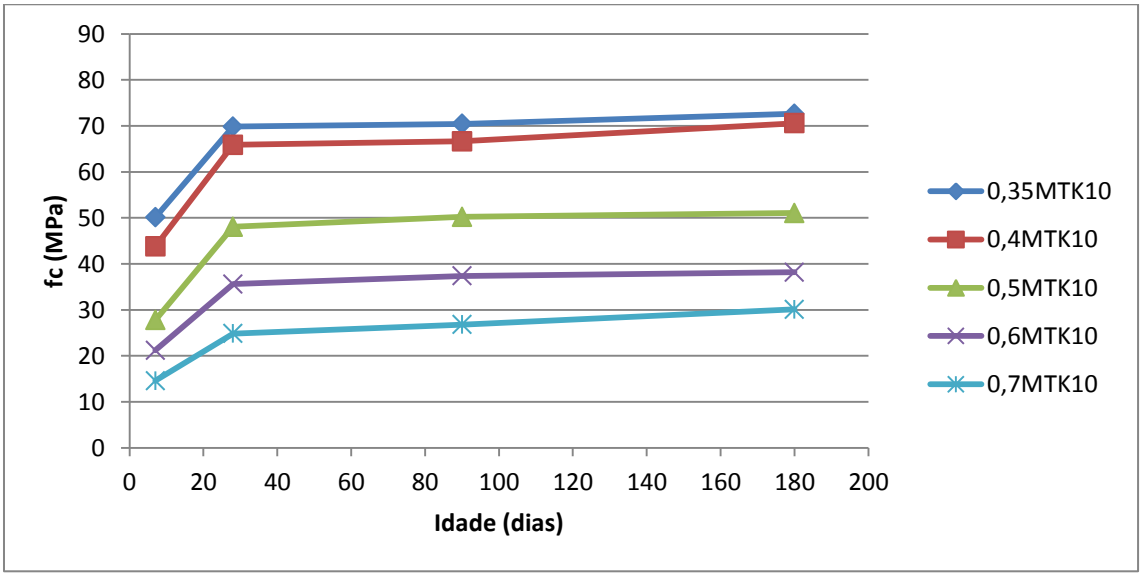


Figura 43: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 10% de metacaulino.

Quadro 28: Resistência à compressão da composição de 20% MTK.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	52,440	79,387	83,360	84,640
C.Variação (%)	1,30	1,33	0,79	0,84
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	44,200	70,493	71,901	73,347
C.Variação (%)	1,55	0,99	1,87	1,15
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	31,404	51,120	54,320	54,880
C.Variação (%)	1,82	2,03	0,92	0,88
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	22,861	39,920	41,000	42,067
C.Variação (%)	1,76	2,01	0,52	1,74
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	15,960	30,040	32,160	39,920
C.Variação (%)	3,12	4,63	1,62	1,40

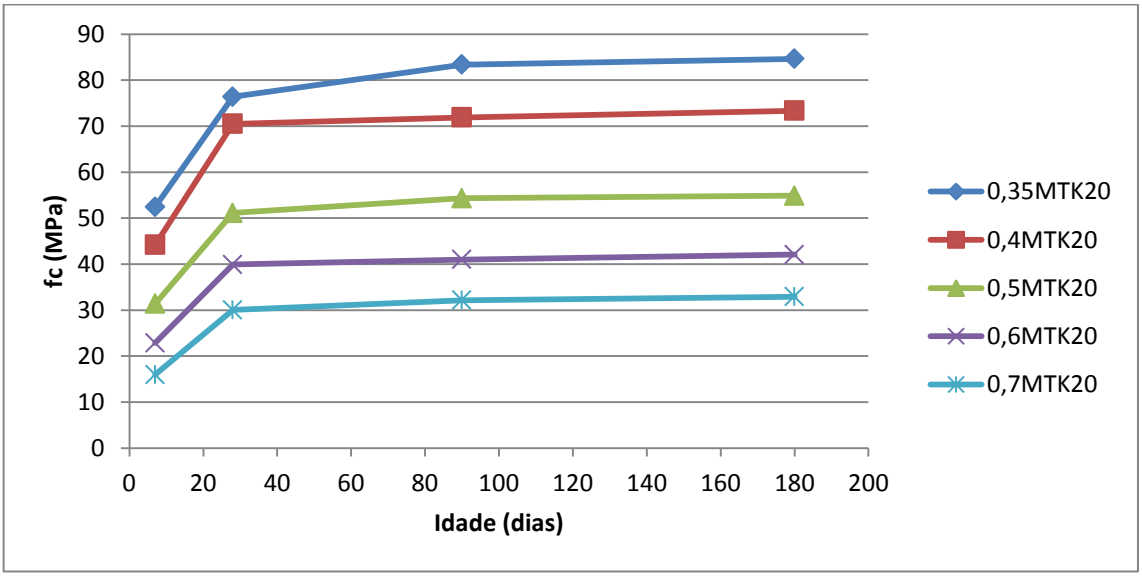


Figura 44: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 20% de metacaulino.

Quadro 29: Resistência à compressão da composição de 30% MTK.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	45,840	78,867	80,573	84,067
C.Variação (%)	0,94	0,39	1,27	0,97
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	40,733	68,547	73,987	74,107
C.Variação (%)	1,63	0,66	0,83	0,41
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	24,832	47,853	48,293	48,707
C.Variação (%)	2,27	1,17	1,21	3,35
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	19,423	36,320	36,213	37,040
C.Variação (%)	1,28	1,65	1,71	4,63
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	12,927	24,387	28,213	29,973
C.Variação (%)	0,27	1,49	0,85	1,40

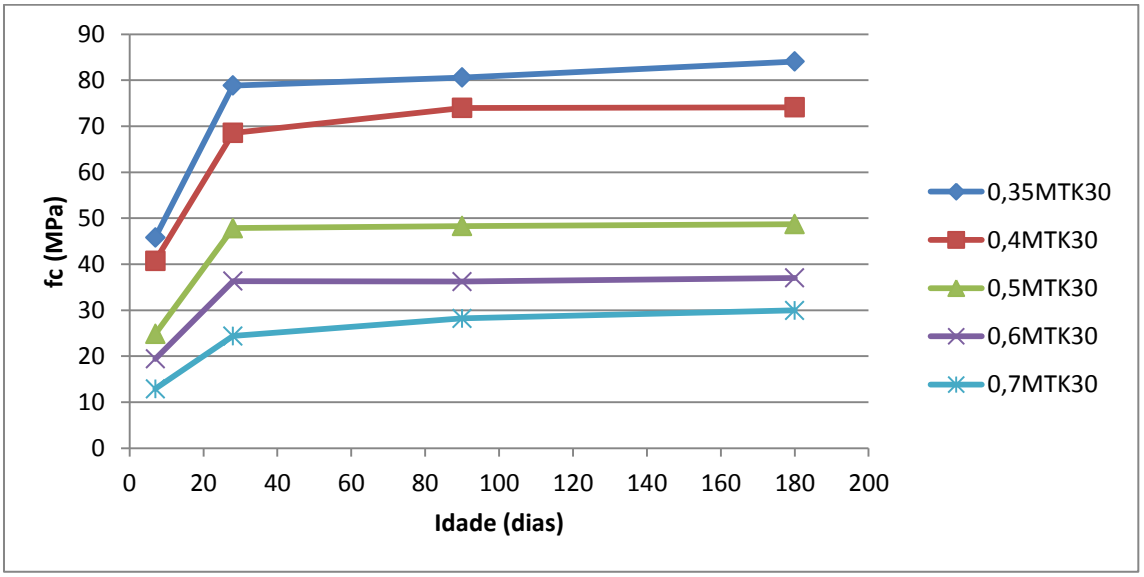


Figura 45: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 30% de metacaulino.

Quadro 30: Resistência à compressão da composição 10% CV + 10% MTK.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	45,960	63,760	66,080	78,107
C.Variação(%)	2,50	1,03	1,06	3,05
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	40,707	56,400	60,987	72,587
C.Variação(%)	2,01	0,94	2,22	1,82
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	25,467	38,813	46,040	47,280
C.Variação(%)	4,18	1,70	1,09	1,78
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	20,365	30,587	35,627	40,707
C.Variação(%)	0,75	3,07	1,15	1,97
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	13,863	24,387	31,236	36,173
C.Variação(%)	3,13	2,82	1,41	0,97

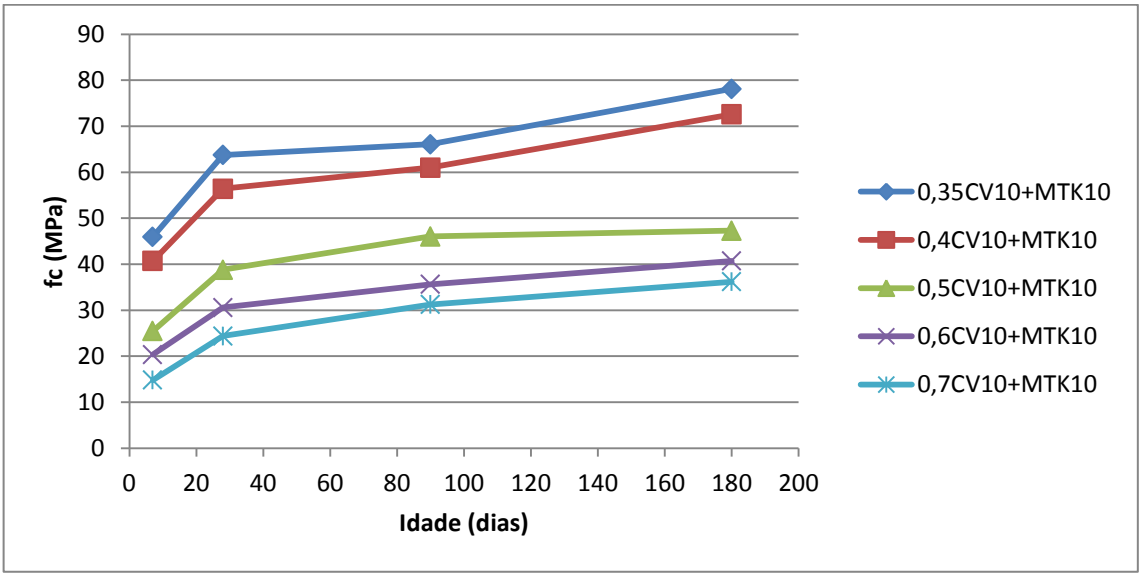


Figura 46: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 10% de cinzas volantes + 10% de metacaulino.

Quadro 31: Resistência à compressão da composição 30% CV + 10% MTK.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	45,427	61,867	71,573	78,040
C.Variação(%)	2,12	0,77	1,01	0,81
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	43,253	53,400	62,533	70,373
C.Variação(%)	1,35	0,07	0,98	2,26
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	26,800	34,440	42,760	46,080
C.Variação(%)	2,60	2,70	2,27	3,24
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	16,288	23,893	30,173	35,053
C.Variação(%)	5,19	0,63	3,14	3,20
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	11,859	17,936	23,160	24,333
C.Variação(%)	0,78	2,87	3,20	1,99

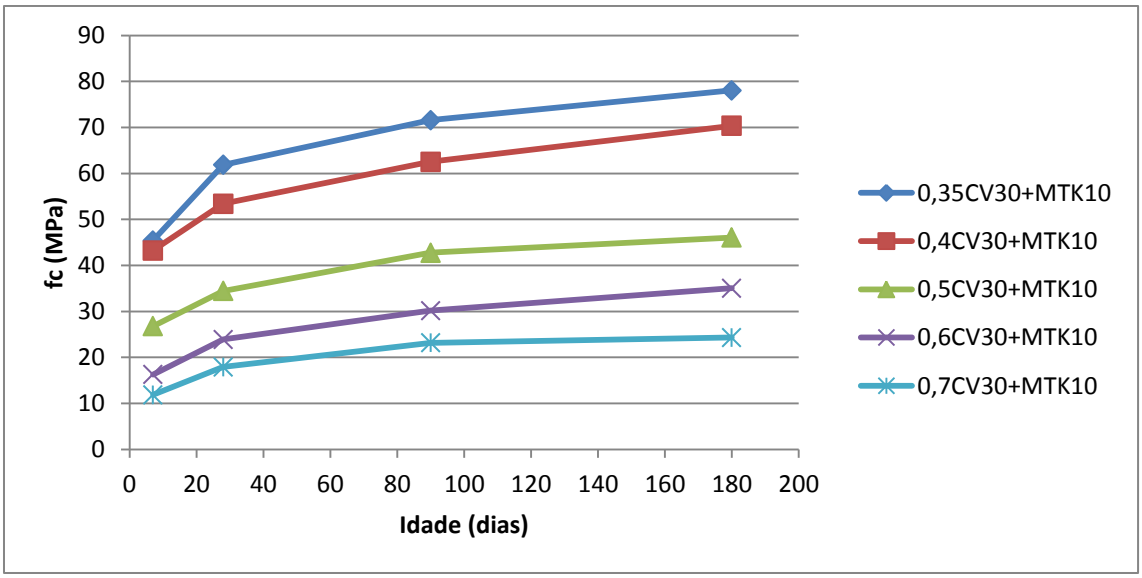


Figura 47: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 30% de cinzas volantes + 10% de metacaulino.

Quadro 32: Resistência à compressão da composição 50% CV + 10% MTK.

Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Composição	**0,35**			
fc (MPa)	37,240	55,587	65,240	68,253
C.Variação(%)	0,84	0,72	1,01	1,45
Composição	**0,4**			
fc (MPa)	24,960	39,773	46,000	55,000
C.Variação(%)	3,38	0,84	3,63	2,69
Composição	**0,5**			
fc (MPa)	14,915	21,068	28,827	37,880
C.Variação(%)	2,15	3,46	3,59	0,66
Composição	**0,6**			
fc (MPa)	9,091	15,065	21,520	28,147
C.Variação(%)	5,17	3,77	2,99	3,23
Composição	**0,7**			
fc (MPa)	2,500	10,581	13,411	16,253
C.Variação(%)	5,47	1,21	5,05	2,92

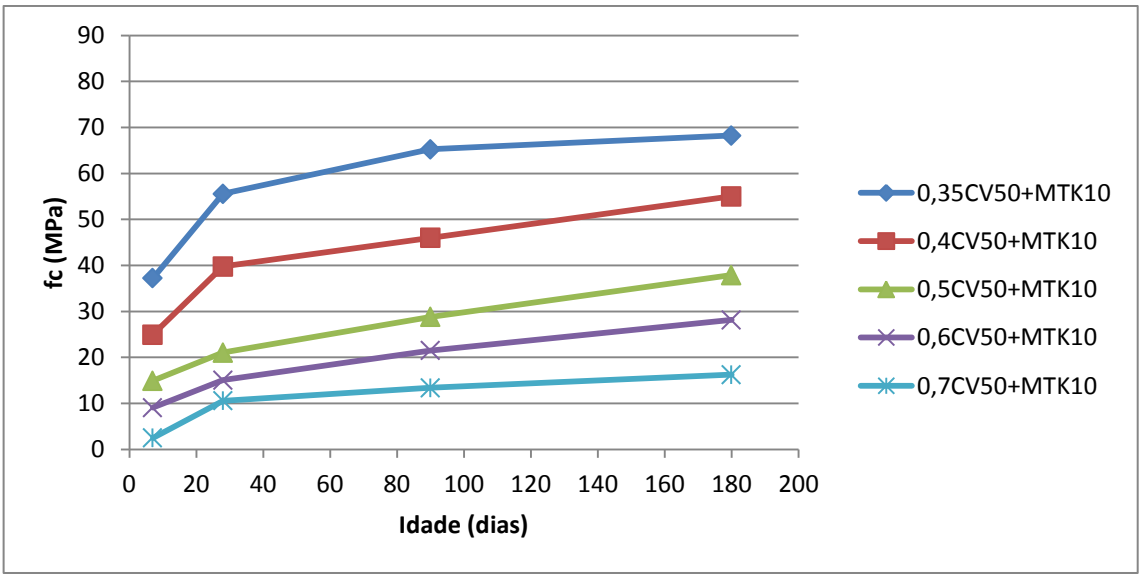


Figura 48: Evolução da resistência à compressão com a idade para a composição com 50% de cinzas volantes + 10% de metacaulino.

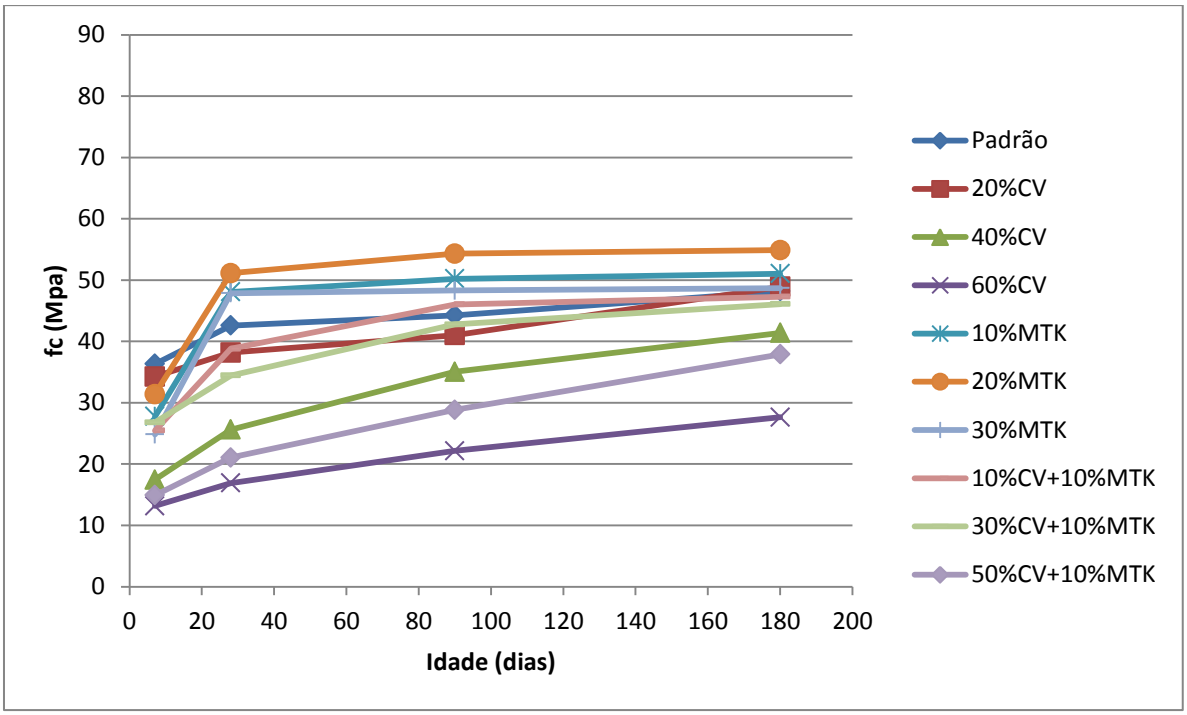
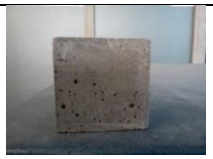
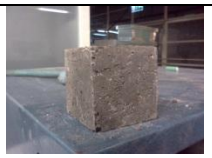
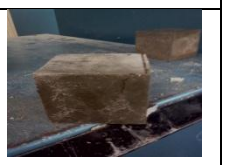


Figura 49: Evolução da resistência à compressão com a idade na razão a/l 0,5, em todas as composições.

4.2.2 Análise dos resultados

Os resultados obtidos no ensaio de compressão para as diversas composições cumpriram com o previsto. Verifica-se, no cômputo geral, que o desvio padrão entre os valores de resistência para cálculo das resistências médias foi bom. A análise da resistência à compressão para cada idade segundo a razão a/c vai de encontro ao esperado e descrito teoricamente: com o aumento de água na composição a resistência à compressão vai diminuindo. Apresenta-se na Figura 49 um gráfico da razão intermédia de estudo da água/ligante de 0,5, a evolução da resistência ao longo do tempo. Apresentam-se no Quadro 33, os provetes após ensaio na razão a/c de 0,5. Todas as composições apresentaram maior valor de resistência à compressão à medida que a idade aumentou, verificando-se que para a composição padrão a partir dos 28 dias até aos 180 dias existe um aumento de 5,587 MPa correspondendo a um aumento de resistência em média de 11,6%.

Quadro 33: Ensaios à compressão na razão a/c 0,5 em todas as idades, e argamassas.

a/c=0,5	**Idade (dias)**			
	7	**28**	**90**	**180**
Argamassa				
Padrão				
20%CV				
40%CV				
60%CV				
10%MTK				
20%MTK				
30%MTK				
10%CV+10%MTK				
30%CV+10%MTK				
50%CV+10%MTK				

A composição padrão apresentou os resultados esperados com valores situados entre 42,50 e 62,50 MPa aos 28 dias. As razões 0,35 e 0,4, contendo superplastificante, apresentaram valores próximos e são as razões água/cimento com melhores resultados, cumprindo o esperado. De referir que a diferença de resistência é notória para razões a/c acima de 0,5 comparadas com as 0,35 e 0,4 para todas as idades, com uma diferença de cerca de 17,26 MPa em média de 0,4 para 0,5. O melhor e pior resultado obtido para a composição padrão foi de 69,51 MPa na razão a/c 0,35 e 18,17 MPa na razão a/c 0,7 para 180 e 7 dias, respetivamente.

A composição contendo cinzas volantes apresentou baixas resistências aos 7 dias evoluindo sempre abaixo da resistência padrão até aos 180 dias onde a composição com 20% de cinzas volantes ultrapassou mesmo a resistência à compressão da composição padrão. A composição padrão registou o valor de 48,19 MPa onde a composição contendo 20% de cinzas volantes obteve o resultado de 48,89MPa, para a razão a/l de 0,5 aos 180 dias. Para as razões contendo menos água, 0,35 e 0,4, a diferença de resistência da composição com 20% de cinzas volantes é mais expressiva, com valores de 74,63 e 62,01 MPa, e 62,95 e 59,23 MPa na composição padrão aos 180 dias representando uma diferença de 15,65% e 4,5% respetivamente. Era de esperar boas prestações a partir dos 90 dias, o que veio acontecer. Aos 90 dias a composição padrão registou uma resistência à compressão de 44,27 e 41,03 MPa na composição com 20% de cinzas volantes, com uma diferença de 3,24 MPa, 7,32%. Aos 28 dias existiu uma diferença de 10,36% relativamente à resistência à compressão padrão, para a/l de 0,5, e de 5,69%.para a mesma razão a/l aos 7 dias. A composição com 20% de cinzas volantes atingiu os resultados esperados, com um comportamento que suporta a inclusão de cinzas volantes em argamassas com resultados próximos do padrão para todas as idades.

Os resultados obtidos na composição com 40% de cinzas volantes encontram-se abaixo dos valores obtidos para a composição padrão em todas as idades. No entanto, é igualmente verificada uma tendência de aproximação dos valores de resistência entre a composição com 40% de cinzas volantes e a composição padrão a partir dos 90 dias com valores muito próximos. Aos 7 dias o efeito das cinzas não beneficia de todo a resistência, estando esta abaixo em cerca de metade do seu valor (51,98%) comparando com os resultados da composição padrão para a razão a/l de 0,5, por exemplo. Aos 28 dias a diferença reduz-se para 33,76% para a razão a/l de 0,5. Aos 90 dias temos uma diferença de 20,81% na razão a/l de 0,5 relativamente à resistência padrão, o que denota a tendência de aproximação a longo

prazo na resistência à compressão das composições padrão e as contendo cinzas volantes a partir dos 90 dias. As razões 0,35 e 0,4 apresentaram valores próximos de resistência em todas as idades enquanto as restantes razões a/c apresentaram um crescimento da diferença entre elas ao longo da idade, o que pode justificar-se pela ativação das propriedades pozolânicas de forma mais notória com a maior e menor presença de água/cimento. Aos 180 dias a resistência à compressão apresenta uma diferença de 14,08% face à composição padrão. O melhor resultado na composição com 40% cinzas volantes foi de 67,92 MPa comparado com os 69,51 MPa da composição padrão para a razão 0,35, valores com uma diferença de 1,59 MPa, portanto, bastante próximos a longo prazo. O pior resultado surgiu aos 7 dias na razão a/l 0,7 com 7,82 MPa, uma diferença de 56,96% face ao menor valor da composição padrão na mesma razão a/c. Aos 180 dias a resistência teve uma ligeira subida, fazendo-se notar o aumento de resistência nas composições com menos água, nomeadamente, nas razõs a/l de 0,35, 0,4 e 0,5, onde o incremento foi de cerca de 10 MPa, valor que sustenta o desempenho a longo prazo das cinzas volantes. Nas argamassas de razão a/l 0,6 e 0,7, o incremento foi de cerca de metade, 5 MPa.

A composição com 60% de cinzas volantes cumpriu analogamente às restantes composições com cinzas volantes com boas indicações a longo prazo. Aos 7 dias existe uma diferença de 23,15 MPa (63,74%) na razão a/l de 0,5 entre a composição padrão e composição contendo 60% de cinzas volantes. Aos 28 dias a composição com 60% de cinzas volantes apresenta uma resistência de 16,89 MPa, o que representa uma diferença de 60,34% face à prestação da composição padrão para a razão a/l de 0,5 (42,60 MPa). Aos 90 dias esta diferença encurta-se para 49,94%, o que representa uma ligeira tendência de aproximação à composição padrão. Aos 180 dias verifica-se que a tendência ainda com diferença considerável na razão a/l de 0,5, acontece, estando a 42,64% da resistência obtida na composição padrão. Uma vez mais a razão a/l de 0,35 é a que mais se aproxima do valor obtido para a mesma razão na composição padrão, 53,89 e 69,51 MPa, respetivamente. Estes resultados podem reforçar a necessidade de diminuir água nas amassaduras, o que no presente estudo implicou o uso de 2% de superplastificante para viabilizar as amassaduras com razões a/c e a/l de 0,35 e 0,4. As razões a/l de 0,35 e 0,4 apresentaram ligeira diferença de valores de resistência entre elas assim como quando comparadas às resistências obtidas na composição padrão. As razões a/l de 0,6 e 0,7 nesta composição apresentaram valores muito próximos em todas as idades com diferença máxima de 1,45 MPa entre elas.

Relativamente às composições com adição de metacaulino observou-se que estas, em todas percentagens de substituição (10, 20 e 30%), apresentaram resistências à compressão superiores à composição padrão, exceto aos 7 dias de idade com uma diferença de 8,57 MPa na razão a/l de 0,5. A partir dos 28 dias todas as percentagens de substituição evoluíram para valores maiores com a idade. Na razão a/l de 0,5 os valores foram de 48,07, 51,12, 47,85 MPa para as composições com 10, 20 e 30% de metacaulino, respetivamente, o que representa um acréscimo da resistência de 5,47, 8,52 e 5,25 MPa. Podemos concluir que a composição com 20% de metacaulino é, neste caso, a que melhor potencia os resultados de resistência à compressão relativamente à composição padrão. Aos 90 e 180 dias os resultados revelaram-se semelhantes com variações de cerca de 2,00 MPa o que deixa concluir que o metacaulino efetivamente tem efeito em idades inicias, nomeadamente, aos 28 dias não alterando em grandes diferenças as resistências à compressão a longo prazo. A composição que compreendeu de modo geral os melhores resultados foi a composição contendo 20% de metacaulino com um valor máximo de resistência à compressão, de todas as composições inclusive, de 84,64 MPa aos 180 dias para a razão a/l de 0,35, e o menor valor para a razão a/l de 0,7 aos 7 dias de 12,93 MPa na composição com 30% de metacaulino entre as composições com metacaulino.

As composições contendo em simultâneo 10% de cinzas volantes e 10% de metacaulino apresentaram resistências à compressão semelhantes à composição padrão, estando ligeiramente abaixo destas até aos 180 dias. Aos 7 dias, efetivamente, a diferença é de menos de 10 MPa nos resultados obtidos na composição 10%CV+10%MTK comparativamente à composição padrão. Aos 28 dias esta diferença é de cerca de 3,00 MPa. Aos 180 dias ocorrem resultados de análise interessante, uma vez que a composição 10%CV+10%MTK ultrapassa a composição padrão nas razões a/c 0,35, 0,4 e 0,7 com uma diferença de 11,01% (8,60 MPa), 6,401% (5,00 MPa) e 11,09% (4,01 MPa) relativamente à composição padrão. Poder-se-á dizer que a adição de cinzas volantes permitiu ainda este acréscimo de resistência a longo prazo. Uma vez que se trata de uma substituição de 20% de cimento (10%CV+10%MTK) é de interesse verificar que, comparativamente à composição com 20% de cinzas volantes, os resultados são inferiores aos 7 dias, tornando-se superior a partir dos 28 dias. O melhor resultado obtido nesta composição foi de 78,11 MPa aos 180 dias na razão 0,35, o que faz com que seja superior em 11,01% relativamente à composição padrão e 4,6% em relação à composição com 20% de cinzas volantes. Analisando igualmente a composição contendo 20% de metacaulino que compreende igualmente uma substituição de

20% de cimento, verifica-se que a composição 20%MTK é para todas as idades superiores à composição 10%CV+10%MTK em cerca de 10 MPa. A composição 30%CV+10%MTK apresenta um comportamento aos 7 dias semelhante à composição 10%CV+10%MTK com uma diferença de cerca de 4,97%. Aos 7 dias apresenta resistências à compressão mais baixas que a composição padrão, igualando-as, sensivelmente, aos 28 dias de idade com resultados muito próximos o que é um bom resultado tendo em conta tratar-se de uma substituição de 40% de cimento (30%CV+10%MTK). Esta composição vem mesmo a ultrapassar os resultados da composição padrão a partir dos 90 dias para as razões a/l de 0,35 e 0,4 com as restantes razões a/l resultarem em resistências à compressão bastante próximas da composição padrão. É mais uma vez notório o efeito das cinzas volantes a longo prazo. Tendo em conta tratar-se de uma substituição de 40% resta comparar a sua prestação com a da composição que incorpora em igual valor somente cinzas volantes. Relativamente à composição 40%CV, a composição 30%CV+10%MTK apresenta para todas as razões e idades valores superiores. Aos 28 dias, por exemplo, a razão a/l de 0,5 apresenta um valor 25,61% superior. O valor mais elevado obtido na composição 30%CV+10%MTK foi de 78,04 MPa na razão a/l igual a 0,35, aos 180 dias, com o menor valor de 11,86 MPa para a razão a/l de 0,7 aos 7 dias. A composição 50%CV+10% é para todas as idades e razões inferior à composição padrão. No entanto os valores obtidos numa composição com um elevado grau de substituição de cimento (60%) tiveram resultados de interesse. A resistência à compressão é inferior a todas as composições exceto a composição com 60% de cinzas volantes. A composição 60%CV é de natural comparação uma vez que em termos de substituição equivale a mesma quantidade de redução do cimento. Aos 7 dias a composição 50%CV+10%MTK é 11,71% superior à composição com 60% de cinzas volantes em todas as razões a/l exceto a razão 0,7 que apresenta o pior resultado de todo o programa experimental com uma resistência à compressão de 2,50 MPa. Aos 28 dias a superioridade aumenta para 19,82% na razão a/l de 0,5, por exemplo, continuando a superiorizar-se nas idades de 90 e 180 dias o que leva a concluir que uma substituição de 60% de cimento pode ser equacionada com a junção de duas adições distintas adequando-as na sua percentagem. Neste caso, verifica-se que o metacaulino reage nas idades mais novas permitindo resistências melhores comparando com a substituição exclusiva do cimento com 60% de cinzas volantes permitindo que no avançar da idade as propriedades pozolânicas das cinzas permitam um acréscimo de resistência de 7,759 MPa dos 28 dias para os 90 dias e de 9,05 MPa dos 90 para os 180 dias de idade, para a razão a/l de 0,5. A composição 50%CV+10%MTK obteve 68,25 MPa com melhor resultado na razão 0,35 de a/l.

De referir, ainda de modo geral, que existiu uma tendência de aumentar a diferença entre os valores obtidos de resistências nas composições entre a razão a/l de 0,4 e 0,5 com a idade. Conclui-se, através da análise das resistências obtidas para as composições com cinzas volantes, que existe uma tendência de aproximação dos resultados obtidos na composição padrão a partir dos 90 dias, o que efetivamente vai de encontro aos estudos realizados por demais investigadores. As resistências diminuíram com o aumento da percentagem de cinzas volantes mas, ainda assim, apresentam resultados de resistência à compressão bastante satisfatórios mesmo na composição com 60% cinzas volantes a partir dos 90 dias nas razões a/l de 0,35 e 0,4, essencialmente. A introdução de metacaulino revelou-se bastante satisfatória concluindo-se que o metacaulino tem o seu efeito pozolânico definido aos 28 dias, fazendo aumentar a resistência até à composição com 30%MTK relativamente à padrão. Verifica-se que nas argamassas sem cinzas volantes, nomeadamente, padrão, 10%MTK, 20%MTK e 30%MTK que a resistência a partir dos 28 dias não tem ganhos tão significativos quanto as composições contendo cinzas volantes, verificando-se pequenas inclinações no aumento de resistência até aos 180 dias. O valor máximo de resistência à compressão foi obtido para a composição com 20% de metacaulino no valor de 84,640 MPa, para a razão a/c de 0,35 enquanto o menor valor foi de 2,5 MPa aos 7 dias para a razão a/l de 0,7 na composição 50%CV+10%MTK.

4.3.Determinação do fator de eficiência k

O valor de eficiência k obtido para as argamassas foi determinado segundo a formulação apresentada por Ferreira e Gonçalves (1998), descrita anteriormente no subcapítulo 2.1.1. Esta formulação foi igualmente utilizada por M. João Brito (2007), onde o fator k resulta de uma relação entre a resistência à compressão (fc) e a razão água/cimento (a/c), comparando a composição com adição incorporada a uma argamassa de referência, sem quaisquer adição. A incorporação de adições na mistura resulta unicamente na alteração da razão a/c. Desta forma, para cada valor de tensão, podemos obter o valor correspondente da razão a/c da mistura com adição e sem adição, respetivamente, como apresentado na Figura 50.

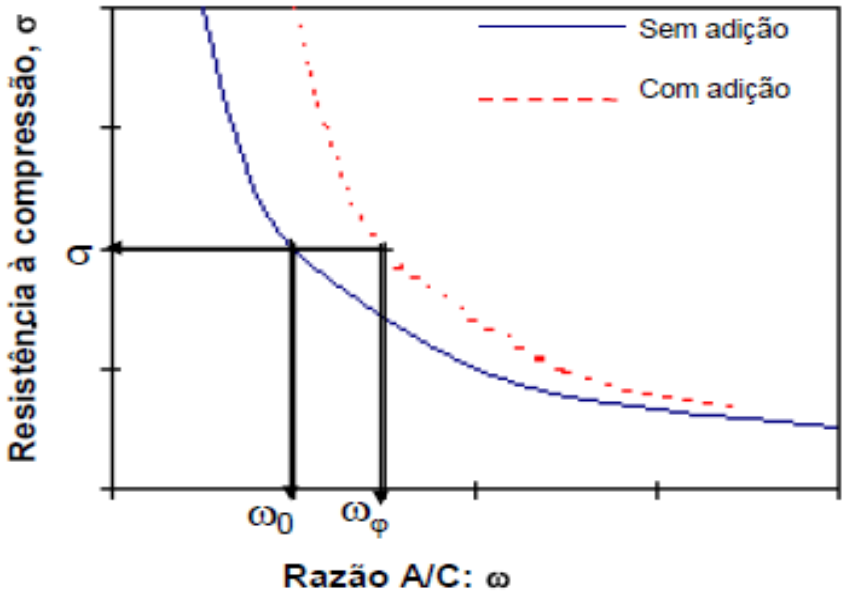


Figura 50: Relação entre a resistência à compressão e a razão a/c das misturas de betão, sem adição e com adição incorporada, respetivamente, para determinação do fator k.

4.3 Cálculo do fator k

4.3.1 Curvas de aproximação do comportamento da resistência à compressão das argamassas para cálculo do fator k

Foram realizados dois tipos de aproximações aos resultados obtidos no ensaio de compressão para definição das curvas de resistência à compressão, nomeadamente, aproximação linear e aproximação hiperbólica, que representam a variação da resistência à compressão das argamassas com as razões água/cimento e/ou água/ligante. Sabe-se que a resistência à compressão não varia de forma linear, no entanto, devido à natureza variável da composição das argamassas, assim como apresentada em vários estudos, optou-se pela realização de aproximações lineares para todas as composições que em alguns casos apresentaram coeficientes de correlação muito próximos da unidade. A aproximação hiperbólica é a que melhor representa o comportamento da resistência à compressão segundo a variação da razão a/c, obtendo-se de modo geral valores de correlação próximos da unidade em todas as argamassas. As curvas de aproximação foram obtidas através do *software* gráfico *Graph*. A utilização deste *software* foi de elevada importância na definição das tensões a utilizar no estudo do fator k. Em vez de olharmos para a maior faixa de resultados que efetivamente melhor define as curvas, foram considerados os comportamentos da curva propriamente ditos uma vez que estas resultaram de uma gama razoável de valores de resistência à compressão, permitindo através destes e os seus coeficientes de correlação considerar as curvas representativas do comportamento das resistências à compressão das argamassas. Neste ponto do programa experimental previa-se a adoção de uma estratégia de análise que melhor considerasse os resultados obtidos, nas respetivas faixas de tensões. Numa abordagem de maior análise, foram considerados cinco níveis de tensões. Foram realizadas as aproximações lineares para todas as argamassas assim como aproximações hiperbólicas (Figura 51 à Figura 58), avaliando-se o comportamento das curvas de aproximação em relação à curva padrão.

Foi adotado o seguinte procedimento na avaliação e definição das tensões a adotar para o cálculo do fator de eficiência:

1. Análise geral das curvas de aproximação linear e hiperbólica das argamassas com adições, verificando-se se estas se encontram acima da curva de aproximação da argamassa padrão, o que é exemplo a Figura 38, anteriormente apresentada;
2. Verificar, para cada idade, os níveis de tensão aonde existe intersecção com a curva padrão;
3. Uma vez verificados os níveis de tensão em que as curvas de aproximação das misturas com adições se intersectam com a curva padrão, definir essas tensões como extremos, considerando cinco níveis de tensões intermédias em incrementos de 5 MPa de modo a que nenhuma curva se sobrepusesse à curva de aproximação padrão, isto porque, implicaria uma razão a/l inferior, o que resultaria num fator de eficiência negativo e portanto anómalo;
4. Foram definidos diferentes níveis de tensões segundo as aproximações, nomeadamente, 5, 10, 15, 20 e 25 MPa para as aproximações lineares, e, 25, 30, 35, 40 e 45 MPa para as aproximações hiperbólicas.

Uma vez definidas as tensões para cálculo do fator k, podemos retirar o valor da razão a/c para o betão sem adição (ω_0) e com adição incorporada (ω_φ), respetivamente. O valor do fator k é obtido através da relação direta entre a razão a/c, com a relação adição/cimento (φ), através da seguinte equação:

$$\frac{(\omega\varphi - \omega 0)}{\omega 0} = k \times \varphi \tag{27}$$

$$k = \frac{\frac{\omega\varphi}{\omega 0} - 1}{\varphi} \tag{28}$$

Onde,

ω_0 – razão água/cimento da mistura sem adição (argamassa de referência).
ω_φ – razão água/cimento da mistura com adição incorporada.
φ – razão adição/cimento
k – fator de eficiência

Em ambas as aproximações foi possível considerar uma tensão comum de referência, nomeadamente, 25 MPa. Os valores do coeficiente de correlação (r^2) estiveram de um modo geral próximos da unidade, o que significa que o número de pontos permitiu a definição das curvas de forma bastante aproximada. As expressões das curvas de aproximação linear e hiperbólica são as seguintes, respetivamente:

$$A.Linear: y = a + bx, \text{em que } x = \frac{a}{l} \tag{29}$$

$$A.Hiperbólica: y = a + \frac{b}{x}, \text{em que } x = \frac{a}{l} \tag{30}$$

Apresentam-se na Figura 51 à Figura 58 os gráficos correspondentes às aproximações lineares e hiperbólicas segundo a razão a/l para as respetivas idades, 7, 28, 90 e 180 dias.

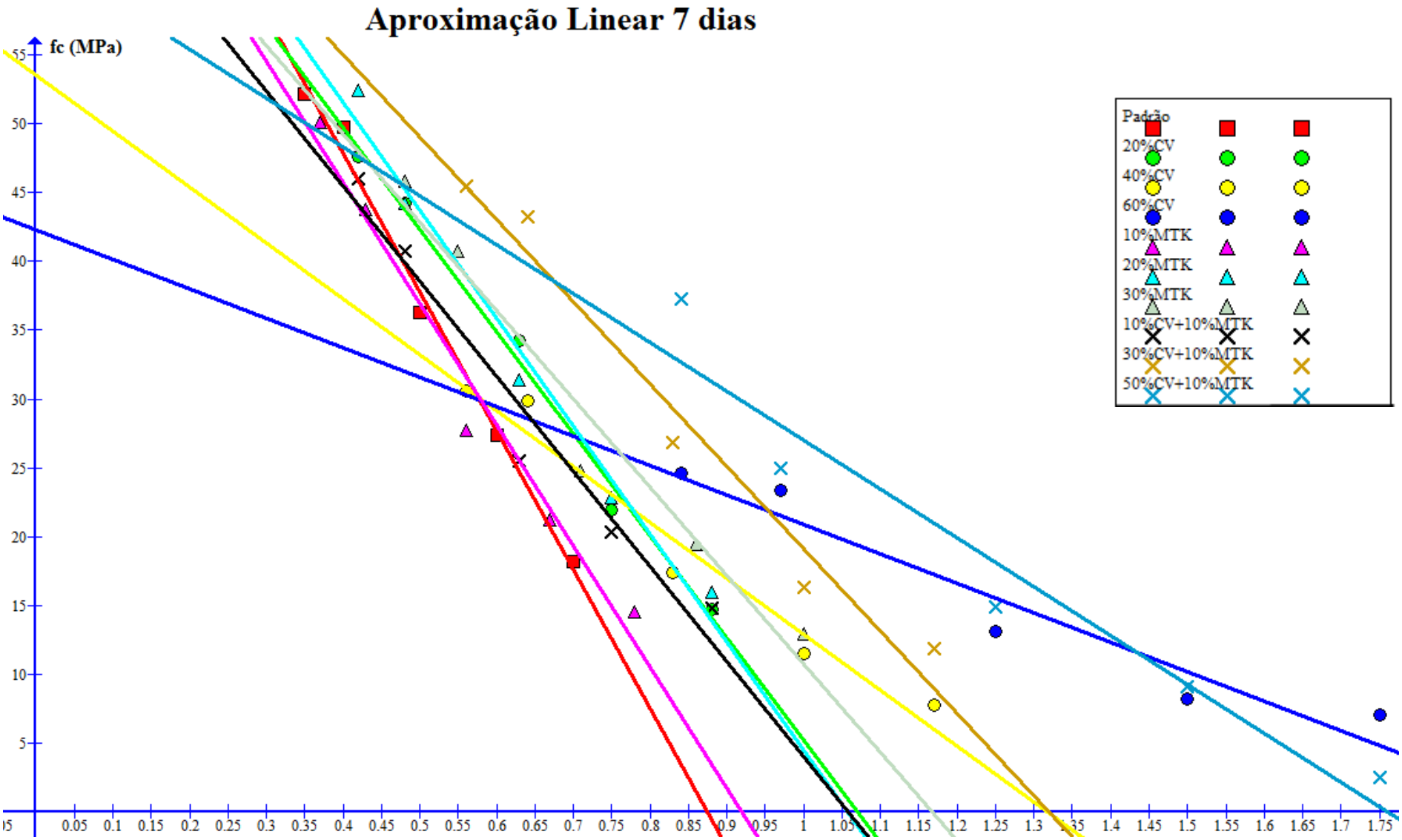


Figura 51: Aproximação linear para a resistência à compressão das argamassas aos 7 dias de idade.

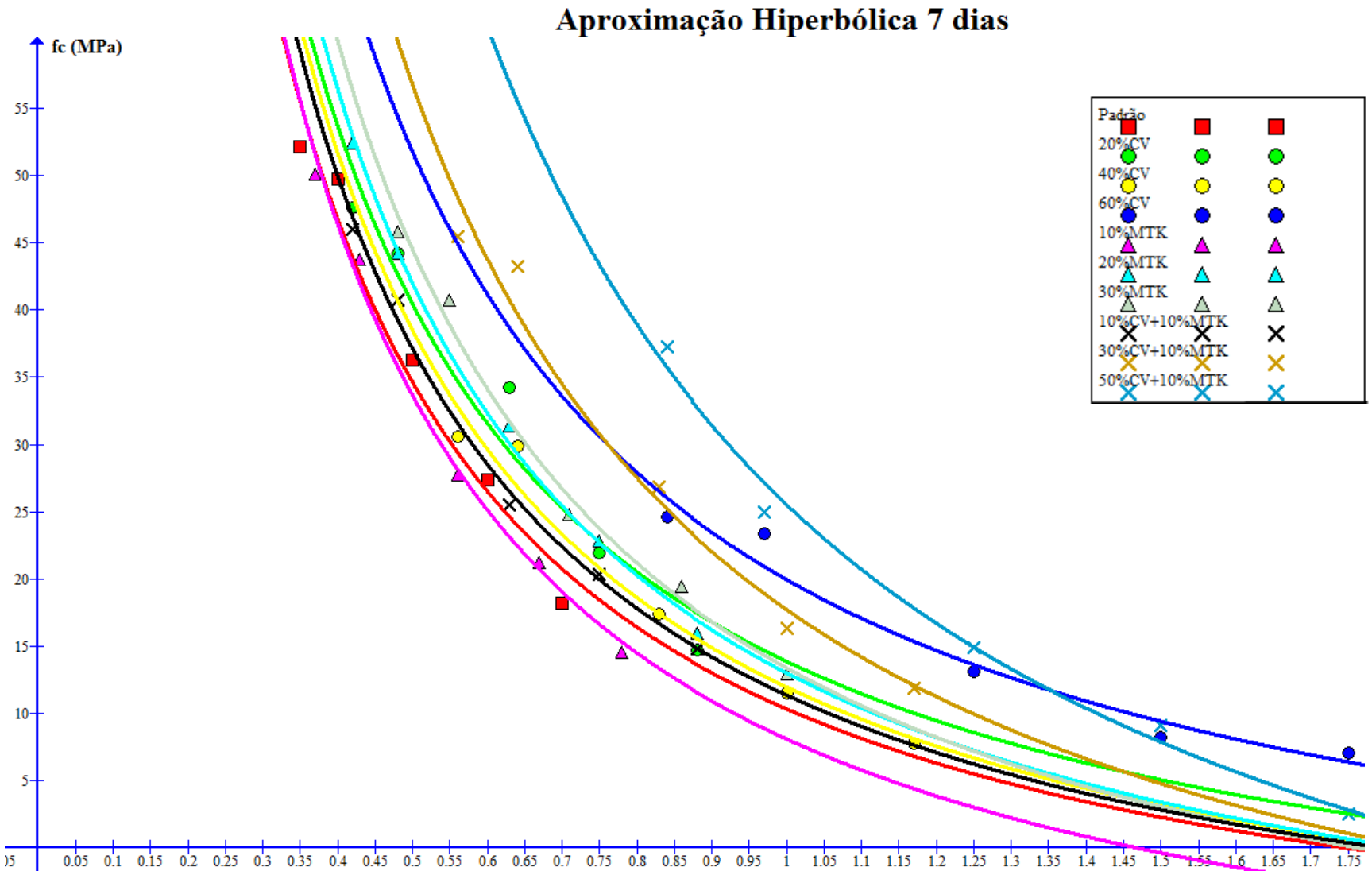


Figura 52: Aproximação hiperbólica para a resistência à compressão das argamassas aos 7 dias de idade.

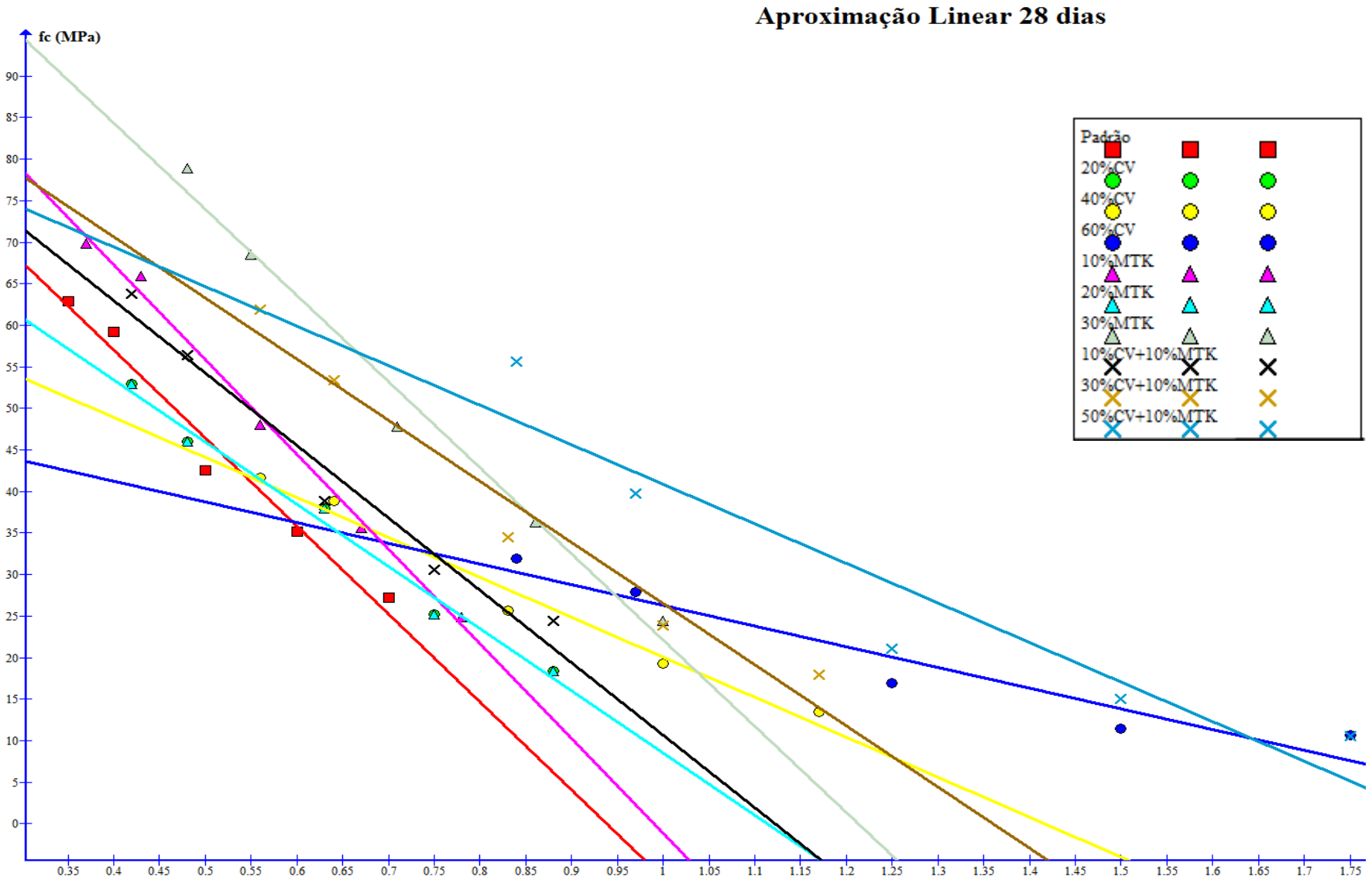


Figura 53: Aproximação linear para a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade.

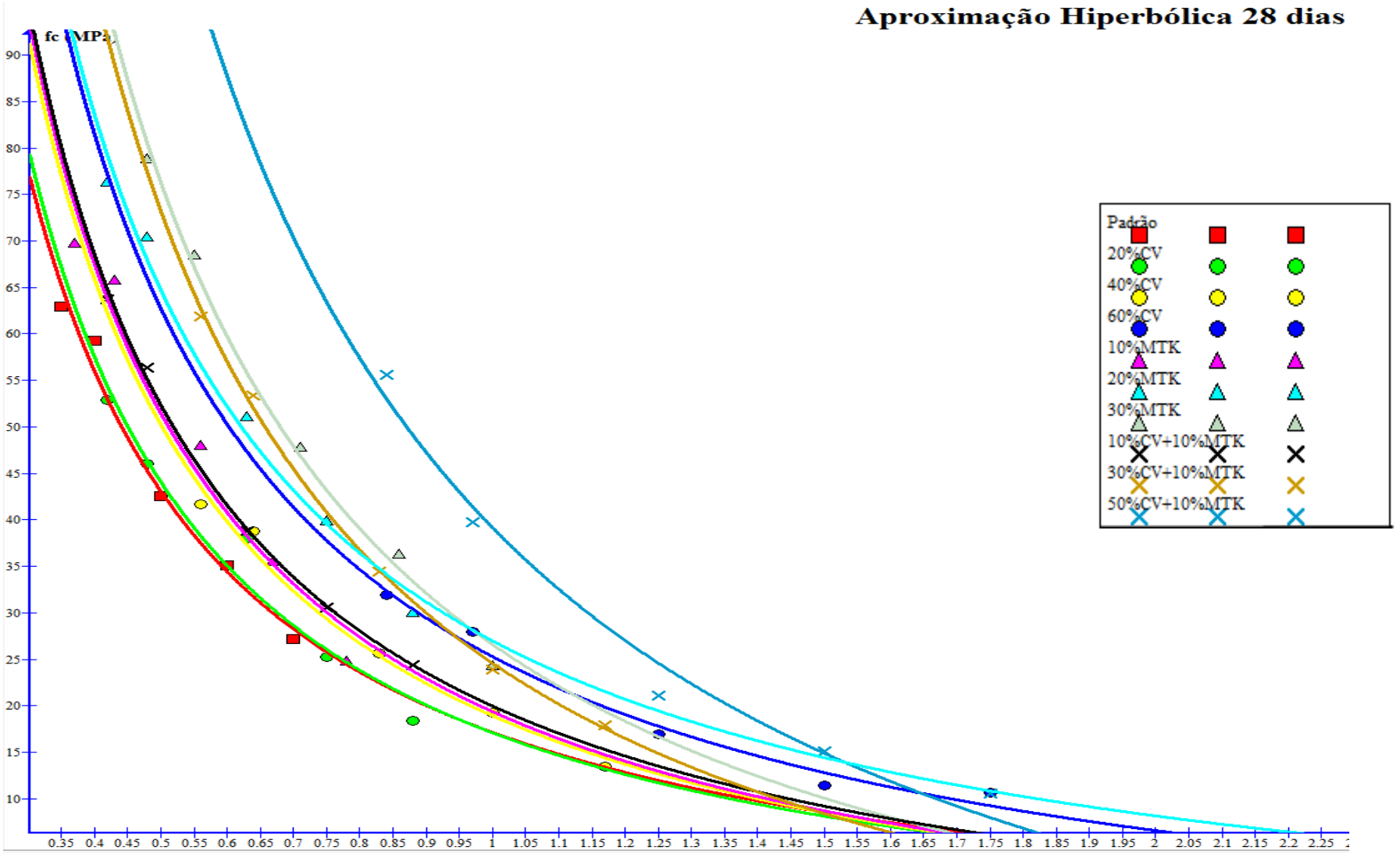


Figura 54: Aproximação hiperbólica para a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade.

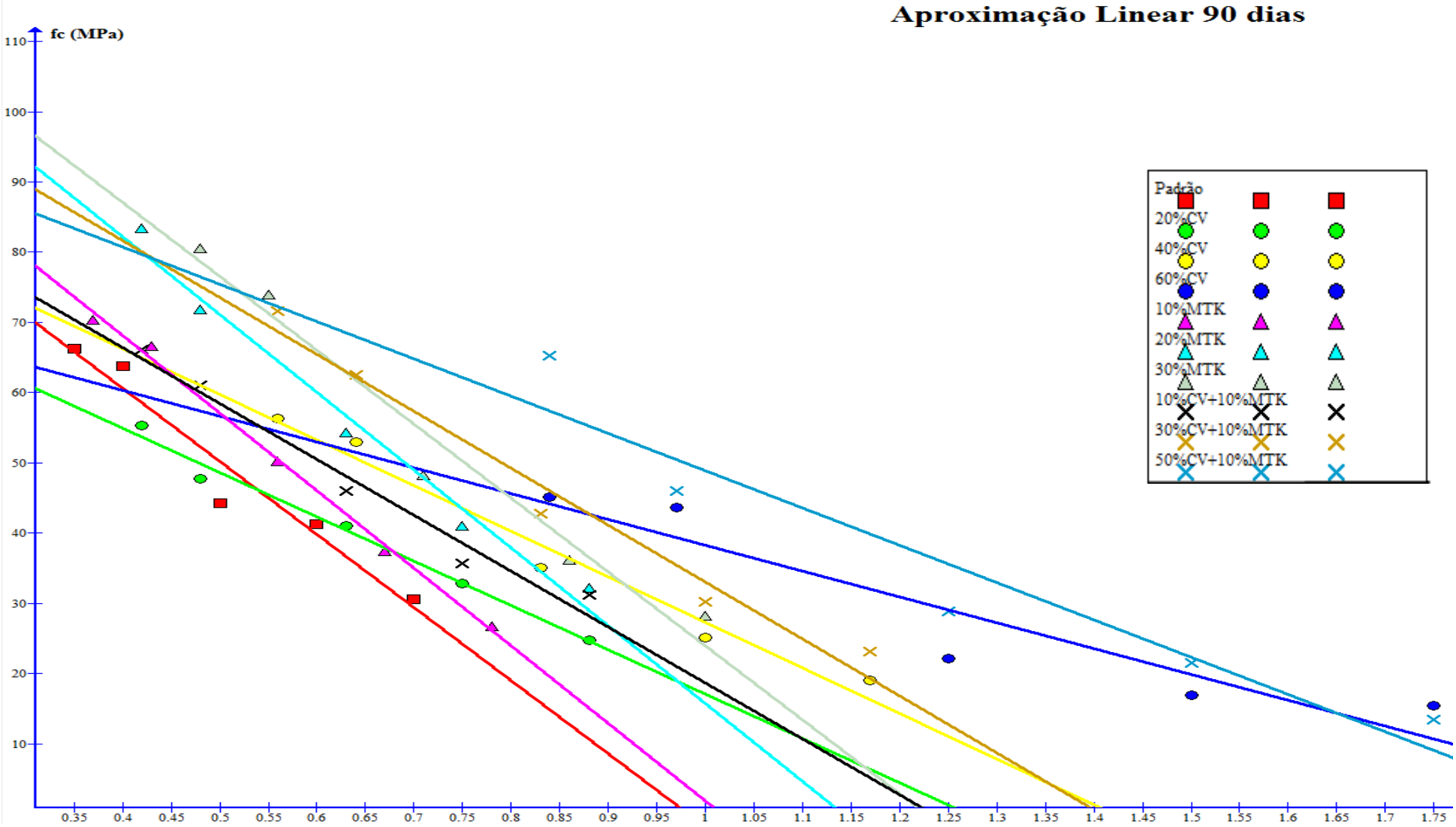


Figura 55: Aproximação linear para a resistência à compressão das argamassas aos 90 dias de idade.

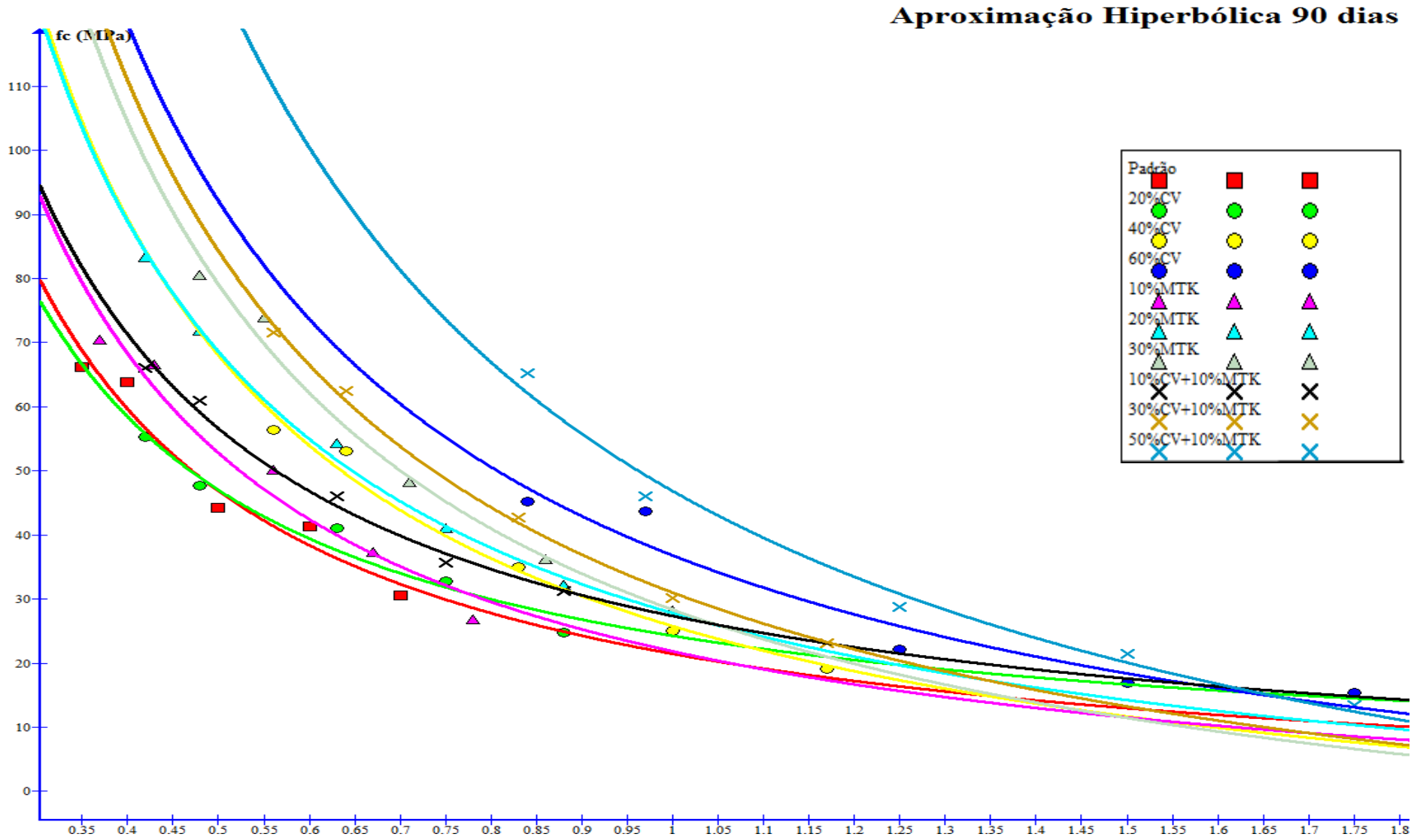


Figura 56: Aproximação hiperbólica para a resistência à compressão das argamassas aos 90 dias de idade.

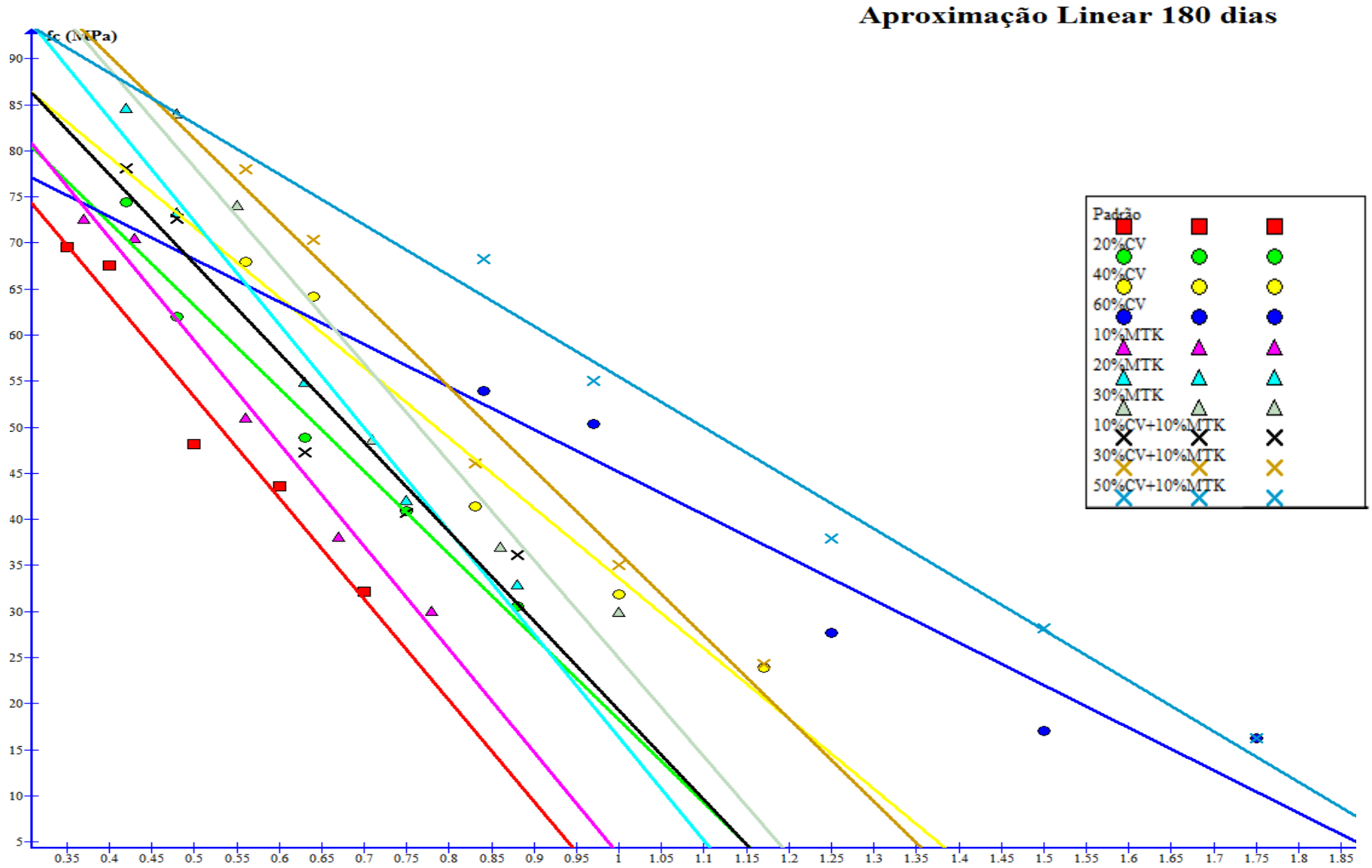


Figura 57: Aproximação linear para a resistência à compressão das argamassas aos 180 dias de idade.

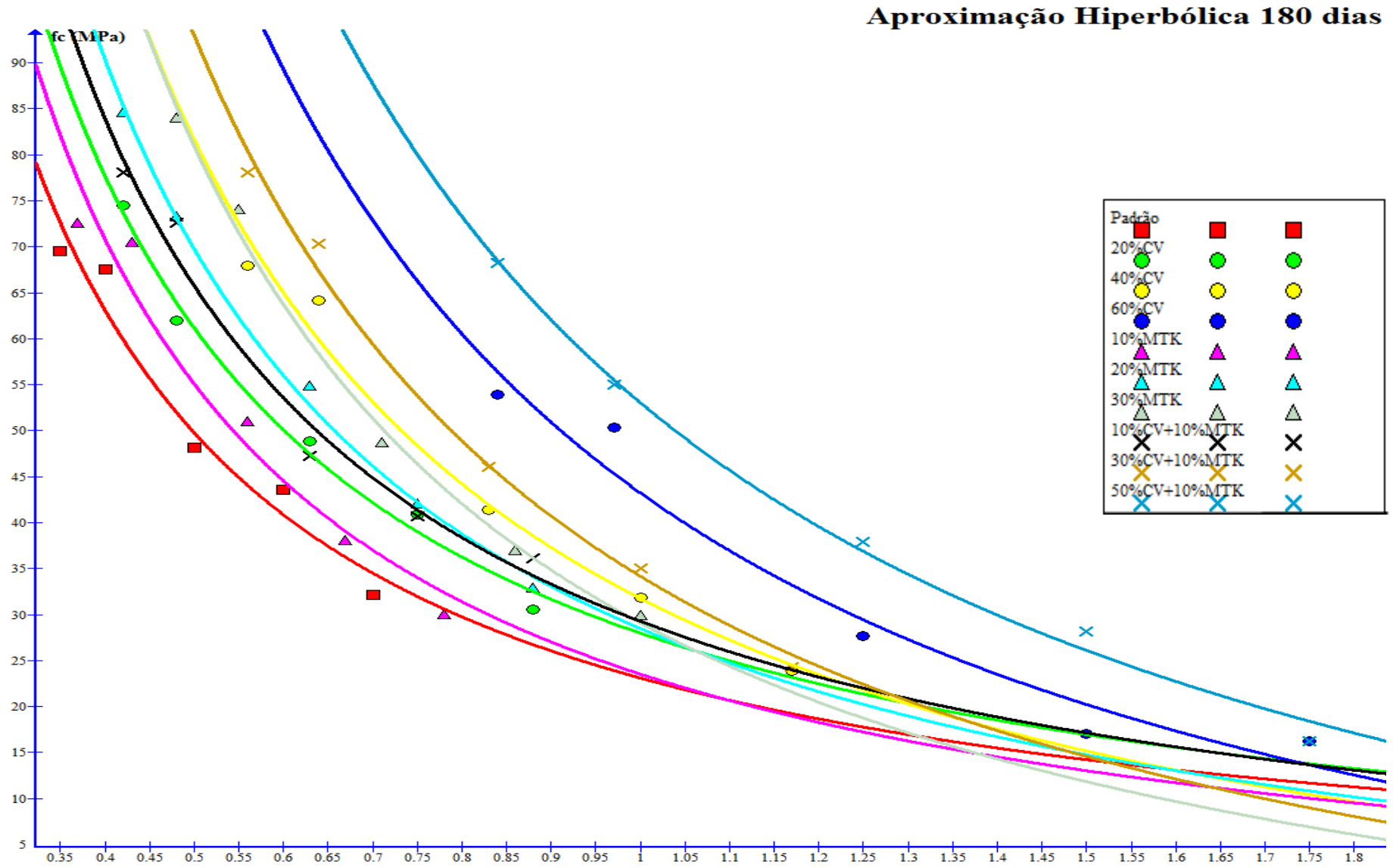


Figura 58: Aproximação hiperbólica para a resistência à compressão das argamassas aos 180 dias de idade.

Verificou-se que as aproximações foram possíveis de enquadrar utilizando a estratégia adotada de balizamento das tensões a avaliar nos pontos de valores intermédios às intersecções das curvas com adições com a curva de aproximação da argamassa padrão exceto o caso da curva de aproximação hiperbólica para a argamassa de 10%MTK aos 7 dias que se encontra abaixo da curva padrão, resultando em valores de a/l inferiores para todas as tensões relativamente às razões a/c obtidas no mesmo nível de tensão para aproximação padrão, originando posteriormente fatores de eficiência negativos como poderemos observar no decorrer dos cálculos. Apresenta-se no Quadro 34 ao Quadro 36 as equações de cálculo das curvas de aproximação linear e hiperbólica assim como os respetivos coeficientes de correlação (r^2), necessárias ao cálculo do fator k.

Quadro 34: Equações das retas e curvas de aproximação com respetivo coeficiente de correlação para a argamassa padrão e argamassas contendo cinzas volantes.

Composição	**Padrão**	**20%CV**	**40%CV**	**60%CV**
Idade	**7 dias**			
Aproximação	**Linear**			
Equação	y=88,143-100,749x	y=79,3665-74,099x	y=53,528-40,582x	y=42,284-21,379x
Correlação (r^2)	0,99200405	0,99129682	0,96266808	0,93370573
Aproximação	**Hiperbólica**			
Equação	y =-13,827+24,199/x	y = -12,550+26,455/x	y = -14,402+26,407/x	y =-11,682+31,676/x
Correlação (r^2)	0,96409619	0,95906472	0,96745814	0,963208573
Idade	**28 dias**			
Aproximação	**Linear**			
Equação	y =99,444-105,932x	y =83,414-74,859x	y = 68,175-48,110x	y = 51,212-24,911x
Correlação (r^2)	0,97447144	0,98640373	0,97958012	0,92332823
Aproximação	**Hiperbólica**			
Equação	y =-8,724+25,900/x	y = -9,823+26,948/x	y = -12,349+31,300/x	y =-12,136+37,457/x
Correlação (r^2)	0,98135077	0,98875599	0,9818941	0,98096268
Idade	**90 dias**			
Aproximação	**Linear**			
Equação	y =102,304-104,074x	y =80,217-63,112x	y = 92,228-64,899x	y =75,063-36,777x
Correlação (r^2)	0,94742443	0,98649789	0,97340896	0,88441724
Aproximação	**Hiperbólica**			
Equação	y =-3,987+25,455/x	y =1,496+22,787/x	y = -16,499+42,302/x	y =-18,449+55,289/x
Correlação (r^2)	0,95483893	0,97698655	0,98156971	0,93934554
Idade	**180 dias**			
Aproximação	**Linear**			
Equação	y =108,203-109,794x	y =108,218-89,957x	y = 109,843-76,200x	y =91,386-46,231x
Correlação (r^2)	0,96161441	0,97102242	0,96668676	0,91596021
Aproximação	**Hiperbólica**			
Equação	y =-3,545+26,670/x	y =-5,144+33,158/x	y = -18,029+49,833/x	y =-25,799+69,071/x
Correlação (r^2)	0,95587422	0,98875599	0,98124042	0,96084968

Quadro 35: Equações das retas e curvas de aproximação com respetivo coeficiente de correlação para as argamassas contendo metacaulino.

Composição	**10%MTK**	**20%MTK**	**30%MTK**
Idade	**7 dias**		
Aproximação	**Linear**		
Equação	y = 80,918-87,963x	y =82,895-78,358x	y =74,914-64,116x
Correlação (r^2)	0,97286028	0,98062972	0,9625627
Aproximação	**Hiperbólica**		
Equação	y =-17,301+25,438/x	y =-15,795+28,850/x	y =-17,5434+30,975/x
Correlação (r^2)	0,99293173	0,99633856	0,99001326
Idade	**28 dias**		
Aproximação	**Linear**		
Equação	y =112,927-114,034x	y =119,006-103,504x	y =125,872-103,719X
Correlação (r^2)	0,99501503	0,98977627	0,98409535
Aproximação	**Hiperbólica**		
Equação	y =-12,669+32,074/x	y =-10,699+37,724/x	y =-23,011+49,651/x
Correlação (r^2)	0,96062345	0,98654099	0,99376415
Idade	**90 dias**		
Aproximação	**Linear**		
Equação	y =112,371-110,472x	y =126,568-110,791X	y =129,234-105,248x
Correlação (r^2)	0,99590939	0,98055545	0,96543968
Aproximação	**Hiperbólica**		
Equação	y =-9,115+30,975/x	y =-12,930+40,768/x	y =-22,349+50,720/x
Correlação (r^2)	0,96921662	0,99511538	0,98804654
Idade	**180 dias**		
Aproximação	**Linear**		
Equação	y =115,261-111,677x	y =128,374-112,030x	y =131,550-106,627x
Correlação (r^2)	0,98293206	0,98034138	0,95474962
Aproximação	**Hiperbólica**		
Equação	y =-7,985+31,540/x	y =-12,734+41,253/x	y =-22,709+51,847/x
Correlação (r^2)	0,95672108	0,99628326	0,99472198

Quadro 36: Equações das retas e curvas de aproximação com respetivo coeficiente de correlação para as argamassas contendo cinzas volantes e metacaulino.

Composição	**10%CV+10%MTK**	**30%CV+10%MTK**	**50%CV+10%MTK**
Idade	**7 dias**		
Aproximação	**Linear**		
Equação	y =73,087-69,023x	y =78,922-59,757x	y =62,497-35,464x
Correlação (r^2)	0,96042862	0,96846482	0,9394318
Aproximação	**Hiperbólica**		
Equação	y =-14,250+25,650/x	y =-21,111+38,887/x	y =-27,452+53,050/x
Correlação (r^2)	0,99406563	0,97339692	0,98785689
Idade	**28 dias**		
Aproximação	**Linear**		
Equação	y =97,894-87,192x	y =100,114-73,572x	y =88,489-47,602x
Correlação (r^2)	0,96669974	0,96306509	0,89239423
Aproximação	**Hiperbólica**		
Equação	y =-12,3487+32,353/x	y =-23,972+48,602/x	y =-33,571+72,7616/x
Correlação (r^2)	0,99756968	0,9974718	0,97981965
Idade	**90 dias**		
Aproximação	**Linear**		
Equação	y =98,299-79,597x	y =114,117-81,044x	y =102,008-53,098x
Correlação (r^2)	0,96630276	0,97179691	0,91435994
Aproximação	**Hiperbólica**		
Equação	y =-1,922+29,289/x	y =-22,238+53,279/x	y =-33,451+80,350/x
Correlação (r^2)	0,98819644	0,9967774	0,98399595
Idade	**180 dias**		
Aproximação	**Linear**		
Equação	y =116,251-96,962x	y =126,303-89,914x	y =110,475-54,967x
Correlação (r^2)	0,92294334	0,97591341	0,97725562
Aproximação	**Hiperbólica**		
Equação	y =-7,152+36,452/x	y =-24,617+58,830/x	y =-27,788+80,872/x
Correlação (r^2)	0,97763368	0,99156905	0,99412705

Como referido anteriormente, verifica-se que as equações de aproximação, tanto lineares como hiperbólicas, apresentam valores de correlação próximos da unidade. São apresentados a amarelo os valores mais próximos da unidade das correlações para cada argamassa nas idades 7, 28,90 e 180 dias. Foi apurado que nas 40 aproximações realizadas, 35 aproximações hiperbólicas obtiveram valores mais próximos da unidade relativamente

às correspondentes aproximações lineares, corroborando a previsão teórica que a aproximação hiperbólica representaria um melhor ajuste no traçado da curva de comportamento da resistência à compressão vs a/c num leque vasto de razões a/c e a/l. Relativamente ao problema de extrapolações encontrado no estudo realizado pela M. João Brito (2007) que comprometeu de certa maneira os resultados obtidos, este foi evitado. As extrapolações foram evitadas com o balizamento das tensões nas zonas em que as curvas de aproximação se encontravam bem definidas. A adoção dos pontos de a/c de 0,35 e 0,7 permitiu um melhor ajuste nas curvas para as argamassas contendo elevados volumes de substituição, definindo melhor os extremos das curvas. Foi ainda verificado que o cálculo do fator k segundo melhor aproximação não faz sentido uma vez que a mistura das curvas de aproximação linear e hiperbólica conduzirem a resultados inconsistentes devido ao cruzamento das retas lineares com as curvas hiperbólicas. Desta forma, estes resultados foram excluídos de apresentação pela sua inconsistência.

4.3.2 Valores de água/ligante para cálculo do fator k

Uma vez obtidas as equações representativas do comportamento das curvas de resistência das argamassas, foi calculado para cada aproximação e nível de tensão o valor correspondente de água/ligante (Quadro 37e Quadro 38). A título de exemplo apresenta-se de seguida o cálculo efetuado na aproximação linear, sendo que o mesmo é realizado de forma análoga na aproximação hiperbólica aplicando a respetiva equação. Dada uma tensão para o valor de y na equação (36), obtemos o correspondente valor de x, representativo da razão a/l aplicando:

$$Nível\ de\ tensão\ \rightarrow y = 25\ MPa \tag{31}$$

$$A.Linear \rightarrow: y = 88{,}143 - 100{,}749x \tag{32}$$

$$25 = 88{,}143 - 100{,}749\text{x} \tag{33}$$

$$x = a/l = 0{,}627 \tag{34}$$

Quadro 37: Valores de a/l na aproximação linear.

	Aproximação Linear																			
	Valores a/l																			
Idade	**7 Dias**					**28 Dias**					**90 Dias**					**180 Dias**				
fc (Mpa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
Padrão	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7
20%CV	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
40%CV	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	1,3	1,2	1,1	1,0	0,8	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
60%CV	1,7	1,5	1,2	1,0	0,8	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4
10%MTK	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
20%MTK	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
30%MTK	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9
10%CV+10%MTK	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
30%CV+10%MTK	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1
50%CV+10%MTK	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5

Quadro 38: Valores de a/l na aproximação hiperbólica.

	Aproximação Hiperbólica																			
	Valores a/l																			
Idade	**7 Dias**					**28 Dias**					**90 Dias**					**180 Dias**				
fc (Mpa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
Padrão	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,9	0,7	0,6	0,6	0,5
20%CV	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6
40%CV	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7
60%CV	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	1,0	0,8	0,7	0,7	0,6	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9
10%MTK	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,9	0,7	0,7	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
20%MTK	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7
30%MTK	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7
10%CV+10%MTK	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	1,0	0,9	0,7	0,6	0,6	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6
30%CV+10%MTK	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8
50%CV+10%MTK	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0	1,5	1,3	1,2	1,1	1,1

Verifica-se que de acordo com o esperado através da análise gráfica das curvas de aproximação, as razões a/l diminuem com o subir do nível da tensão para ambas as aproximações.

4.3.3 Fator de eficiência k

O valor do fator k foi obtido através da aplicação da formulação apresentada no subcapítulo 4.3.1, através da respetiva formulação (28).

4.3.3.1 Análise das argamassas contendo cinzas volantes

Apresenta-se no Quadro 39 a Quadro 46, os resultados da eficiência do fator k obtidos para a aproximação linear e hiperbólica, para as argamassas contendo cinzas volantes como substituição parcial do cimento, por cada nível de tensão.

Quadro 39: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 7 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
20%CV	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
40%CV	1,1	1,0	0,8	0,6	0,3
60%CV	1,9	1,6	1,3	0,9	0,5

Quadro 40: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 7 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
20%CV	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
40%CV	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
60%CV	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Quadro 41: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 28 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
20%CV	1,8	0,8	0,7	0,6	0,6
40%CV	1,8	1,8	1,0	0,8	0,7
60%CV	2,3	1,6	1,4	1,1	0,8

Quadro 42: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 28 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
20%CV	0	0,1	0,1	0,1	0,1
40%CV	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
60%CV	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6

Quadro 43: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 90 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
20%CV	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
40%CV	1,1	1,1	0,8	0,6	0,3
60%CV	1,9	1,6	1,3	0,9	0,5

Quadro 44: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 90 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
20%CV	0,5	0,3	0,2	0,1	0
40%CV	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
60%CV	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1

Quadro 45: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 180 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
20%CV	1,1	1,1	1,1	0,7	0,6
40%CV	1,2	1,0	1,0	1,1	1,1
60%CV	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5

Quadro 46: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 180 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
20%CV	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
40%CV	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1
60%CV	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o fator k, de modo geral, diminui à medida que o nível de tensão aumenta. Verifica-se, no entanto, em algumas argamassas um comportamento oposto ao referido. Nas argamassas 60%CV para os 90 e 180 dias de idade na aproximação hiperbólica, o fator k aumenta ligeiramente à medida que a tensão aumenta. Apresentam-se, nos subcapítulos seguintes, as representações gráficas e respetivas relações para melhor análise e compreensão do comportamento do fator k.

4.3.3.1.1 Evolução do fator k com a idade

Neste subcapítulo são apresentados os gráficos de evolução do fator de eficiência relativamente à idade, para a aproximação linear e hiperbólica, respetivamente. É de esperar que o k aumente com idade com base na revisão bibliográfica realizada, principalmente no presente caso de adições de cinzas volantes, que a partir dos 90 dias mais revelam o seu potencial pozolânico. Devido a esta tardia reação, no caso das cinzas volantes, espera-se, igualmente, valores baixos de eficiência aos primeiros dias de idade. São apresentadas as Figura 59 à Figura 68, com os gráficos de evolução do fator k para os respetivos níveis de tensão, segundo cada aproximação.

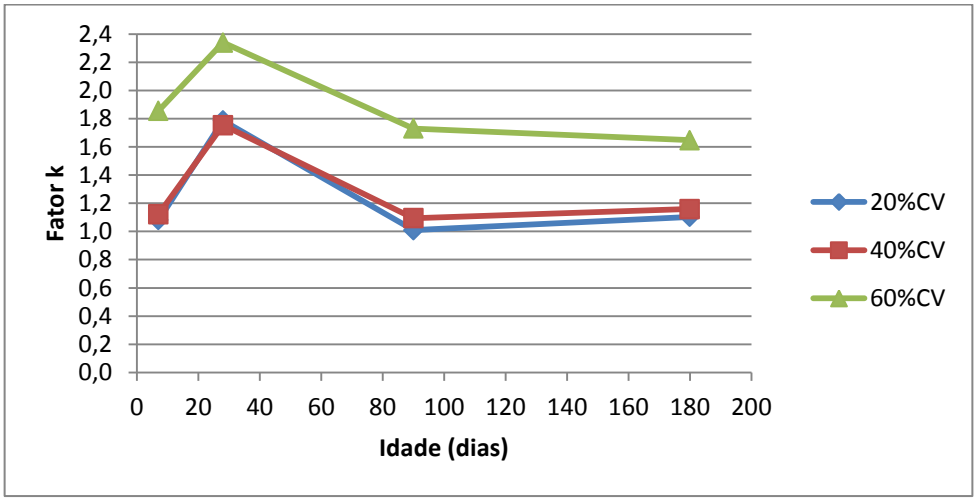


Figura 59: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 5 MPa na aproximação linear.

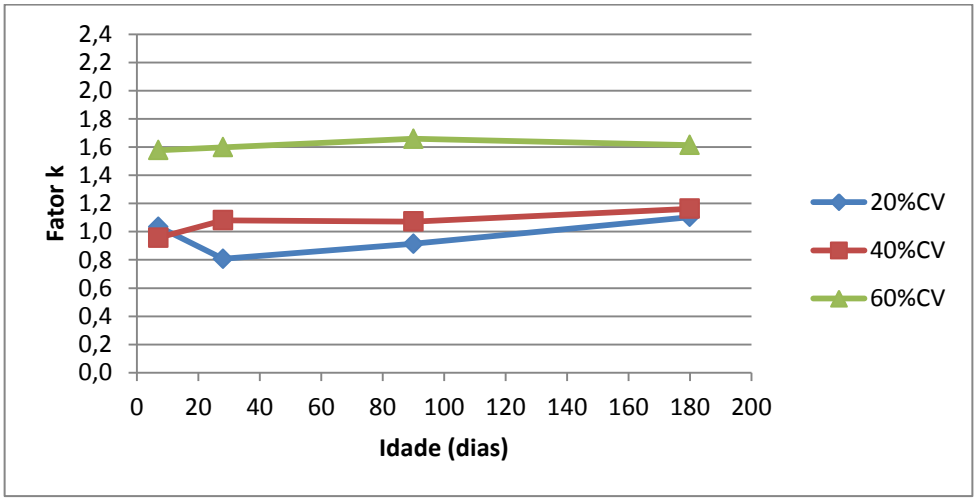


Figura 60: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 10 MPa na aproximação linear.

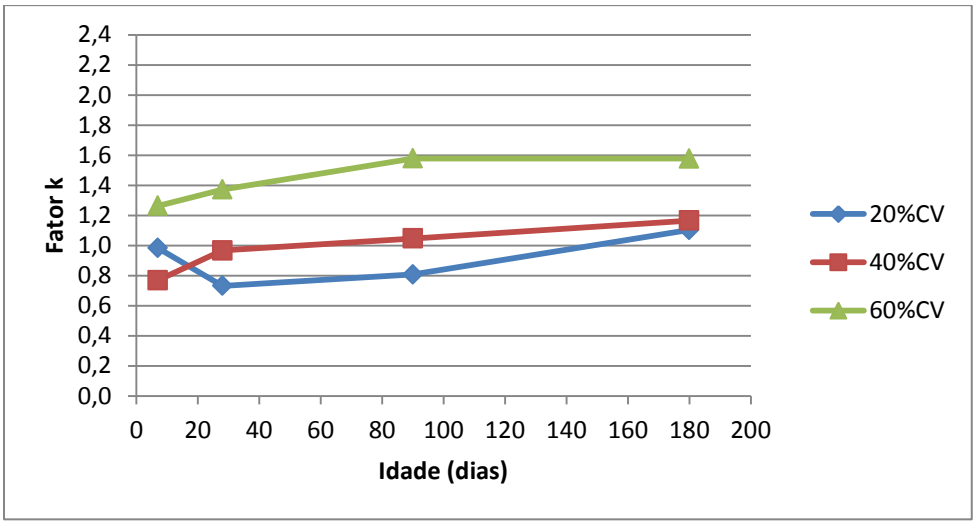


Figura 61: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 15 MPa na aproximação linear.

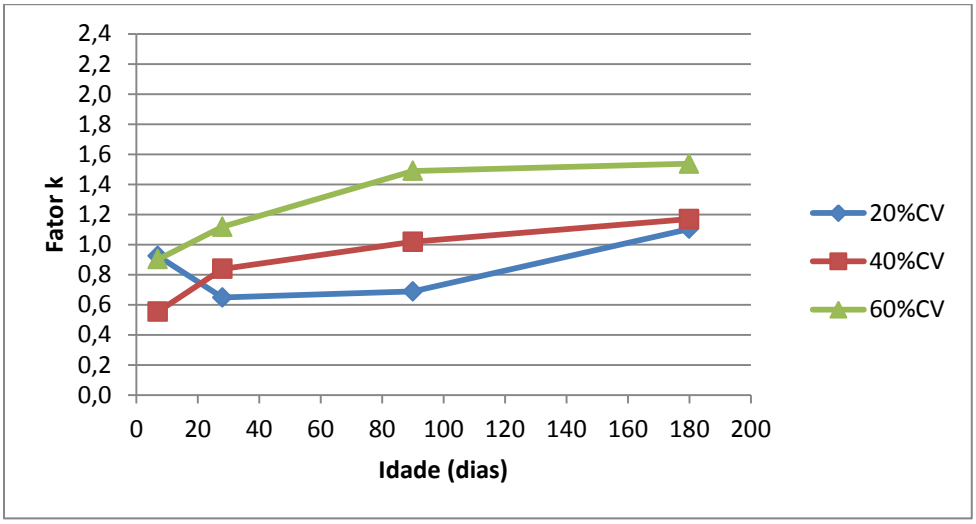


Figura 62: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 20 MPa na aproximação linear.

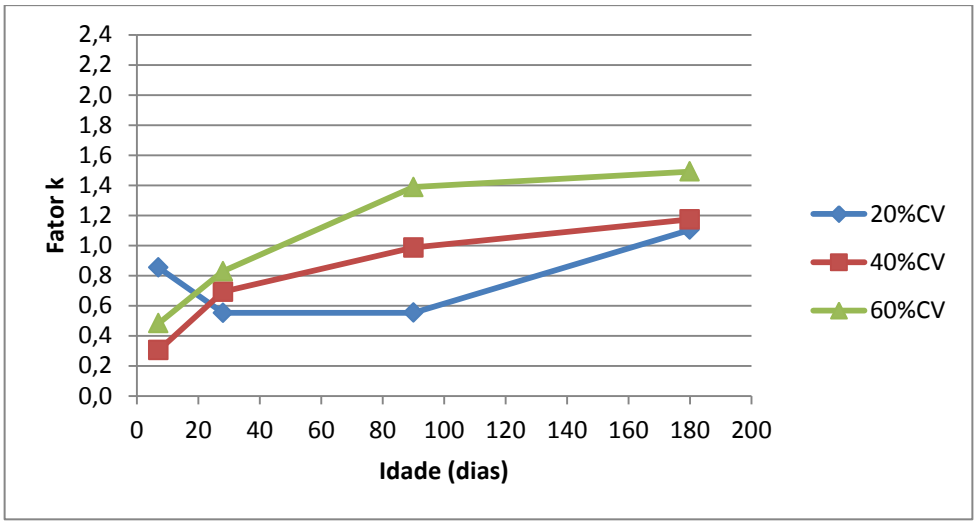


Figura 63: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação linear.

Verifica-se, nos resultados obtidos do fator k através da aproximação linear ao longo do tempo, que, de forma geral, a evolução de k é positiva salvo algumas exceções como o caso do nível de tensão de 5 MPa (Figura 59). Numa análise dos 7 aos 180 dias, sem consideração das idades intermédias, verifica-se para todas as tensões uma subida da eficiência das adições, o que seria de esperar a longo prazo e, principalmente, no caso das adições com cinzas volantes devido à morosidade da reação pozolânica destas. Apresentam-se na Figura 64 à Figura 68 a evolução de k segundo a idade para as respetivas tensões definidas, na aproximação hiperbólica.

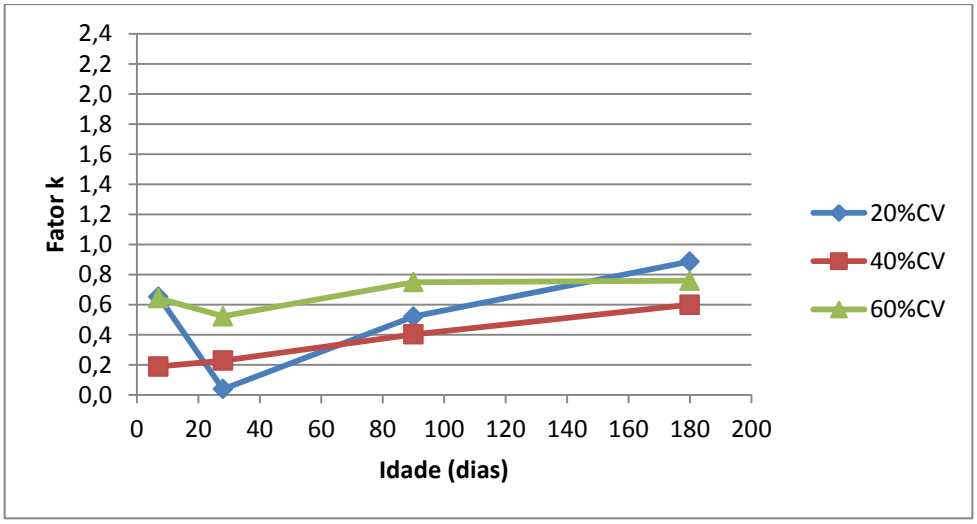


Figura 64: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação hiperbólica.

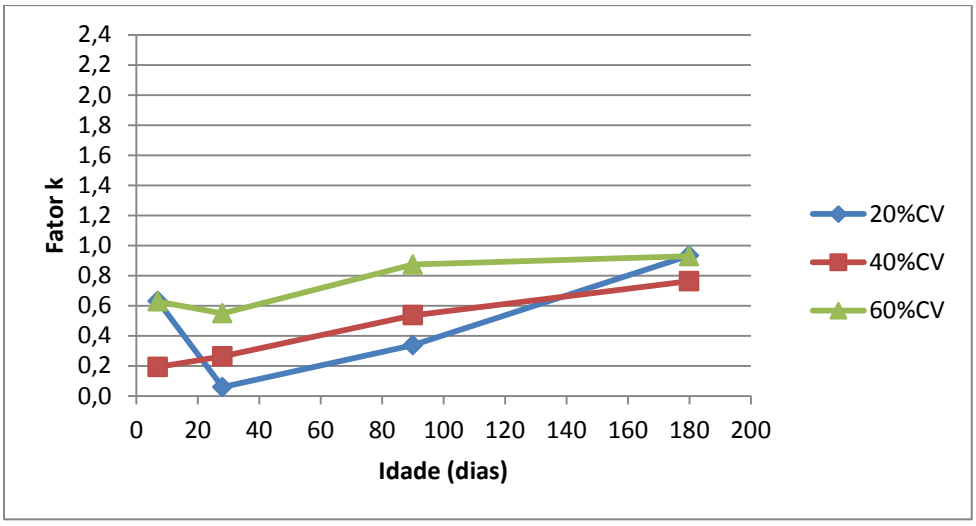


Figura 65: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 30 MPa na aproximação hiperbólica.

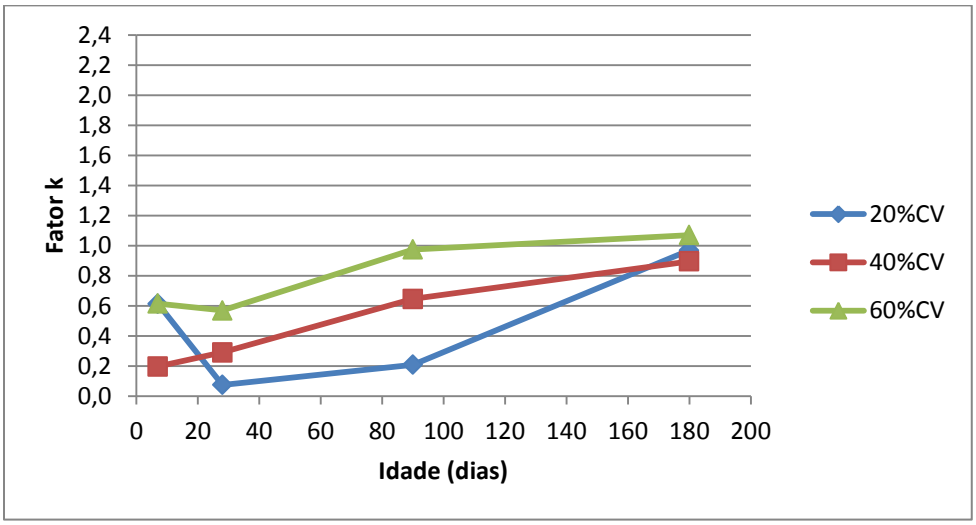


Figura 66: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 35 MPa na aproximação hiperbólica.

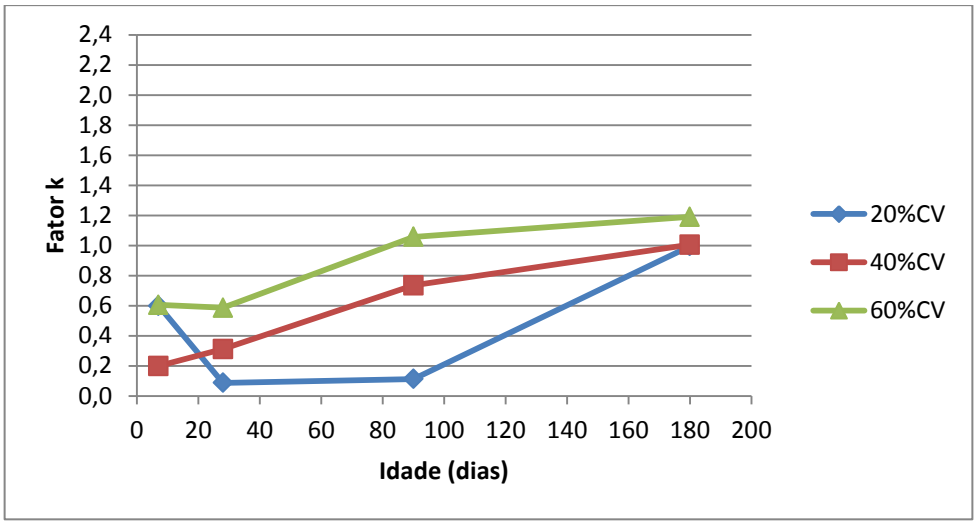


Figura 67: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 40 MPa na aproximação hiperbólica.

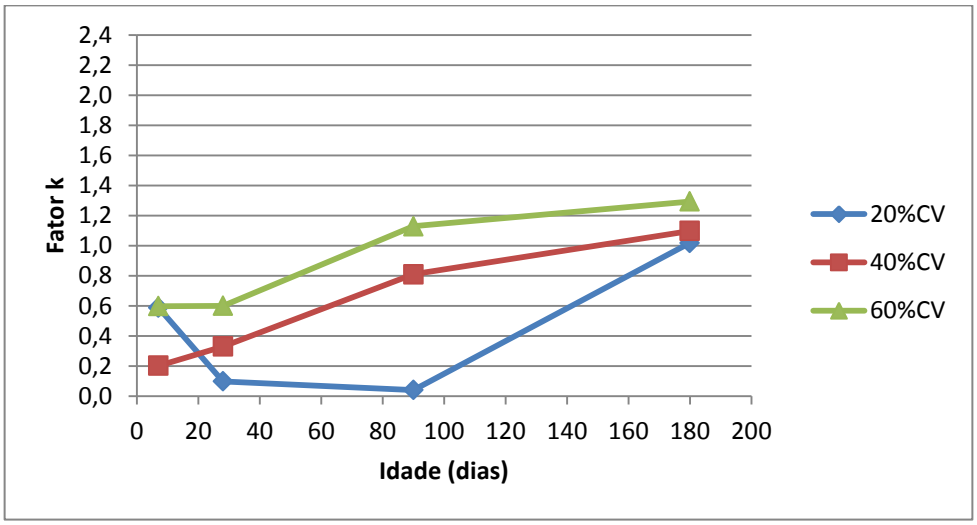


Figura 68: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 45 MPa na aproximação hiperbólica.

Analisando, de um modo geral, o comportamento do fator k ao longo da idade na aproximação hiperbólica, este tende a subir, o que teoricamente seria previsível. No entanto, a argamassa 20%CV apresenta um comportamento contrário ao esperado entre os 7 a 90 dias na tensão de referência de 45 MPa. Em nível de tensões inferiores, esta anomalia é apenas verificada entre os 7 e 28 dias, evoluindo o fator k em sentido contrário ao esperado. Este facto pode traduzir-se pela ineficiência das cinzas volantes nos primeiros dias de idade, contribuindo negativamente na resistência à compressão quando comparado com uma argamassa corrente sem adições. A partir dos 90 dias, os resultados vão de encontro ao esperado e apoiado por vários investigadores. A eficiência das cinzas volantes é notória a partir dos 90 dias, com o fator k a subir positivamente até um k médio de 1. Os valores detalhados do fator k segundo a idade para cada nível de tensão e aproximação, são apresentados em anexo. Uma vez que para ambas as aproximações o nível de tensão de 25 MPa é representativo do comportamento do fator k, apresenta-se para esse nível um quadro síntese do fator k para cada aproximação, e os respetivos valores (Quadro 47).

Quadro 47: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica.

Fator k segundo a idade				
Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Aproximação Linear				
20%CV	0,9	0,6	0,6	1,1
40%CV	0,3	0,7	1	1,2
60%CV	0,5	0,8	1,4	1,5
Aproximação Hiperbólica				
20%CV	0,7	0	0,5	0,9
40%CV	0,2	0,2	0,4	0,6
60%CV	0,6	0,5	0,7	0,8

Observando o Quadro 47, verifica-se efetivamente um evolução positiva de modo geral do fator k. Como referido anteriormente, é na argamassa 20%CV que os resultados apresentaram um comportamento anómalo até aos 90 dias, descendo o k com a idade até aí.

Considerando a idade inicial e final como pontos de análise, verifica-se, para todas argamassas, que o k evoluiu positivamente. Comparando os resultados com os obtidos para o mesmo nível de tensão temos no caso do programa experimental elaborado por M. João Brito (2007) (Quadro 48), um fator de eficiência aos 7 dias de k= 0,6 e k=0,7, para a argamassa 20%CV e 60%CV, respetivamente, na aproximação hiperbólica. Estes valores são próximos dos obtidos no presente estudo (k=0,7 e k=0,6). Na aproximação linear, aos 7 dias, o fator k foi de 0,8 e 0,4 para 20%CV e 60%CV, valores próximos dos obtidos no presente programa experimental (k=0,9 e k=0,5, respetivamente). Aos 28 dias os resultados obtidos no programa experimental realizado por M. João Brito foram anómalos, não permitindo a sua comparação com os obtidos no presente programa experimental (k=-1,3 e -0,3, para 20%CV e 60%CV, respetivamente) na aproximação hiperbólica com k=0,6 e k=0,8, no programa experimental levado a cabo.

Quadro 48: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica por M. João Brito (2007).

Fator k segundo a idade		
Idade	**7**	**28**
Aproximação Linear		
20%CV	0,8	0,3
60%CV	0,4	0,6
Aproximação Hiperbólica		
20%CV	0,6	-1,3
60%CV	0,7	-0,3

Comparando os resultados obtidos com as indicações normativas da NP EN 206-1 na utilização de adições de cinzas volantes, o fator k encontra-se dentro do indicado na aproximação linear e uso de um cimento CEM I 42,5, com um k=0,6 aos 28 dias comparado com o k=0,4 aconselhado numa substituição de uma razão de cinzas volantes e cimento que deve ser inferior a 0,33, em massa. No entanto, o valor de k na aproximação hiperbólica é nulo, na tensão de 25 MPa, e de k=0,1 nas restantes tensões, demonstrando uma anomalia verificada no estudo da argamassa 20%CV. Posto isto, apenas a argamassa contendo 20%CV pode ser enquadrada nas indicações normativas uma vez que as substituições de 40 e 60% de cinzas volantes de cimento ultrapassam o valor de 0,33 em massa e por tal justificam a

realização de investigações no sentido de apurar e consolidar a sua utilização em futuras normas. Os resultados de k no nível de tensão de 25 MPa, foi de 1,2 e 1,5, para 40%CV e 60%CV, aos 180 dias, respetivamente. É de reforçar que a consideração do fator k na utilização de cinzas volantes deve ser considerada para idades superiores a 90 dias, uma vez que em idades baixas a eficiência das cinzas volantes não contribui significativamente para uma melhoria de resistência à compressão das argamassas.

4.3.3.1.2 Evolução do fator k com a percentagem de substituição

Apresentam-se na Figura 69 à Figura 78, o comportamento do fator k relativamente à percentagem de substituição do cimento por adição de cinzas volantes, para a aproximação linear e hiperbólica, respetivamente.

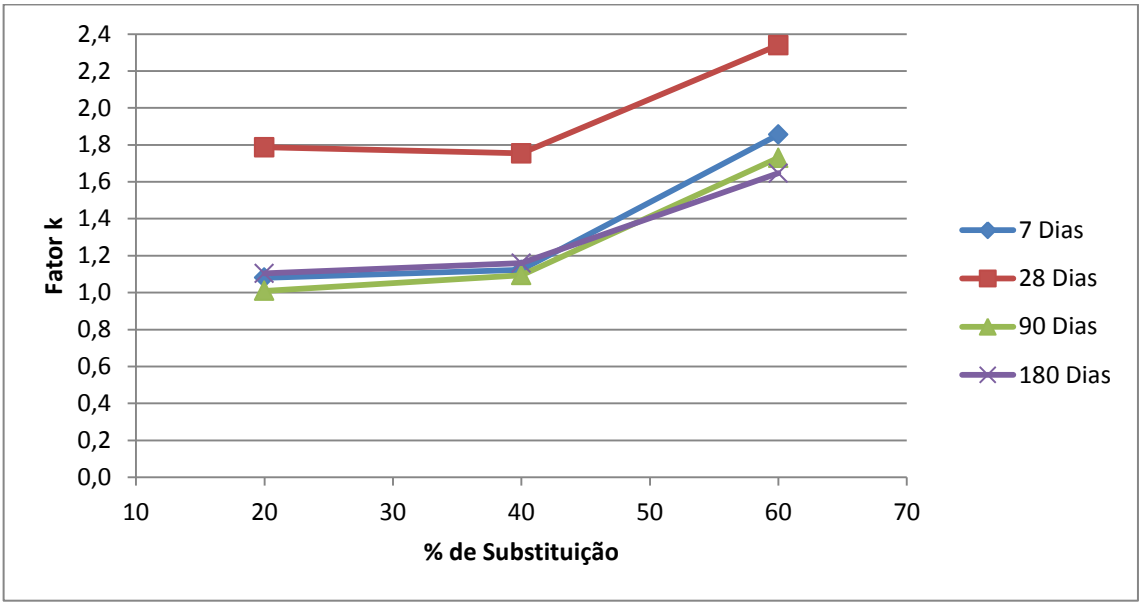


Figura 69: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 5 MPa, na aproximação linear.

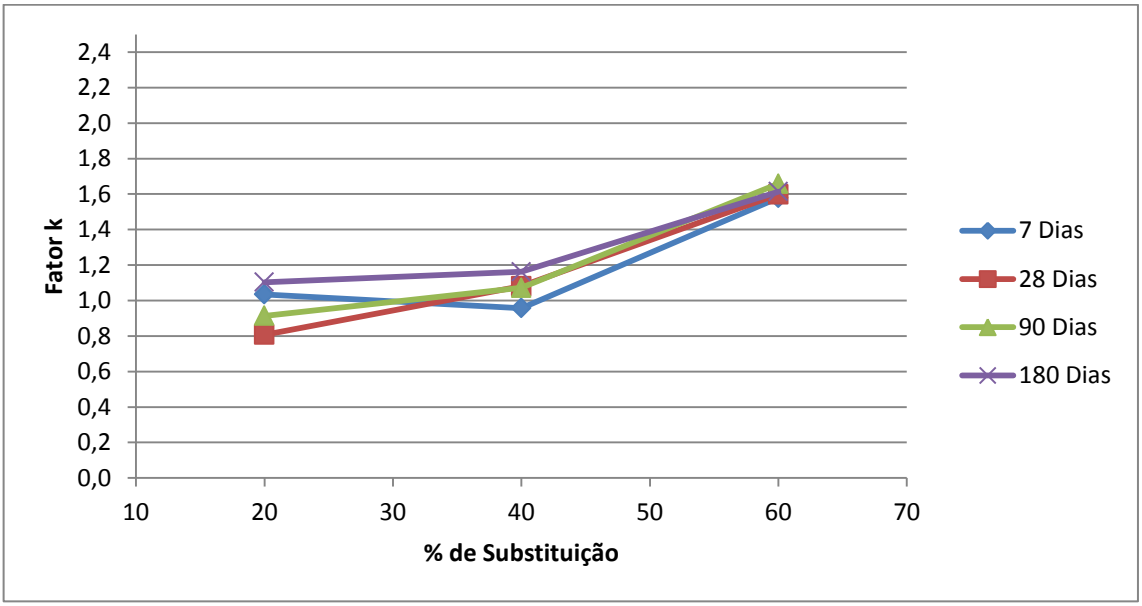


Figura 70: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 10 MPa, na aproximação linear.

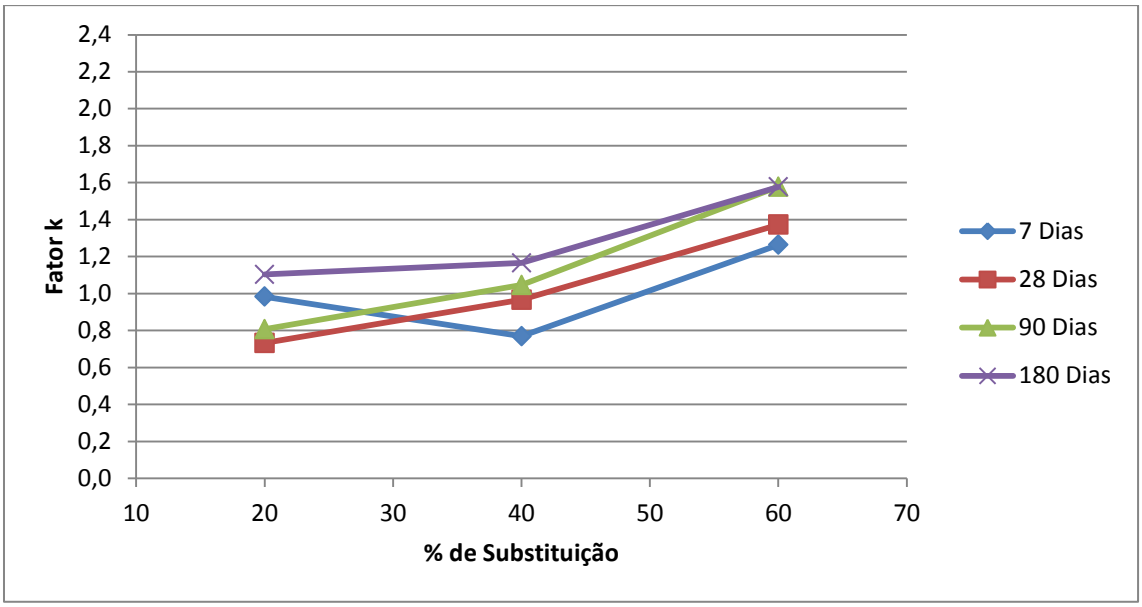


Figura 71: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 15 MPa, na aproximação linear.

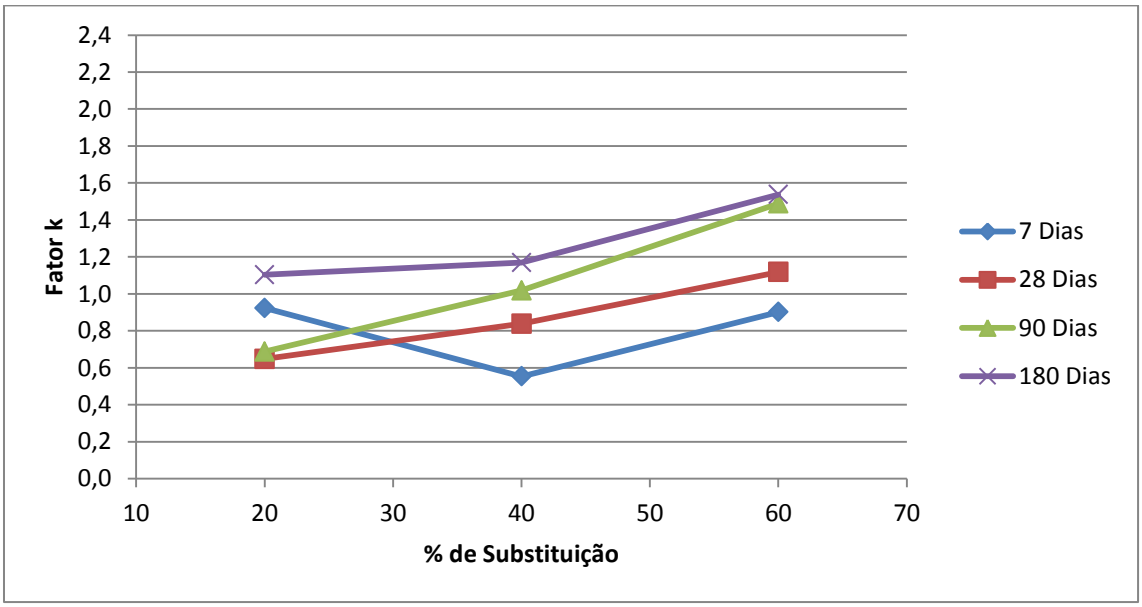


Figura 72: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 20 MPa, na aproximação linear.

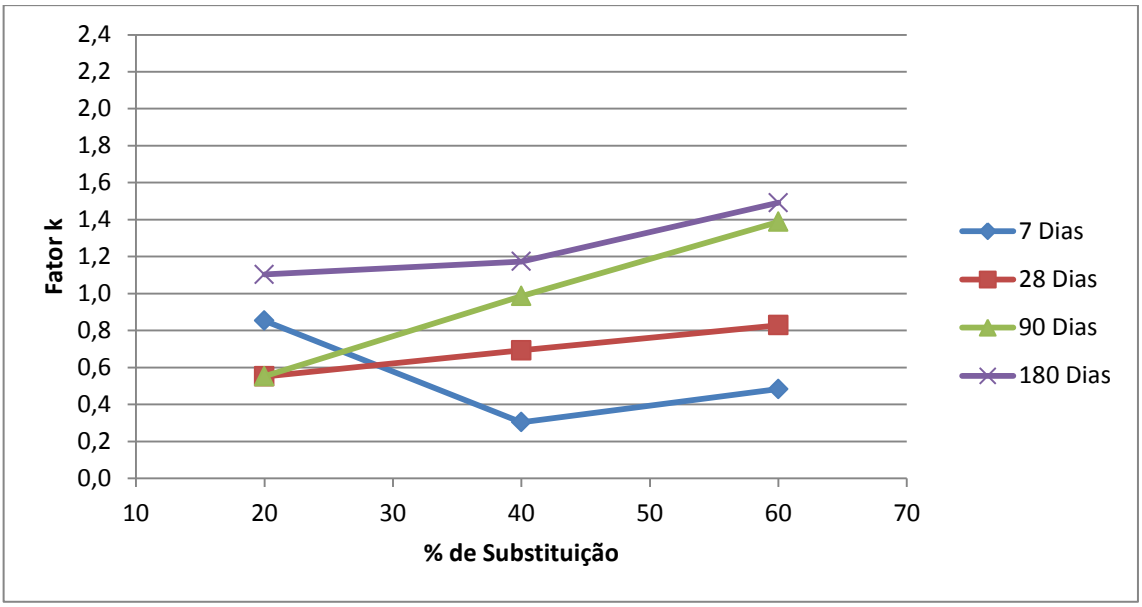


Figura 73: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação linear.

Observando os gráficos considerando a aproximação linear, verifica-se que existe uma tendência de subida do fator de eficiência consoante a percentagem de substituição. Esta tendência é notória nas idades de 90 e 180 dias, estando relativamente estável nos 7 e 28 dias. Estes resultados são contrários aos esperados, uma vez que seria de esperar que o fator k diminuísse com o aumento da percentagem de substituição. Comparando com os resultados obtidos por M. João Brito (2007), estes apresentaram igualmente um comportamento anómalo, com o fator k a crescer com a percentagem de substituição. Apresentam-se nas Figura 74 à Figura 78, os gráficos de igual carácter para a aproximação hiperbólica e respetivos níveis de tensão adotados.

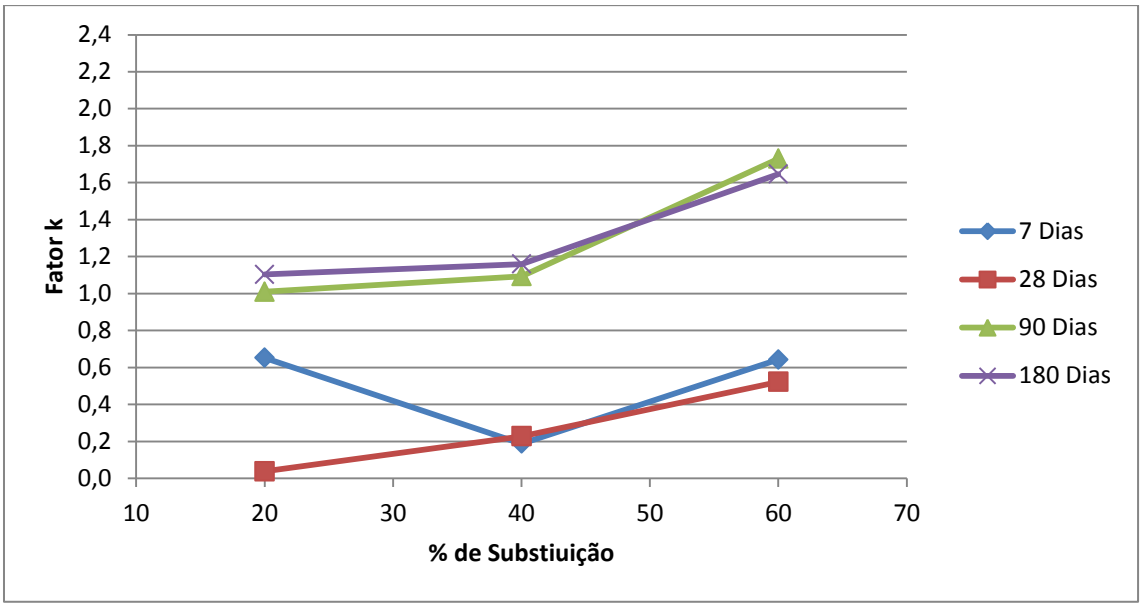


Figura 74: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica.

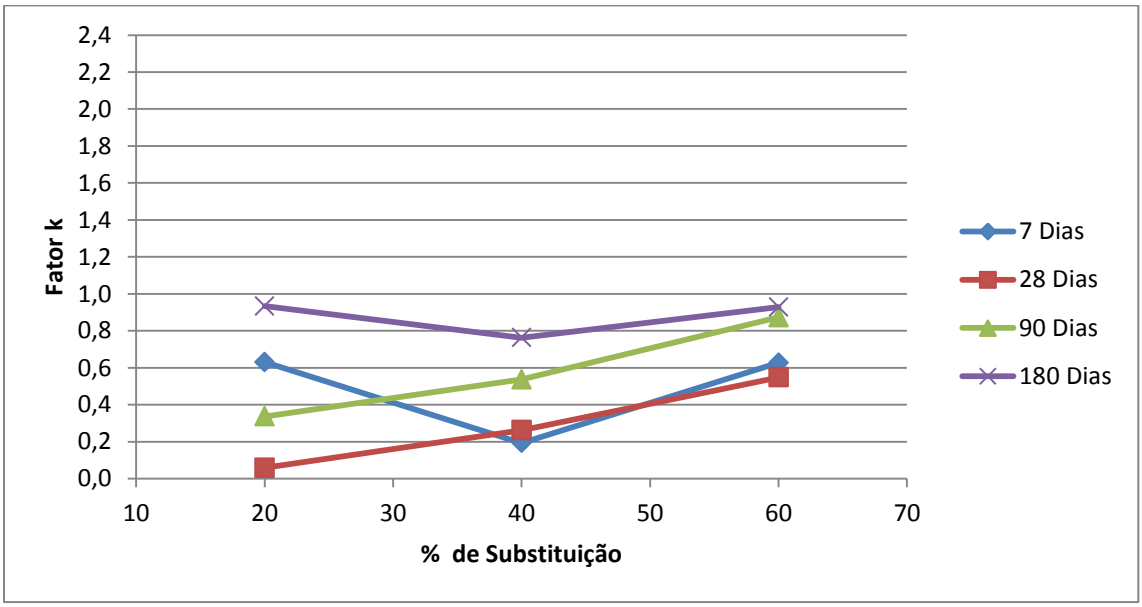


Figura 75: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 30 MPa, na aproximação hiperbólica.

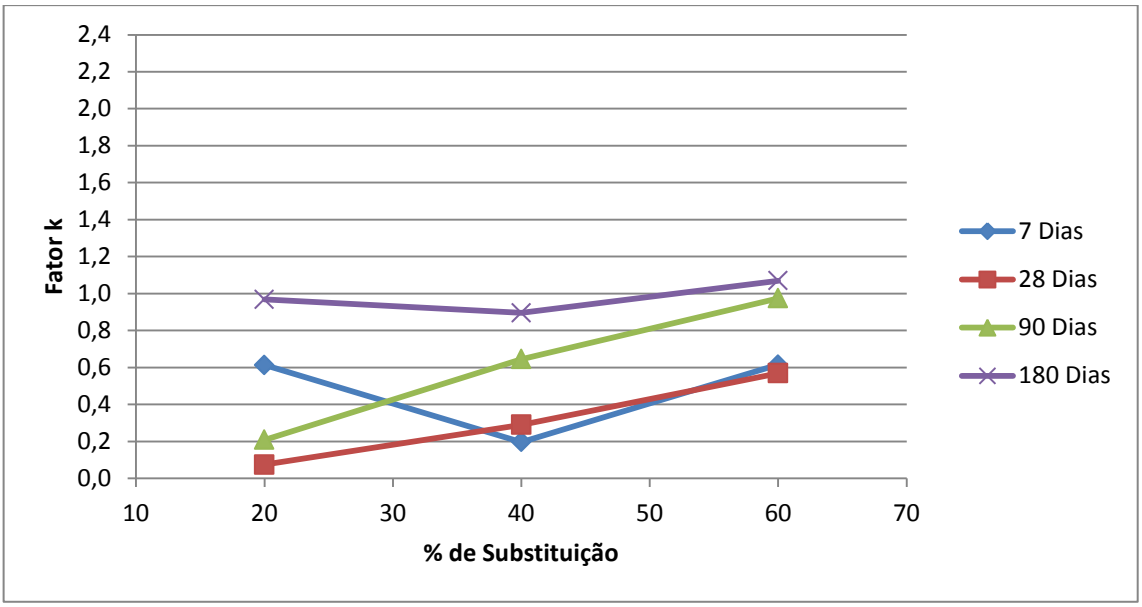


Figura 76: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 35 MPa, na aproximação hiperbólica.

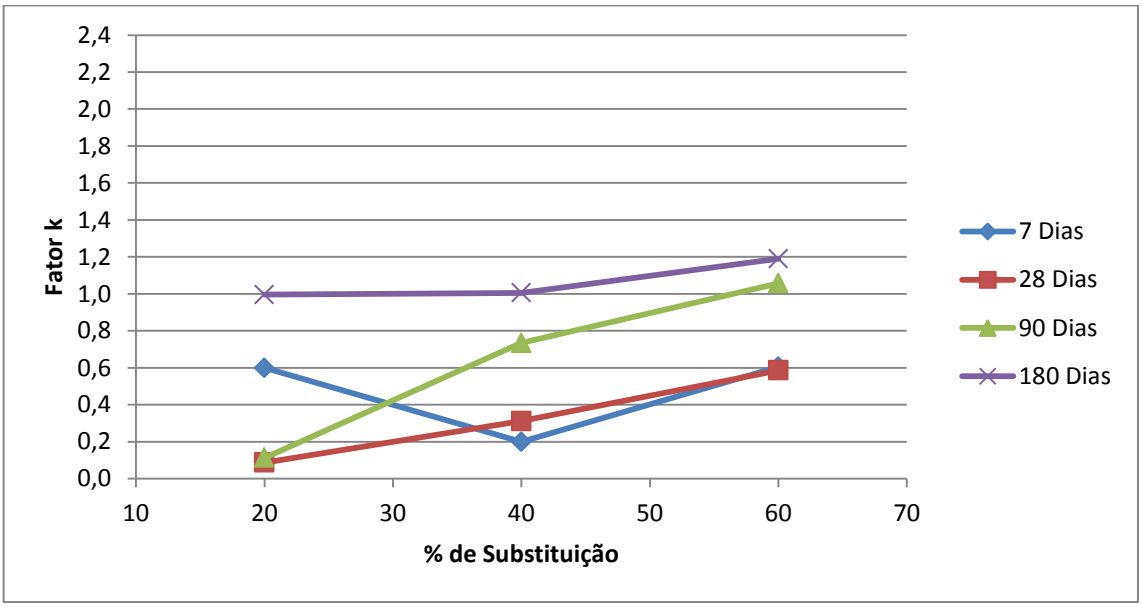


Figura 77: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 40 MPa, na aproximação hiperbólica.

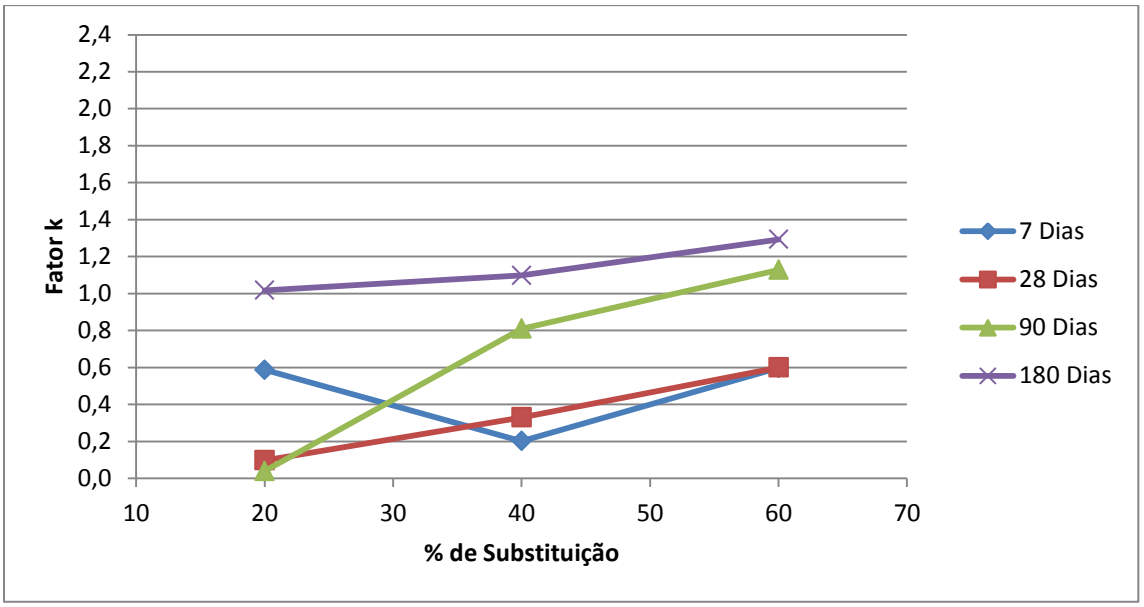


Figura 78: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 45 MPa, na aproximação hiperbólica.

Atendendo aos gráficos respetivos à aproximação hiperbólica, verifica-se, de igual forma, que o fator k evolui positivamente relativamente ao aumento da percentagem de substituição, o que, não seria de esperar. De forma geral, a variação até aos 40% para os 7 dias representa o esperado, diminuindo o valor de k. No entanto, o fator de eficiência volta a subir a partir dos 40%, o que não seria de esperar. Nas restantes idades o fator k aumenta com a percentagem de substituição, como referido anteriormente. Estes resultados são pertinentes e poderão abrir discussão na relação como o fator k se comporta com a percentagem de substituição em futuros estudos uma vez que os resultados foram contraditórios ao esperado.

4.3.3.1.3 Evolução do fator k com o nível de tensão

No decorrer dos cálculos de determinação do fator k, persistiu a ideia de que o valor do fator k, para além das características intrínsecas das composições, dependeria igualmente do nível de tensão adotado. Isto pode ser considerado devido ao comportamento das curvas de aproximação que servem de base para o cálculo do fator k. Uma abordagem possível e efetuada no decorrer da pesquisa bibliográfica, é a consideração de um k médio, que será apresentado nos resultados finais da presente dissertação.

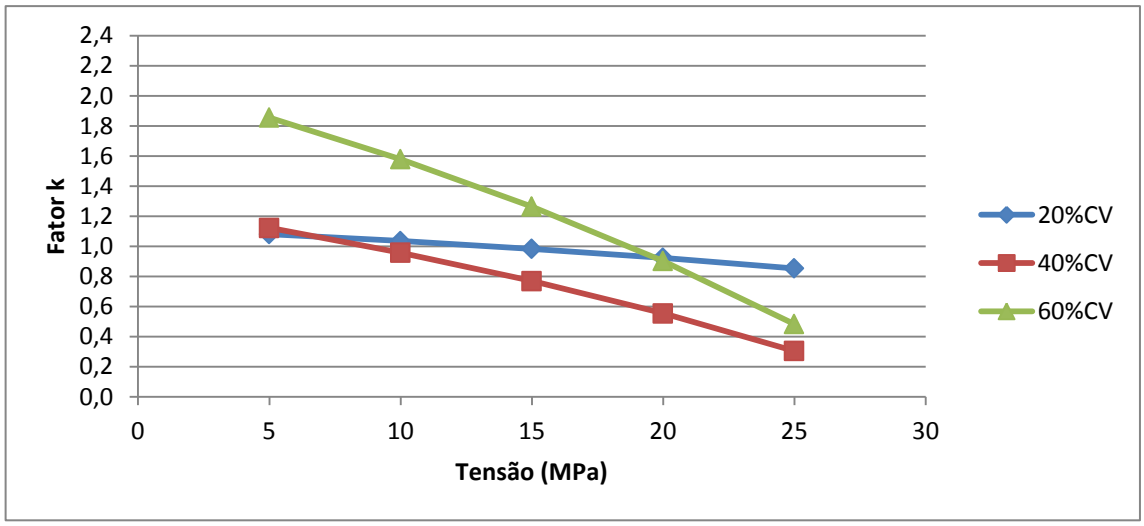


Figura 79: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação linear.

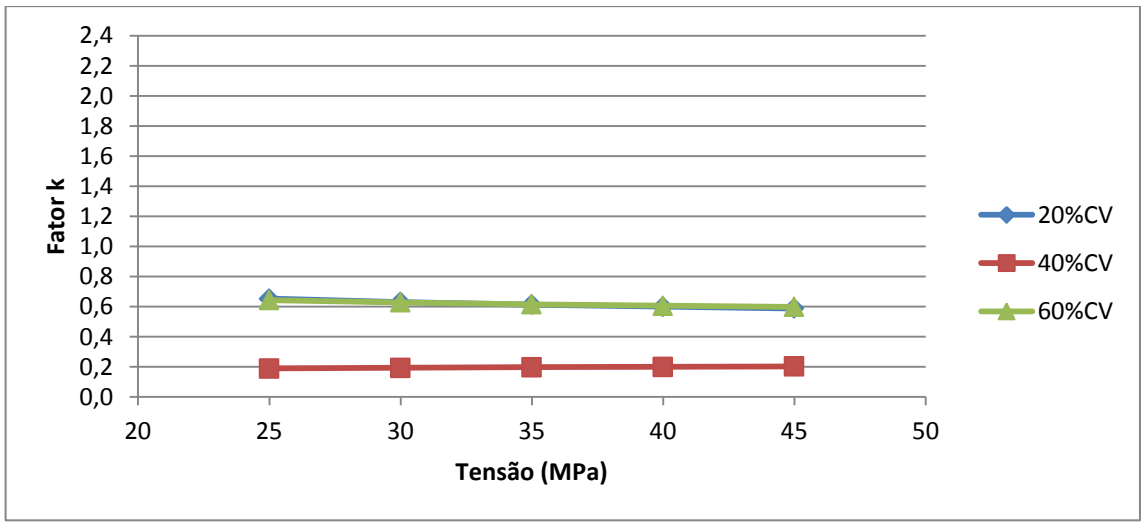


Figura 80: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação hiperbólica.

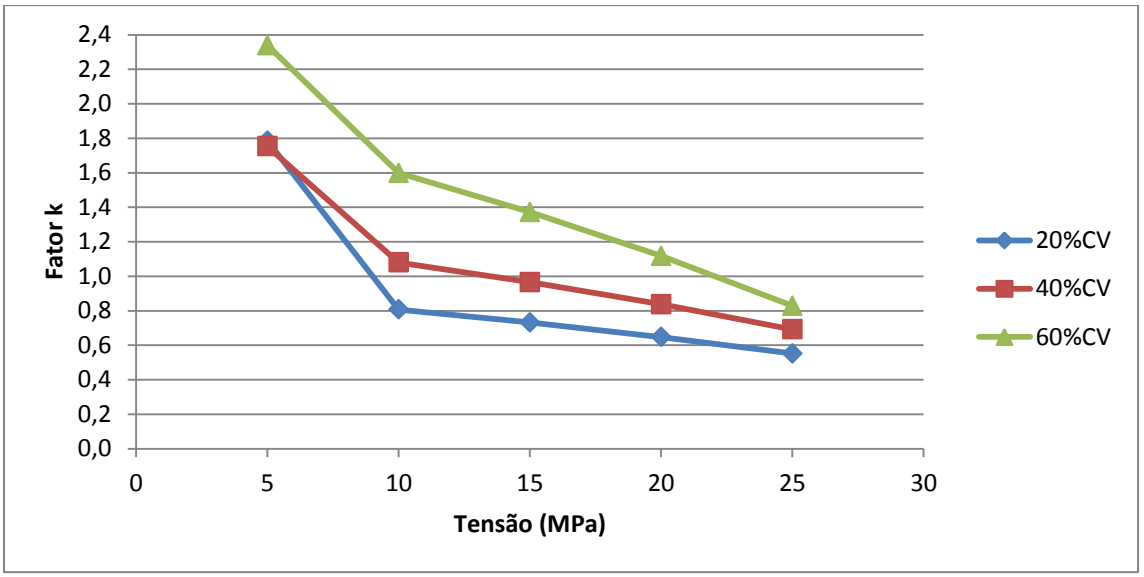


Figura 81: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação linear.

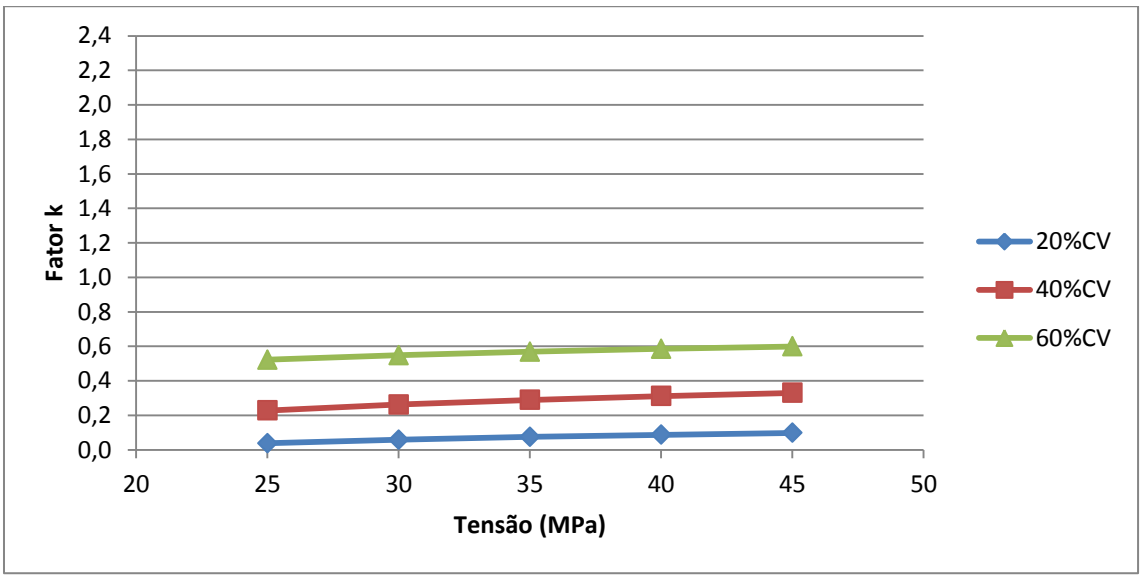


Figura 82: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação hiperbólica.

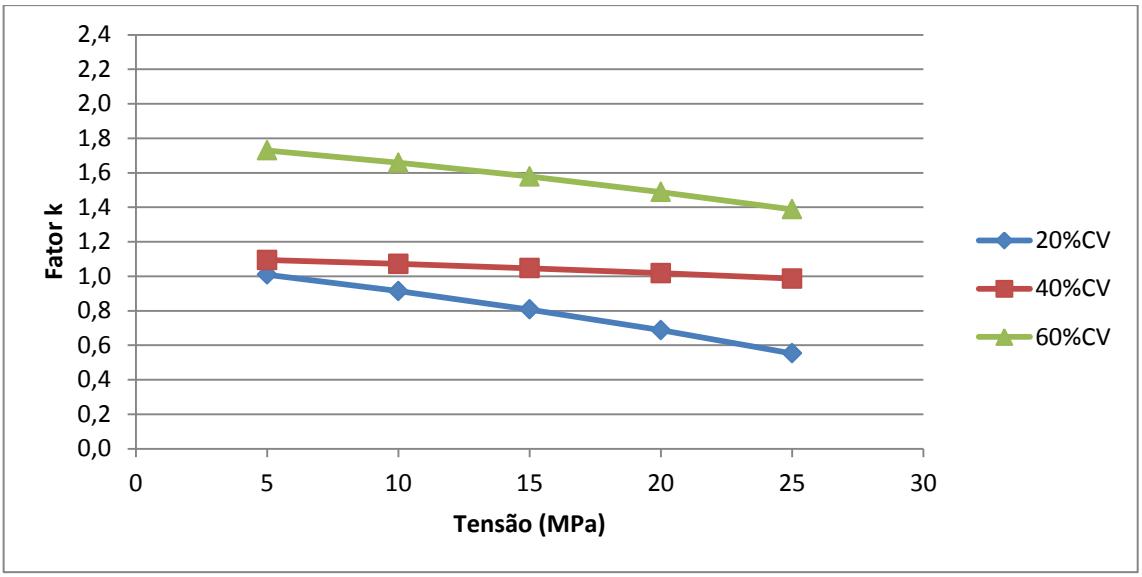


Figura 83: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação linear.

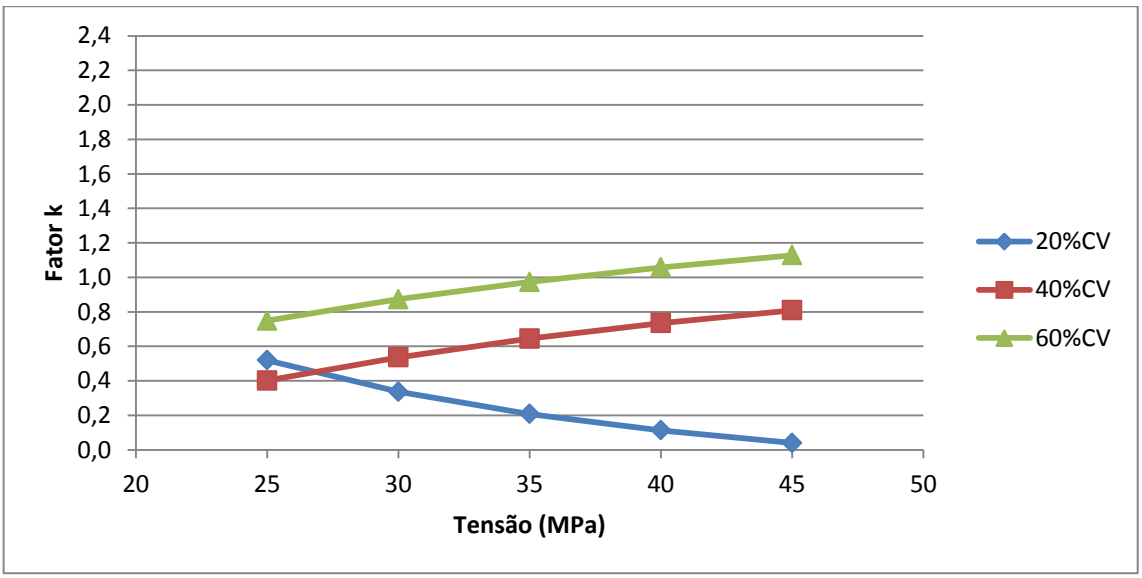


Figura 84: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação hiperbólica.

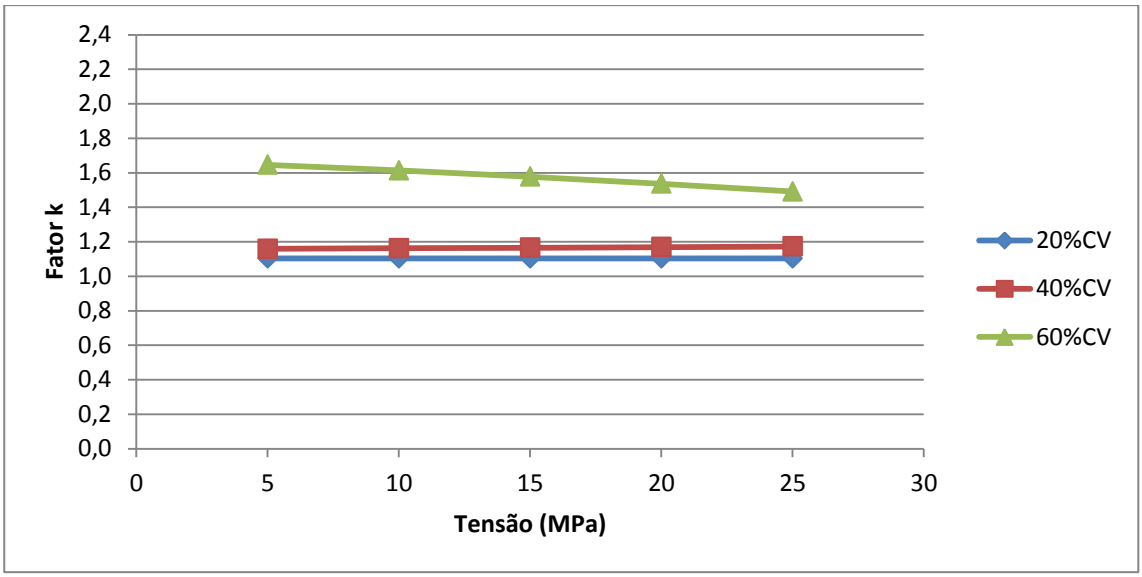


Figura 85: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação linear.

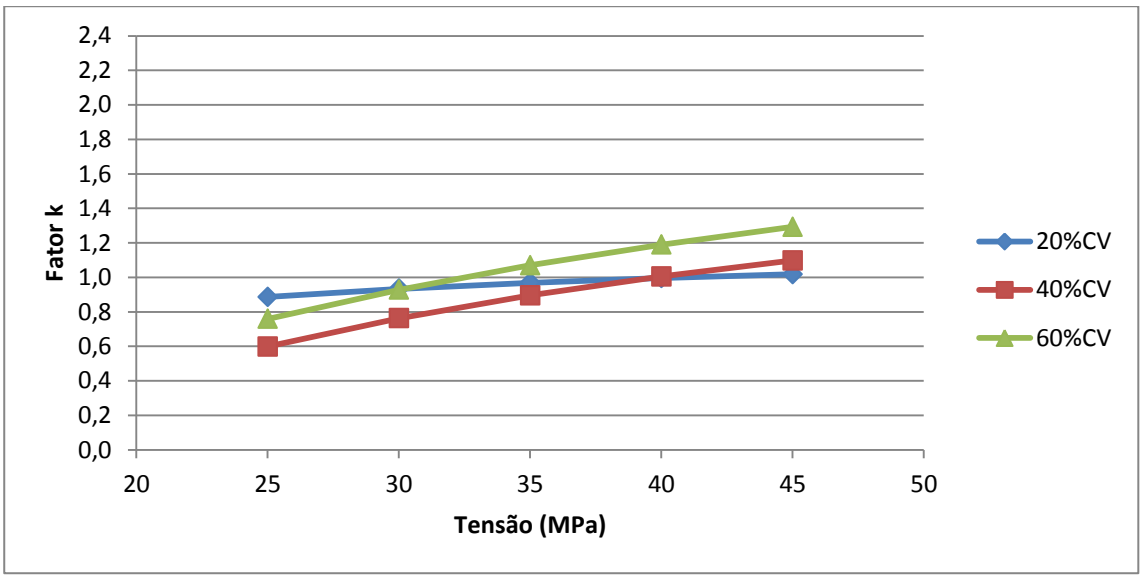


Figura 86: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação hiperbólica.

Através da observação dos gráficos (Figura 79 à Figura 86) é possível concluir que na aproximação hiperbólica, a variação da tensão não constitui grande diferença no valor do fator k, sendo o valor de k relativamente constante para os níveis de tensão de 25, 30, 35, 40 e 45 MPa. Estes resultados são importantes pois sustentam que a obtenção do fator k através da metodologia adotada é possível, desde que os níveis de tensão compreendam os resultados obtidos e as curvas de aproximação estejam bem definidas. No caso das aproximações

lineares, estas apresentam a mesma tendência mas com algumas reservas aos 7 e 28 dias, observando-se um fator k sensível ao nível de tensão.

4.3.3.2 Análise das argamassas contendo metacaulino

Apresenta-se no Quadro 49 ao Quadro 56, os resultados da eficiência do fator k obtidos para a aproximação linear e hiperbólica, para as argamassas contendo metacaulino como substituição parcial do cimento, para cada nível de tensão.

Quadro 49: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 7 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
10%MTK	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
20%MTK	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
30%MTK	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8

Quadro 50: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 7 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
10%MTK	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1
20%MTK	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
30%MTK	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7

Quadro 51: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 28 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
10%MTK	2,3	0,7	0,8	0,9	1,0
20%MTK	2,1	1,2	1,3	1,4	1,5
30%MTK	1,7	1,1	1,1	1,2	1,3

Quadro 52: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 28 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
10%MTK	1,1	1,2	1,4	1,5	1,5
20%MTK	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0
30%MTK	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7

Quadro 53: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 90 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
10%MTK	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6
20%MTK	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2
30%MTK	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1

Quadro 54: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 90 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
10%MTK	0,3	0,6	0,8	0,9	1,0
20%MTK	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8
30%MTK	0,7	1,0	1,2	1,4	1,5

Quadro 55: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 180 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
10%MTK	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
20%MTK	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
30%MTK	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1

Quadro 56: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 180 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
10%MTK	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8
20%MTK	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5
30%MTK	0,5	0,8	1,0	1,2	1,3

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o fator k apresenta um comportamento variável ao longo da idade e níveis de tensão. Até aos 90 dias, a aproximação linear apresenta valores de fator k que diminuem com o nível de tensão. Acima dos 90 dias, o fator k diminui com o nível de tensão. Na aproximação hiperbólica, o fator k aumenta com o nível de tensão, contrariamente ao obtido nas argamassas com cinzas volantes. É ainda de referir os resultados anómalos obtidos aos 7 dias na aproximação hiperbólica com valores negativos para o fator de eficiência na argamassa 10%MTK. Estes resultados revelam que os níveis de tensão de estudo são importantes na obtenção do fator k. Relativamente aos valores obtidos, pode-se dizer que se encontram dentro do esperado, com valores de eficiência elevados. É na argamassa 20%MTK que se encontra o valor mais elevado de eficiência do presente estudo, com um k de 2,3. Refere-se, no entanto, que o valor do fator k será apresentado como um valor de eficiência médio das cinco tensões adotadas para ambas as aproximações no subcapítulo 4.4. Apresentam-se nos subcapítulos seguintes as representações

gráficas e respetivas relações para melhor análise e compreensão do comportamento do fator k na presente adição.

4.3.3.2.1 Evolução do fator k com a idade

Neste subcapítulo são apresentados os gráficos de evolução do fator de eficiência relativamente à idade, para a aproximação linear e hiperbólica, respetivamente. É de esperar que o k aumente com idade conforme o verificado nas adições de cinzas volantes desde as primeiras idades. São apresentados na Figura 87 à Figura 96, os gráficos de evolução do fator k com a idade para os respetivos níveis de tensão, segundo cada aproximação.

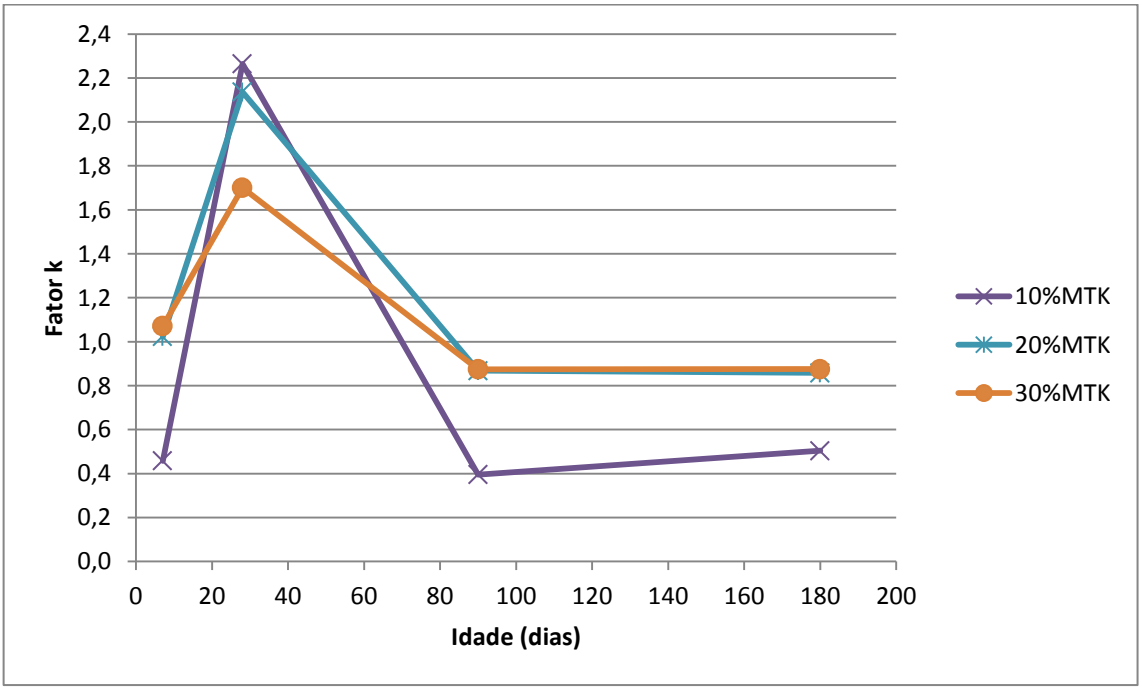


Figura 87: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 5 MPa na aproximação linear.

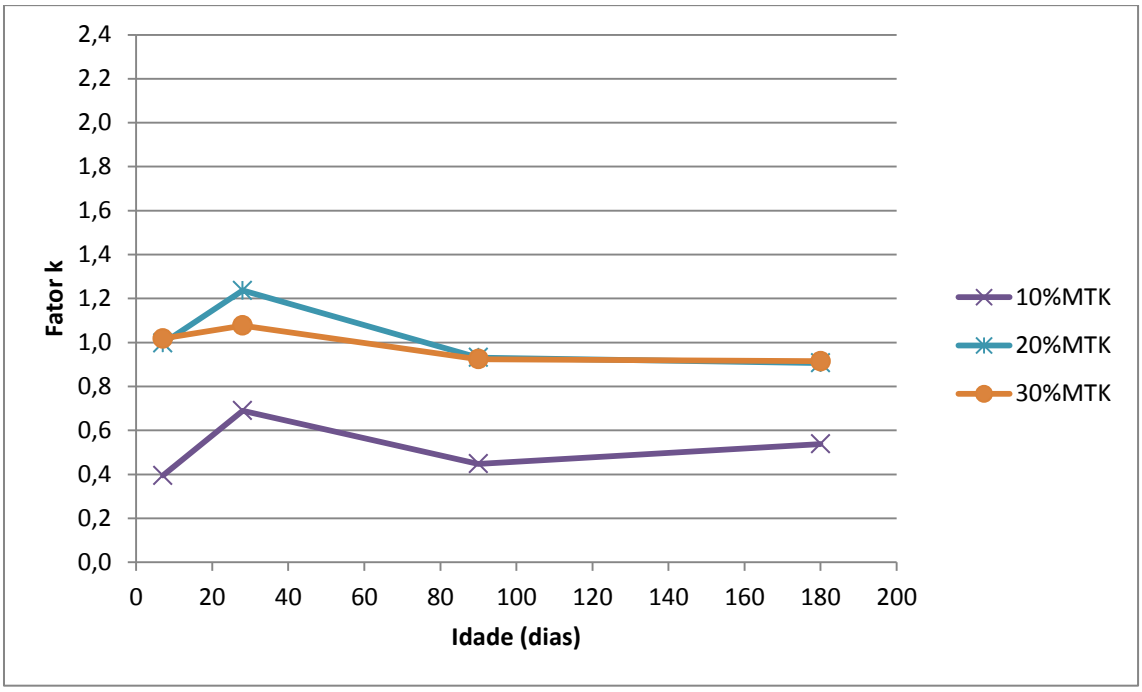


Figura 88: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 10 MPa na aproximação linear.

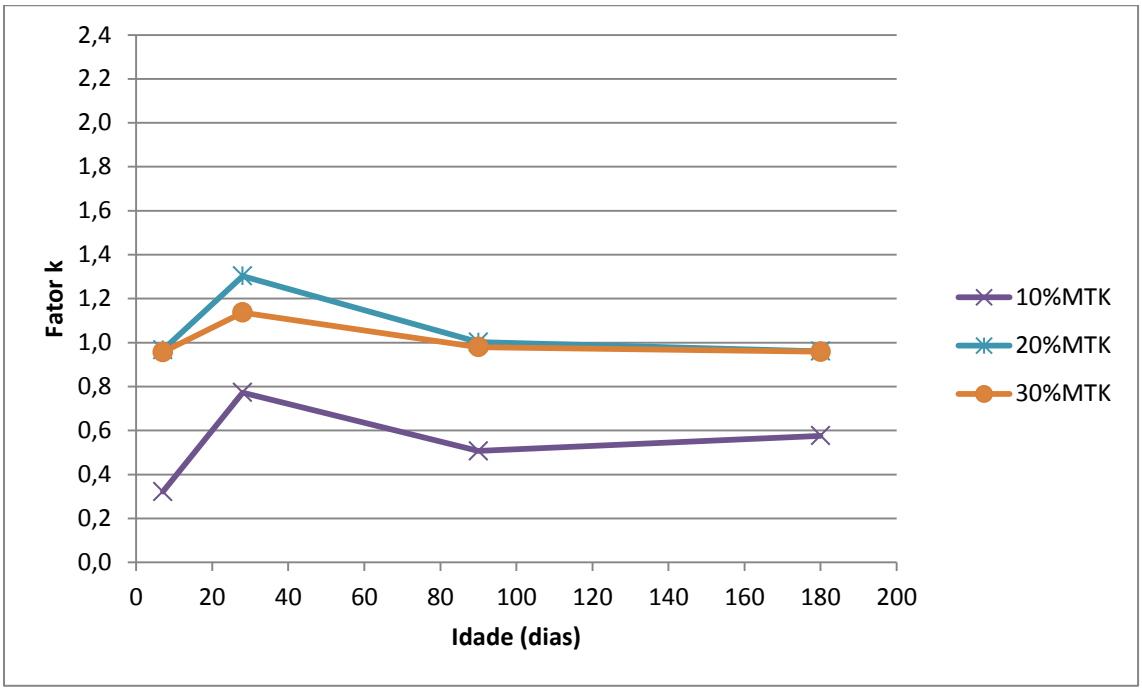


Figura 89: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 15 MPa na aproximação linear.

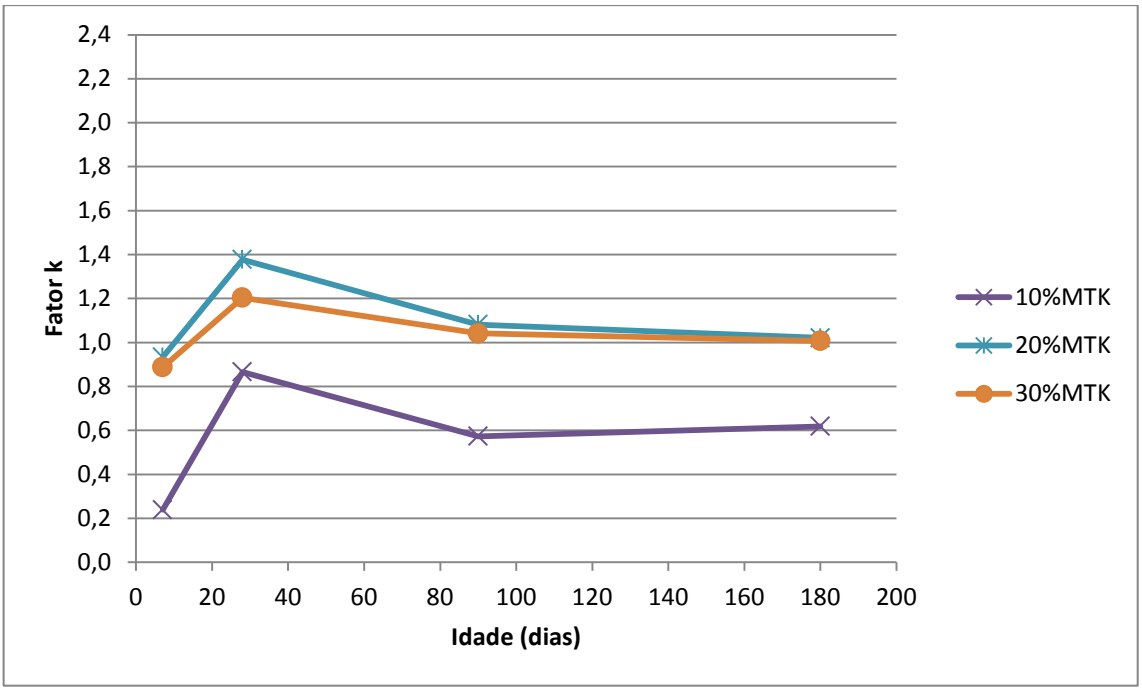


Figura 90: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 20 MPa na aproximação linear.

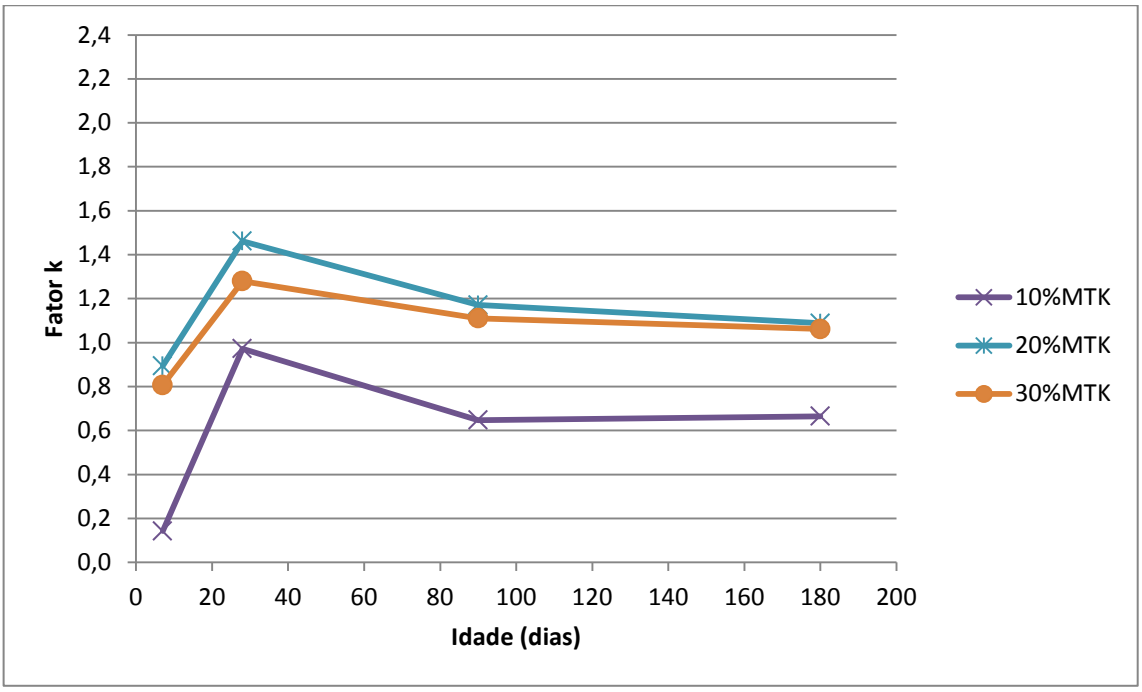


Figura 91: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação linear.

Analisando os resultados obtidos com a aproximação linear, verifica-se que o fator k nas argamassas contendo metacaulino tem um comportamento variável e contrário ao esperado. O fator k evolui conforme o esperado dos 7 aos 28 dias, apresentando valores de k entre 0,9 e 1,4, em média. No entanto, entre os 29 e 180 dias, o fator k para todos os níveis de tensão decresce, o que representa um comportamento anómalo e compromete, a certo nível, os resultados obtidos. Realizando uma análise entre os extremos, nomeadamente, o valor do fator k dos 7 aos 180 dias, observa-se que se unirmos estes resultados, o fator k de modo geral evolui positivamente com a idade. Apresentam-se de seguida os gráficos obtidos na aproximação hiperbólica (Figura 92 à Figura 96).

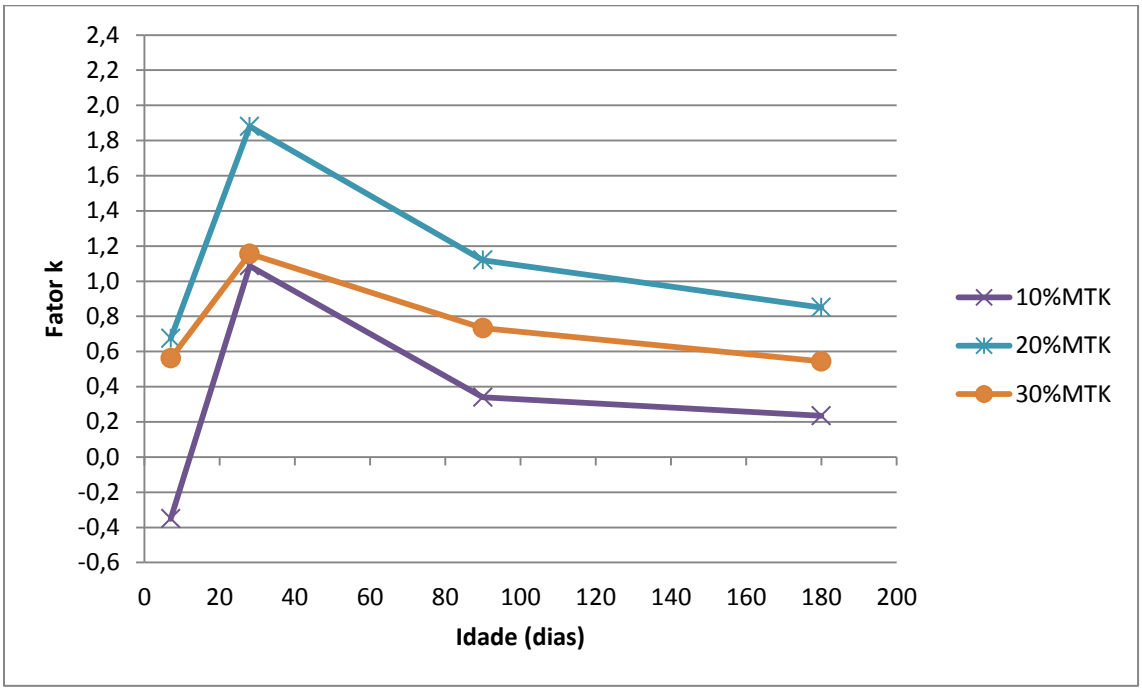


Figura 92: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação hiperbólica.

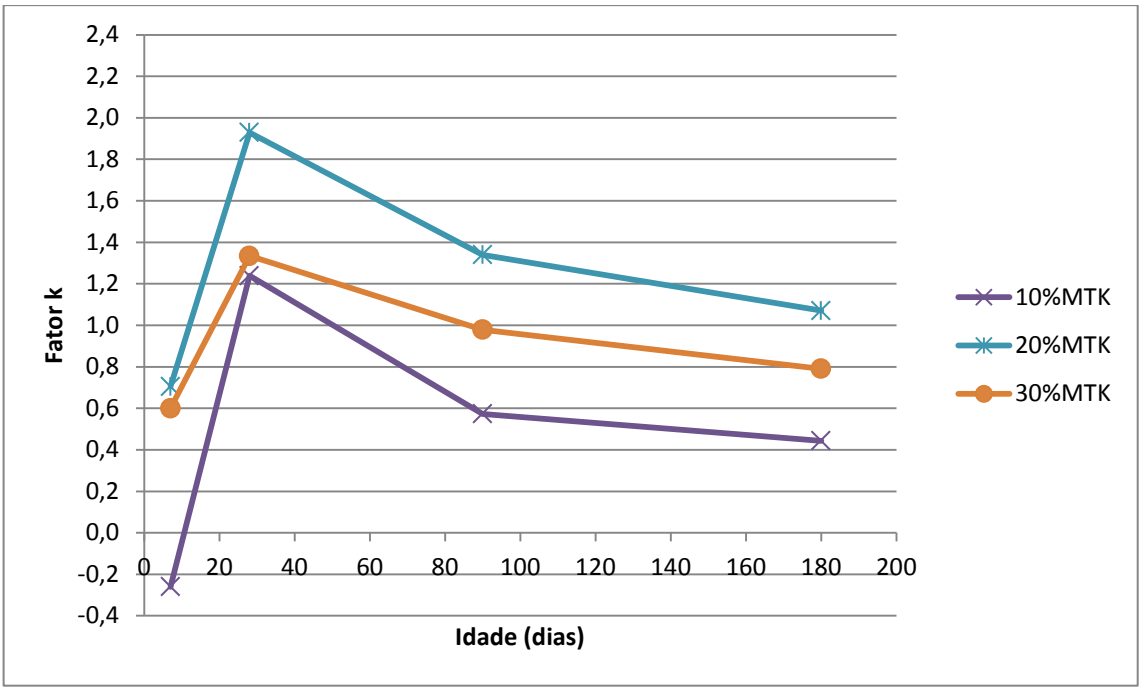


Figura 93: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 30 MPa na aproximação hiperbólica.

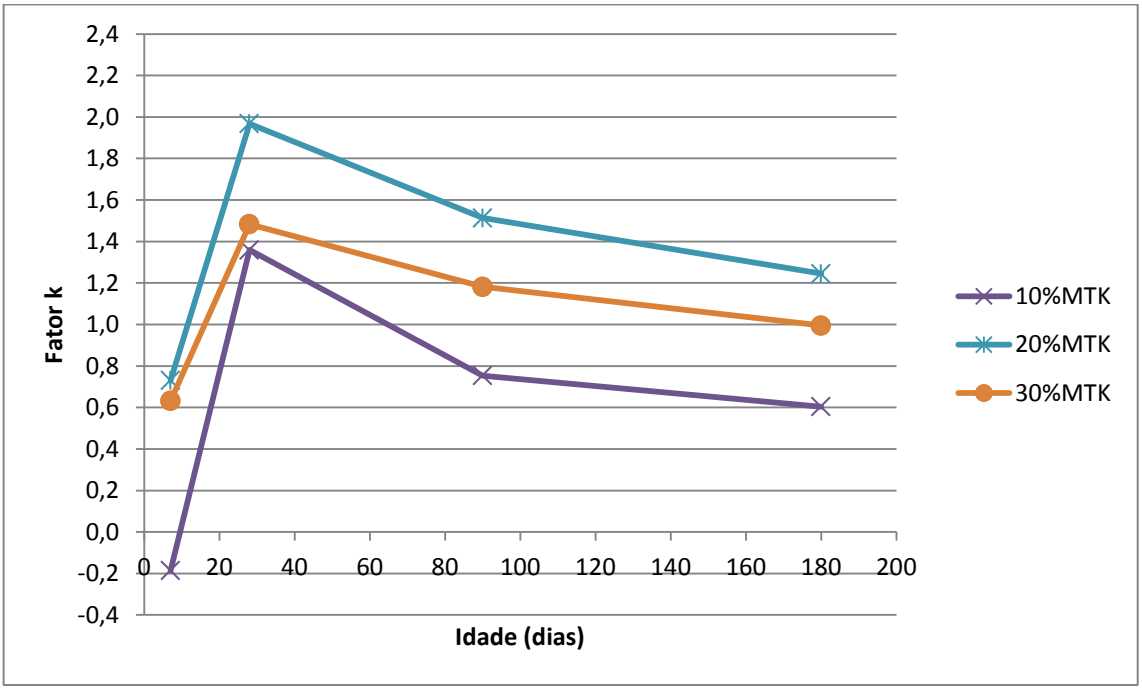


Figura 94: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 35 MPa na aproximação hiperbólica.

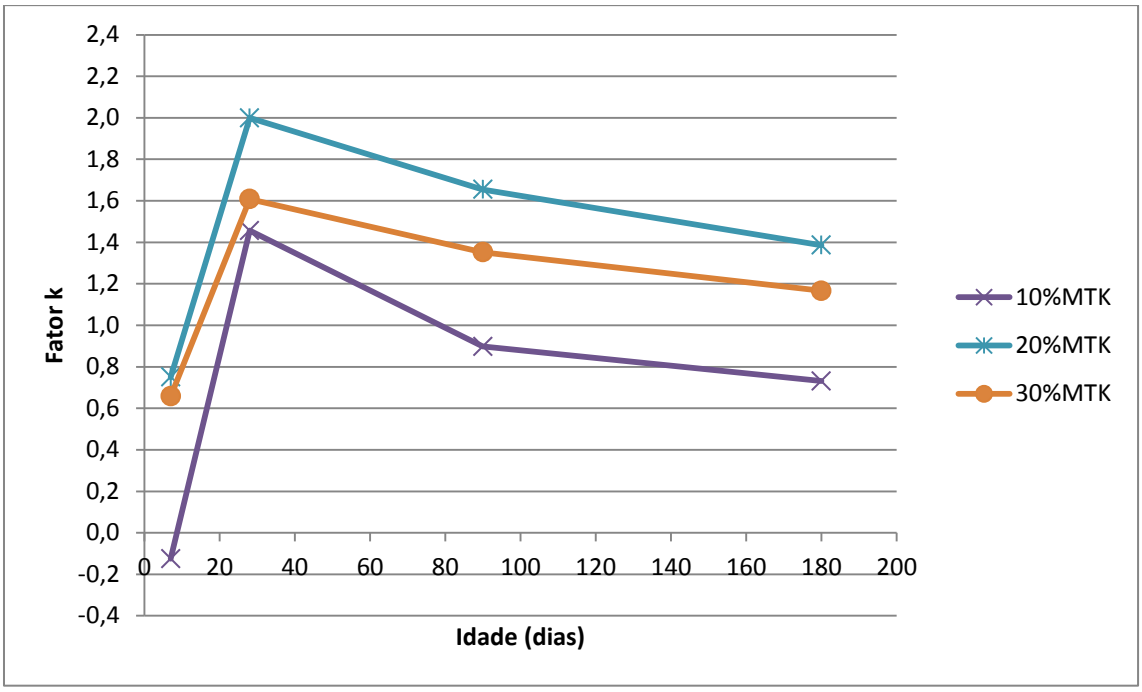


Figura 95: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 40 MPa na aproximação hiperbólica.

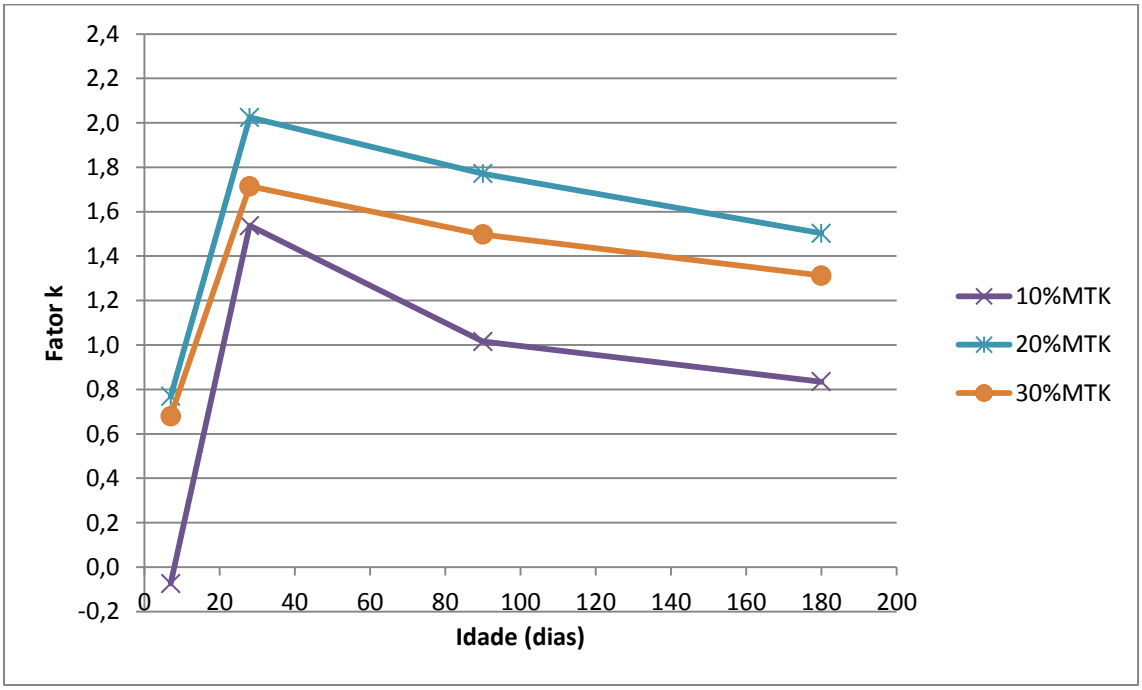


Figura 96: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 45 MPa na aproximação hiperbólica.

Analisando, de modo um geral, o comportamento do fator k ao longo da idade na aproximação hiperbólica, este apresenta igualmente a anomalia verificada na aproximação linear, subindo até aos 28 dias e registando uma queda no seu valor até aos 180 dias, o que não seria previsível que acontecesse. No entanto, como referido anteriormente, uma análise de ponto a ponto, isto é, dos 7 dias aos 180 dias, ignorando o comportamento intermédio, observa-se que o fator k cumpre com o previsto a longo prazo. É de referir que a anomalia encontrada nas argamassas contendo metacaulino é curiosa pois era de esperar uma evolução positiva desde os primeiros dias, que é visível, mas que se devia evidenciar ao longo de todas as idades. Como já tinha sido referido anteriormente, a argamassa 10%MTK apresenta uma anomalia considerável na aproximação hiperbólica com um fator de eficiência negativo aos 7 dias de idade, visível na Figura 92 à Figura 96. Estes valores podem ser considerados pela aproximação linear que apresenta os resultados positivos. Os valores negativos são resultado dos valores obtidos muito próximos das resistências à compressão padrão, cuja aproximação hiperbólica sobrepôs a curva de referência padrão, resultando em fatores de eficiência negativos. Os valores detalhados do fator k, segundo a idade para cada nível de tensão e aproximação, são apresentados em anexo. Uma vez que para ambas as aproximações o nível de tensão de 25 MPa é representativo do comportamento do fator k, apresenta-se, para esse nível, um quadro síntese do fator k para cada aproximação, e os respetivos valores (Quadro 57).

Quadro 57: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica.

Fator k segundo a idade				
Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Aproximação Linear				
10%MTK	0,1	1,0	0,6	0,7
20%MTK	0,9	1,5	1,2	1,1
30%MTK	0,8	1,3	1,1	1,1
Aproximação Hiperbólica				
10%MTK	-0,4	1,1	0,3	0,2
20%MTK	0,7	1,9	1,1	0,9
30%MTK	0,6	1,2	0,7	0,5

Observando o Quadro 57, verifica-se que o fator de eficiência apresenta as observadas anomalias entre os 28 e 90 dias, decrescendo em ambas aproximações. Como referido anteriormente, uma análise direta do k aos 7 dias de idade para os 180 dias e mesmo 90 dias de idade, apresenta um comportamento esperado, com valores de k a subir. Para ambas as aproximações, aos 180 dias, o fator de eficiência mais elevado foi encontrado na argamassa 20%MTK, com um valor de k de 1,1 e 0,9, na aproximação linear e hiperbólica, respetivamente. Acrescenta-se que este resultado está de acordo com as melhores prestações de resistência à compressão obtidas na argamassa 20%MTK.

Quadro 58: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica obtido por M. João Brito (2007).

Fator k segundo a idade		
Idade	**7**	**28**
Aproximação Linear		
20%MTK	1	0,7
Aproximação Hiperbólica		
20%MTK	0,9	-0,4

Comparativamente aos resultados obtidos para o mesmo nível de tensão no programa experimental elaborado por M. João Brito (2007) (Quadro 58), resultou um fator de eficiência aos 7 dias de k= 1 e k=0,9, para a argamassa 20%MTK, na aproximação linear e hiperbólica, respetivamente. Estes valores são próximos dos obtidos no presente estudo (k=0,9 e k=0,7). Aos 28 dias os resultados obtidos no programa experimental realizado por M. João Brito foram k=0,7 e -0,4, na aproximação linear e hiperbólica, respetivamente. Estes valores, encontram-se abaixo dos obtidos no presente estudo, com um k=1,5 e k=1,9, na aproximação linear e hiperbólica, respetivamente. No entanto, é aos 28 dias que os valores se encontram elevados e representam uma anomalia dos resultados, pelo que a sua consideração poderá não ser representativa da evolução do fator k.

4.3.3.2.2 Evolução do fator k com a percentagem de substituição

Apresentam-se na Figura 97 à Figura 106, o comportamento do fator k relativamente à percentagem de substituição do cimento por adição de cinzas volantes, para a aproximação linear e hiperbólica, respetivamente.

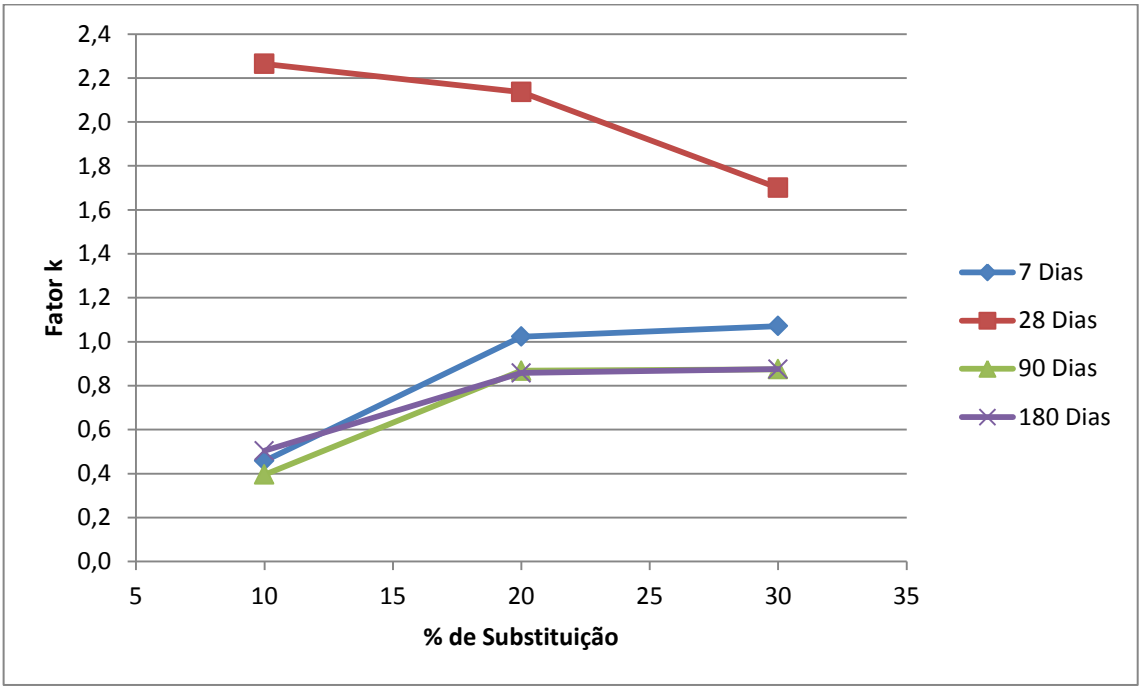


Figura 97: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 5 MPa, na aproximação linear.

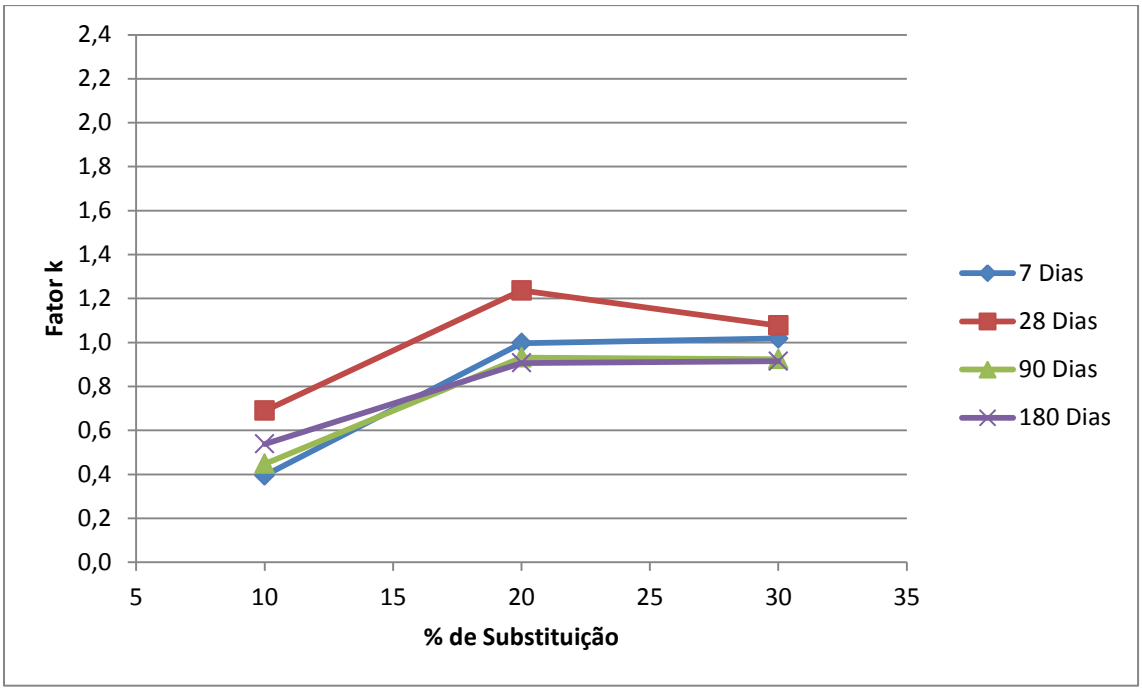


Figura 98: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 10 MPa, na aproximação linear.

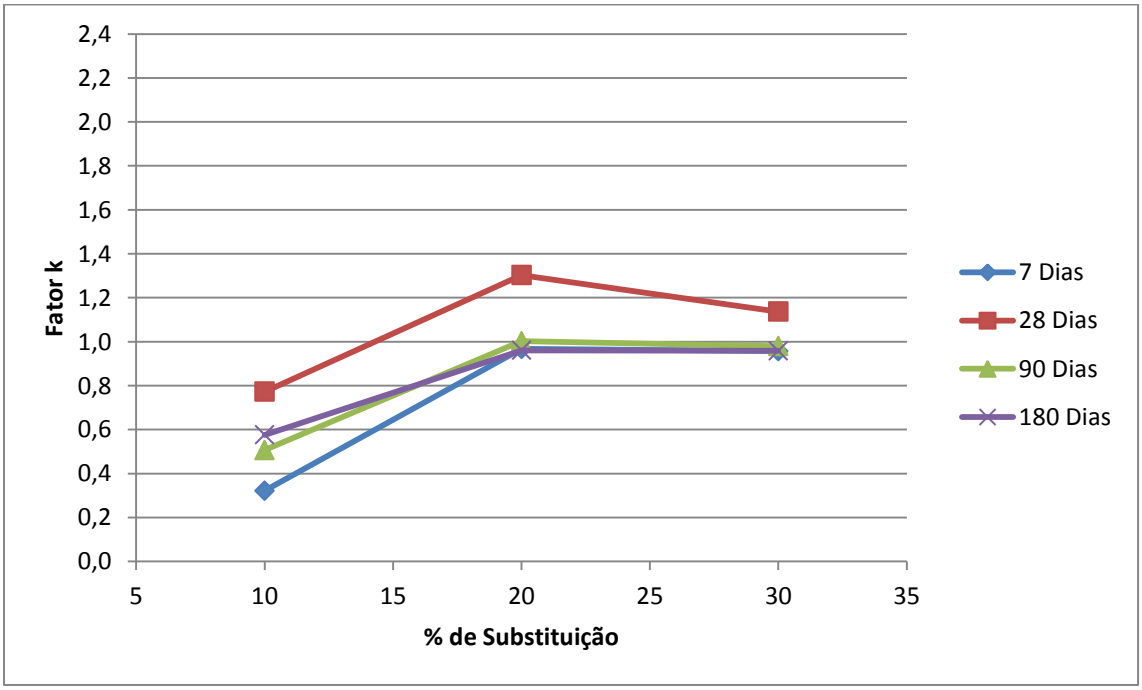


Figura 99: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 15 MPa, na aproximação linear.

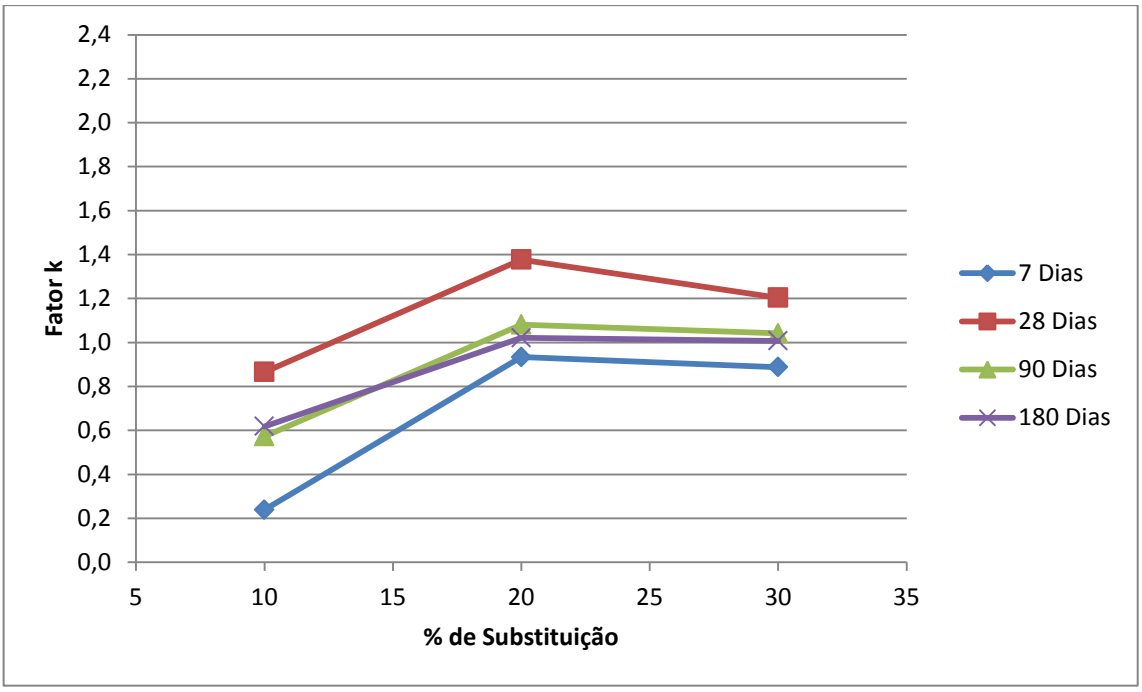


Figura 100: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 20 MPa, na aproximação linear.

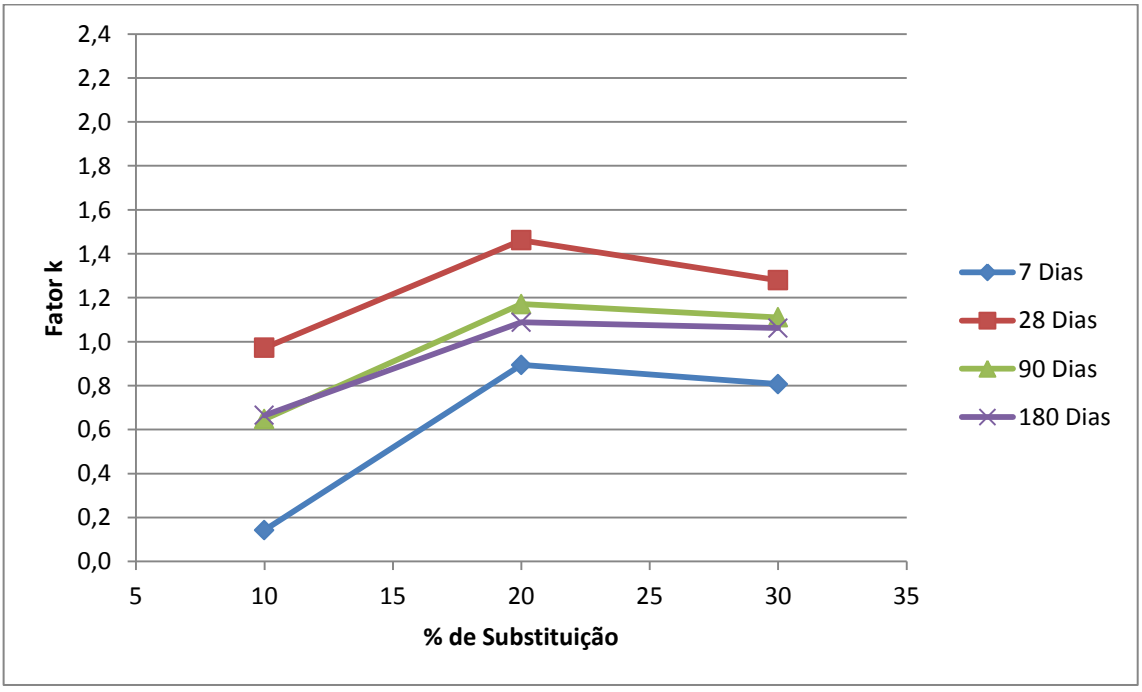


Figura 101: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação linear.

Observando os gráficos considerando a aproximação linear, verifica-se que existe uma tendência de subida do fator de eficiência até aos 20% de substituição de cimento, decrescendo a partir desse ponto. Através dos gráficos (Figura 97 à Figura 101), é possível afirmar que a melhor percentagem de substituição é de 20% de metacaulino, o que realmente apresentou os melhores resultados no ensaio de resistência à compressão. Apresentam-se ainda os gráficos correspondentes à evolução do fator de eficiência segundo a percentagem de substituição, para cada nível de tensão, na aproximação hiperbólica (Figura 102 à Figura 106).

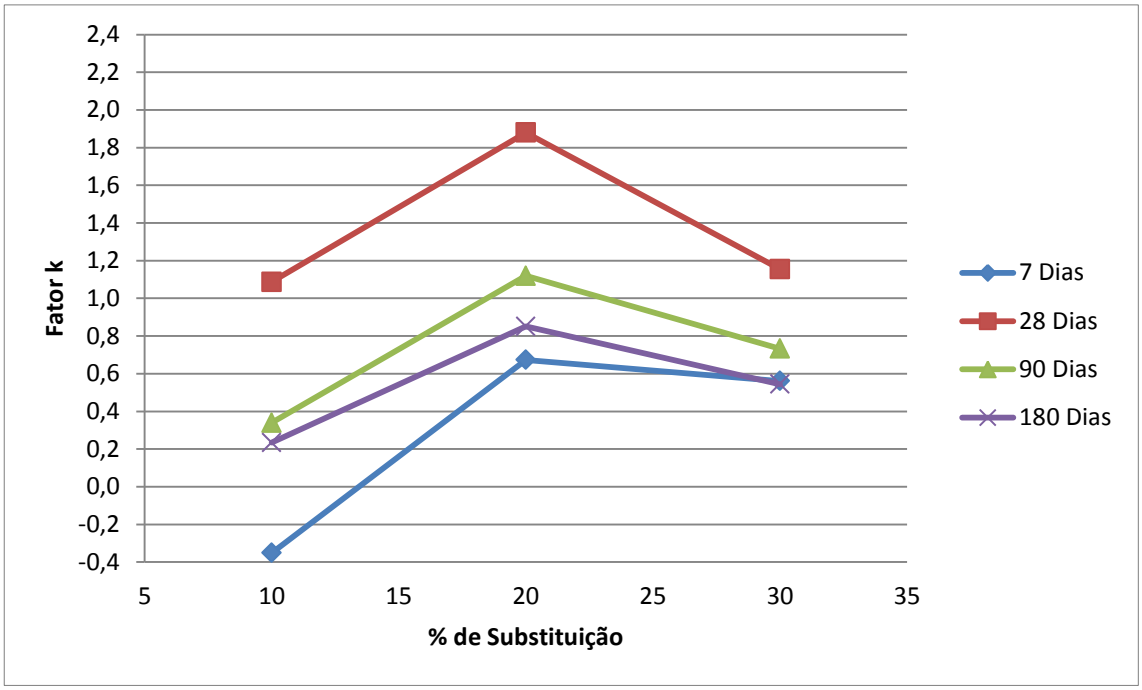


Figura 102: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica.

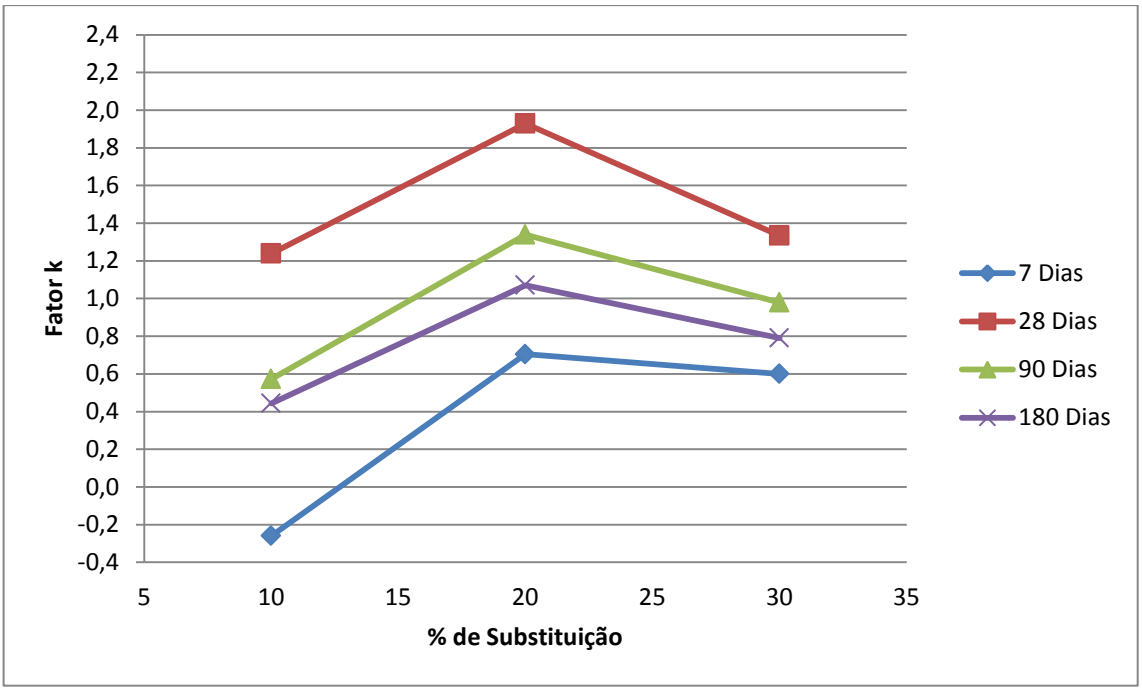


Figura 103: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 30 MPa, na aproximação hiperbólica.

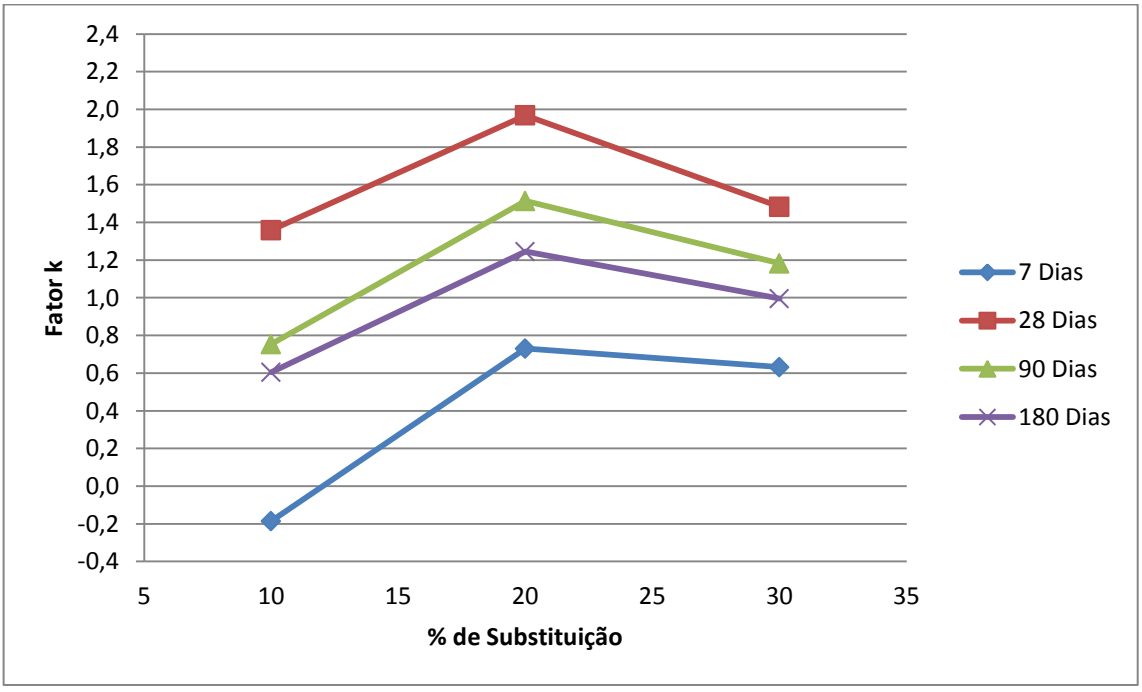


Figura 104: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 35 MPa, na aproximação hiperbólica.

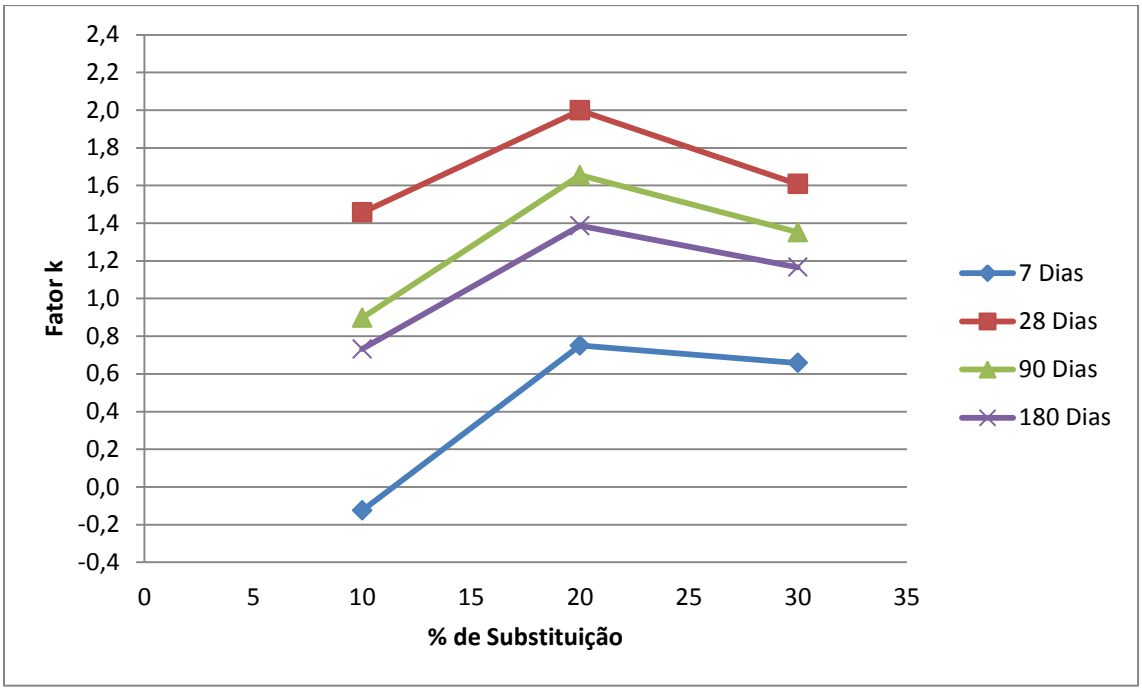


Figura 105: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 40 MPa, na aproximação hiperbólica.

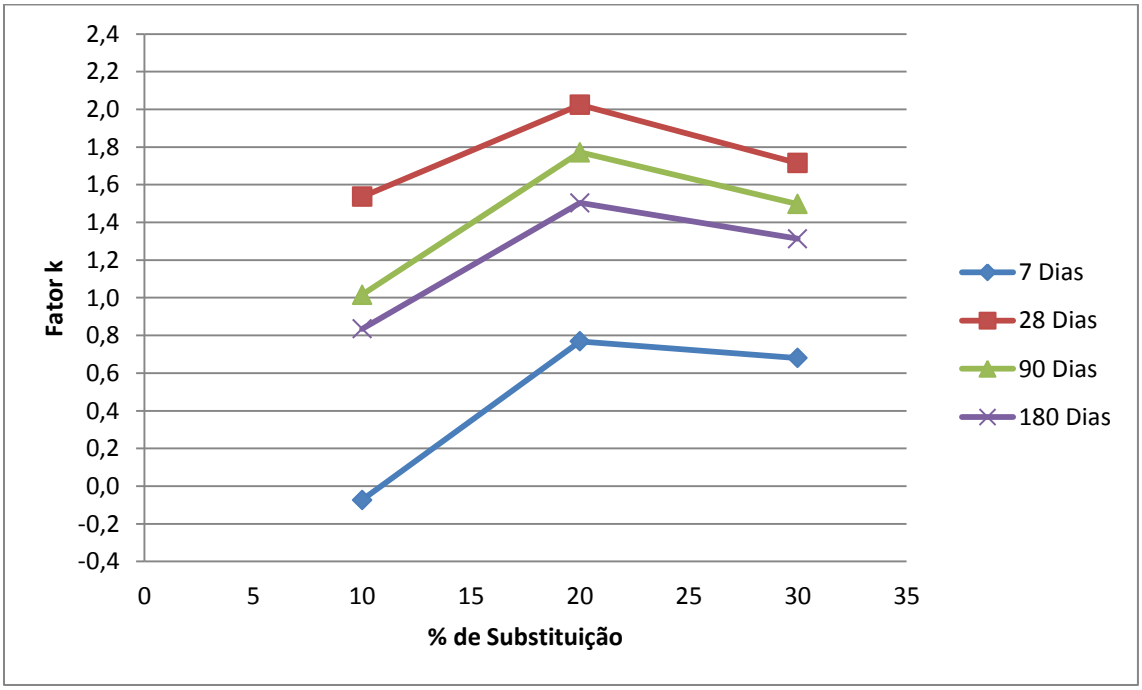


Figura 106: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 45 MPa, na aproximação hiperbólica.

Atendendo aos gráficos apresentados (Figura 102 à Figura 106), para a aproximação hiperbólica, é igualmente percetível que o aumento da percentagem de substituição de cimento por metacaulino na argamassa conduz a fatores de eficiência menores a partir dos 20% de substituição de cimento. De igual forma, é possível afirmar como visto na aproximação linear, que o melhor resultado de substituição se encontra na percentagem de 20%.

4.3.3.2.3 Evolução do fator k com o nível de tensão

Apresentam-se nas Figura 107 à Figura 114, a evolução do fator k com o nível de tensão.

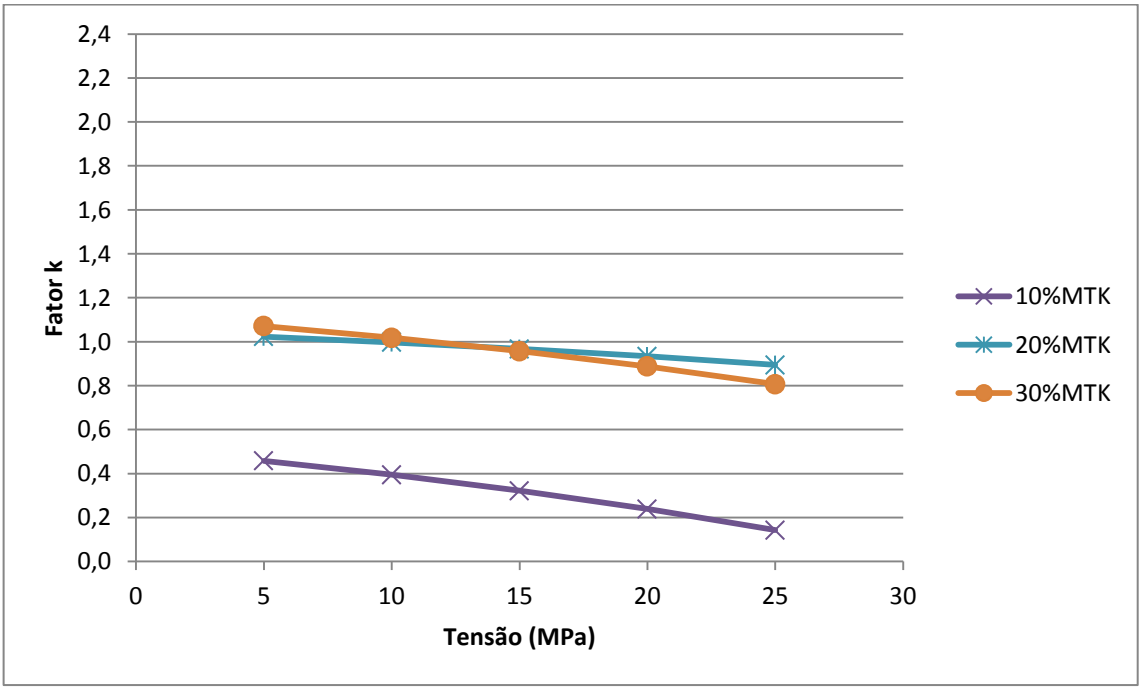


Figura 107: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação linear.

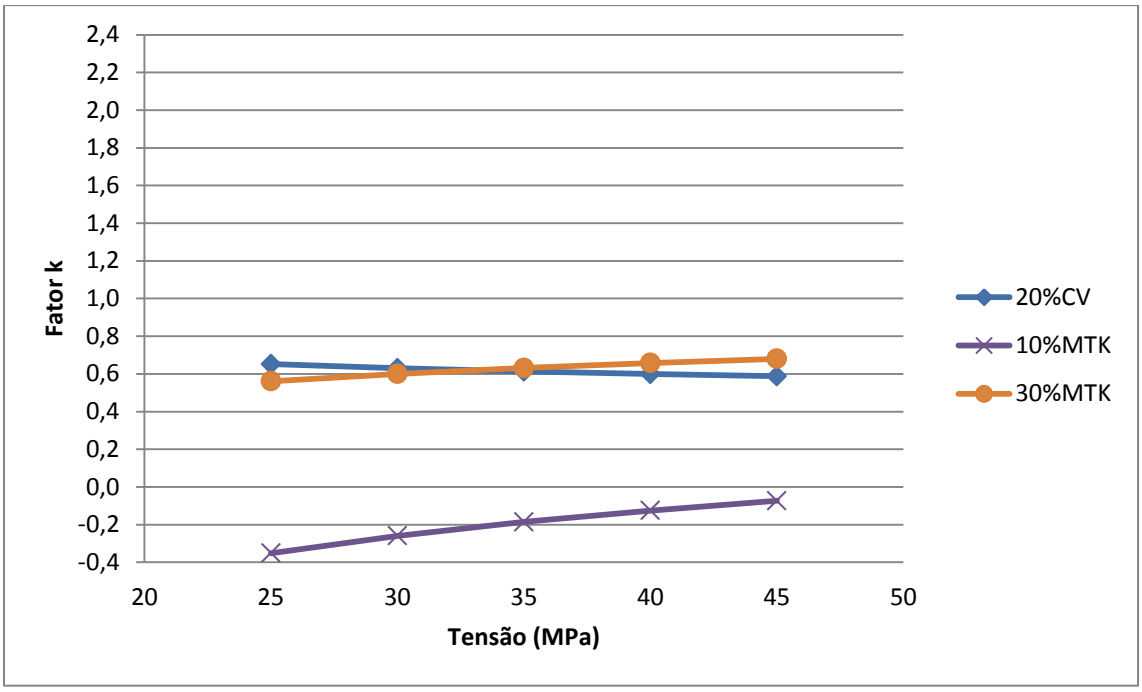


Figura 108: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação hiperbólica.

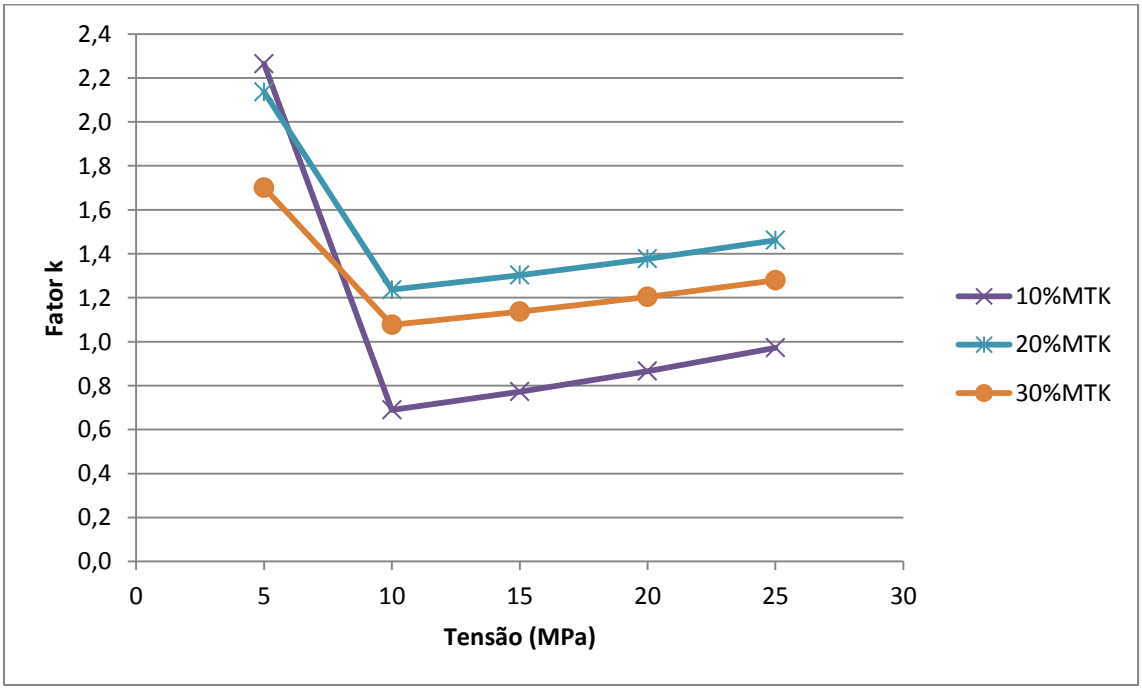


Figura 109: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação linear.

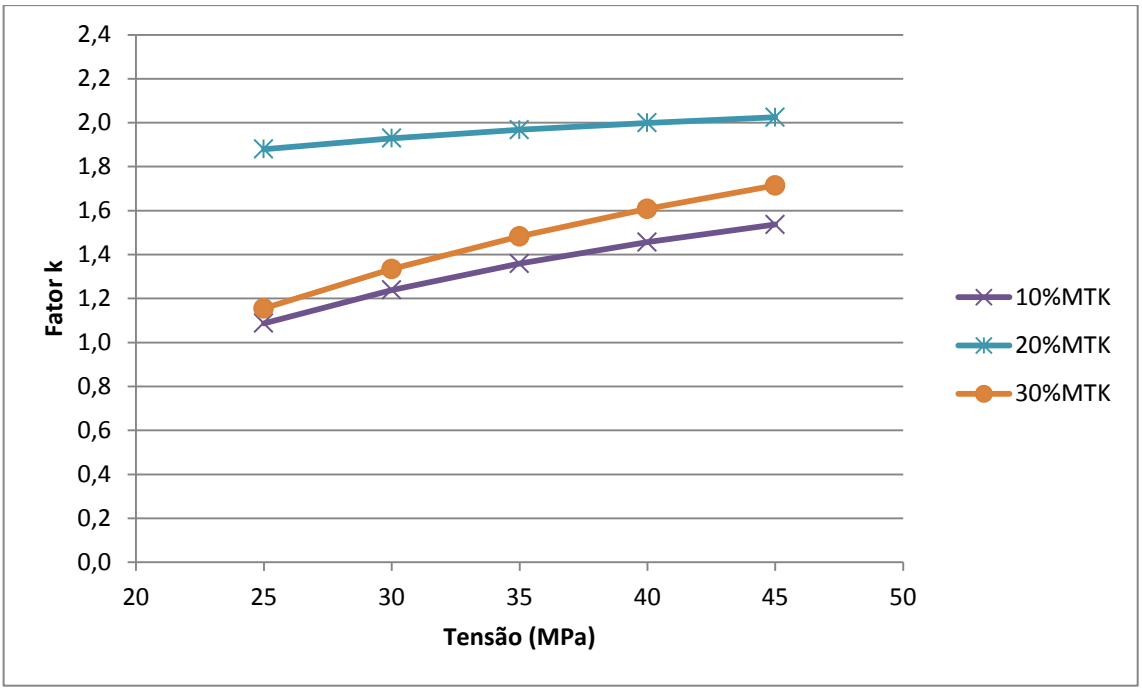


Figura 110: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação hiperbólica.

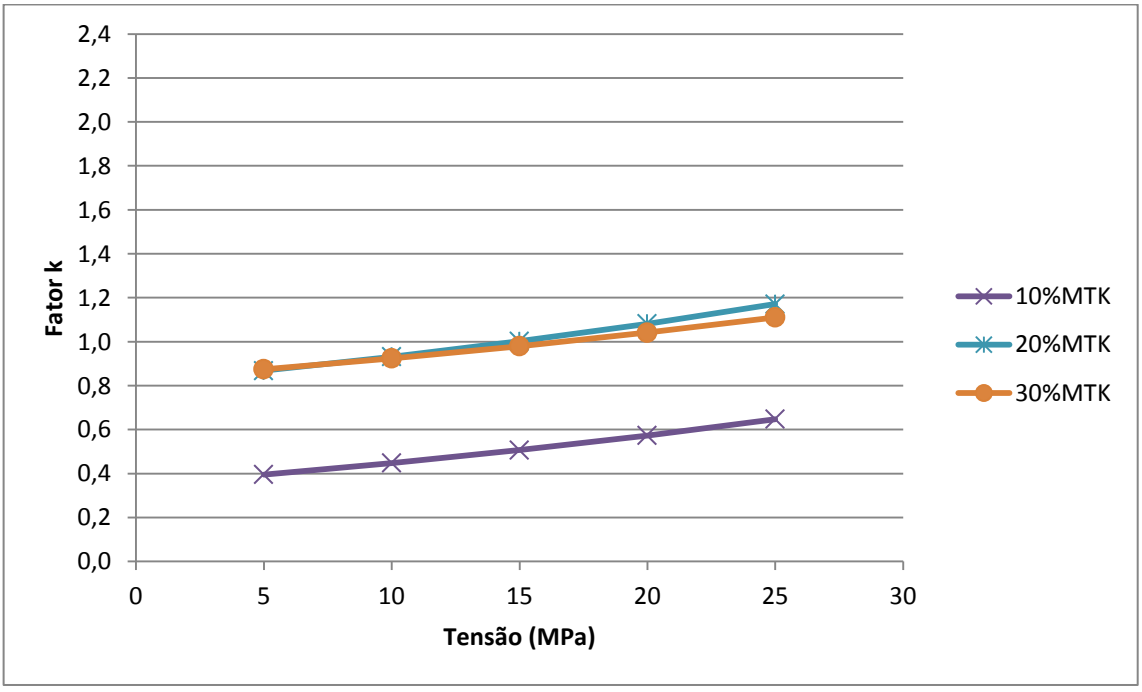


Figura 111: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação linear.

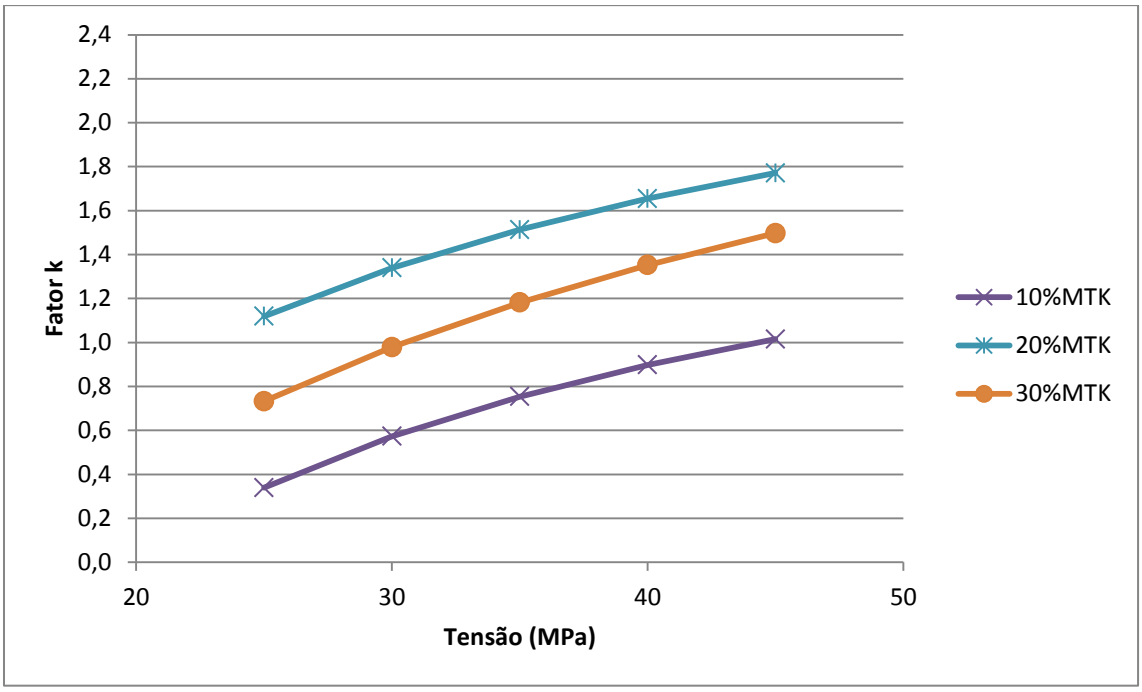


Figura 112: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação hiperbólica.

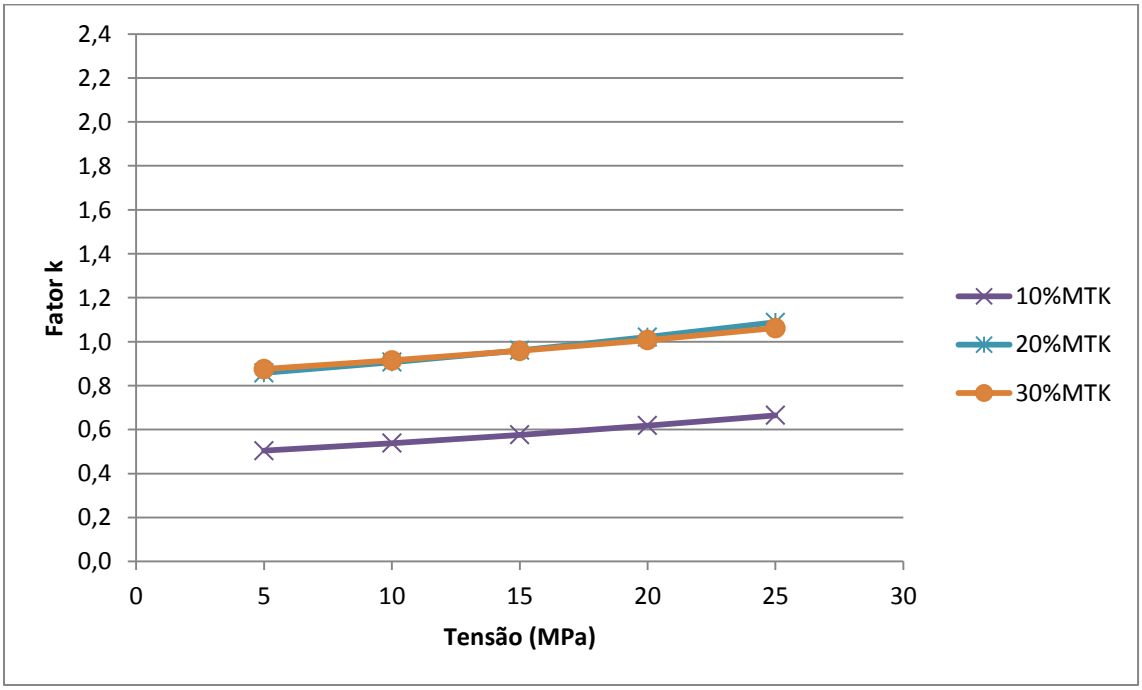


Figura 113: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação linear.

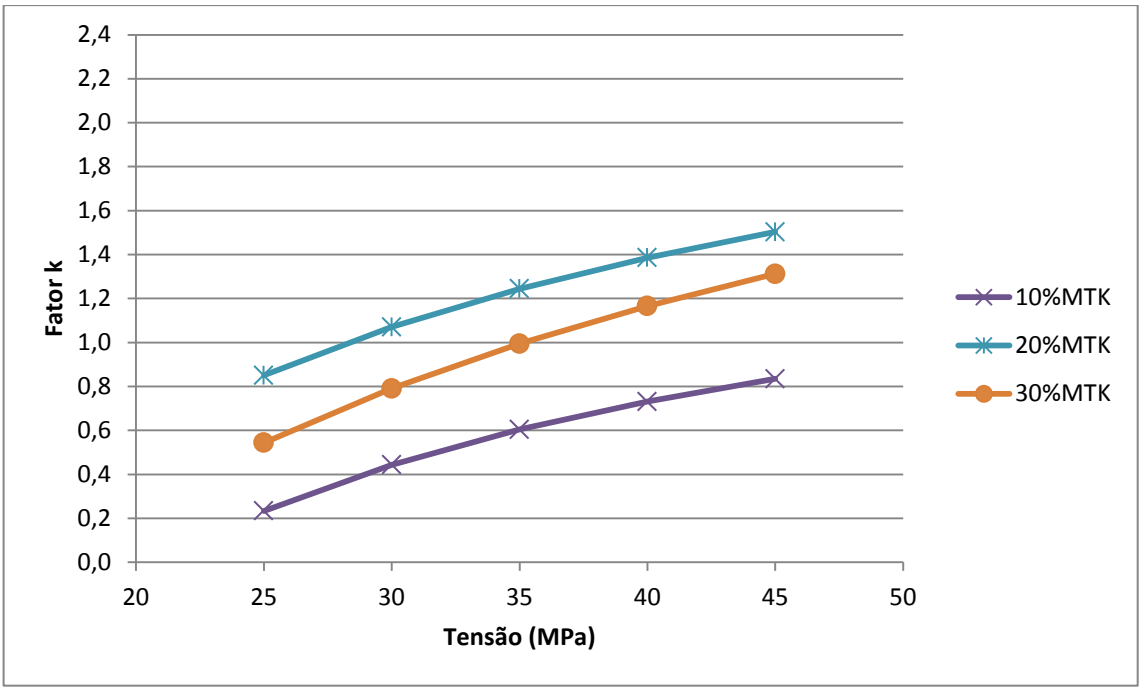


Figura 114: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação hiperbólica.

Observando os resultados obtidos, verifica-se que o aumento do nível de tensão provocou um ligeiro crescimento do fator k. Este crescimento do fator k em relação ao aumento do nível de tensão é fruto das aproximações realizadas que representam curvas de comportamento da resistência à compressão próximas da curva de aproximação do comportamento da resistência à compressão padrão, o que torna o nível de tensão mais sensível em relação às argamassas contendo cinzas volantes. A variação do fator k com o nível de tensão é mais notória na aproximação hiperbólica, com base no referido anteriormente. A sensibilidade do nível de tensão é, com base nos resultados obtidos, um comportamento que deve ser encorajado avaliar para uma uniformização de avaliação do fator k.

4.3.3.3 Análise das argamassas contendo cinzas volantes e metacaulino

Apresenta-se no Quadro 59 ao Quadro 66, os resultados da eficiência do fator k obtidos para a aproximação linear e hiperbólica, para as argamassas contendo cinzas volantes e metacaulino em simultâneo como substituição parcial do cimento, por cada nível de tensão.

Quadro 59: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 7 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
10%CV+10%MTK	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
30%CV+10%MTK	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
50%CV+10%MTK	1,6	1,5	1,4	1,3	1,1

Quadro 60: Fator de eficiência k aos 7 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 7 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
10%CV+10%MTK	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
30%CV+10%MTK	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
50%CV+10%MTK	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3

Quadro 61: Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 28 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
10%CV+10%MTK	1,9	1,0	1,0	1,0	0,9
30%CV+10%MTK	1,7	1,1	1,1	1,1	1,1
50%CV+10%MTK	2,1	1,6	1,6	1,5	1,5

Quadro 62:Fator de eficiência k aos 28 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 28 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
10%CV+10%MTK	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9
30%CV+10%MTK	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2
50%CV+10%MTK	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5

Quadro 63: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 90 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
10%CV+10%MTK	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2
30%CV+10%MTK	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
50%CV+10%MTK	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6

Quadro 64: Fator de eficiência k aos 90 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 90 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
10%CV+10%MTK	1,2	1,1	1,1	1,0	1
30%CV+10%MTK	0,7	0,9	1,1	1,2	1,3
50%CV+10%MTK	0,9	1,2	1,3	1,5	1,6

Quadro 65: Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação linear.

Fator de Eficiência k – 180 dias					
A. Linear					
fc (MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**
10%CV+10%MTK	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
30%CV+10%MTK	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
50%CV+10%MTK	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8

Quadro 66:Fator de eficiência k aos 180 dias na aproximação hiperbólica.

Fator de Eficiência k – 180 dias					
A. Hiperbólica					
fc (MPa)	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**
10%CV+10%MTK	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4
30%CV+10%MTK	0,7	0,9	1,1	1,2	1,3
50%CV+10%MTK	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o fator k apresenta um comportamento variável nas diferentes composições. É de notar que se trata de composições com mistura de adições com diferentes comportamentos na substituição do cimento, que podem justificar a variação dos valores obtidos. O efeito do metacaulino é conhecido por se manifestar a idades iniciais enquanto as cinzas volantes tem o seu efeito em idades a partir dos 90 dias, como verificado na bibliografia e nos resultados obtidos. A mistura foi igualmente pensada com o propósito de análise das propriedades das adições, isto é, se o metacaulino permitia obter boas prestações iniciais enquanto as cinzas volantes potenciassem um acréscimo de resistência a longo prazo. Apresenta-se da Figura 115 à Figura 124, os gráficos de evolução do fator k ao longo da idade, para cada nível de tensão e respetiva aproximação a fim de uma adequada análise dos resultados obtidos.

4.3.3.3.1 Evolução do fator k com a idade

Neste subcapítulo são apresentados os gráficos de evolução do fator de eficiência relativamente à idade, para a aproximação linear e hiperbólica, respetivamente. É de esperar que a o k aumente com idade com base na revisão bibliográfica realizada. É ainda de observar se o metacaulino permite uma evolução favorável nos primeiros dias de idade, esperando-se que a partir dos 90 dias as cinzas volantes permitam ainda um acréscimo de eficiência relativamente à argamassa padrão. São apresentados as Figura 115 à Figura 124, com os gráficos de evolução do fator k para os respetivos níveis de tensão, segundo cada aproximação.

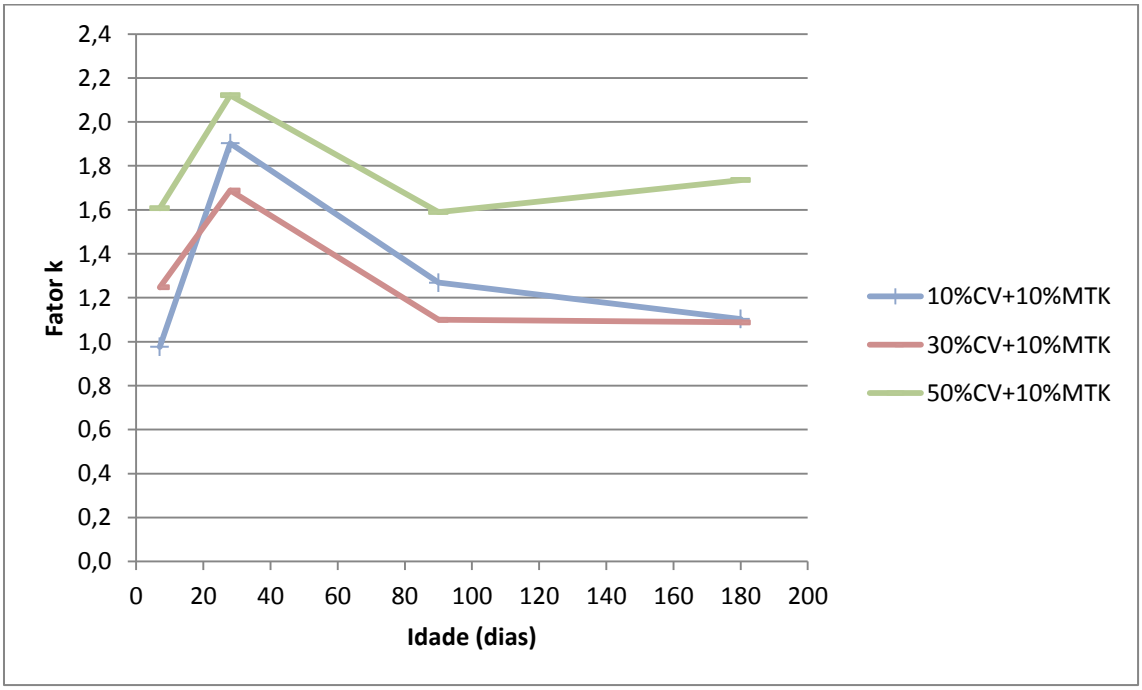


Figura 115: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 5 MPa na aproximação linear.

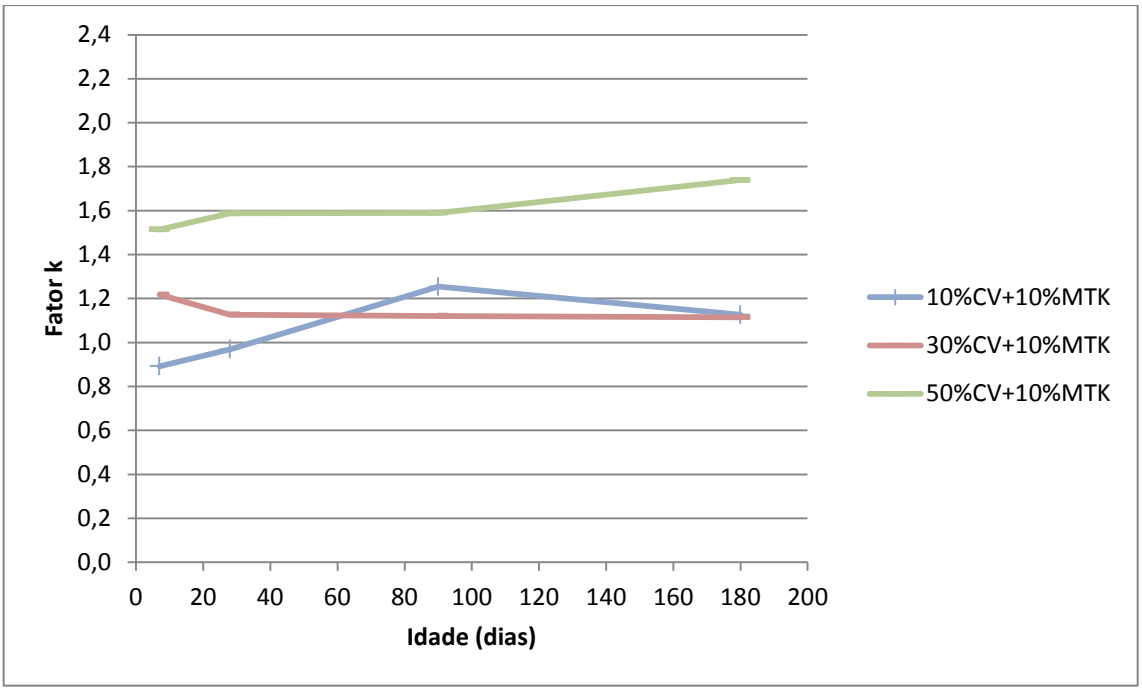


Figura 116: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 10 MPa na aproximação linear.

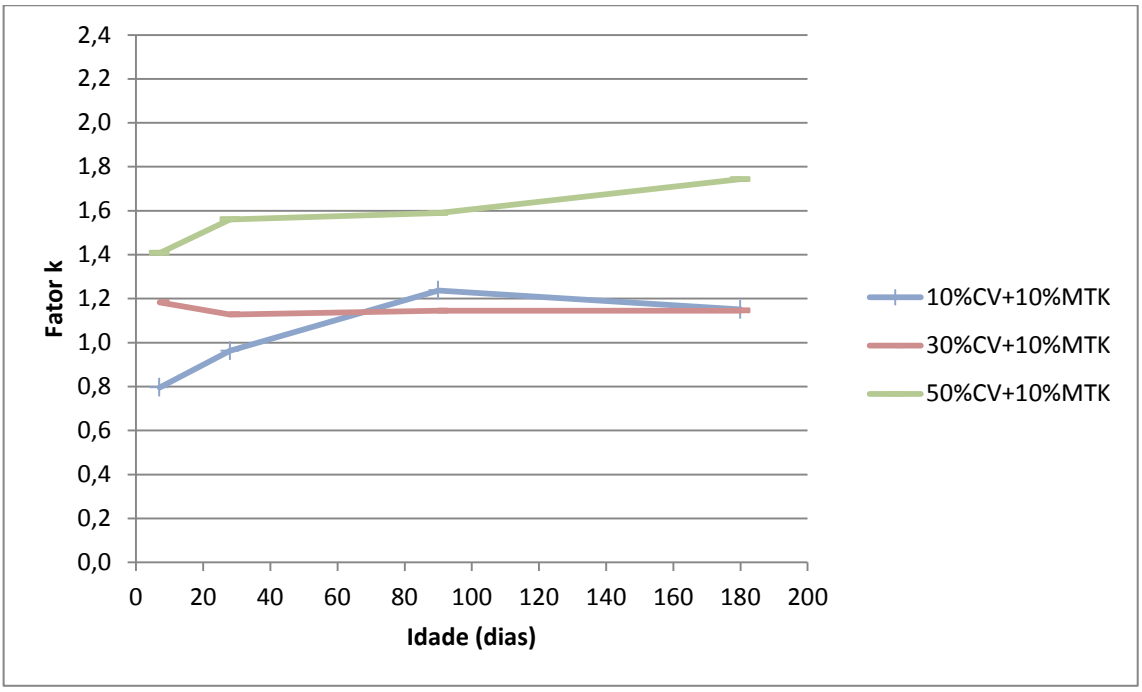


Figura 117: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 15 MPa na aproximação linear.

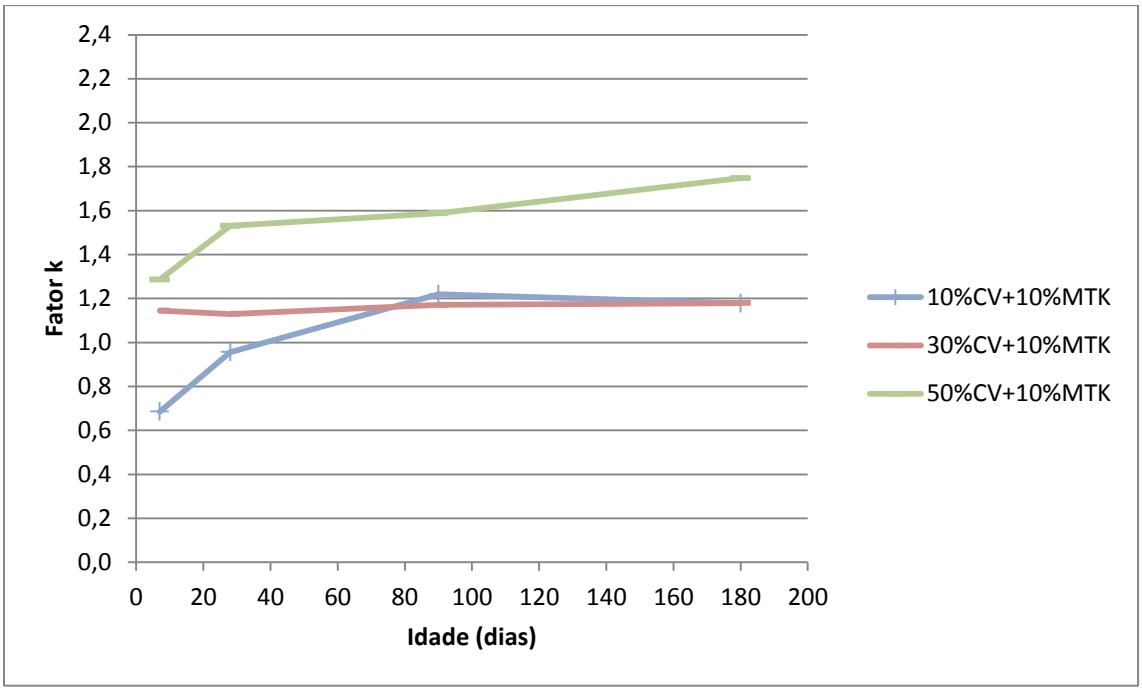


Figura 118: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 20 MPa na aproximação linear.

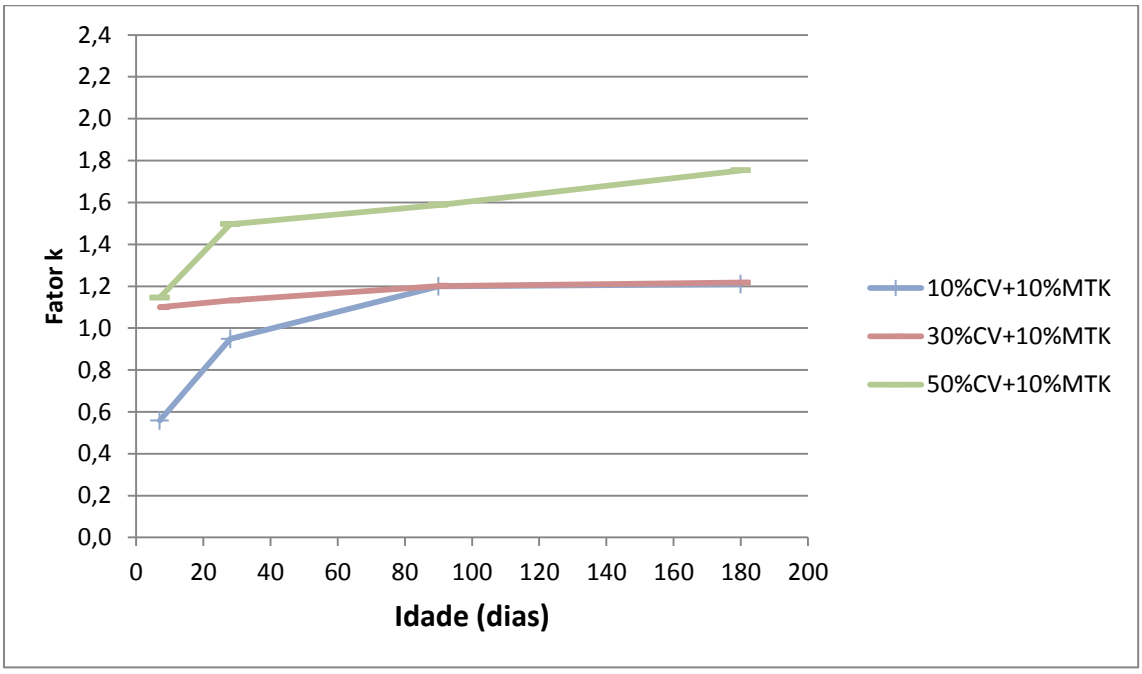


Figura 119: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação linear.

Verifica-se nos resultados obtidos do fator k através da aproximação linear ao longo do tempo que, de forma geral, a evolução de k é positiva salvo a sua evolução para o nível de tensão de 5 MPa (Figura 115) em que o valor de k vai diminuindo ao longo da idade, terminando ligeiramente abaixo do k aos 7 dias. Numa análise dos 7 aos 180 dias, sem consideração das idades intermédias, verifica-se para as restantes tensões uma subida da eficiência das adições, o que seria de esperar a longo prazo. A inclusão de metacaulino proporciona valores de k em ascensão às primeiras idades, estabilizando aos 90 dias, subindo ligeiramente até aos 180 dias. Apresentam-se na Figura 120 à Figura 124 a evolução de k segundo a idade para as respetivas tensões definidas, na aproximação hiperbólica.

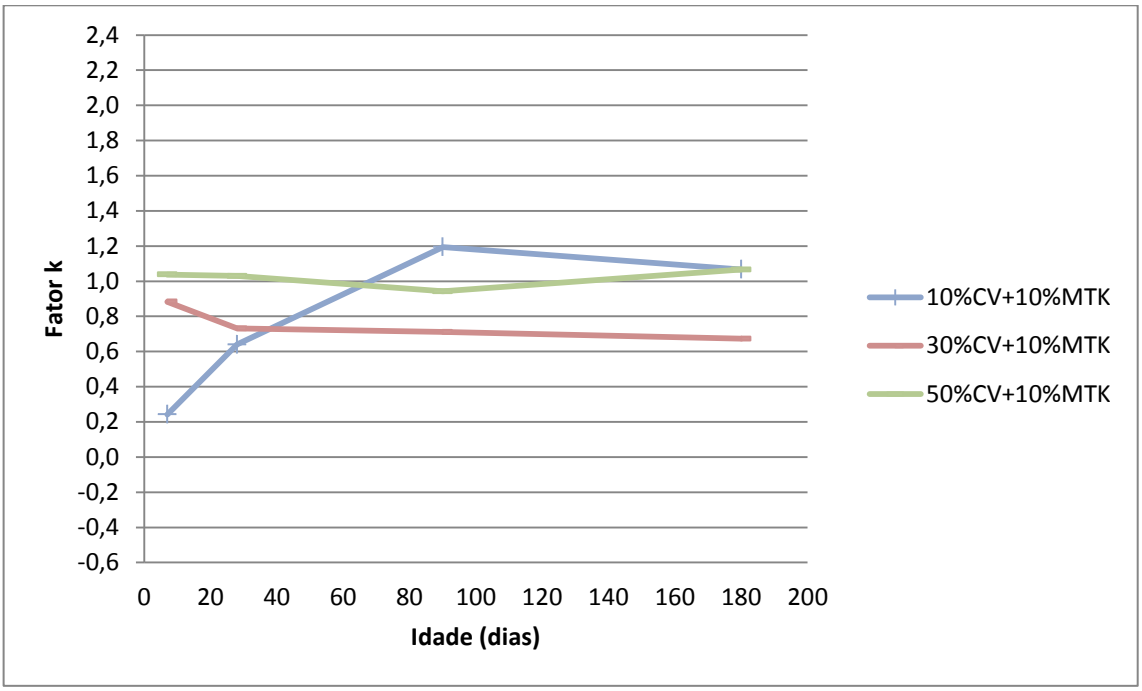


Figura 120: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 25 MPa na aproximação hiperbólica.

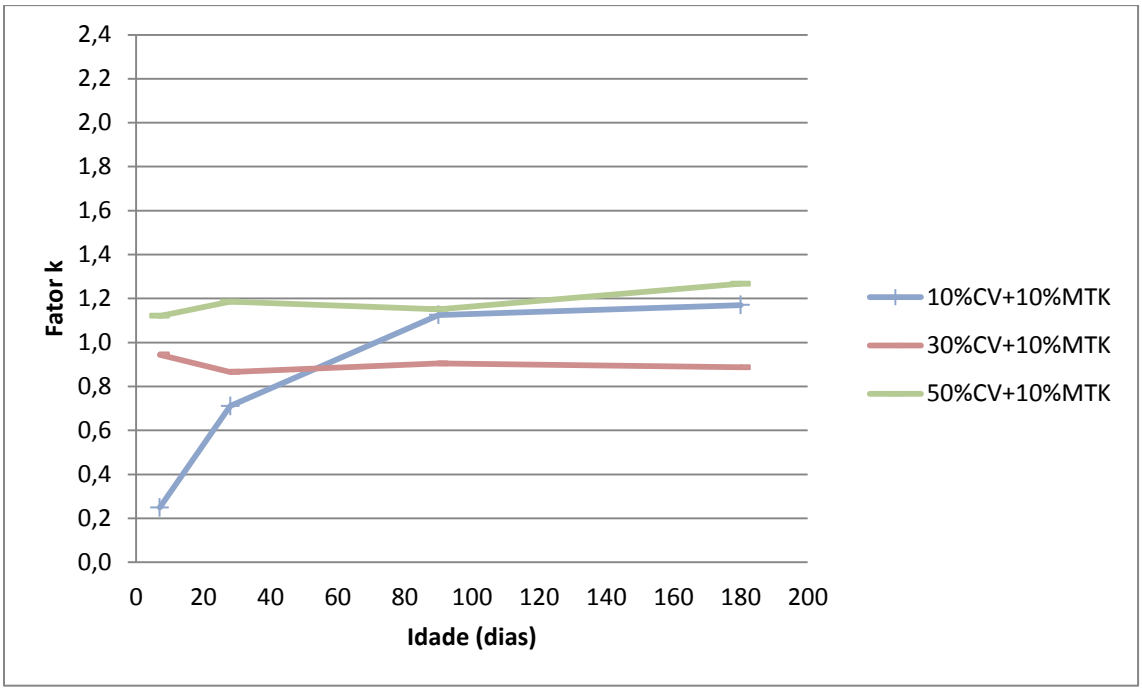


Figura 121: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 30 MPa na aproximação hiperbólica.

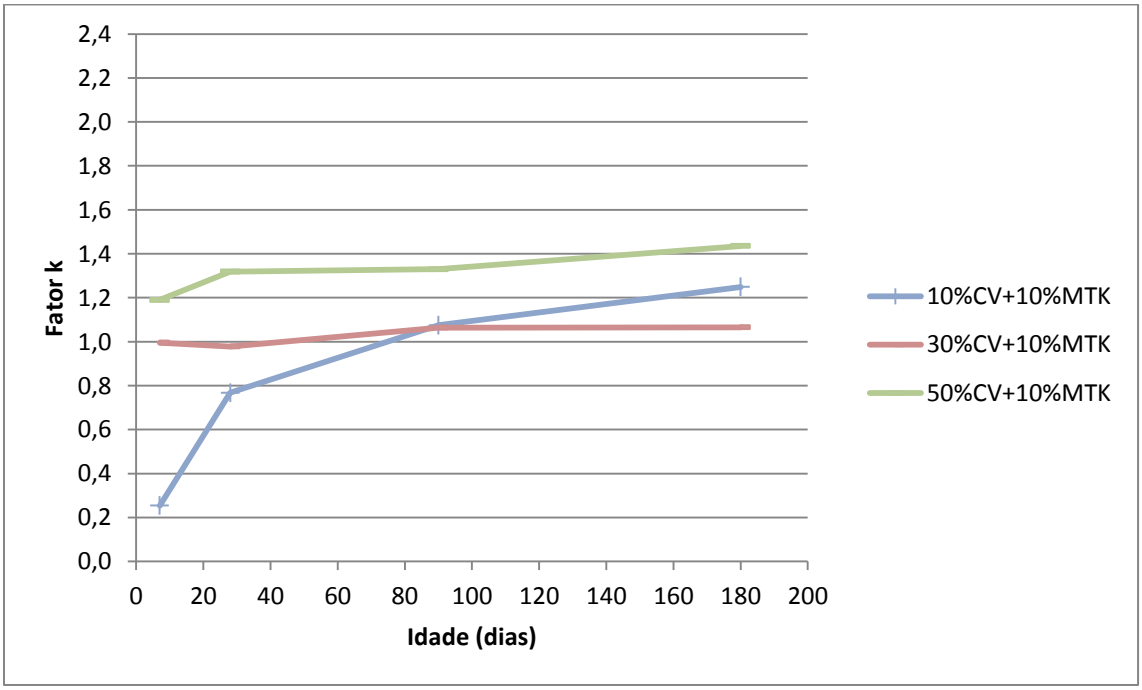


Figura 122: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 35 MPa na aproximação hiperbólica.

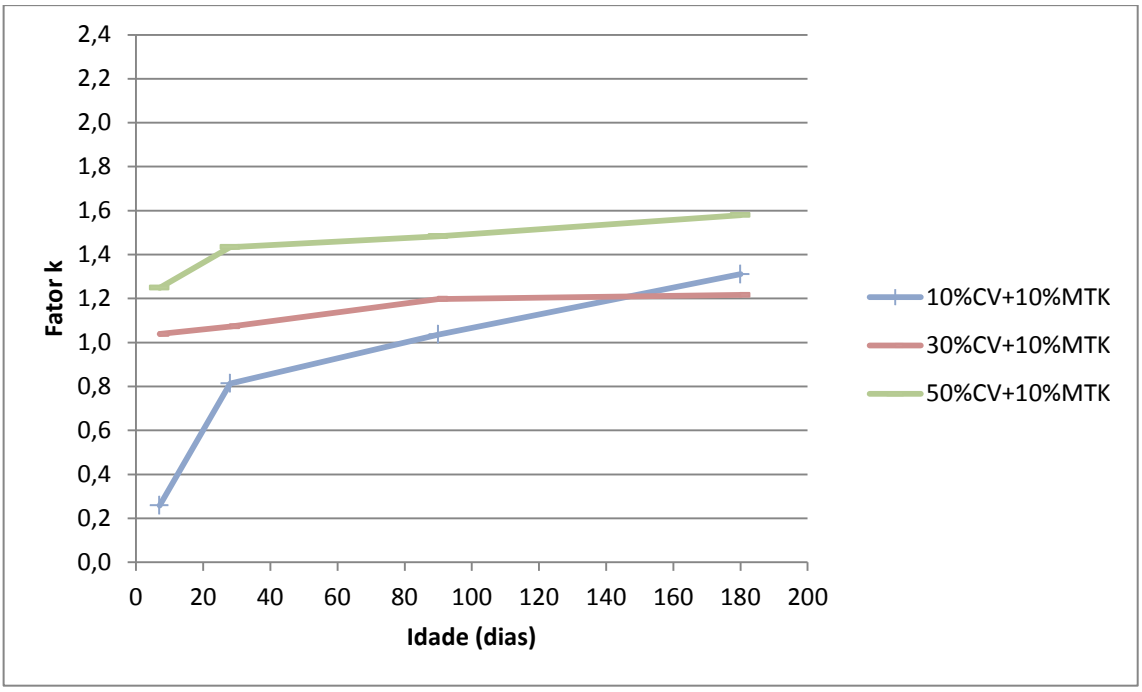


Figura 123: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 40 MPa na aproximação hiperbólica.

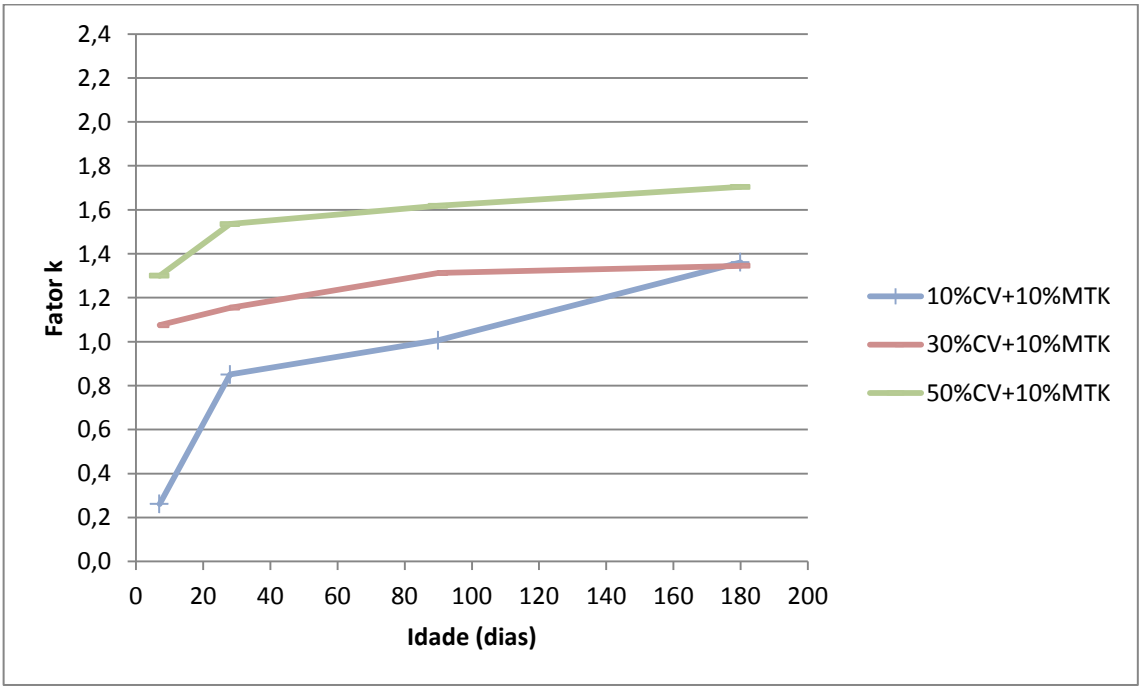


Figura 124: Evolução do fator k com a idade para a tensão de 45 MPa na aproximação hiperbólica.

Analisando, de um modo geral o comportamento do fator k ao longo da idade na aproximação hiperbólica (Figura 120 a Figura 124), este tende a subir, o que teoricamente seria previsível. No entanto, no nível de tensão de 25 MPa, este decresce de k=0,9 a k=0,7 na argamassa 30%CV+10%MTK, o que não seria de esperar. No nível de tensão de 30 MPa o resultado de k é praticamente constante ao longo do tempo, o que é igualmente pertinente. Relativamente às restantes argamassas e restantes níveis de tensão, o fator k dos 7 aos 180 dias de idade apresenta uma evolução positiva, o que pode concluir que o fator k efetivamente aumenta com a idade. Os valores detalhados do fator k segundo a idade para cada nível de tensão e aproximação, são apresentados em anexo. Uma vez que foi tomado o nível de tensão de 25 MPa como representativo do comportamento do fator k, apresenta-se para o mesmo um quadro síntese do fator k para cada aproximação, e os respetivos valores (Quadro 67).

Quadro 67: Fator k segundo a idade para o nível de tensão de 25 MPa nas aproximações linear e hiperbólica.

Fator k segundo a idade				
Idade	**7**	**28**	**90**	**180**
Aproximação Linear				
10%CV+10%MTK	0,6	0,9	1,2	1,2
30%CV+10%MTK	1,1	1,1	1,2	1,2
50%CV+10%MTK	1,1	1,5	1,6	1,8
Aproximação Hiperbólica				
10%CV+10%MTK	0,2	0,6	1,2	1,1
30%CV+10%MTK	0,9	0,7	0,7	0,7
50%CV+10%MTK	1,0	1,0	0,9	1,1

Observando o Quadro 67, verifica-se efetivamente um evolução positiva, de modo geral, do fator k. No entanto, a argamassa 30%CV+10%MTK apresenta um valor de k inferior aos 180 dias comparado aos 7 dias, o que é inesperado. A evolução foi mais notória na argamassa 10%CV+10%MTK, que constitui uma percentagem de substituição de 20%, e que no decorrer do estudo nas diversas argamassas apresenta bons resultados. É igualmente de salientar que a percentagem de substituição de 20% vai de encontro às indicações normativas da NP 206-1, uma vez que a razão da adição/cimento é inferior a 0,33. É de ressalvar, no entanto, que os resultados obtidos com as restantes argamassas são bastante satisfatórias e

bem superiores à eficiência de k=0,4 prevista uma vez cumpridas as disposições normativas da NP 206-1, ainda que o metacaulino não seja referido na norma. Como referido, a ausência de disposições normativas para o uso de adições de MTK, CV+MTK assim como valores para as percentagens de substituição superiores a 20% é uma natural motivação pela ausência de forma geral de informação. Observando a mistura com maior percentagem de substituição, 50%CV+10%MTK, que representa uma substituição de cimento de 60%, o valor de k é elevado aos 180 dias com um k=1,8 na aproximação linear, e 1,1 na aproximação hiperbólica. Considerando o comportamento hiperbólico da resistência à compressão nas argamassas, o valor de k=1,1 é encorajador de reavaliação uma vez que representa uma redução substancial de cimento. O valor de k iguala o valor de eficiência obtido nas argamassas 10%CV+10%MTK. É apresentado, no final do presente Capítulo, um quadro (Quadro 68) que permitirá a comparação dos valores de k resultantes entre os diferentes tipos de composições de argamassas, o que será de interesse avaliar uma vez que a presente composição equivale em quantidade várias amassaduras, nomeadamente, 20%CV, 20%MTK, 40%CV e 60%CV.

4.3.3.3.2 Evolução do fator k com a percentagem de substituição

Apresentam-se na Figura 125 à Figura 134 o comportamento do fator k relativamente à percentagem de substituição do cimento por adição simultânea de cinzas volantes e metacaulino, para a aproximação linear e hiperbólica, respetivamente.

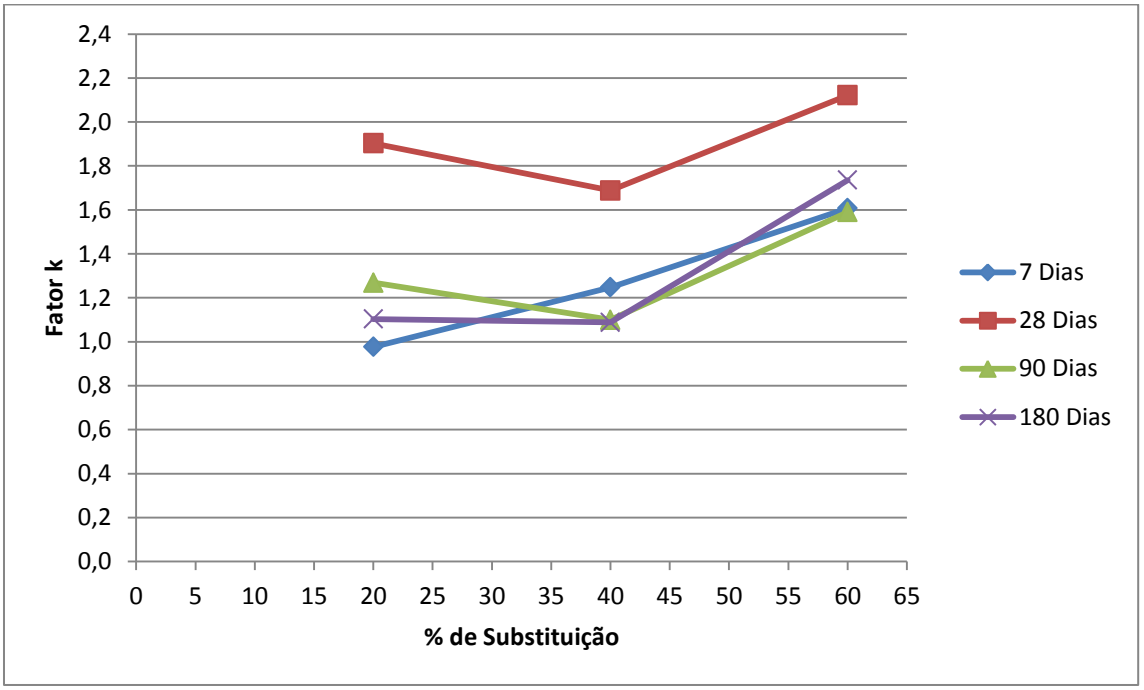


Figura 125: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 5 MPa, na aproximação linear.

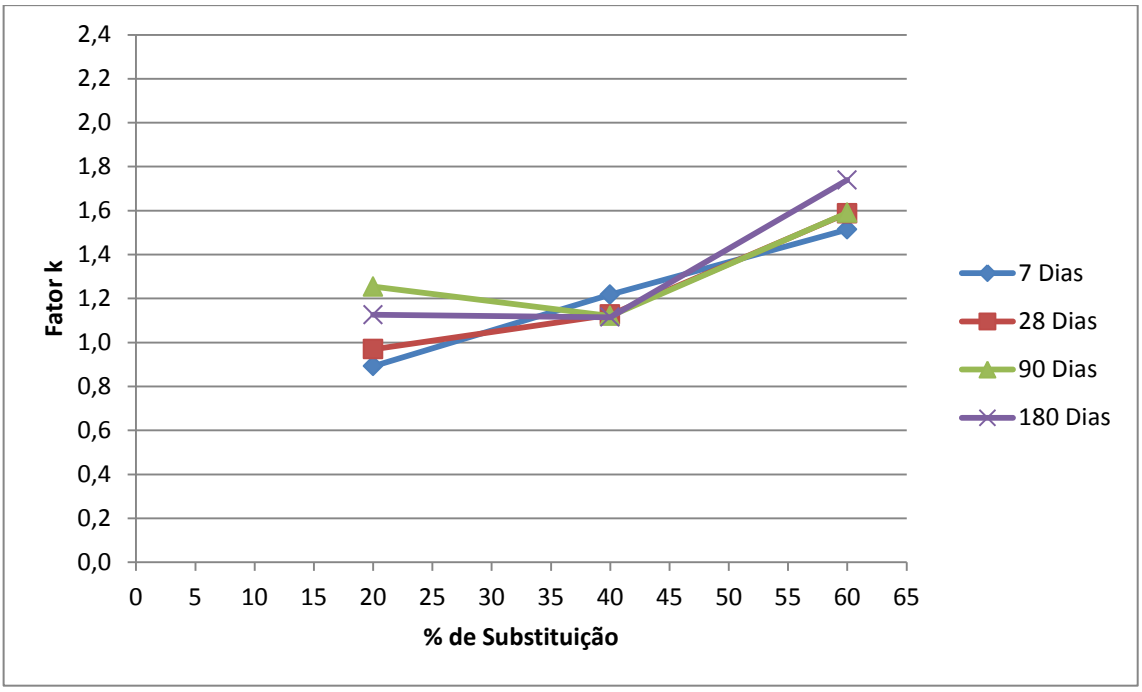


Figura 126: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 10 MPa, na aproximação linear.

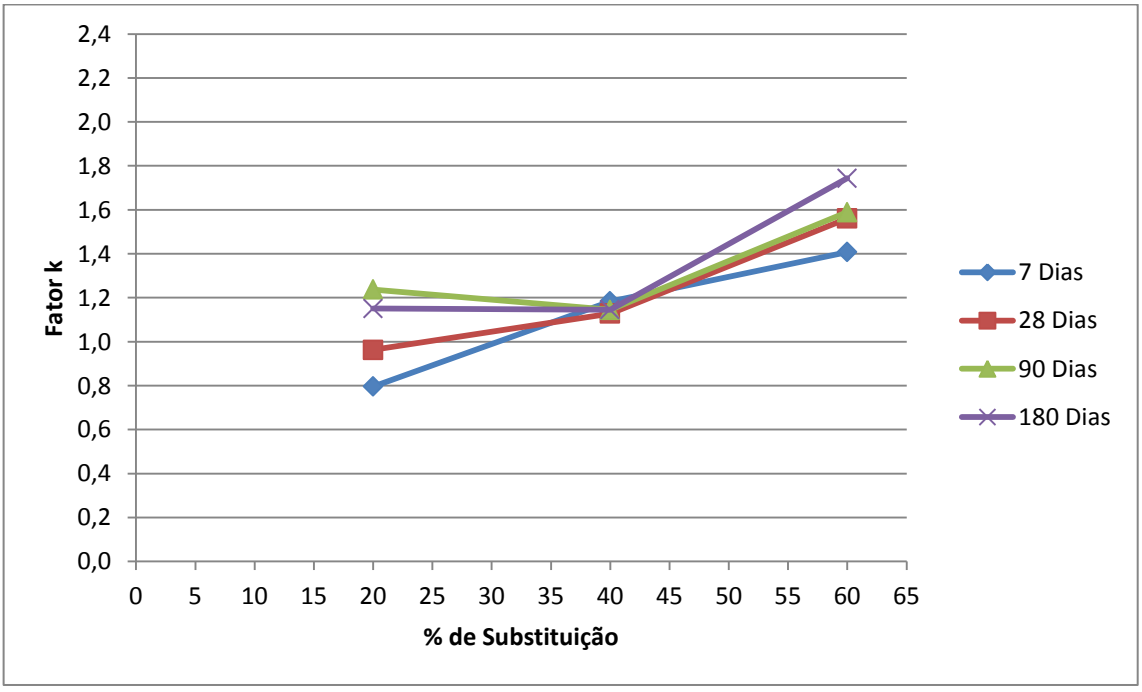


Figura 127: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 15 MPa, na aproximação linear.

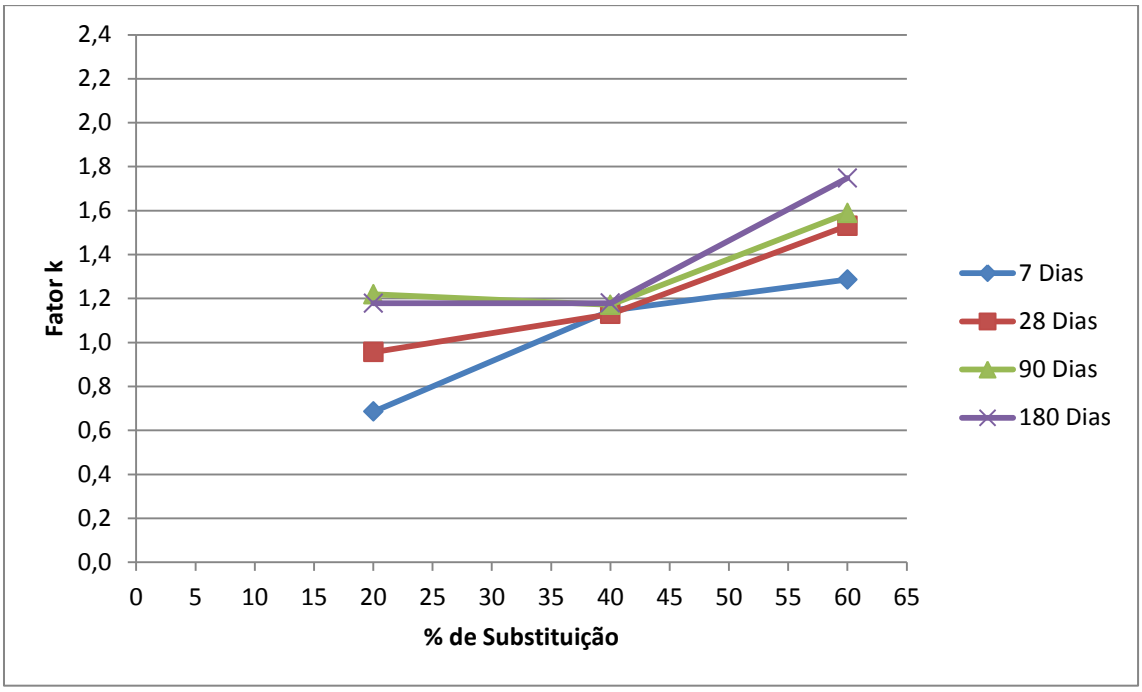


Figura 128: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 20 MPa, na aproximação linear.

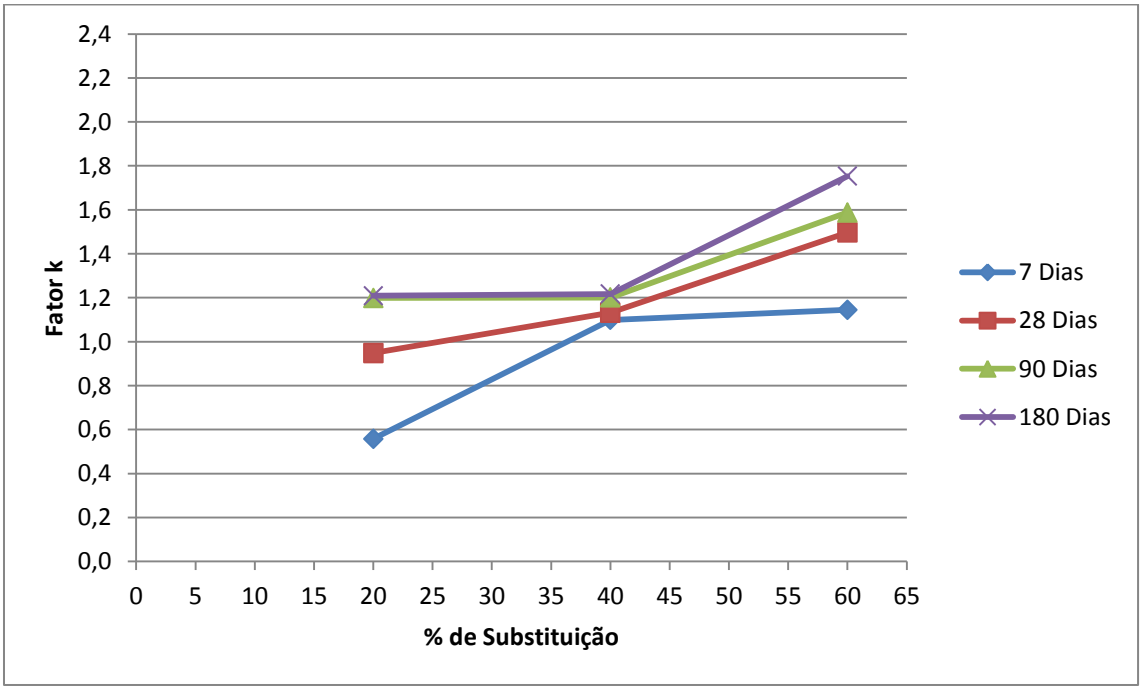


Figura 129: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes para a tensão de 25 MPa, na aproximação linear.

Observando os gráficos considerando a aproximação linear (Figura 125 à Figura 129), verifica-se que existe uma tendência de subida do fator de eficiência consoante a percentagem de substituição. Aos 7 dias este aumento estabiliza a partir dos 40%. Aos 90 dias e 180 dias o fator k encontra-se estável até aos 40% de substituição, subindo a partir desta percentagem. Estes valores são considerados atendendo à presença de cinzas volantes que potenciam o fator k a partir dos 90 dias. No entanto, não seria de esperar que mesmo em percentagens de substituição elevadas o fator k evoluísse desta forma logo a partir dos 28 dias. Apresentam-se na Figura 130 à Figura 134, os gráficos de igual carácter para a aproximação hiperbólica e respetivos níveis de tensão adotados.

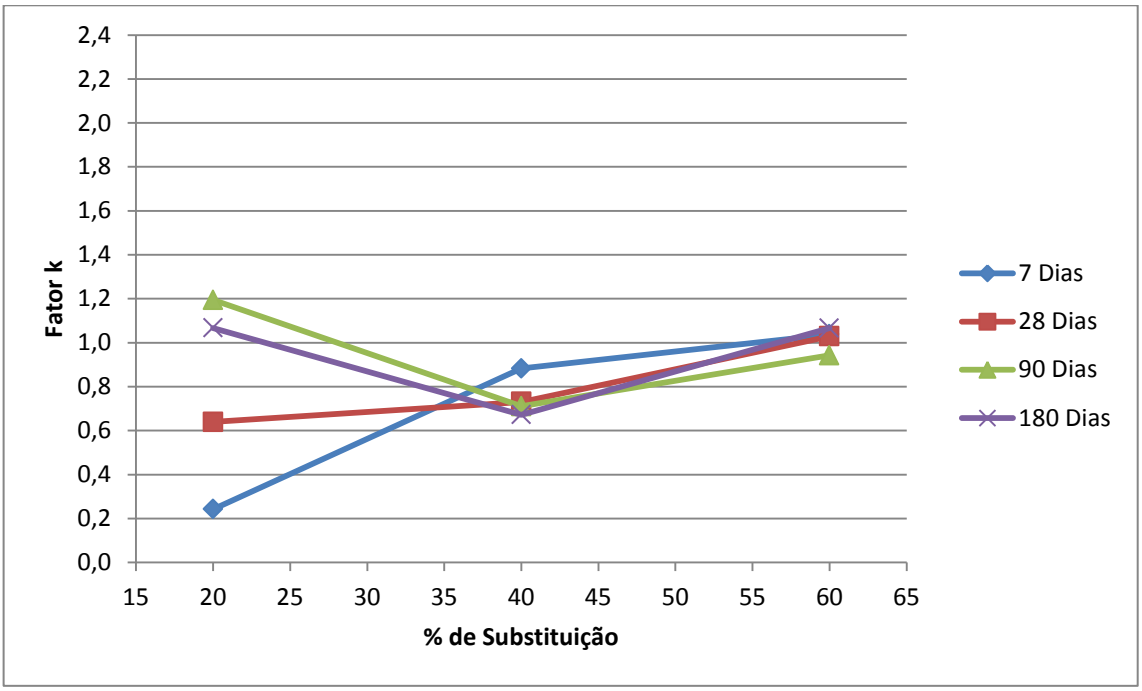


Figura 130: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica.

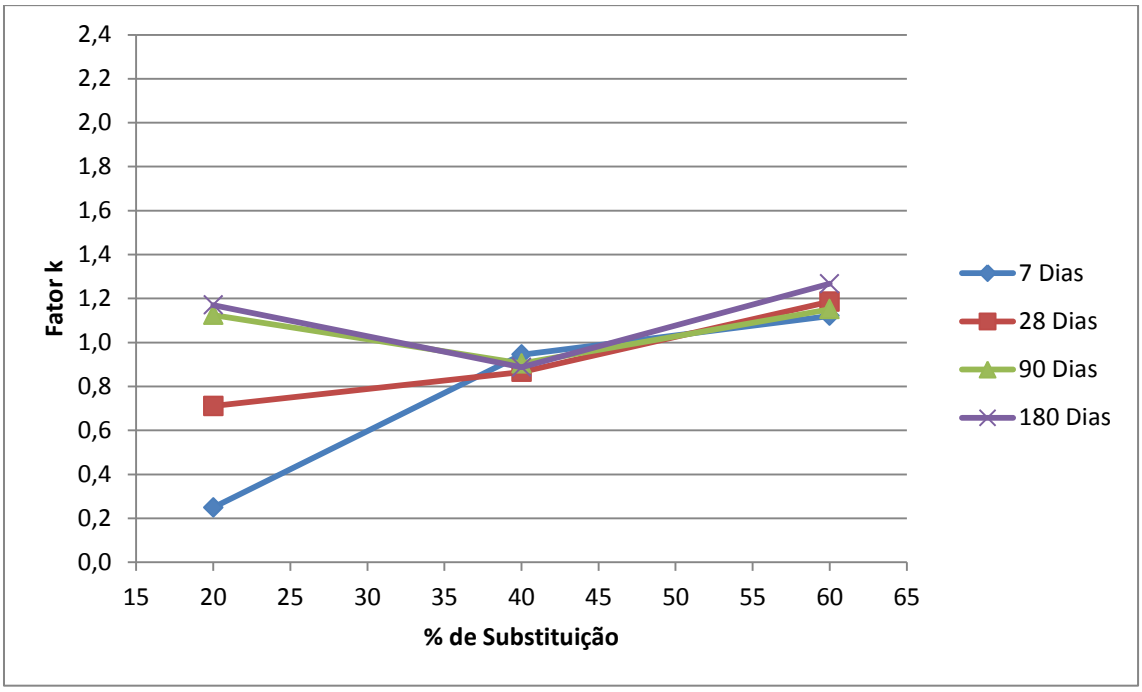


Figura 131: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 30 MPa, na aproximação hiperbólica.

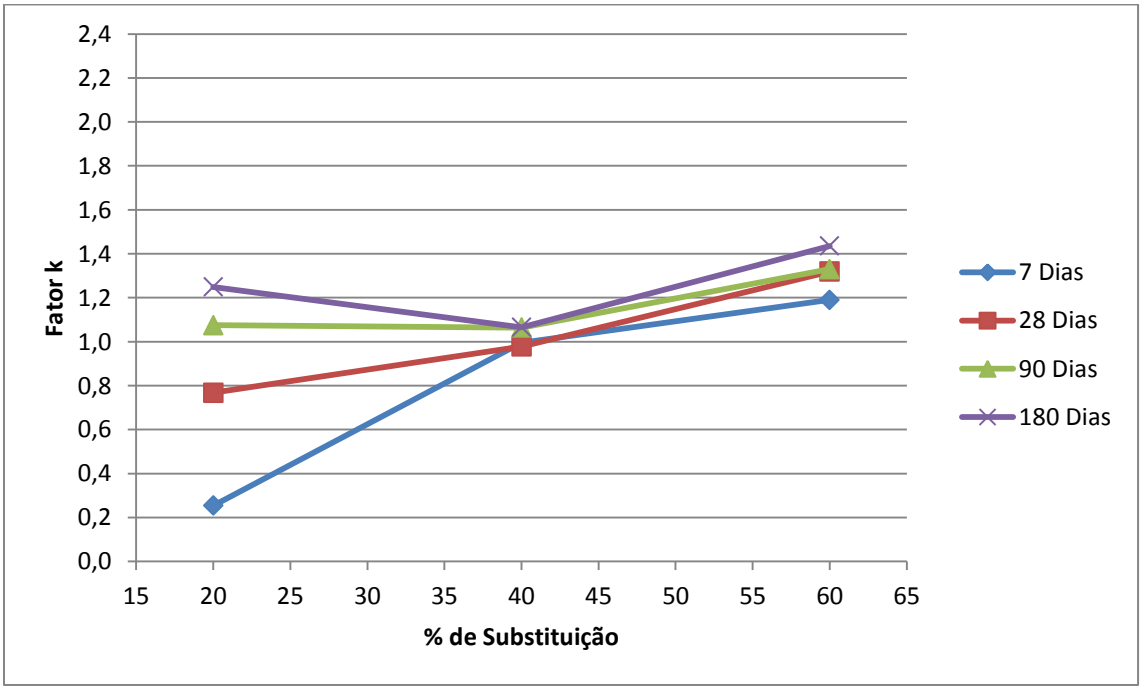


Figura 132: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 35 MPa, na aproximação hiperbólica.

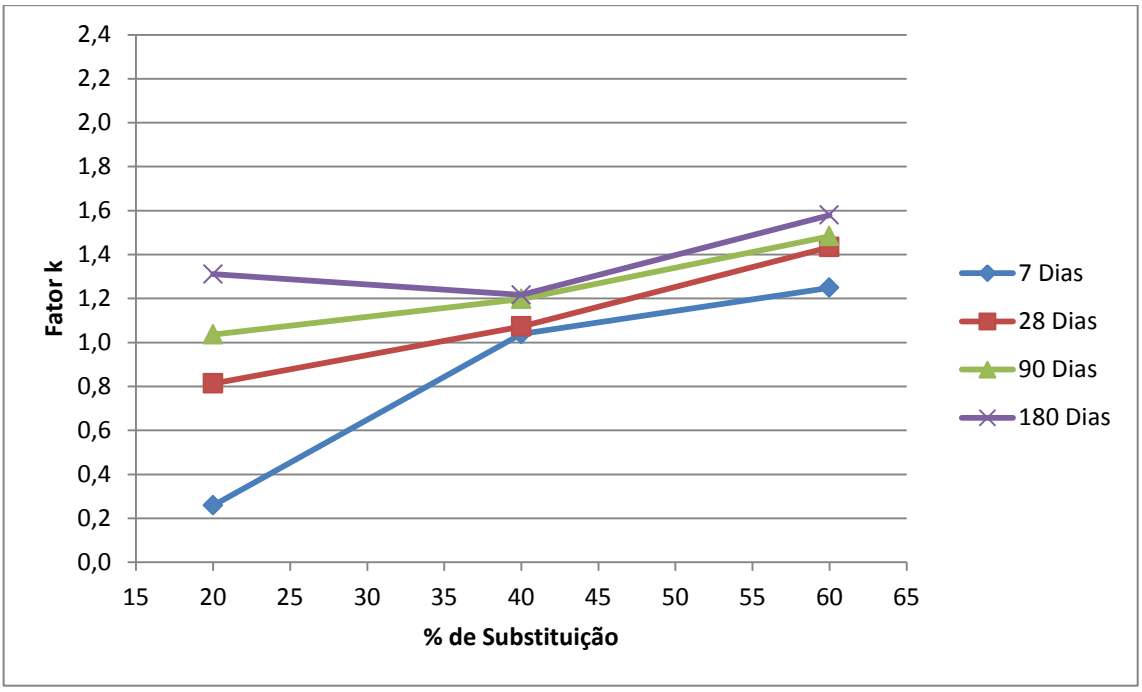


Figura 133: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 40 MPa, na aproximação hiperbólica.

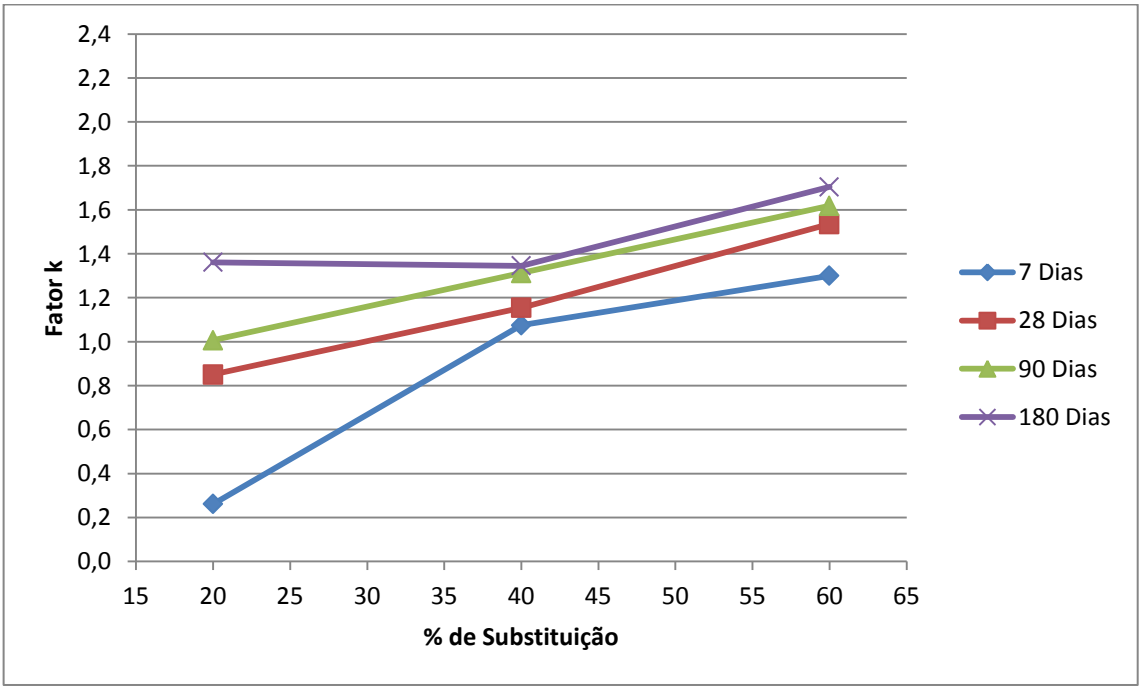


Figura 134: Evolução do fator k relativamente à percentagem de substituição por cinzas volantes e metacaulino para a tensão de 45 MPa, na aproximação hiperbólica.

Atendendo aos gráficos apresentados (Figura 130 à Figura 134), para a aproximação hiperbólica, verifica-se que, para todas as tensões, o aumento de percentagem aos 7 e 28 dias, representam uma evolução ascendente do fator k com o aumento de substituição, o que não seria de esperar como havia sido referido anteriormente. Aos 90 e 180 dias, o fator k diminui ligeiramente até 40%, ascendendo a partir deste valor para valores de k superiores. Este comportamento pode ser considerado devido à maior presença de cinzas volantes na mistura mas que seria de esperar não contribuísse para uma evolução ascendente do fator k dentro do quadro apresentado.

4.3.3.3.3 Evolução do fator k com o nível de tensão

Apresentam-se na Figura 135 à Figura 142, a evolução do fator k com o nível de tensão, para a respetiva aproximação. De referir que será ainda apresentado no final no capítulo um quadro síntese de todas as argamassas com um k médio dos vários níveis de tensão (Quadro 68).

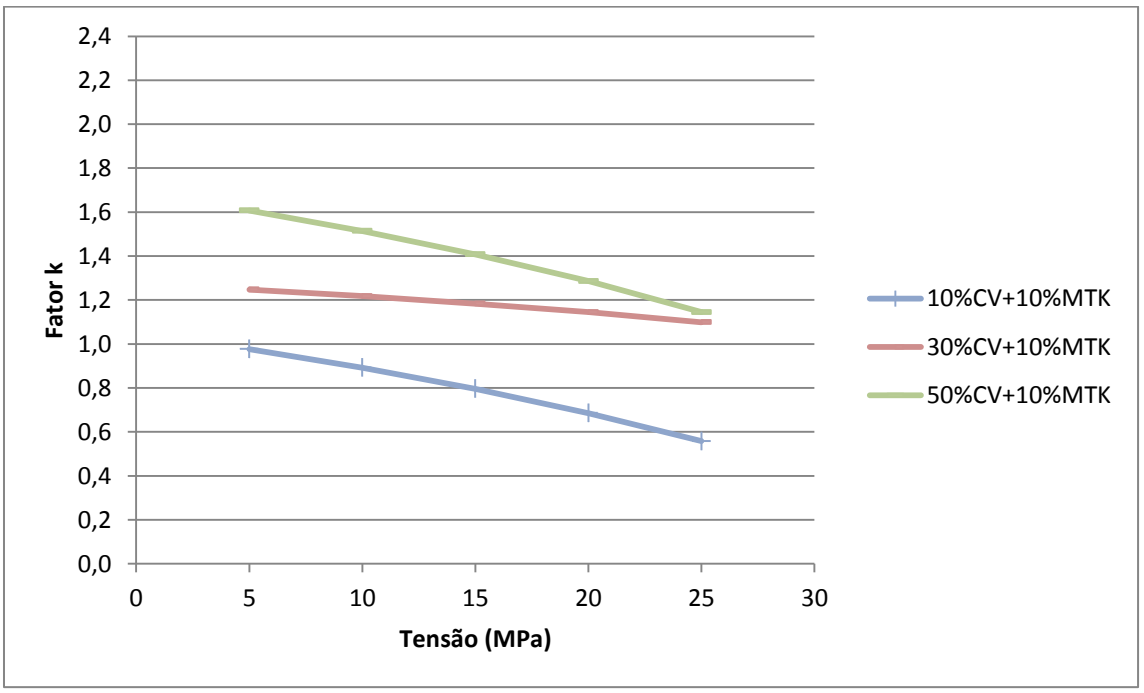


Figura 135: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação linear.

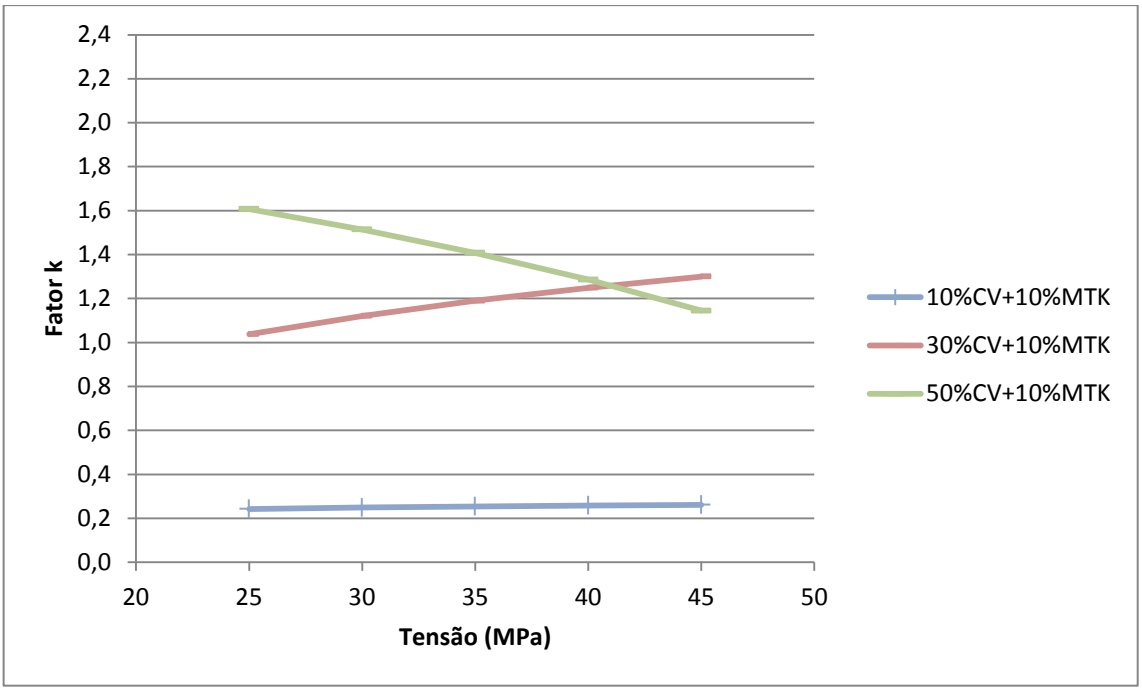


Figura 136: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 7 dias, na aproximação hiperbólica.

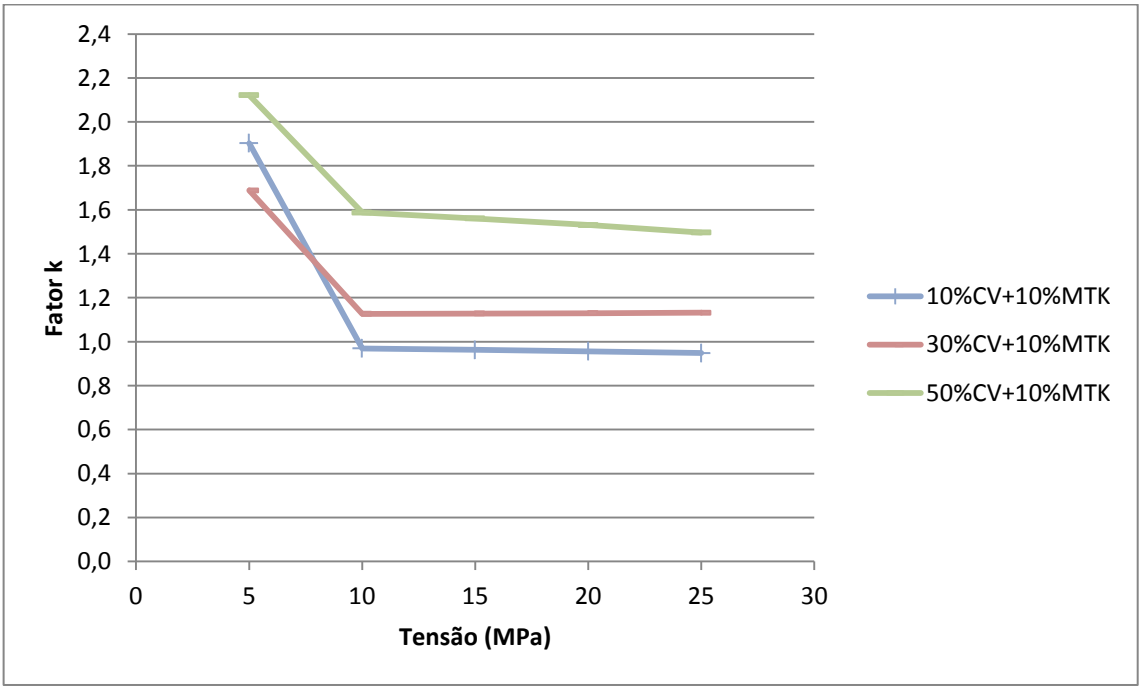


Figura 137: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação linear.

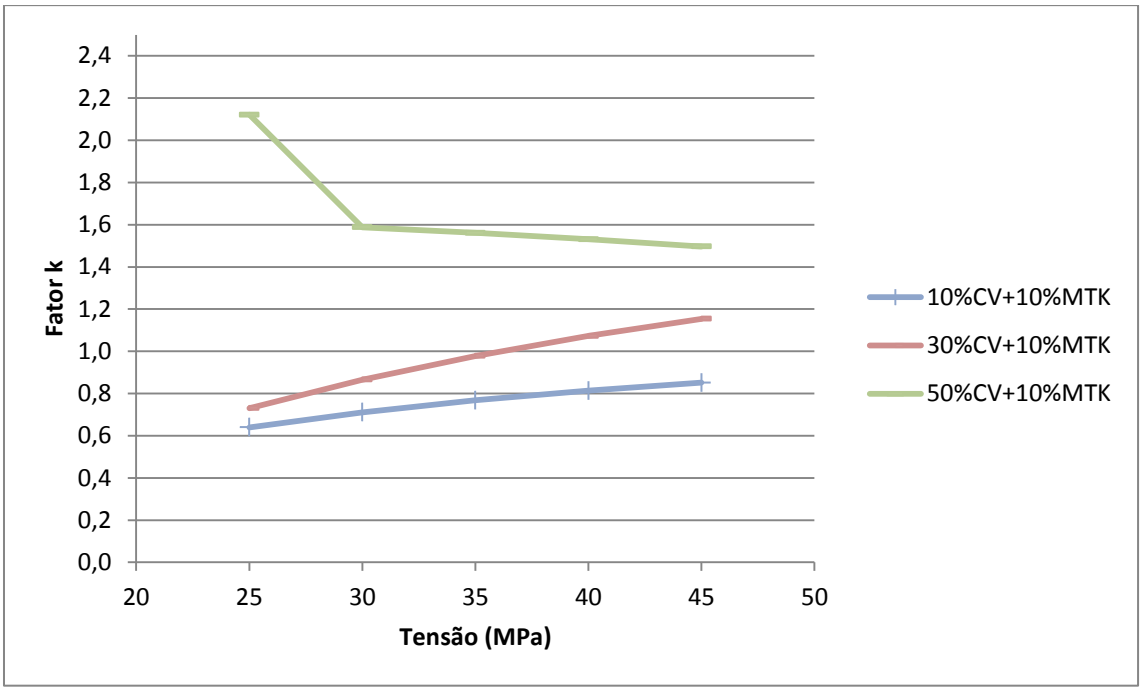


Figura 138: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 28 dias, na aproximação hiperbólica.

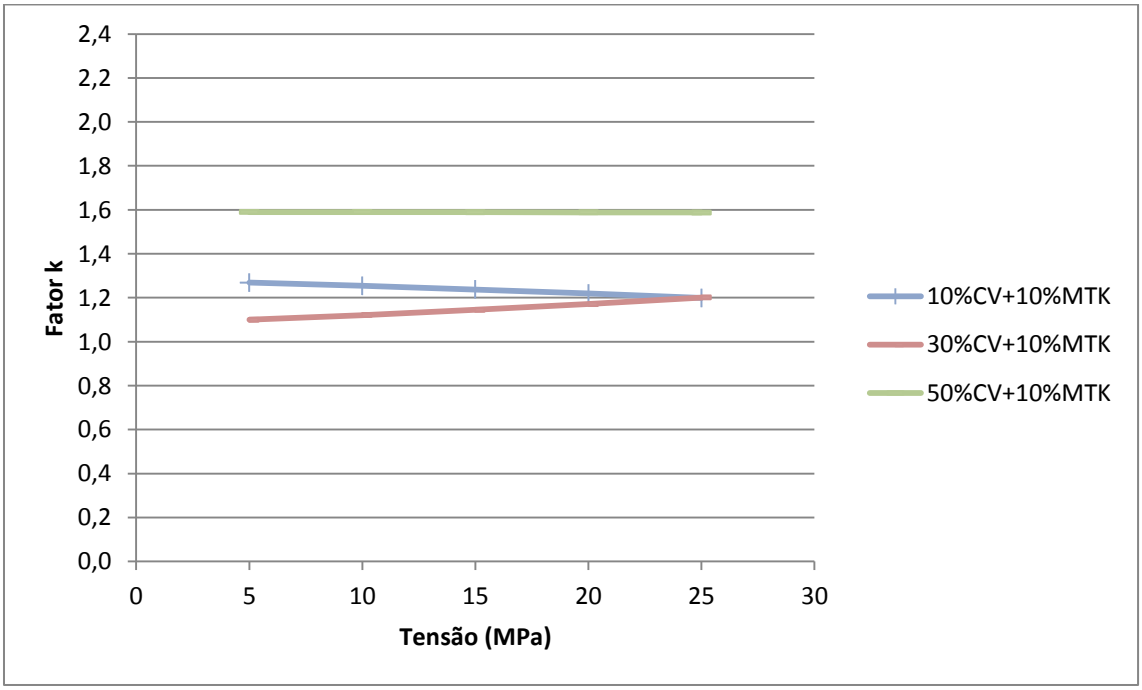


Figura 139: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação linear.

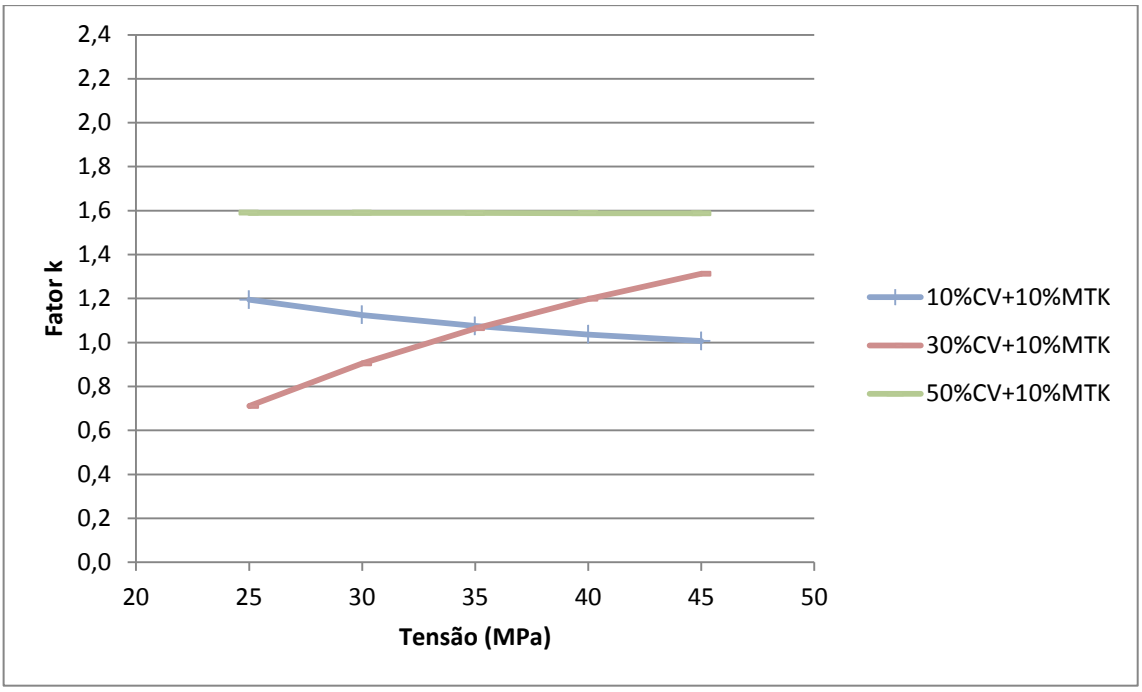


Figura 140: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 90 dias, na aproximação hiperbólica.

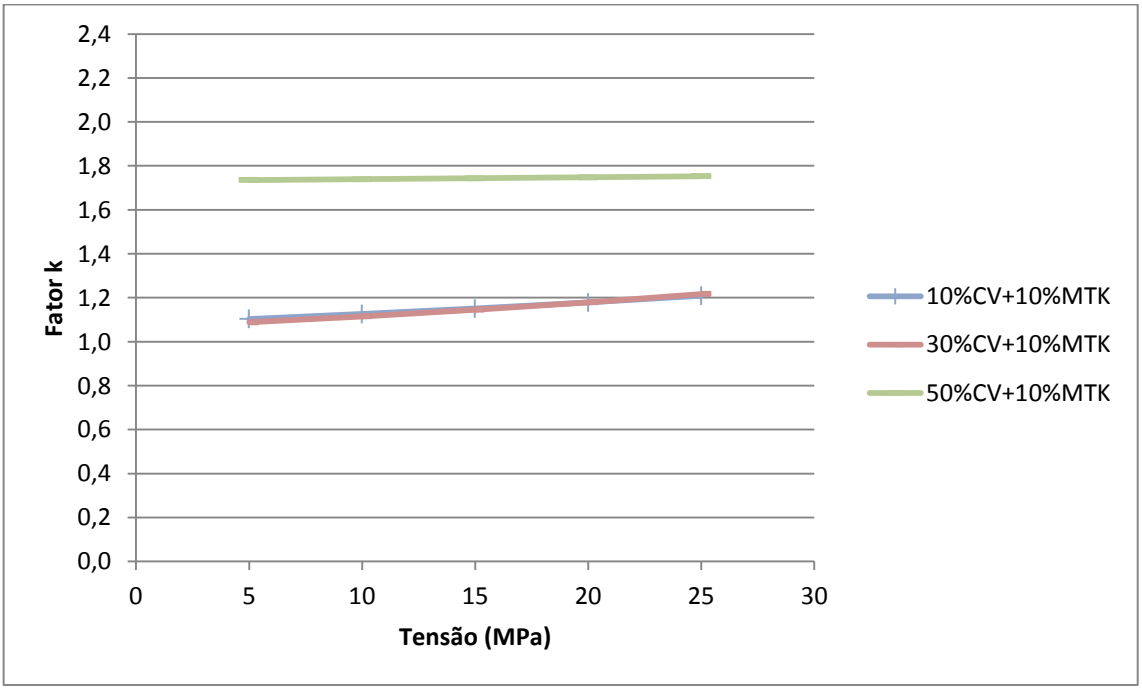


Figura 141: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação linear.

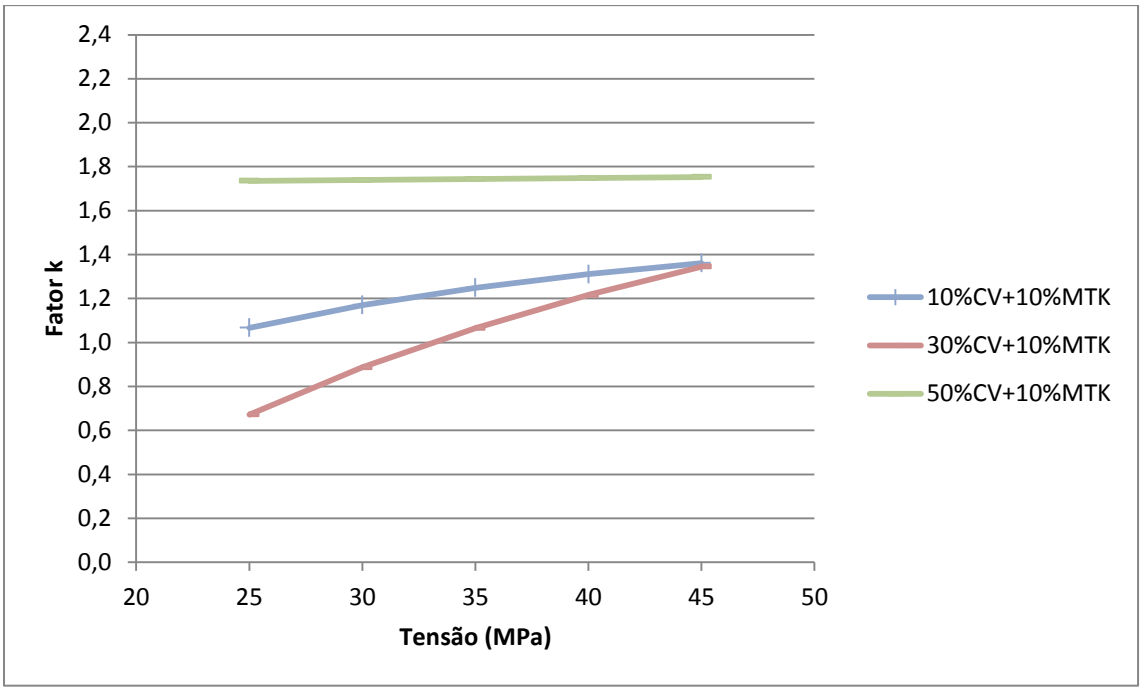


Figura 142: Evolução do fator k com o nível de tensão aos 180 dias, na aproximação hiperbólica.

Observando os resultados obtidos (Figura 135 à Figura 142), verifica-se que resultaram vários tipos de comportamentos do fator k à medida que a tensão aumenta. Aos 7 dias, a aproximação linear apresenta valores do fator k a descerem com o aumento da tensão em todas as argamassas. Isto já não acontece na aproximação hiperbólica, com níveis de tensão a subir de 25 a 45 MPa, apresentando um fator k crescente na argamassa 30%CV+10%MTK, constante na argamassa 10%CV+10%MTK e decrescente na argamassa 50%CV+10%MTK à medida que a tensão aumenta. Aos 28 dias o fator k decresce na aproximação linear do nível de tensão 5 para 10 MPa, mantendo-se sensivelmente constante nas restantes tensões com comportamento sensivelmente análogo na aproximação hiperbólica, nos níveis de tensão de 25 a 45 MPa. A partir dos 90 dias, o fator k apresenta-se sensivelmente constante ao longo das tensões à exceção da argamassa 30%CV+10%MTK que vai crescendo cerca de k=0,5 na aproximação hiperbólica, aos 90 e 180 dias.

4.4 Fator k previsível com base nos k obtidos para os níveis de tensão

No seguimento dos valores obtidos para o fator de eficiência k na aproximação linear e hiperbólica, nos cinco níveis de tensão, (5, 10, 15, 20 e 25 MPa) e (25, 30, 35, 40 e 45 MPa), respetivamente, apresenta-se os valores obtidos para cada aproximação segundo áreas onde o fator k se situa definidas pelos intervalos dos resultados obtidos. Com esta representação de k, análoga ao apresentado no subcapítulo 2.6, é possível estimar um fator k em termos de previsão com base nos resultados obtidos para uma determinada idade.

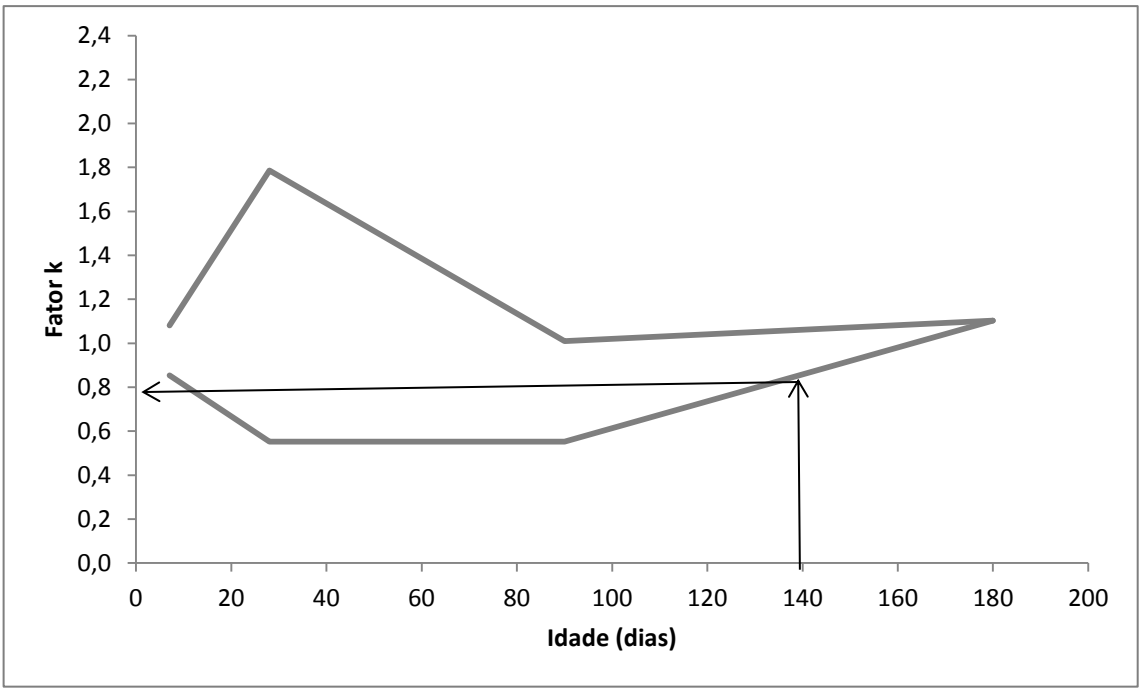


Figura 143: Exemplo de cálculo da previsão do fator k na argamassa 20%CV aos 140 dias, na aproximação linear.

Como se trata de uma previsão, é aconselhável a escolha de um k ligeiramente abaixo das áreas de valores em que este se encontra. É no entanto de salvaguardar que devido à anomalia de alguns resultados, esta previsão está comprometida em determinadas áreas, nomeadamente, aos 28 dias. A título de exemplo como o k pode ser estimado, analogamente ao apresentado no subcapítulo 2.6, apresenta-se na Figura 143 o valor de k previsível para os 140 dias de idade. Com base nos resultados obtidos de k na aproximação linear, é previsível que o fator k aos 140 dias seja de 0,79. Desta forma apresentam-se os gráficos para cada aproximação que permitem uma estimação do k (Figura 144 a Figura 161).

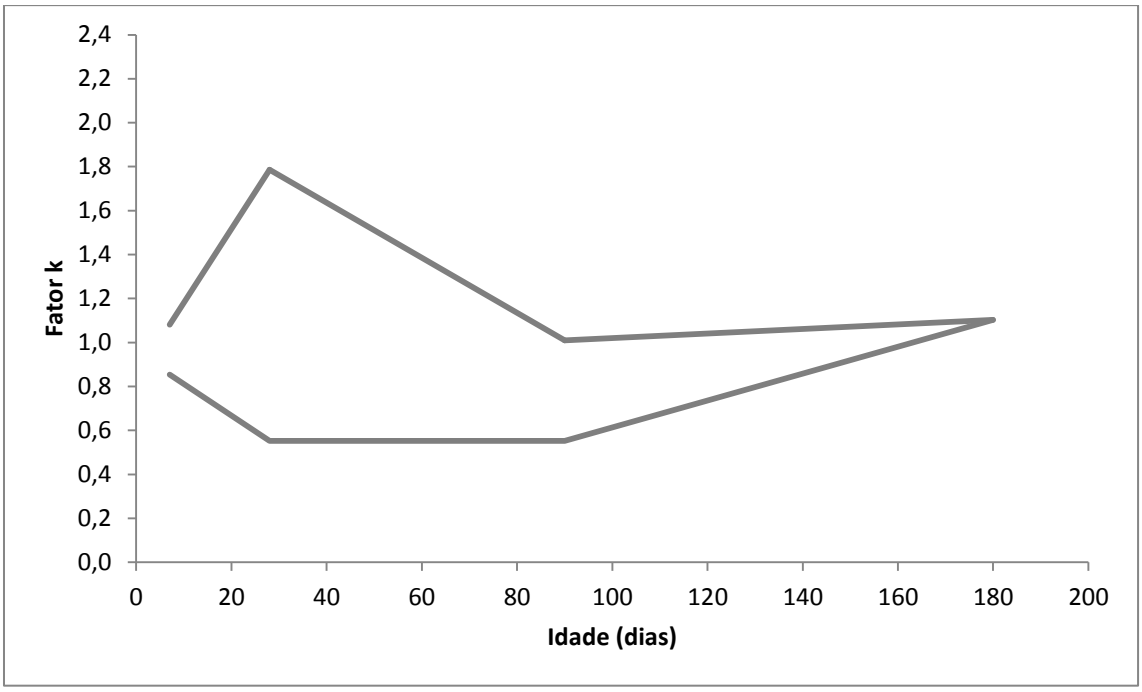


Figura 144: Intervalos para estimativa de k de 20%CV, na aproximação linear.

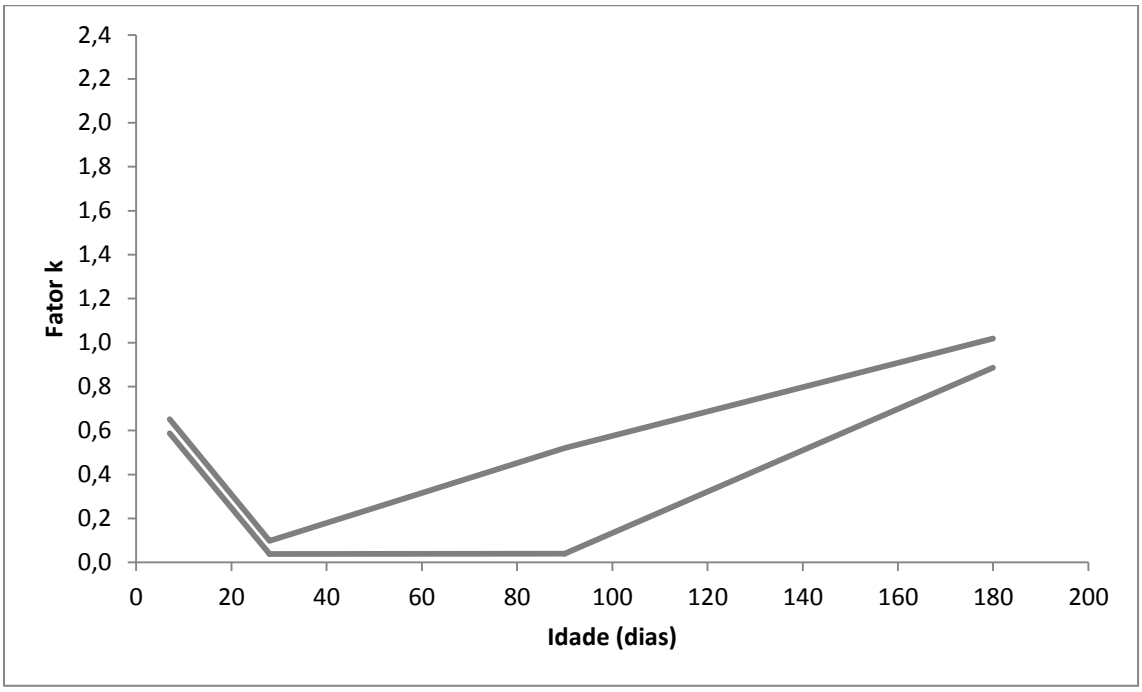


Figura 145: Intervalos para estimativa de k de 20%CV, na aproximação hiperbólica.

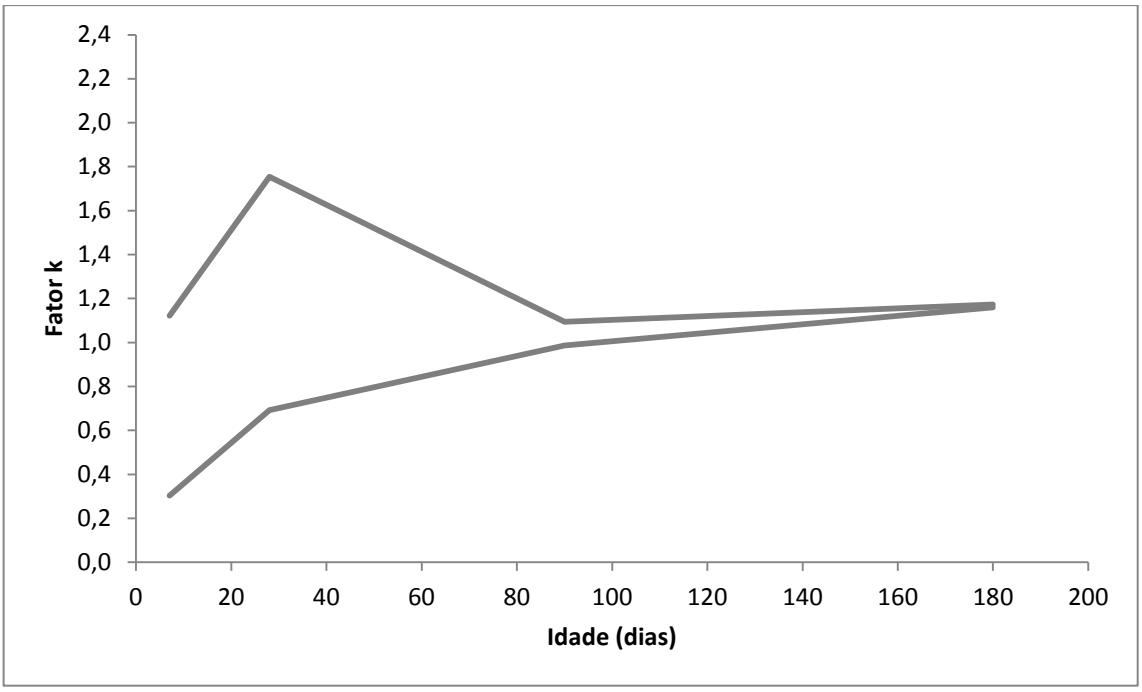


Figura 146: Intervalos para estimativa de k de 40%CV, na aproximação linear.

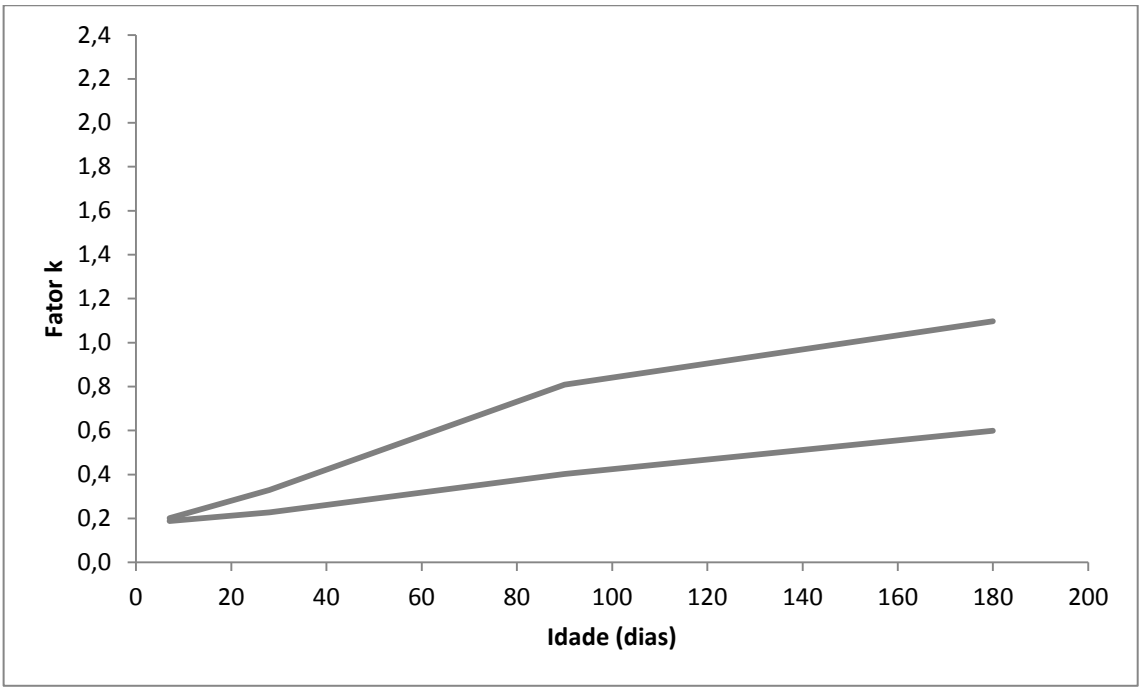


Figura 147: Intervalos para estimativa de k de 40%CV, na aproximação hiperbólica.

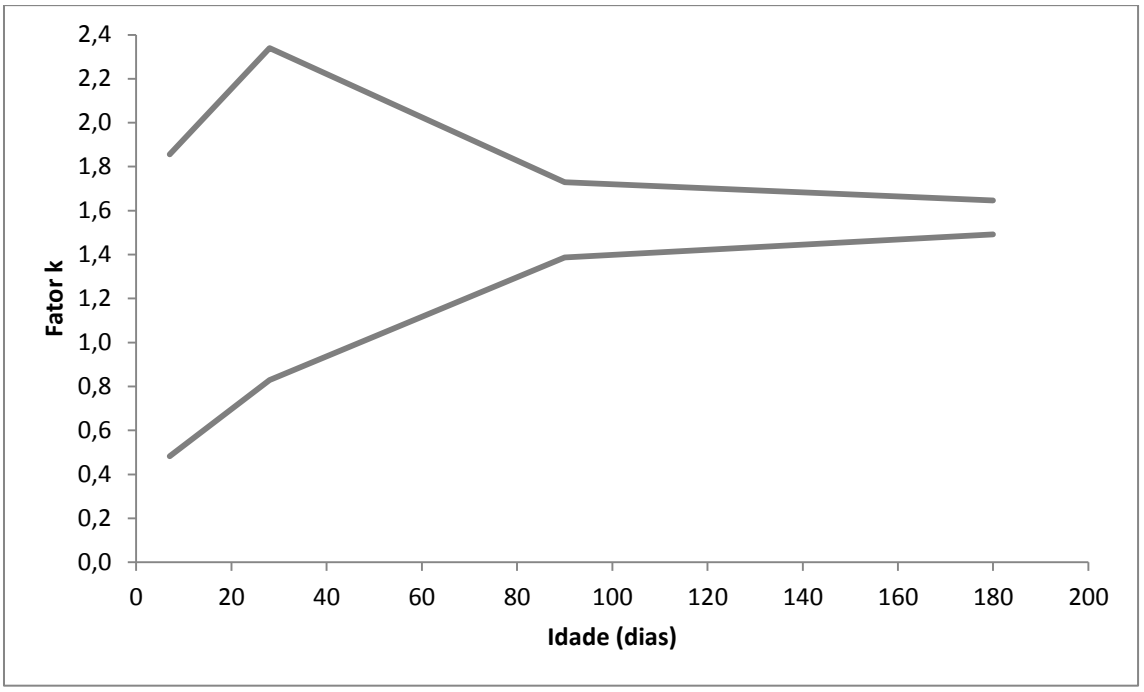


Figura 148: Intervalos para estimativa de k de 60%CV, na aproximação linear.

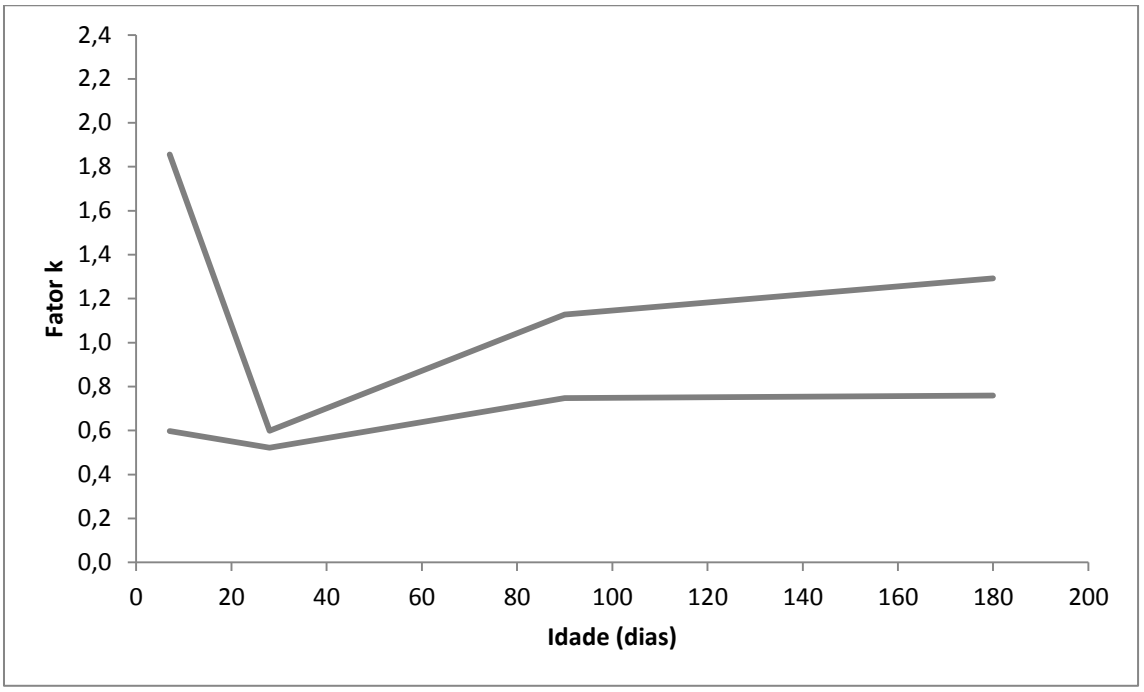


Figura 149: Intervalos para estimativa de k de 60%CV, na aproximação hiperbólica.

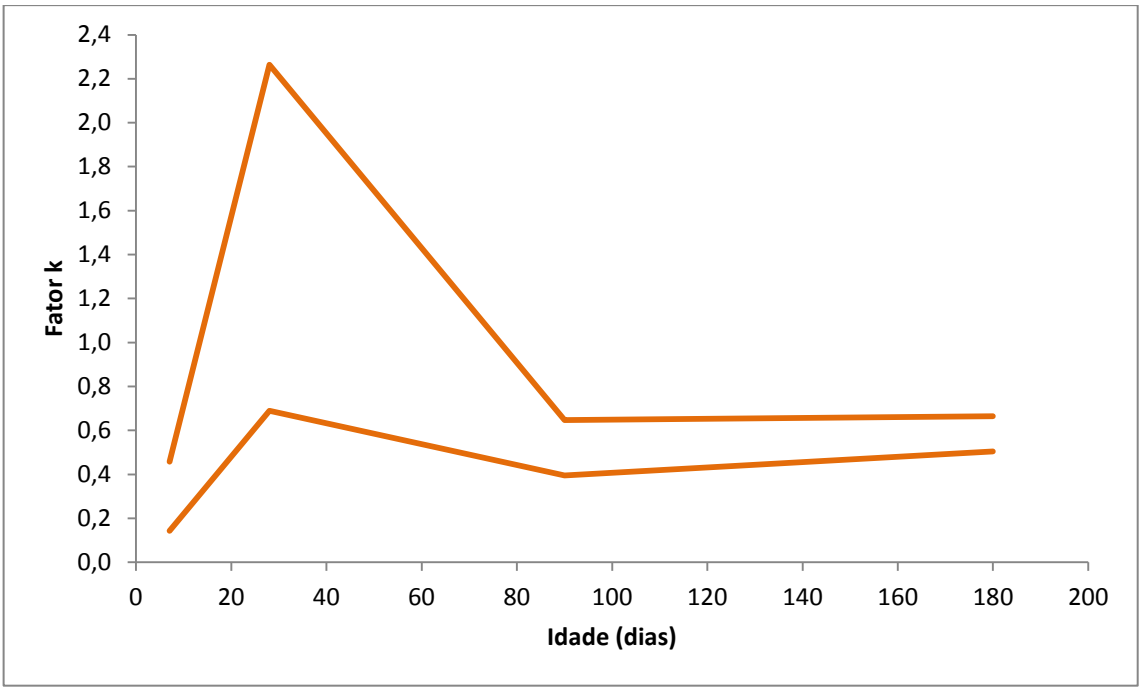


Figura 150: Intervalos para estimativa de k de 10%MTK, na aproximação linear.

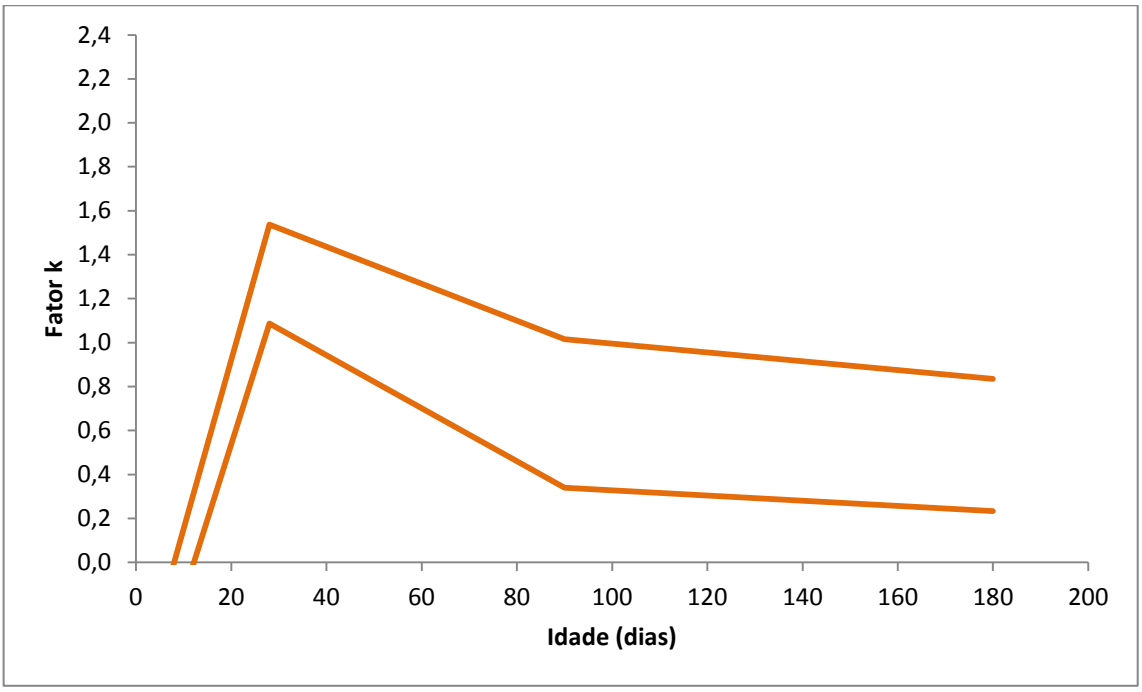


Figura 151: Intervalos para estimativa de k de 10%MTK, na aproximação hiperbólica.

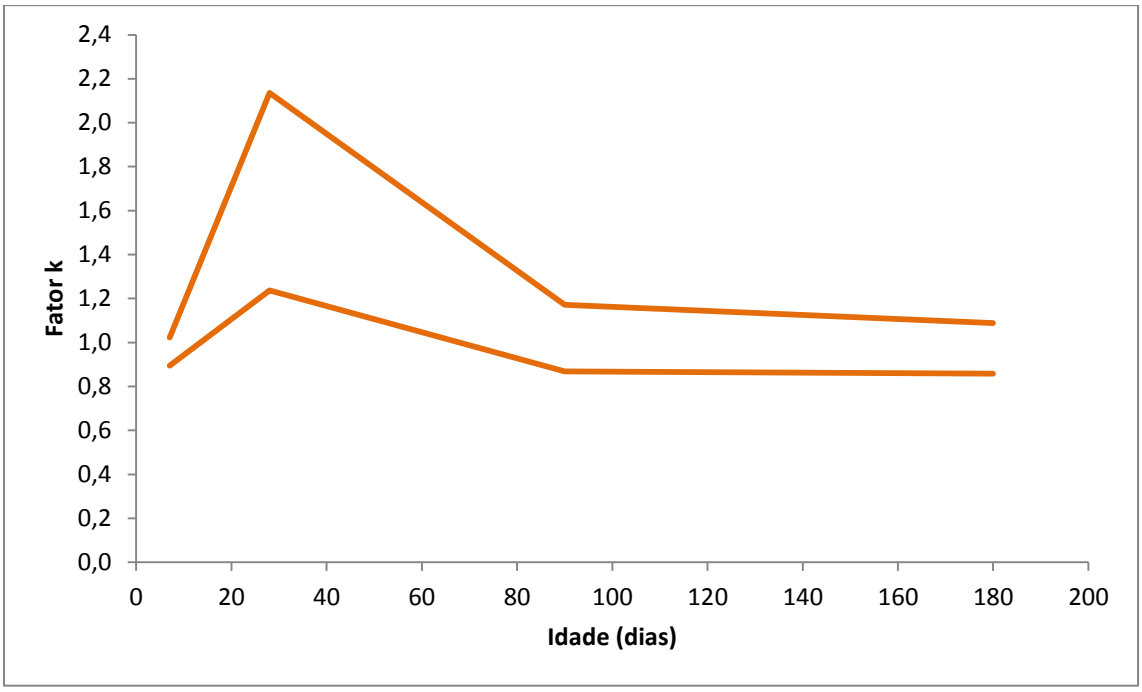


Figura 152: Intervalos para estimativa de k de 20%MTK, na aproximação linear.

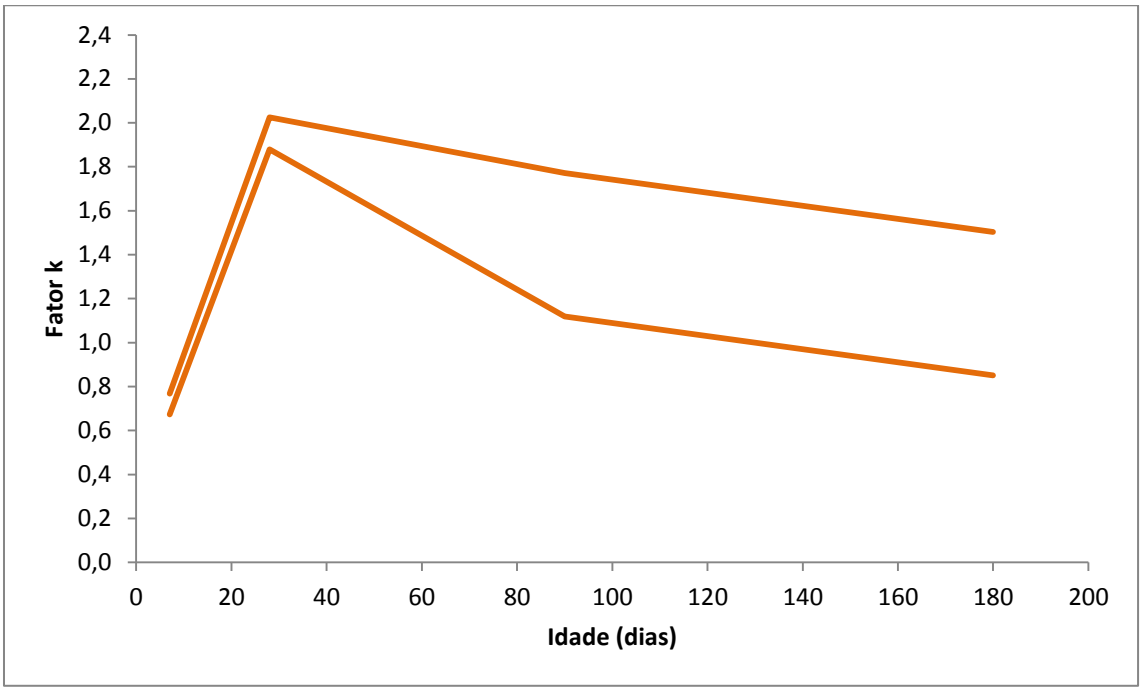


Figura 153: Intervalos para estimativa de k de 20%MTK, na aproximação linear.

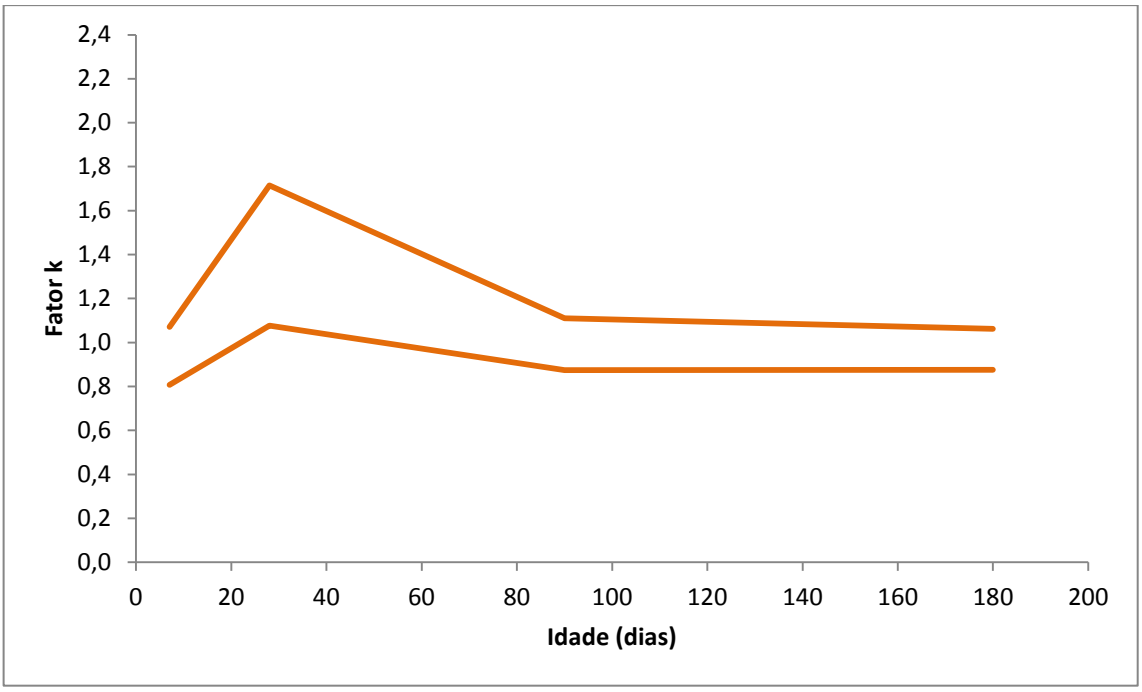


Figura 154: Intervalos para estimativa de k de 30%MTK, na aproximação linear.

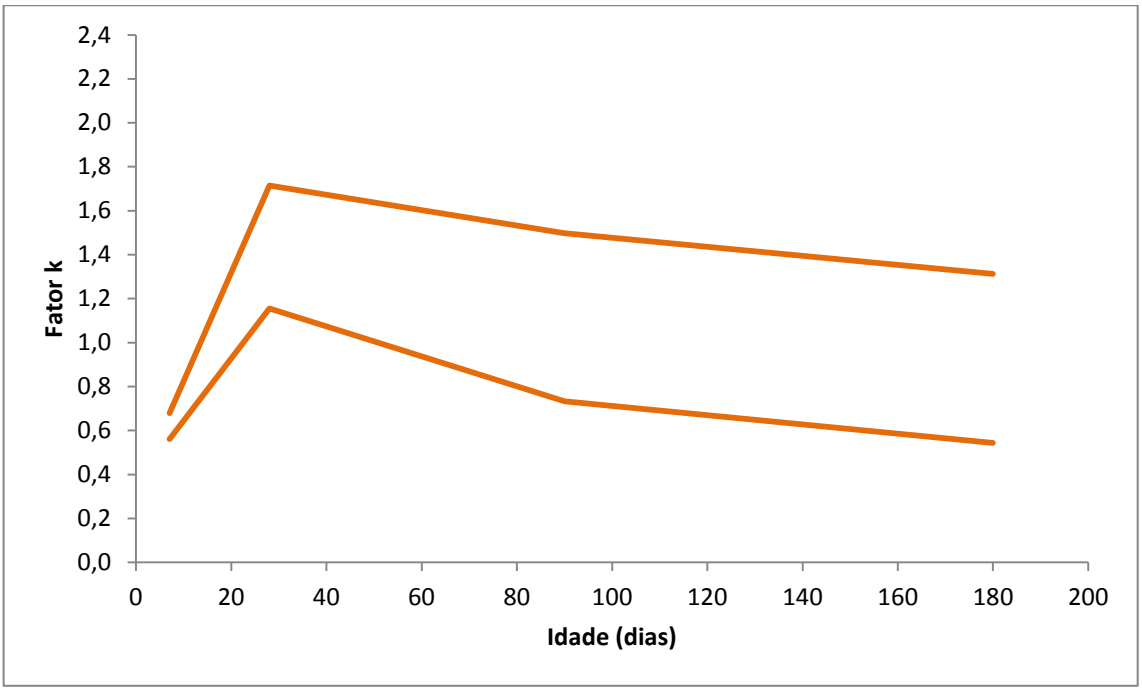


Figura 155: Intervalos para estimativa de k de 30%MTK, na aproximação hiperbólica.

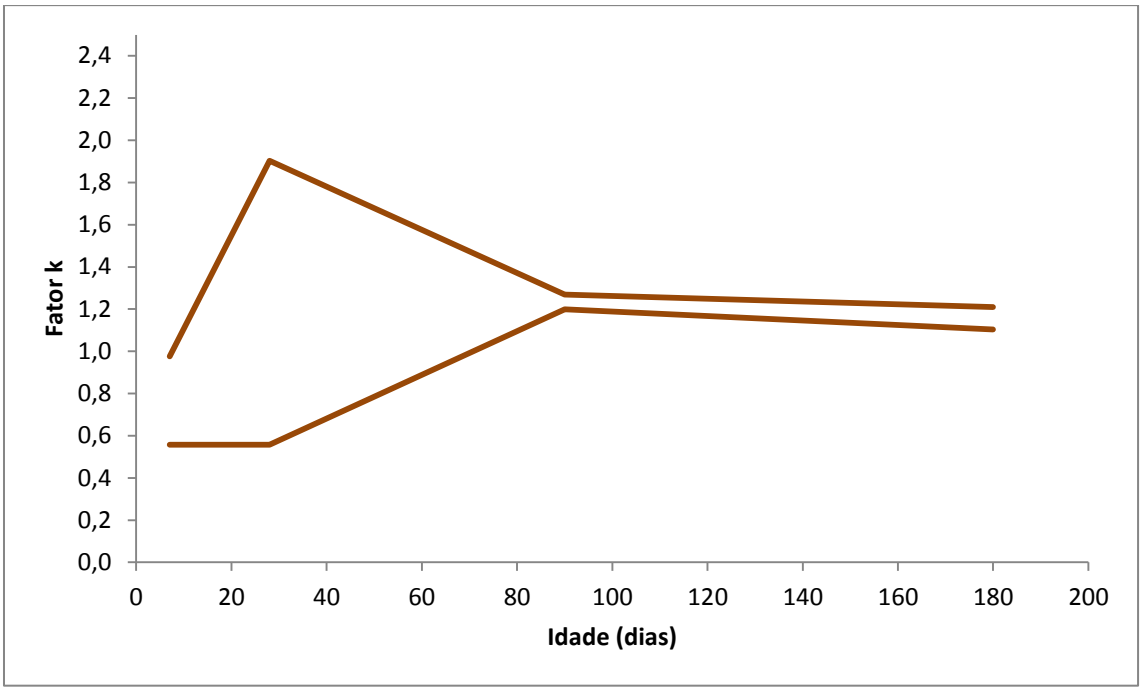


Figura 156: Intervalos para estimativa de k de 10%CV+10%MTK, na aproximação linear.

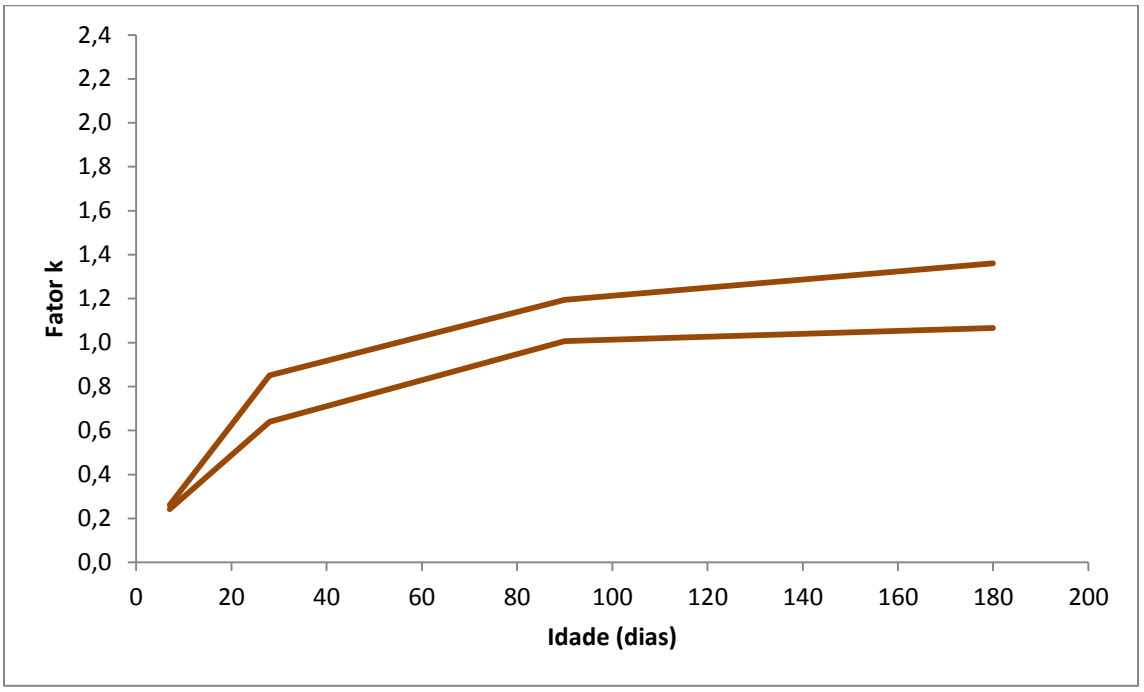


Figura 157: Intervalos para estimativa de k de 10%CV+10%MTK, na aproximação hiperbólica.

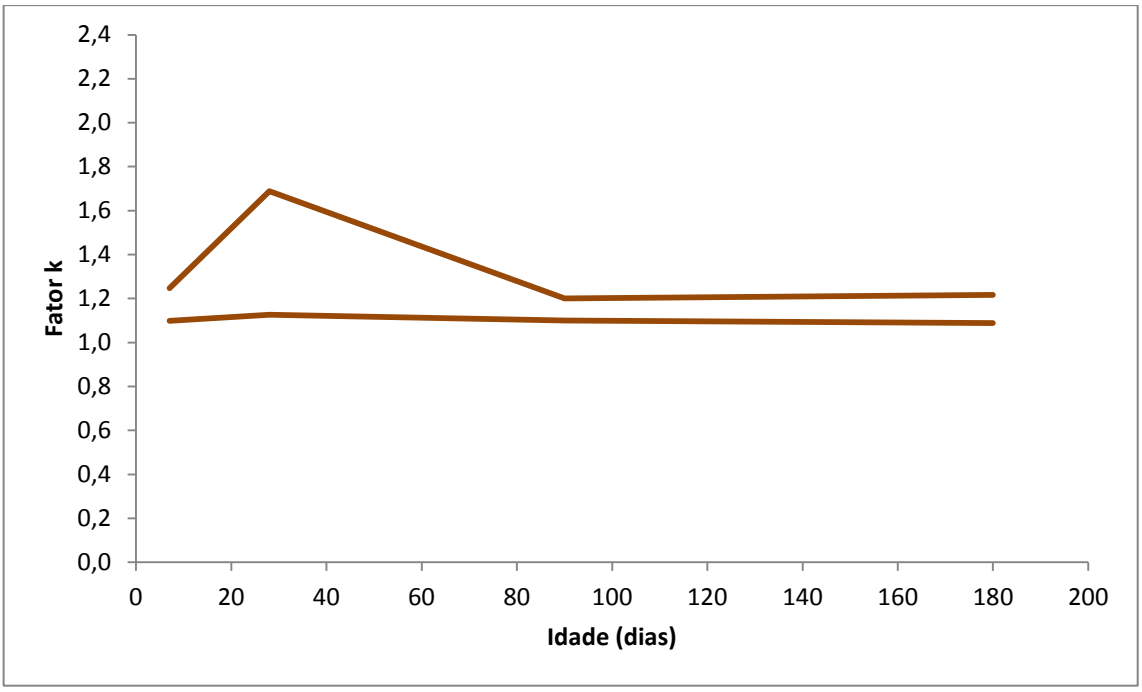


Figura 158: Intervalos para estimativa de k de 30%CV+10%MTK, na aproximação linear.

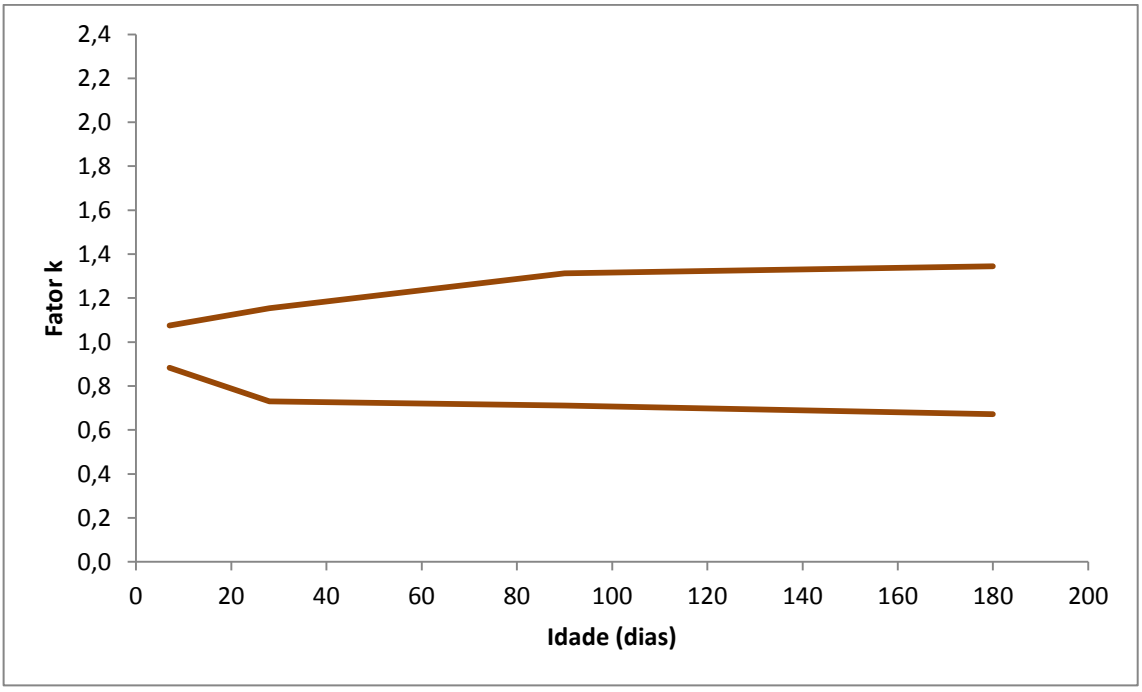


Figura 159: Intervalos para estimativa de k de 30%CV+10%MTK, na aproximação hiperbólica.

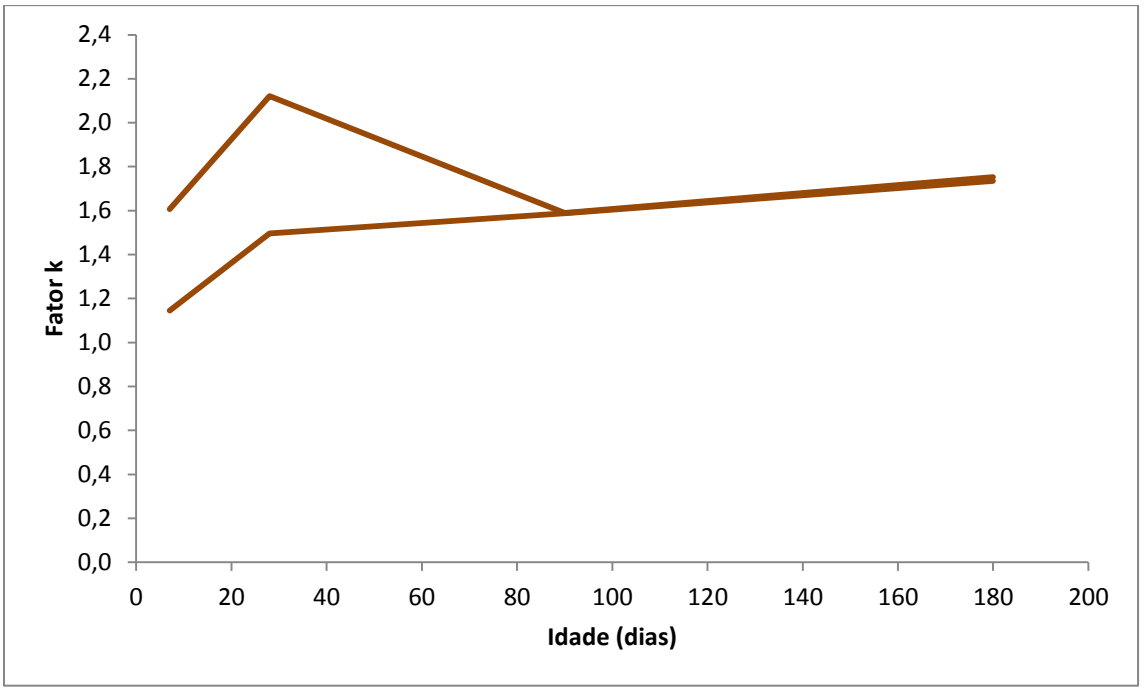


Figura 160: Intervalos para estimativa de k de 50%CV+10%MTK, na aproximação linear.

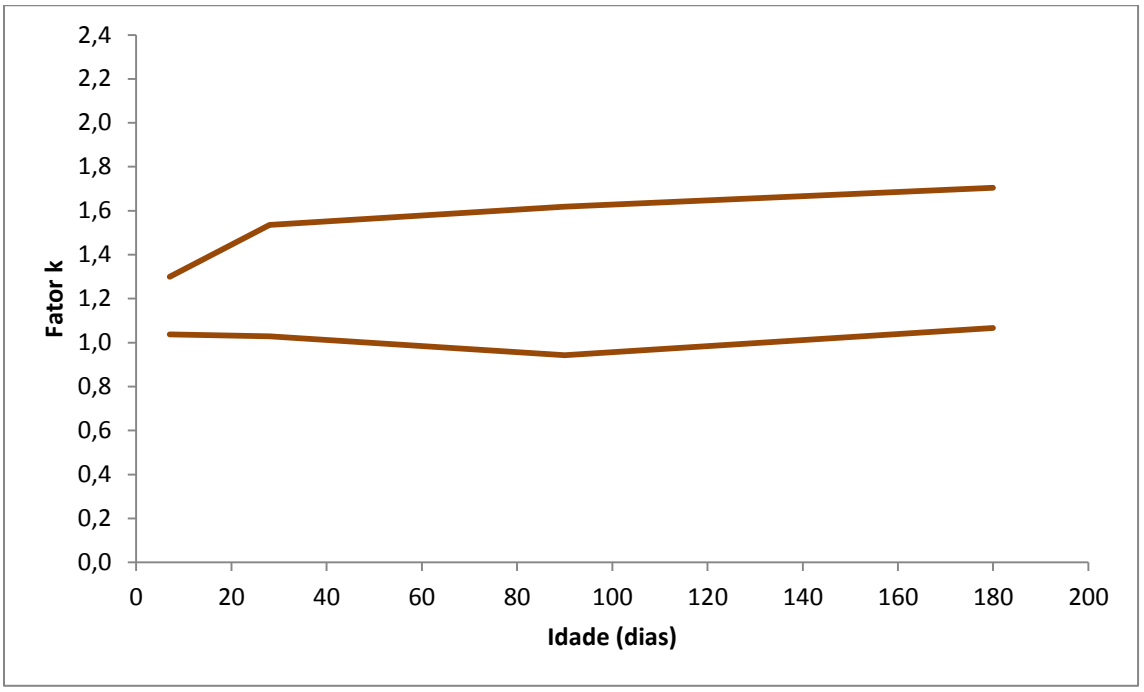


Figura 161: Intervalos para estimativa de k de 50%CV+10%MTK, na aproximação hiperbólica.

4.4 Análise geral do fator k

Neste subcapítulo são apresentados os resultados que no decorrer do programa experimental se consideraram representativos do comportamento do fator k em todas as argamassas. Em termos de tensão, o fator k é apresentado como uma média, obtida nos níveis de tensão 5, 10, 15, 20 e 25 MPa (Quadro 68) na aproximação linear, e, 25, 30, 35, 40 e 45 MPa na aproximação hiperbólica (Quadro 69). Apesar da aproximação hiperbólica apresentar coeficientes de correlação mais próximos da unidade, verificou-se que a aproximação linear obteve valores de k mais razoáveis e com um comportamento mais consistente (Figura 162) comparativamente à relação do k médio com a idade na aproximação hiperbólica (Figura 163).

Quadro 68: Fator k médio na aproximação linear nas respetivas idades.

Fator k médio				
Argamassa	**Idade**			
	7	**28**	**90**	**180**
20%CV	1	0,9	0,8	1,1
40%CV	0,7	1,1	1,0	1,2
60%CV	1,2	1,5	1,6	1,6
10%MTK	0,3	1,1	0,5	0,6
20%MTK	1	1,5	1,0	1,0
30%MTK	0,9	1,3	1,0	1,0
10%CV+10%MTK	0,8	1,1	1,2	1,2
30%CV+10%MTK	1,2	1,2	1,1	1,1
50%CV+10%MTK	1,4	1,7	1,6	1,7

Analisando o Quadro 68, observa-se que os valores de k médios são bastante satisfatórios, principalmente, nas composições que incluem cinzas volantes. Era, no entanto, expetável que os valores de k médios nas argamassas contendo exclusivamente metacaulino apresentassem valores de k superiores, não deixando, ainda assim, de apresentar bons valores de k.

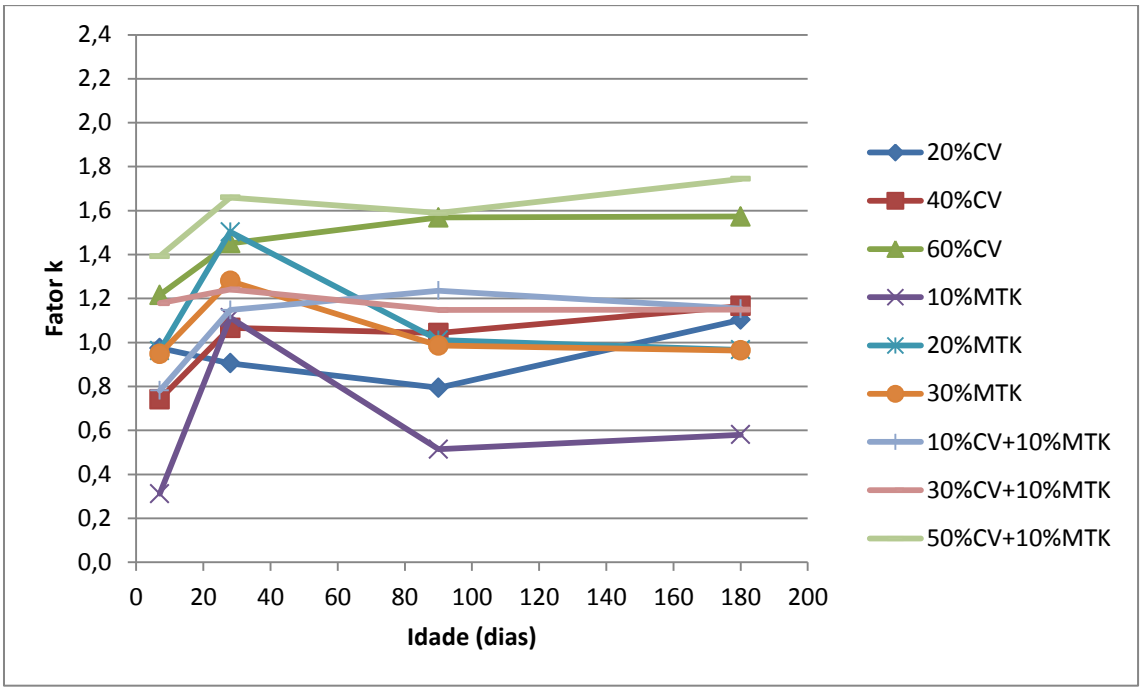


Figura 162: Evolução do fator k médio com a idade, na aproximação linear.

Observando o gráfico da evolução do fator k médio na aproximação linear (Figura 162), observa-se, de modo geral, uma tendência de evolução positiva de k com a idade.

Quadro 69: Fator k médio na aproximação hiperbólica nas respetivas idades.

Fator k médio				
Argamassa	**Idade**			
	7	**28**	**90**	**180**
20%CV	0,6	0,1	0,2	1,0
40%CV	0,2	0,3	0,6	0,9
60%CV	0,6	0,6	1,0	1,0
10%MTK	-0,2	1,3	0,7	0,6
20%MTK	0,7	2,0	1,5	1,2
30%MTK	0,6	1,5	1,1	1,0
10%CV+10%MTK	0,3	0,8	1,1	1,2
30%CV+10%MTK	1,0	1,0	1,0	1,0
50%CV+10%MTK	1,2	1,3	1,3	1,4

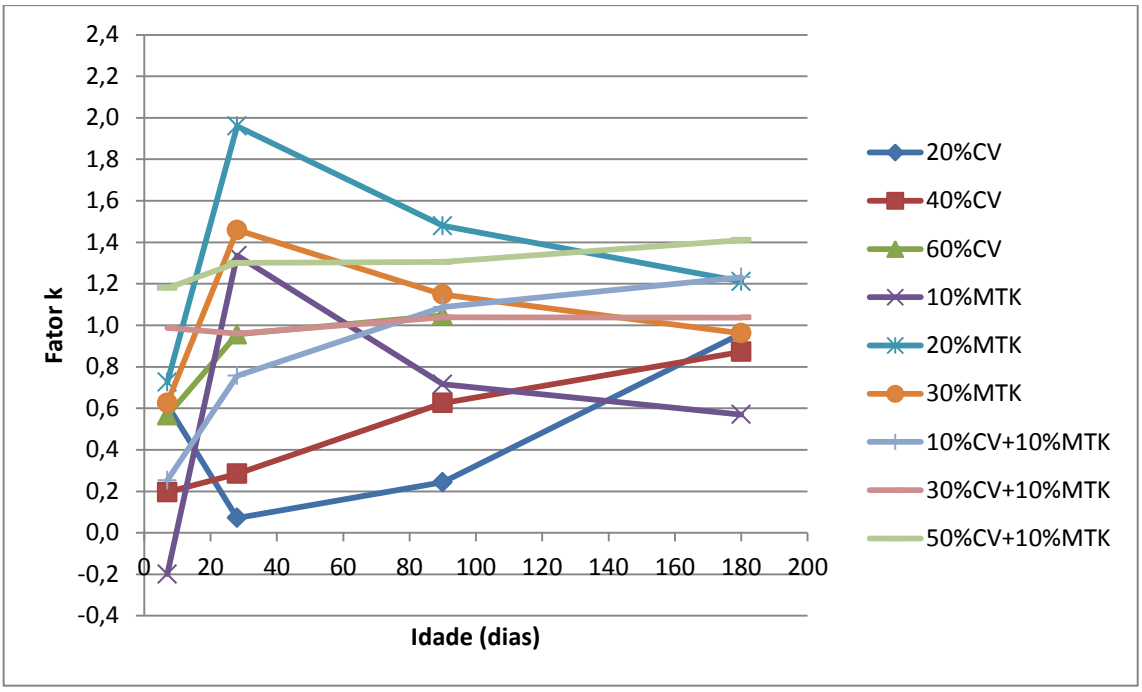


Figura 163: Evolução do fator k médio com a idade, na aproximação hiperbólica.

Atendendo ao gráfico (Figura 163) e ao Quadro 69, é possível verificar que o fator k evolui a um pico nas argamassas contendo unicamente metacaulino, decrescendo a partir dos 28 dias até um valor cerca de 40% inferior. É ainda de salientar que a argamassa 10%MTK apresentou um comportamento anómalo definido pela curva de aproximação hiperbólica, que resultou em valores de eficiência negativos aos 7 dias de idade, na aproximação hiperbólica. A argamassa 20%CV tem igualmente um comportamento atípico, decrescendo dos 7 aos 28 dias no seu valor de eficiência, quando era esperado que este evoluísse ascendentemente ao longo do tempo. No entanto, salienta-se que os resultados acabam por se apresentar positivos quando encarados do ponto de vista inicial e final. Em todas as argamassas o valor de k inicial aos 7 dias foi evoluindo para um k final superior aos 180 dias. Este tipo de avaliação deixa em aberto a idade a que determinada adição deverá ser analisada em termos de eficiência para além dos 28 dias normalmente utilizados, ainda que alguns resultados se comportam de forma imprevista.

Como apresentado no Capítulo 2, foi possível verificar que recentemente o fator k se encontra alvo de novos estudos, permitindo novas abordagens e avaliação do mesmo. Neste sentido, com apoio na respetiva bibliografia, apresenta-se o resultado obtido utilizando a abordagem descrita no subcapítulo 2.6 no caso da argamassa 20%CV aos 28 dias.

$$\omega_a = \frac{w_a}{c_a} = \frac{456{,}670}{730{,}672} = 0{,}63 \tag{35}$$

$$0{,}63 = \omega'_a \cdot \left(1 + \frac{182{,}668}{730{,}672}\right) \rightarrow \ \omega'_a = 0{,}5 \tag{36}$$

$$f_0 = 99{,}444 - 105{,}932 \cdot \omega_0 \tag{37}$$

$$\mathrm{f}_f = 83{,}414 - 74{,}859 \cdot \frac{w}{(c + cv)}, com\ \frac{cv}{c} = 0{,}25\ (20\%\ cinzas\ volantes) \tag{38}$$

$$\mathrm{k} = \frac{(83{,}414 - 99{,}444) \cdot (1 + 0{,}25)}{74{,}859 \cdot 0{,}25} \cdot \frac{1}{\omega_0} + \left[\frac{105{,}932 \cdot (1 + 0{,}25)}{74{,}859} - 1\right] \cdot \frac{1}{0{,}25} \tag{39}$$

$$\mathrm{k} = 3{,}075 - \frac{1{,}071}{\omega_0} \tag{40}$$

Para $\omega_0 = 0{,}5$, por exemplo, temos:

$$\mathrm{k} = 3{,}075 - \frac{1{,}071}{0{,}5} = 0{,}934 \tag{41}$$

Calculando o fator k para um nível de tensão, neste caso de forma a comparar os resultados, para um nível de tensão de 25 MPa:

$$f_0 = 25MPa \tag{42}$$

$$25 = 99{,}444 - 105{,}932 \cdot \omega_0 \rightarrow \omega_0 = 0{,}702 \tag{43}$$

$$\mathrm{k} = 1{,}344 - \frac{0{,}644}{0{,}702} = 0{,}42 \tag{44}$$

Verificando os resultados obtidos podemos afirmar que este método permite resultados diretos podendo relacionar facilmente o fator k com a razão a/c e com a resistência à compressão, consideradas as variáveis mais importantes. O método apresentado pelo CEN-TC104-SC1 N0766 TG5 possui várias vantagens. O cálculo do fator k é realizado com base nas duas equações de aproximação linear, previamente definidas segundo os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão e as suas razões a/l. O resultado de k surge pela relação entre as duas equações, para um caso pela atribuição de uma razão a/c (ω_0) e noutro pela atribuição de um nível de tensão como o realizado na presente dissertação. Em termos de valores obtidos, o fator k para a razão a/c de 0,5 pelo presente método foi de 0,93. Infelizmente não existe uma razão a/l equivalente podendo afirmar-se que na aproximação linear (a/l=0,482) o fator k é obtido numa tensão de 45 MPa com o valor de 0,1. Em termos de fator k, para um determinado nível de tensão, a comparação direta já é possível, obtendo-se um k=0,42 no presente método e um k=0,6 no programa experimental, no nível de tensão de 25 MPa, na aproximação linear na argamassa 20%CV. Comparando os resultados pode-se concluir que este método apresenta resultados pelo lado da segurança, com k's inferiores ainda que próximos. Este método é certamente um caminho a avaliar uma vez que se pretende atualmente que assim venha incluir as respetivas atualizações normativas.

4.5 Relação do fator k nas argamassas mistas

Uma vez que foram realizadas argamassas contendo em simultâneo adições de cinzas volantes e metacaulino, definiu-se como objetivo inicial uma análise ao comportamento do fator k nestas relativamente às que apenas contêm uma adição. Os valores de k foram retirados diretamente das argamassas que representam igual valor de substituição, e ajustados no caso de não existir argamassa correspondente. O valor de k obtido foi comparado com o valor efetivamente obtido na argamassa com adições simultâneas. Neste sentido, são apresentados no Quadro 70 ao Quadro 75, os respetivos resultados obtidos na aproximação linear na tensão de 25 MPa. Os resultados para os restantes níveis de tensão e aproximação linear encontram-se em anexo.

Quadro 70: Relação de linearidade entre argamassas 10%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação linear.

A. Linear				
Tensão= 25 MPa				
Fator de Eficiência k				
Idade	**20%CV**	**10%MTK**	**10%CV+10%MTK**	**10%CV+10%MTK (ENSAIO)**
7	0,85	0,14	0,10	0,56
28	0,55	0,97	0,15	0,95
90	0,55	0,65	0,12	1,20
180	1,10	0,67	0,18	1,21

Quadro 71: Relação de linearidade entre argamassas 10%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica.

A. Hiperbólica				
Tensão= 25 MPa				
Fator de Eficiência k				
Idade	**20%CV**	**10%MTK**	**10%CV+10%MTK**	**10%CV+10%MTK (ENSAIO)**
7	0,59	-0,07	0,05	0,26
28	0,10	1,54	0,16	0,85
90	0,04	1,02	0,11	1,01
180	1,02	1,70	0,27	1,36

Quadro 72: Relação de linearidade entre argamassas 30%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação linear.

A. Linear				
Tensão= 25 MPa				
Fator de Eficiência k				
Idade	**20%CV)**	**10%MTK**	**30%CV+10%MTK**	**30%CV+10%MTK (ENSAIO)**
7	1,08	0,46	0,37	1,25
28	1,79	2,26	0,76	1,69
90	1,01	0,40	0,34	1,10
180	1,10	0,50	0,38	1,09

Quadro 73: Relação de linearidade entre argamassas 30%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica.

A. Hiperbólica				
Tensão= 25 MPa				
Fator de Eficiência k				
Idade	**20%CV**	**10%MTK**	**30%CV+10%MTK**	**30%CV+10%MTK (ENSAIO)**
7	0,65	-0,35	0,16	0,88
28	0,04	1,09	0,12	0,73
90	0,52	0,34	0,19	0,71
180	0,89	0,23	0,29	0,67

Quadro 74: Relação de linearidade entre argamassas 50%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação linear.

A. Linear				
Tensão= 25 MPa				
Fator de Eficiência k				
Idade	**40%CV**	**10%MTK**	**50%CV+10%MTK**	**50%CV+10%MTK (ENSAIO)**
7	0,30	0,14	0,17	1,15
28	0,69	0,97	0,44	1,50
90	0,99	0,65	0,56	1,59
180	1,17	0,67	0,65	1,75

Quadro 75: Relação de linearidade entre argamassas 50%CV+10%MTK na tensão de 25 MPa, na aproximação hiperbólica.

A. Hiperbólica				
Tensão= 25 MPa				
Fator de Eficiência k				
Idade	**40%CV**	**10%MTK**	**50%CV+10%MTK**	**50%CV+10%MTK (ENSAIO)**
7	0,19	-0,35	0,06	1,04
28	0,23	1,09	0,22	1,03
90	0,40	0,34	0,23	0,94
180	0,60	0,23	0,32	1,07

Uma vez verificados os resultados, pode-se dizer que não foi encontrada qualquer combinação linear, obtendo-se valores de k muito diferentes dos obtidos em ensaio. Estes resultados são, no entanto, meramente indicativos uma vez que a linearidade não foi possível verificar de forma precisa, utilizando o k de argamassas próximas. No sentido desta avaliação fazer sentido e apresentar resultados que possam levar a conclusões sobre o comportamento de linearidade entre argamassas com adições únicas e argamassas com adições simultâneas, deve ser levado a cabo um programa experimental com argamassas equivalentes, isto é, para avaliar a linearidade de k da argamassa 10%CV+10%MTK, devem ser confecionadas argamassas de 10%CV e 10%MTK.

5 CONCLUSÕES

O presente programa experimental, que compreendeu a realização da presente dissertação, teve como objetivo a análise de misturas ternárias através do fator de eficiência k com a incorporação de cinzas volantes e metacaulino como adições minerais substitutas parciais do cimento. Foi possível concluir que a incorporação de adições minerais, efetivamente, trouxe vantagens em termos de resistência à compressão ao longo da idade, especialmente a longo prazo, a partir dos 90 dias. Os fatores de eficiência k situaram-se entre 0,2 (10%MTK) e 2 (20%MTK), aos 7 dias e 180 dias, em média, respetivamente. A resistência à compressão diminuiu sempre com a maior presença de água na amassadura, o que seria expetável. Como seria de esperar, as argamassas com elevadas percentagens de substituição não obtiveram melhores resultados relativamente à argamassa padrão mas sim resultados satisfatórios tendo em conta a sua elevada incorporação, o que deixa claro que a sua incorporação pode ser efetivamente uma excelente alternativa à utilização exclusiva de cimento. A resistência à compressão diminui a partir de 20% de substituição quando comparada com a mistura padrão. No entanto, a relação entre a percentagem de substituição e o fator k não apresentou resultados conclusivos com valores de k a aumentarem com a percentagem de substituição, o que não seria de esperar. A relação do fator k com o nível de tensão de cálculo permitiu concluir que o valor de k não apresenta elevada variabilidade numa faixa de tensões com intervalos de 5 MPa. Contudo, é de referir que a escolha do nível de tensão é, na presente abordagem, de enorme importância uma vez que deverá compreender a maior faixa de resultados de resistência à compressão obtidos nos ensaios à compressão. Conclui-se que o fator k evolui positivamente tendo em conta o seu valor inicial aos 7 dias de idade e o valor final, aos 180 dias de idade.

Em termos de composições, a argamassa 20%CV conseguiu ultrapassar a resistência à compressão da argamassa padrão aos 180 dias, com valores próximos a partir dos 90 dias, concluindo-se que a incorporação de cinzas volantes é, como referido por vários investigadores, uma adição benéfica com bons resultados de resistência à compressão a longo prazo. A composição 40%CV teve um comportamento semelhante, estando ligeiramente abaixo em termos de resistência à compressão da argamassa padrão. A composição 60%CV apresentou resultados satisfatórios nas menores razões a/l. Conclui-se que o aumento da

percentagem de substituição de cinzas volantes resultou em menores resistências à compressão, ou seja, com o aumento da percentagem de substituição a resistência vai diminuindo. É de referir que a diferença de resistência é notória com a maior presença de água. Na razão a/l 0,35 os resultados não apresentam grandes variações relativamente à argamassa padrão. É concluído que a maior presença de água na mistura apresenta argamassas com menores resistências à compressão, especialmente com o aumento da percentagem de incorporação de cinzas volantes. A incorporação de cinzas volantes apresentou valores de eficiência situados entre 0,1 e 1,6, aos 7 dias e 180 dias, em média, respetivamente. O fator k apresentou valores anómalos aos 28 dias de idade, com valores de k maiores que aos 90 dias, o que não seria previsível. No entanto, analisando a evolução do fator k dos 7 dias ao valor obtido aos 180 dias, é possível confirmar que este evolui com a idade, confirmando-se o esperado. Com base nos resultados obtidos, é de reforçar que a incorporação de cinzas volantes nas argamassas e betões são benéficas em termos de resistência a longo prazo. Esta conclusão pode igualmente ser encarada como uma observação para futuros estudos que possam questionar a idade a que a eficiência deverá ser avaliada, uma vez que no caso das cinzas volantes estas podem não apresentar o seu potencial a curto prazo, podendo ser questionada a legitimidade da sua incorporação. De referir, ainda que não comprovado no presente programa experimental, que a incorporação de cinzas volantes melhora ainda a durabilidade das argamassas e betões, com base na bibliografia consultada, que reforçam o incentivo à sua aplicabilidade.

Relativamente à incorporação de metacaulino, de forma análoga, é conclusivo que a sua inclusão é benéfica, apresentando resultados de resistência à compressão equivalentes e superiores comparativamente à argamassa padrão. Aos 7 dias de idade, a inclusão de metacaulino não apresenta valores superiores à argamassa padrão, estando ligeiramente abaixo, o que não seria expetável ainda que os valores sejam muito semelhantes. Aos 28 dias o efeito do metacaulino é notório, apresentando para todas as argamassas, nomeadamente, 10%MTK, 20%MTK e 30%MTK, em todas as razões a/l exceto 0,7, valores superiores de resistência à compressão comparativamente à argamassa padrão. A argamassa 20%MTK é aquela que apresenta o valor mais elevado de resistência à compressão em todo o programa experimental na razão a/l de 0,35 com o valor de 84,64 MPa. No entanto, em termos de avaliação da eficiência das adições pelo fator k, os resultados não foram em toda a linha consistentes, surgindo valores de k negativos na argamassa 10%MTK aos 7 dias, na aproximação hiperbólica. Estes resultados surgem devido à modelação das curvas de

aproximação que se apresenta abaixo da curva de aproximação do comportamento da resistência à compressão da argamassa padrão. A curva de aproximação encontra-se abaixo da curva de aproximação da argamassa padrão devido à proximidade dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias, na aproximação hiperbólica. No estudo realizado, a relação foi levada a cabo entre a resistência à compressão e a razão a/c, portanto segundo a quantidade de cimento existente na argamassa. O fator k teve igualmente um comportamento anómalo aos 28 dias, verificando-se um k elevado baixando este aos 90 dias para um valor inferior. Realizada a análise análoga em todas as argamassas, verificando o valor de k aos 7 dias e aos 180 dias, é possível concluir que o fator k evolui positivamente com a idade. É pertinente o resultado obtido aos 28 dias pelo que a sua consideração é uma falta no presente programa experimental, com os resultados anómalos obtidos. De igual forma o fator k não apresentou resultados conclusivos no seu comportamento relativamente à percentagem de substituição, decrescendo até aos 20% como o esperado mas aumentando a partir daí. E termos dos valores de k segundo o nível de tensão, os valores concluem que num determinado intervalo de tensões com uma variação de 5 MPa em cada nível, os valores de k são semelhantes. O valor do fator k nas argamassas contendo metacaulino encontram-se entre -0,2 e 2, aos 7 dias e 180 dias, em média, respetivamente. Conclui-se que a incorporação de metacaulino é uma adição que potencia como seria previsto, uma resistência à compressão superior à padrão a partir dos 28 dias, exceto a argamassa 30%MTK na razão 0,7 e, portanto, passível de incentivo enquanto substituição de parte do cimento na confeção de argamassas.

As misturas contendo adições simultâneas de cinzas volantes e metacaulino apresentaram resultados satisfatórios em termos de resistência à compressão. Aos 7dias apresentam resistências ligeiramente inferiores comparativamente à argamassa padrão mas que a partir dos 28 dias se invertem no caso das argamassas 10%CV+10%MTK e 30%CV+10%MTK na razão a/l 0,35 e 0,4. Nas argamassas contendo mais água apenas a composição 10%CV+10%MTK se encontra acima dos resultados de resistência à compressão padrão nas idades de 28, 90 e 180 dias. Mais uma vez a percentagem de substituição de 20% (10%CV+10%MTK) se apresenta como aquela com melhores resultados não desprezando os restantes que igualmente tiveram excelentes prestações, concluindo-se como sendo o valor ideal de substituição no presente programa experimental. Nas argamassas com mistura simultânea a de cinzas volantes e metacaulino foi possível observar um acréscimo de resistência em cerca de 10 MPa nas argamassas contendo 30%CV com 10%MTK e 50%CV com 10%MTK, o que demonstra que a presença de cinzas volantes numa idade superior aos

90 dias possibilita um acréscimo de resistência à compressão de cerca de 10 MPa, segundo os resultados obtidos. Na argamassa 10%CV+10%MTK, este acréscimo não foi notório, concluindo-se que a percentagem de 10%CV na argamassa 10%CV+10%MTK não apresenta um comportamento expressivo a longo prazo ainda que os resultados sejam semelhantes à argamassa padrão. Foi possível verificar que uma substituição de 20%CV apresenta resultados semelhantes a uma substituição de 30%MTK, o que leva a concluir que uma percentagem dentro 20-30% deva ser ponderada tendo em conta igualmente os custos das adições. O fator k teve igual comportamento em termos de percentagem de substituição assim como no nível de tensão com o referido nas outras argamassas. Os valores de eficiência situaram-se entre 0,3 e 1,7, aos 7 dias e 180 dias, em média, respetivamente. Foi ainda verificado que não existe qualquer tipo combinação linear entre os resultados obtidos nas argamassas com incorporação simultânea de cinzas volantes e metacaulino com as argamassas de adição única. Refere-se que os resultados obtidos não permitiram uma observação sustentável sobre a existência ou não de uma combinação linear entre as argamassas. No sentido desta avaliação fazer sentido e apresentar resultados que possam levar a conclusões sobre o comportamento de linearidade entre argamassas com adições únicas e argamassas com adições simultâneas, deve ser levado a cabo um programa experimental com argamassas equivalentes, isto é, para avaliar a linearidade de k da argamassa 10%CV+10%MTK, devem ser confecionadas argamassas de 10%CV e 10%MTK, como já referido.

Conclui-se ainda que os resultados obtidos utilizando a aproximação linear são, de modo geral, mais consistentes relativamente aos obtidos na aproximação hiperbólica apesar desta melhor representar o comportamento da resistência à compressão no leque de valores obtidos relativamente à razão a/l.

Uma vez apresentadas as conclusões, apresentam-se algumas observações que possam apoiar um futuro trabalho experimental na avaliação da eficiência de misturas ternárias através da aplicação do fator k. A utilização da abordagem apresentada em 2.6 passível de integrar uma revisão normativa na utilização de adições minerais substitutas parciais do cimento é de facto uma abordagem de interesse pela sua simplicidade e versatilidade, podendo o fator k ser obtido para uma razão água/cimento a que as argamassas sejam realizadas assim como para um determinado nível de tensão. É de referir que, de um modo geral, a avaliação do fator k é realizada tendo em conta intervalos de tensões reduzidos, razão pela qual a aproximação linear nesse caso funcione ao contrário do que é realizado na

presente dissertação, com uma elevada faixa de resultados, onde é sabido e concluído através dos valores de correlação que as curvas de aproximação hiperbólica representam melhor o comportamento da resistência à compressão em relação à razão a/c. Seria de interesse avaliar o fator k nos moldes realizados na presente dissertação seguindo a abordagem referida tendo igualmente em conta a faixa de resultados de forma a evitar ou minorar as extrapolações de onde surjam resultados anómalos. A idade a que o fator k deve efetivamente ser avaliado é igualmente uma questão pertinente uma vez que aos 28 dias a sua avaliação pode não representar o verdadeiro potencial da adição como é o caso da inclusão das adições de cinzas volantes, que a partir dos 90 dias é mais notório. É esperado que a conclusão do presente trabalho seja apenas um ponto de partida para um próximo, com o objetivo de potenciar o uso de adições minerais a fim de minorar a necessidade e dependência do cimento num abraçar consciente da construção com o ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO Designation T277-83; 2: Standard Method of Test for Resistance of Concrete Ion Penetration. FHWA, 1983.

Aguiar, J. B. (2000). *Apontamentos da disciplina de Materiais de Construção.* Universidade do Minho - Guimarães.

Aitcin, P.C (2000). *Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow*. Cement and Concrete Research.

Arnon Bentur (1988). *Impact of Additions: Indicators for Durability and Strength Performance.*

Arnon Bentur, Denis Mitchell (2008). *Material performance lessons*. Cement and Concrete Research, Volume 38, Issue 2, Special Issue -- The 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, Canada.

ASTM C1202 – 94: *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. American Society for Testing and Materials, 1994.

Babu, KG, G. Siva Nageswara Rao (1996). *Efficiency of fly ash in concrete with age*. Cement and Concrete Research, Volume 26, Issue 3.

Babu, K.G. and Rao, G.S.N (1995). *Efficiency of fly ash in concrete with age*. Cement and Concrete.

Brito, Maria J.C.C (2007). *Avaliação da eficácia de adições incorporadas no betão – fator k.* 90 páginas. dissertação. Universidade do Minho. Guimarães.

Camões, A. F. (2002). *Betões de Elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes.*

Camões, A. F. (2006*). Betões de Elevado Desempenho*.

CEN-TC104-SC1 N0766 TG5 (September 6, 2012) – *Use of k-value concept, Equivalente Concrete Performance Concept and Equivalente Performance of Combinations Concept*.

Coutinho, A., & Gonçalves, A. (1988). *Fabrico e propriedades do betão. Volume III.* Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

E. Badogiannis, V. G. Papadakis, E. Chaniotakis, S. Tsivilis (2004). *Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value*. Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 6.

Ferreira, M.J. Esteves, Gonçalves, Arlindo F. (1998). *K-values for two fly ash concrete of equal slump*.

H. S. Wong, H. Abdul Razak (2005). *Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance*. Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 4.

K. Anna (2010). *Freeze/Thaw Durability of Concrete with Fly Ash*. Master of Science Thesis in the Master's Programme Structural engineering and Building Performance Design, Chalmers University of Technology, Göteborg.

Kosmatka, Kerkhoff, and Panarese (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Fourteenth Edition. Portland Cement Association, Skokie, IL.

Malhotra, V.M. e Mehta, P.K. (2002). *High Performance, High Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories*. CANMET, Ottawa, Canada.

Mehta, K. (2001). *Reducing the environment impact of concrete*. Concrete can be durable and environmentally friendly. Concrete International, Vol.10.

Mehta, K. (2001). *High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development*. International. workshop on sustainable development and concrete technology.

NP EN 197-1:2001 — Cimento. Parte 1 — Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.

NP EN 206-1 (2005) : Betão Parte 1 - especificação, desempenho, produção e conformidade.

NP EN 450-1 (2008) : Cinzas volantes para betão - Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade.

NP 4220 (1993) : Pozolanas para betão - Definições, especificações e verificação da conformidade.

Oner, S. Akyuz, R. Yildiz (2005). *An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete*. Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 6.

Pinto, A. Teixeira (2004). *Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino*.

Prinya Chindaprasirt, Chai Jaturapitakkul, Theerawat Sinsiri (2004). *Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste*.

Sampaio, J., Sousa Coutinho, J., Sampaio, M.N (2000). *Melhoria do Desempenho de Betões pelo Metacaulino*. 43º Congresso Brasileiro do Concreto.

Santi, A. M. M. (1997). *O Emprego de Resíduos como Combustíveis Complementares na Produção de Cimento na Perspectiva da Energia, da Sociedade e do Meio Ambiente*. Estudo de caso: Minas Gerais no período 1980 – 1997. Campinas, SP: [s.p.]. Tese de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. 157 p.

Schulze, J.(1999). *Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars*, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 6.

Smith, I.A. (1967). *The design of fly ash concrete*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 36, pp 769-790.

Swamy, R.N (2000). *Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction. Sustainable construction into the Next Millennium environmentally friendly and innovative cement based materials*. In Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction into the next Millenium, Friendly and Innovative Cement Based Materials. N.P. Barbosa and R.N. Swamy Editors Brazil.

V. Baroghel-Bouny, C. Andarde, K. Scrivener (2007). *Proceedings International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete V*.

V. G. Papadakis (1999). *Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Low-calcium fly ash*. Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 11.

V. G. Papadakis (2000). *Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash*. Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 10.

V. G. Papadakis, S. Antiohos, S. Tsimas (2002). *Supplementary cementing materials in concrete: Part II: A fundamental estimation of the efficiency fator*. Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 10.

V. G. Papadakis, S. Tsimas (2005). *Greek supplementary cementing materials and their incorporation in concrete, Cement and Concrete Composites*. Volume 27, Issue 2, Cement and Concrete Research in Greece.

V. Matějka, P. Matějková, P. Kovář, J.Vlček, J. Přikryl, P.Červenka, Z. Lacný, J. Kukutschová (2012). *Metakaolinite/TiO_2 composite: Photoactive admixture for building materials based on Portland cement binder.* Construction and building materials.

Ecosmartconcrete (2010). Acedido em 25 de Maio de 2011, em http://ecosmartconcrete.com/

Introntech (2011). Acedido em 26 de Julho de 2011, em http://www.introntech.com/

ANEXOS

A - Materiais

Cimento CEM I 42,5R - Secil

CEM I 42,5R

Cimento Portland



Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Locais de Produção	Embalagem	Composição do Produto (Núcleo Cimento)
Fábrica Secil-Outão	Granel	95% a 100% Clínquer Portland
Fábrica Maceira-Liz	Sacos de 40kg	0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injecção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.

Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).

Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele.

Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para proteção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO3)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

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

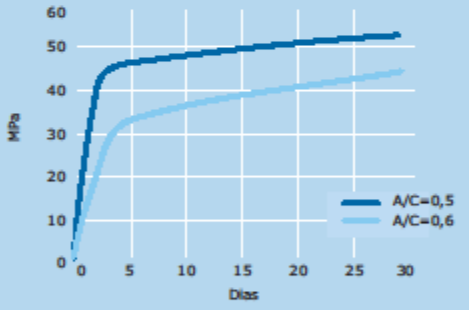
Características Mecânicas

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

Características Físicas

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

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



Autoestrada A2.
Ponte de Alcácer do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direcção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 986 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

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

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

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

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

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

Areia 0/4 - Britaminho

CE

0866

Britaminho-Granitos e britas do Minho, Lda.
Rua 10 de Junho, 130
4800-435 Gonça-Guimarães

DS

0866-CPD- 0088

PRODUTO: Areia 0/4 **ORIGEM:** Pedreira "Sorte do Mato das Lagedas"

Utilização
EN 13242:2002+A1 - Agregados para betão
NP EN 13139:2005 - Agregados para argamassa
NP EN 13043:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais em estradas, aeroportos e outras áreas sujeitas a tráfego de veículos
NP EN 13242:2002+A1 - Agregados para misturas granulares não ligados e para materiais com ligantes hidráulicos para utilização em trabalhos de engenharia civil e construção de estradas

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PRODUTO

NORMA	EN 13242:2002+A1	NP EN 13139:2005	NP EN 13043:2004	EN 13242:2002+A1
Dimensão nominal (d/D)	0/4			
Granulometria	GrBS	0/4	GrBS	GrSS
Teor de finos	f3	Categoria 1	NA	f3
Equivalente de Areia	SE62		NA	SE62
Azul de Metileno	MB0.3		NA	MBu 3
Massa Volúmica				
- Material impermeável	2.67			
- Partículas secas em estufa	2.66			
- Partículas saturadas	2.66			
- Absorção de Água	0.2 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %
Teor de cloretos	0.0 %		NA	
Teor de húmus à	Mais clara		NA	Mais clara
Contaminantes orgânicos leves	LOA3.0		Puro 1	NA

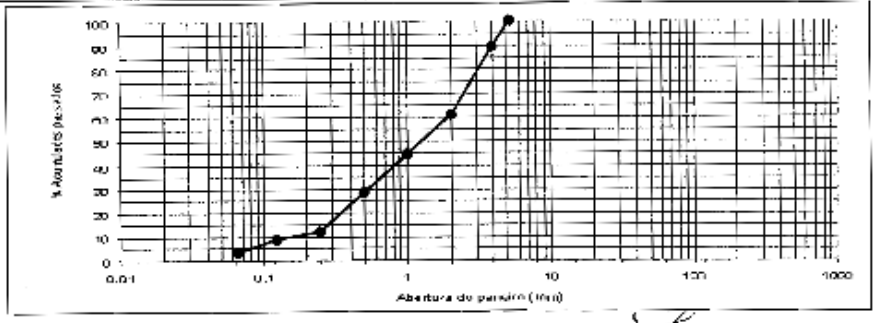
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
125			
80			
63			
50			
45			
40			
31.5			
25			
20			
16			
14			
12.5			
11.2			
10			
8	100	100	100
5.3			
5.6	99	98	100
5			
4	92	85	99
2	60		
1	47		
0.5	32		
0.25	22		
0.125	15		
0.063	8		

Descrição Petrográfica
Estrutura: Compacta
Textura: Holocristalina, fanerítica, de grão médio, com tendência porfiróide
Alteração: Sã a pouco alterada (W1-2)
Superfície: Áspera
Porosidade: Baixa
Forma: angulosa
Anisotropia: Isotrópica
Vesicular idade : Não apresenta
Outras propriedades verificadas: Cor cinza clara. Predomínio de biotite. Apresenta fenocristais de feldspato
Minerais presentes e respectivas dimensões: Quartzo (1 a 5 mm), feldspatos (1.5 a 18 mm), micas (0.5 a 2 mm) e outros. As percentagens aproximadas são 45%, 45%, 9%, 1% respectivamente.
Modo de Jazida: Batólito e/ou lacólito
Idade geológica: Hercínica
Classificação geológica: Rocha ígnea plutónica - Granito

NA – Não aplicável
DAD - Desempenho não determinado
(a) Se a relação for mais clara que a solução padrão, a areia pode não ser adequada

CURVA GRANULOMÉTRICA



DATA : 27/02/2010

ASSINATURA:

Superplastificante Glenium Sky 526 - Basf

BASF
The Chemical Company

GLENIUM® SKY 526

Superplastificante de éter policarboxilico para produção de betão de elevada performance com especial relevância sobre as resistências iniciais

Descrição
GLENIUM SKY 526 é um superplastificante inovador de segunda geração, à base de polímeros de éter policarboxílico (PCE). A configuração especial das suas moléculas permite uma eficaz hidratação do cimento. A adsorção da molécula às partículas de cimento, combinada com um eficaz efeito de dispersão, expõe uma maior superfície dos grânulos de cimento para reagirem com a água. Como resultado deste efeito, é possível obter um processo de hidratação mais eficaz e consequentemente melhor comportamento nas resistências iniciais.
A estrutura do polímero do GLENIUM SKY 526 foi especialmente desenvolvida para melhorar a rheologia do betão para aplicações em pré ou pós-esforço, revestimento definitivo de túneis, ou em qualquer processo que se pretenda uma descofragem relativamente rápida, obtendo betões de elevada fluidez e baixa viscosidade mesmo a baixas relações a/c sem risco de pegajosidade. Robustez é o distinto benefício do betão produzido com GLENIUM SKY 526. GLENIUM SKY 526 é livre de cloretos, reúne os requisitos NP EN-394-2 e é compatível com todos os tipos de cimento.

Rendimento / Dosagem
A dosagem normalmente recomendada situa-se entre 0,4 e 1,0 litros por 100 Kg de ligante e outros materiais (finos ou fillers) inferiores a 0,125 mm utilizados para produção de betão rheodinâmico. Outras dosagens podem ser utilizadas em situações especiais de acordo com as condições específicas de cada obra.Nestes casos consultar o nosso Departamento Técnico.

Embalagem e armazenamento
GLENIUM SKY 526 é fornecido em bidons de 210L , depósitos de 1000L e a granel. Armazenar em local a temperaturas não inferiores a 5·C. Se congelar, o produto deverá ser aquecido até pelo menos 30°C, e misturado adequadamente.

Campos de aplicação
GLENIUM SKY 526 pode ser utilizado em combinação com adjuvantes GLENIUM STREAM ou RHEOMATRIX, produzindo betão rheodinâmico, auto-compactável, mesmo na presença de grande densidade de armaduras, sem necessidade de vibração. GLENIUM SKY 526 permite obter uma forte plastificação e um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.
A utilização do GLENIUM SKY 526 deverá ter em particular atenção a temperatura ambiente. É aconselhável a utilização de um producto de gama POZZOLITH em sinergia por forma a garantir o tempo de trabalhabilidade desejado, sem comprometer a sua principal característica para contribuição melhorada às idades iniciais.

Vantagens
GLENIUM SKY 526 proporciona os seguintes benefícios à indústria de produção de betão:
- Produção de betão rheoplástico e rheodinâmico com uma menor relação a/c.
- Optimização dos ciclos de obra reduzindo a sua duração.
- Aumento da produtividade.
- Melhoria da aparência superficial.
- Melhora a rheologia do betão, minimizando a sua pegajosidade.
- Assegura robustez e consistência na qualidade do betão produzido.
- Comparativamente aos superplastificantes tradicionais, as propriedades tais como resistências iniciais e finais, à flexão e compressão, aderência ao aço, módulo de elasticidade, retracção, segregação e impermeabilidade são melhoradas.

BASF
The Chemical Company

GLENIUM® SKY 526

Características técnicas	
Função principal:	Superplastificante / Forte redutor de água
Função secundária:	Acelerador de endurecimento
Marcação CE:	Segundo NP EN 934-2 como T3.1, T3.2 e T7
Aspecto:	Líquido castanho
Densidade relativa (20ºC):	1,07 ± 0,02 g/cm^3
pH, 20ºC:	5 ± 1
Viscosidade (20ºC):	< 100 cps
Teor de cloretos:	≤ 0,1 %
Os dados técnicos aqui apresentados são fruto de resultados estatísticos. Caso se pretendam valores de controlo, podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico.	

Modo de aplicação

- GLENIUM SKY 526 é um adjuvante líquido pronto a usar que deve ser adicionado ao betão durante a mistura. Os melhores resultados são obtidos quando o adjuvante é adicionado após todos os restantes componentes e após a adição de pelo menos 80% do total de água de mistura. Evitar a adição do adjuvante aos materiais secos
- Misturar durante pelo menos 60 segundos, depois da introdução do GLENIUM SKY 526 por forma a obter uma dispersão homogénea.
- Continuar a mistura e ajustar a quantidade de água para obter a trabalhabilidade requerida.

NOTA:
A presente Ficha Técnica serve, assim como as demais recomendações e informação técnica, unicamente para a descrição das características do produto, modo de utilização e suas aplicações. Os dados e informações reproduzidos têm por base os nossos conhecimentos técnicos adquiridos através de biografia, ensaios de laboratório e através da prática.
Os dados de consumo e dosificação que figuram nesta ficha técnica, são baseados na nossa própria experiência, pelo que são susceptíveis de variações devido a diferentes condições de obra. Os consumos e dosificações reais deverão determinar-se através de ensaios prévios sendo estes responsabilidade do cliente.
Para um acompanhamento adicional, o nosso serviço técnico, está à sua disposição.
BASF Construction Chemicals Portugal, S.A. reserva o direito de modificar a composição dos produtos, sempre e quando estes continuem cumprindo as características descritas na Ficha Técnica.
Outras aplicações do produto que não se enquadrem com as indicadas, não serão da nossa responsabilidade.
Outorgamos garantia em caso de defeito na qualidade de produção dos nossos produtos, ficando excluídas as reclamações adicionais, sendo da nossa responsabilidade tão só a de compensar o valor de mercadoria fornecida.
Deve ser tido em conta as eventuais reservas correspondentes a patentes ou direito de terceiros.

Data de emissão 01/09/2010
A presente ficha técnica perde a sua validade com a emissão de uma nova.

Compatibilidade

GLENIUM SKY 526 é compatível e recomendado para utilização com:

- RHEOMATRIX para produção de Smart Dynamic Concrete;
- GLENIUM STREAM, adjuvantes para produção de betão rheodinâmico;
- MICRO-AIR adjuvante introdutor de ar, para melhorar a resistência aos ciclos de gelo-degelo (classe de exposição XF 1 a XF 4, EN 206 – 1);
- MEYCO MS 610, microsílica para betão de maiores performances e de maior durabilidade em ambientes quimicamente agressivos (classe de exposição XA 1 a XA 3, EN 206 – 1);
- Agente desmoldante RHEOFINISH para remoção de cofragens e para melhorar acabamentos arquitéctonicos.

GLENIUM SKY 526 não é compatível com os superplastificantes RHEOBUILD.

CE

BASF Construction Chemicals Portugal, S.A.
Sede e Fábrica: Rua de S. Sebastião, 57 – Cabra Figa
2635-047 RIO DE MOURO
Tel: 21 915 85 50 – Fax: 21 915 85 52
Delegação Norte: Rua Manuel Pinto de Azevedo, 626
4100-320 PORTO
Tel: 22 616 60 01 – Fax: 22 610 67 02
www.baf-cc.pt

Cinzas Volantes – Endesa Generación

Endesa Generacion S.A
U.P.T. Compostilla
Apartado de correos 35
24400 Ponferrada (Leon)

N. TICKET :Z0177360
FECHA: 06-05-2011 10:28

MATRICULA : 15 EV 65
FECHA ENTRADA: 06-05-201
ALBARAN:
TRANSPORTISTA: 7
CONDUCTOR:
OPERADOR TRANSPORTE:

N.ORDEN/TARJETA: 300002790

CLIENTE/PROV.: 403 CIAL ARROYO - INTERNAC
Ctra. Carrión, s/n 34306 PALENCIA
ZONA CARGA:
OBSERVACIONES:

MATERIAL	DESCRIPCION	TARA (Kg)	BRUTO (Kg	NETO (Kg)	N.B.
31	CENIZAS	13.320	40 500	27 180	3

HOJA DE AUTOCONTROL

EMPRESA: ENDESA
U.P.T. COMPOSTILLA
PAIS:
Nº CERTIFICADO: 0099/CPD/A95/003
AÑO: 2009

TIPO DE CENIZAS: B

AUTOCONTROL:

TIPO DE CENIZA	P.C.	FINURA	DENSIDAD
CATEGORÍA	B	N	
VALOR DECLARADO (V.D.)		15,00%	2420

MATERIA PRIMA	COMPOSICIÓN
CARBÓN	80%
COQUE	20%

RESULTADOS SOBRE LAS MUESTRAS DE AUTOCONTROL

		ANÁLISIS QUÍMICOS										ANÁLISIS FÍSICOS								
DIA de EXPEDICIÓN		P.C	Cl⁻	SO_3	CaO_{libre}	$CaO_{reactivo}$	$SiO_{2\,reactivo}$	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	Alcalis	MgO	P_2O_5	Finura-1 (%>0,045 mm)	Finura-2 (%>0,045 mm)	Densidad	Tiempo fraguado inicial (min)			Demanda agua	Indice acividad (%	
																$t_{75/25}$		≤ 95%	I.A.$_{28D}$	I.A.$_{90D}$
	Tipo	[2,7]%	≤ 0,10%	≤ 3%	≤ 2,5%	≤ 10%	≥ 25%	≥ 70%	≤ 5%	≤ 4%	≤ 100 mg/kg	≤ 40%	≤ 40%	± 200 kg/m³ (V.D.)	t_{100}	≤ 120 min t_{100}	Variación de t (%)	(100% cemento)	≥ 70%	≥ 80%
06-may-11	B	4,85	0	0,12	0,1	2,7	40,8	89,9	0,25	1,9	1,92	12,35	12,07	2420	240	220	109		79	99

Argamassa Padrão

Dosagem de água e cimento para W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

Volume da Amassadura									
W/C	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	300	900	100,8	6	3150	2650	1000	1040	0,541
0,4	300	900	115,8	6	3150	2650	1000	1040	0,556
0,5	300	900	150	0	3150	2650	1000	1040	0,585
0,6	300	900	180	0	3150	2650	1000	1040	0,615
0,7	300	900	210	0	3150	2650	1000	1040	0,645

				Quantidades			
Idade	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**SP (G)**
7	**0,35**	3	1,8	997,359	2992,077	335,113	19,947
28		3					
90		3					
180		3					

				Quantidades			
Idade	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**SP (G)**
7	**0,4**	3	1,8	970,473	2911,418	374,602	19,409
28		3					
90		3					
180		3					

				Quantidades		
Idade	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,8	923,297	2769,890	461,648
28		3				
90		3				
180		3				

				Quantidades		
Idade	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,8	878,248	2634,743	526,949
28		3				
90		3				
180		3				

				Quantidades		
Idade	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,8	837,390	2512,170	586,173
28		3				
90		3				
180		3				

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	100	10	10
0,4	215	21	22
0,5	100	10	10
0,6	160	16	16
0,7	242,5	24	24,5

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,039	kg
Cimento	4,607	kg
Areia	13,820	kg
Cinzas Volantes	0,000	kg
Metacaulino	0,000	kg
Água	2,284	L

Número de provetes
60

Argamassa 20% de cinzas volantes

Dosagem de C e CV		
%CV	**C (g)**	**CV(g)**
20	240	60
40	180	120
60	120	180

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,80
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

	Volume da Amassadura 20%CV										
W/C	**CV (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣcv**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	60	240	900	100,8	6	3150	2360	2650	1000	1040	0,548
0,4	60	240	900	115,8	6	3150	2360	2650	1000	1040	0,563
0,5	60	240	900	150	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,591
0,6	60	240	900	180	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,621
0,7	60	240	900	210	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,651

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,8	788,600	197,150	2957,251	19,715	331,212
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,40**	3	1,8	767,582	191,896	2878,434	19,190	370,358
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,8	730,672	182,668	2740,019	0,000	456,670
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,8	695,387	173,847	2607,701	0,000	521,540
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,8	663,353	165,838	2487,574	0,000	580,434
28		3						
90		3						
180		3						

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	117,5	12	11,5
0,4	245	24	25
0,5	110	11	11
0,6	175	17	18
0,7	215	21,5	21,5

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,039	kg
Cimento	3,646	kg
Areia	13,671	kg
Cinzas Volantes	0,911	kg
Metacaulino	0,000	kg
Água	2,260	L

Número de provetes
60

Argamassa 40% de cinzas volantes

Dosagem de C e CV		
%CV	**C (g)**	**CV(g)**
20	240	60
40	180	120
60	120	180

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

	Volume da Amassadura 40%CV										
W/C	**CV (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣcv**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	120	180	900	100,8	6	3150	2360	2650	1000	1040	0,554
0,4	120	180	900	115,8	6	3150	2360	2650	1000	1040	0,569
0,5	120	180	900	150	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,598
0,6	120	180	900	180	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,628
0,7	120	180	900	210	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,658

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,8	584,645	389,764	2923,226	19,488	327,401
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,4**	3	1,8	569,238	379,492	2846,189	18,975	366,210
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,8	542,157	361,438	2710,785	0,000	451,797
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,8	516,242	344,161	2581,209	0,000	516,242
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,8	492,691	328,461	2463,455	0,000	574,806
28		3						
90		3						
180		3						

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	135	13	14
0,4	250	25	25
0,5	115	11,5	11,5
0,6	180	18	18
0,7	235	23,5	23,5

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,038	kg
Cimento	2,705	kg
Areia	13,525	kg
Cinzas Volantes	1,803	kg
Metacaulino	0,000	kg
Água	2,236	L

Número de provetes
60

Argamassa 60% de cinzas volantes

Dosagem de C e CV		
%CV	**C (g)**	**CV(g)**
20	240	60
40	180	120
60	120	180

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

	Volume da Amassadura 60%CV										
W/C	**CV (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣcv**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	180	120	900	100,8	6	3150	2360	2650	1000	1040	0,561
0,4	180	120	900	115,8	6	3150	2360	2650	1000	1040	0,576
0,5	180	120	900	150	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,604
0,6	180	120	900	180	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,634
0,7	180	120	900	210	0	3150	2360	2650	1000	1040	0,664

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,8	385,330	577,995	2889,976	19,267	323,677
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,4**	3	1,8	375,288	562,932	2814,658	18,764	362,153
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,8	357,622	536,434	2682,168	0,000	447,028
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,8	340,700	511,050	2555,249	0,000	511,050
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**V (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,8	325,307	487,960	2439,799	0,000	569,286
28		3						
90		3						
180		3						

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	142,5	14	14,5
0,4	250	25	25
0,5	122,5	12	12,5
0,6	185	18	19
0,7	250	25	25

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,038	kg
Cimento	1,784	kg
Areia	13,382	kg
Cinzas Volantes	2,676	kg
Metacaulino	0,000	kg
Água	2,213	L

Número de provetes
60

Quantidades totais das argamassas com cinzas volantes

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,096	kg
Cimento	8,135	kg
Areia	40,578	kg
Cinzas Volantes	5,391	kg
Metacaulino	0,000	kg
Água	6,710	L

Número Total de provetes
180

Argamassa 10% de metacaulino

Dosagem de MTK para (W/C)		
%MTK	**C (g)**	**MTK (g)**
10	270	30
20	240	60
30	210	90

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

Volume da Amassadura 10%MTK											
W/C	**MTK (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣMTK**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	30	270	900	100,8	6	3150	2600	2650	1000	1040	0,543
0,4	30	270	900	115,8	6	3150	2600	2650	1000	1040	0,558
0,5	30	270	900	150	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,587
0,6	30	270	900	180	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,617
0,7	30	270	900	210	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,647

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,800	894,295	99,366	2980,985	19,873	333,870
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,4**	3	1,800	870,274	96,697	2900,914	19,339	373,251
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,800	828,114	92,013	2760,382	0,000	460,064
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,800	787,841	87,538	2626,138	0,000	525,228
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,800	751,304	83,478	2504,346	0,000	584,347
28		3						
90		3						
180		3						

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	130	13	13
0,4	217,5	22,5	21
0,5	110	11	11
0,6	170	17	17
0,7	217,5	21,5	22

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,039	kg
Cimento	4,132	kg
Areia	13,773	kg
Cinzas Volantes	0,000	kg
Metacaulino	0,459	kg
Água	2,277	L

Número de provetes
60

Argamassa 20% de metacaulino

Dosagem de MTK para (MTK/C)		
%MTK	**C (g)**	**MTK (g)**
10	270	30
20	240	60
30	210	90

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

Volume da Amassadura 20%MTK											
W/C	**MTK (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣMTK**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	60	240	900	100,8	6	3150	2600	2650	1000	1040	0,545
0,4	60	240	900	115,8	6	3150	2600	2650	1000	1040	0,560
0,5	60	240	900	150	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,589
0,6	60	240	900	180	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,619
0,7	60	240	900	210	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,649

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,800	791,993	197,998	2969,974	19,800	332,637
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,4**	3	1,800	770,796	192,699	2890,487	19,270	371,909
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,800	733,583	183,396	2750,938	0,000	458,490
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,800	698,024	174,506	2617,589	0,000	523,518
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MTK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,800	665,752	166,438	2496,571	0,000	582,533
28		3						
90		3						
180		3						

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	143,5	14,3	14,4
0,4	217,5	21,5	22
0,5	106,5	10,3	11
0,6	162,5	16,5	16
0,7	222,5	22	22,5

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,039	kg
Cimento	3,660	kg
Areia	0,915	kg
Cinzas Volantes	0,000	kg
Metacaulino	0,915	kg
Água	2,269	L

Número de provetes
60

Argamassa 30% de metacaulino

Dosagem de MtK para (MtK/C)		
%MtK	**C (g)**	**MtK (g)**
10	270	30
20	240	60
30	210	90

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

Volume da Amassadura 30%MtK											
W/C	**MtK (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣMtK**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	90	210	900	100,8	6	3150	2600	2650	1000	1040	0,547
0,4	90	210	900	115,8	6	3150	2600	2650	1000	1040	0,562
0,5	90	210	900	150	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,591
0,6	90	210	900	180	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,621
0,7	90	210	900	210	0	3150	2600	2650	1000	1040	0,651

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,800	690,444	295,905	2959,045	19,727	331,413
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,4**	3	1,800	672,031	288,013	2880,134	19,201	370,577
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,800	639,697	274,156	2741,559	0,000	456,926
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,800	608,789	260,910	2609,096	0,000	521,819
28		3						
90		3						
180		3						

				Quantidades				
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,800	580,730	248,884	2488,844	0,000	580,730
28		3						
90		3						
180		3						

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	120	12	12
0,4	142,5	14,5	14
0,5	90	9	9
0,6	125	12,5	12,5
0,7	172,5	17	17,5

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,039	kg
Cimento	3,192	kg
Areia	13,679	kg
Cinzas Volantes	0,000	kg
Metacaulino	1,368	kg
Água	2,261	L

Número de provetes
60

Quantidades totais das argamassas com metacaulino

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,117	kg
Cimento	10,984	kg
Areia	41,177	kg
Cinzas Volantes	0,000	kg
Metacaulino	2,742	kg
Água	6,807	L

Número Total de provetes
180

Argamassa 10% de cinzas volantes + 10% de metacaulino

Dosagem de CV e MtK				
%CV	**%MtK**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**
10	**10**	240	30	30
30	**10**	180	90	30
50	**10**	120	150	30

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

Volume da Amassadura 10%CV + 10%MtK													
W/C	**CV (g)**	**MtK (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣcv**	**ɣMtK**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	30	30	240	900	100,8	6	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,547
0,4	30	30	240	900	115,8	6	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,562
0,5	30	30	240	900	150	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,590
0,6	30	30	240	900	180	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,620
0,7	30	30	240	900	210	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,650

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	Nr.Provetes	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,8	790,293	98,78663	98,787	2963,599	19,757	331,923
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	Nr.Provetes	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,4**	3	1,8	769,186	96,14825	96,148	2884,448	19,230	371,132
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,8	732,125	91,51558	91,516	2745,467	0,000	457,578
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,8	696,703	87,08786	87,088	2612,636	0,000	522,527
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,8	664,551	83,06882	83,069	2492,064	0,000	581,482
28		3							
90		3							
180		3							

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	130	13	13
0,4	245	24	25
0,5	107,5	10,5	11
0,6	132,5	13	13,5
0,7	215	22	21

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,039	kg
Cimento	3,653	kg
Areia	13,698	kg
Cinzas Volantes	0,457	kg
Metacaulino	0,457	kg
Água	2,265	L

Número de provetes
60

Argamassa 30% de cinzas volantes + 10% de metacaulino

Dosagem de CV e MtK				
%CV	**%MtK**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**
10	10	240	30	30
30	10	180	90	30
50	10	120	150	30

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

Volume da Amassadura 30%CV + 10%MtK													
W/C	**CV (g)**	**MtK (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣcv**	**ɣMtK**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	90	30	180	900	100,8	6	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,553
0,4	90	30	180	900	115,8	6	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,568
0,5	90	30	180	900	150	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,596
0,6	90	30	180	900	180	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,626
0,7	90	30	180	900	210	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,656

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,8	585,886	292,943	97,648	2929,429	19,530	328,096
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,4**	3	1,8	570,414	285,207	95,069	2852,069	19,014	366,966
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,8	543,224	271,612	90,537	2716,118	0,000	452,686
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,8	517,209	258,604	86,201	2586,044	0,000	517,209
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,8	493,572	246,786	82,262	2467,859	0,000	575,834
28		3							
90		3							
180		3							

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	137,5	13,5	14
0,4	212,5	21	21,5
0,5	117,5	11,5	12
0,6	205	20	21
0,7	240	24	24

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,039	kg
Cimento	2,710	kg
Areia	13,552	kg
Cinzas Volantes	1,355	kg
Metacaulino	0,452	kg
Água	2,241	L

Número de provetes
60

Argamassa 50% de cinzas volantes + 10% de metacaulino

Dosagem de CV e MtK				
%CV	**%MtK**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**
10	10	240	30	30
30	10	180	90	30
50	10	120	150	30

Dosagem de água W/C		
W/C	**C (g)**	**W (g)**
0,35	300	100,8
0,4	300	115,8
0,5	300	150
0,6	300	180
0,7	300	210

Volume da Amassadura 50%CV + 10%MtK													
W/C	**CV (g)**	**MtK (g)**	**C (g)**	**A (g)**	**W (g)**	**2% SP (g)**	**ɣc**	**ɣcv**	**ɣMtK**	**ɣa**	**ɣw**	**ɣsp**	**V (L)**
0,35	150	30	120	900	100,8	6	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,559
0,4	150	30	120	900	115,8	6	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,574
0,5	150	30	120	900	150	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,603
0,6	150	30	120	900	180	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,633
0,7	150	30	120	900	210	0	3150	2360	2600	2650	1000	1040	0,663

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,35**	3	1,8	386,138	482,673	96,535	2896,038	19,307	324,356
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,4**	3	1,8	376,054	470,068	94,014	2820,408	18,803	362,893
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,5**	3	1,8	358,318	447,90	89,580	2687,389	0,000	447,898
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,6**	3	1,8	341,332	426,665	85,333	2559,987	0,000	511,997
28		3							
90		3							
180		3							

			Quantidades						
Idade (dias)	**W/C**	**Nr.Provetes**	**Volume (12 provetes) (L)**	**C (g)**	**CV (g)**	**MtK (g)**	**A (g)**	**SP (g)**	**W (g)**
7	**0,7**	3	1,8	325,882	407,353	81,471	2444,118	0,000	570,294
28		3							
90		3							
180		3							

Espalhamento (1,8L)	**mm**	**d1**	**d2**
0,35	155	15	16
0,4	250	25	25
0,5	140	14	14
0,6	227,5	22,5	23
0,7	245	25	24

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,038	kg
Cimento	1,788	kg
Areia	13,408	kg
Cinzas Volantes	2,235	kg
Metacaulino	0,447	kg
Água	2,217	L

Número de provetes
60

Quantidades totais das argamassas com cinzas volantes e metacaulino

Materiais	**Quantidade Total**	
Superplastificante	0,116	kg
Cimento	8,151	kg
Areia	40,658	kg
Cinzas Volantes	4,046	kg
Metacaulino	1,355	kg
Água	6,723	L

Resistência à compressão

Argamassa Padrão

0,35	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	130,30	129,07	131,70	130,36	3,15	2,42	160,10	157,30	154,70	157,37	2,70	1,72	165,80	166,00	164,70	165,50	0,70	0,42	174,00	172,30	175,00	173,77	1,37	0,79

0,4	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	120,90	125,32	127,00	124,41	1,32	1,06	148,30	148,30	147,60	148,07	0,40	0,27	159,80	160,00	158,90	159,57	0,59	0,37	167,40	169,10	170,40	168,97	1,50	0,89

0,5	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	90,00	90,40	92,00	90,80	1,06	1,17	101,30	108,50	109,70	106,50	4,54	4,27	112,30	110,30	109,40	110,67	1,48	1,34	121,30	119,80	120,30	120,47	0,76	0,63

0,6	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	69,08	68,48	68,01	68,52	0,54	0,78	89,40	89,20	85,00	87,87	2,49	2,83	99,50	103,70	106,40	103,20	3,48	3,37	109,20	109,10	108,70	109,00	0,27	0,24

0,7	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	42,50	48,23	45,52	45,42	2,87	6,31	68,50	66,20	69,10	67,93	1,53	2,25	77,80	77,80	73,60	76,40	2,43	3,17	79,80	81,50	79,90	80,40	0,95	1,19

Resistência à compressão

Argamassa 20% Cinzas Volantes

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,35	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	120,00	120,00	117,00	119,00	1,73	1,46	130,70	137,50	128,50	132,23	4,69	3,55	137,50	139,00	138,50	138,33	0,76	0,55	187,90	185,50	186,30	186,57	1,22	0,66

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,4	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	110,30	110,00	111,00	110,43	0,51	0,46	115,00	114,00	115,30	114,77	0,68	0,59	119,00	118,90	120,00	119,30	0,61	0,51	156,00	154,10	155,00	155,03	0,95	0,61

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,5	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	88,30	85,00	83,60	85,63	2,41	2,82	95,00	96,00	95,40	95,47	0,50	0,53	101,60	101,60	104,50	102,57	1,67	1,63	122,30	121,20	123,20	122,23	1,00	0,82

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,6	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	53,00	56,30	55,00	54,77	1,66	3,04	66,70	62,90	59,50	63,03	3,60	5,71	80,50	80,80	84,90	82,07	2,46	3,00	101,30	105,30	100,20	102,27	2,68	2,62

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,7	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	33,20	38,40	39,00	36,87	3,19	8,65	44,04	45,03	49,00	46,02	2,63	5,70	65,00	62,70	57,90	61,87	3,62	5,86	77,10	77,80	74,20	76,37	1,90	2,50

Resistência à compressão

Argamassa 40% Cinzas Volantes

0,35	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	78,00	73,10	78,00	76,37	2,83	3,70	104,90	103,70	104,10	104,23	0,61	0,59	142,20	139,10	141,20	140,83	1,58	1,12	168,70	170,40	170,30	169,80	0,95	0,56

0,4	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	74,50	75,30	74,00	74,60	0,66	0,88	99,60	95,60	95,80	97,00	2,25	2,32	133,70	130,20	133,70	132,53	2,02	1,52	159,20	161,50	160,30	160,33	1,15	0,72

0,5	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	42,01	44,43	44,37	43,60	1,38	3,17	63,64	64,52	63,98	64,05	0,44	0,69	85,10	91,00	86,80	87,63	3,04	3,47	104,10	100,20	106,20	103,50	3,05	2,94

0,6	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	30,20	27,33	29,09	28,87	1,45	5,01	49,81	45,66	48,92	48,13	2,19	4,54	61,80	63,90	62,60	62,77	1,06	1,69	79,60	83,50	78,50	79,53	3,56	4,48

0,7	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	19,59	19,50	19,56	19,55	0,05	0,23	33,61	33,79	33,47	33,62	0,16	0,48	47,55	46,74	48,66	47,65	0,96	2,02	61,20	59,50	58,60	59,77	1,32	2,21

Resistência à compressão

Argamassa 60% Cinzas Volantes

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,35	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	60,02	62,68	61,76	61,49	1,35	2,20	81,00	79,00	79,60	79,87	1,03	1,29	108,80	115,30	114,50	112,87	3,54	3,14	135,40	134,50	134,30	134,73	0,59	0,43

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,4	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	60,25	56,53	58,68	58,49	1,87	3,19	70,80	68,30	70,30	69,80	1,32	1,90	110,00	109,30	108,20	109,17	0,91	0,83	125,60	129,40	122,90	125,97	3,27	2,59

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,5	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	31,17	35,00	32,60	32,92	1,93	5,88	42,02	43,00	41,68	42,23	0,69	1,62	55,50	55,40	55,30	55,40	0,10	0,18	71,50	68,30	67,50	69,10	2,12	3,06

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,6	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	20,87	21,23	19,73	20,61	0,78	3,80	28,18	28,93	28,65	28,59	0,38	1,33	42,90	40,71	42,90	42,17	1,26	3,00	42,29	42,64	43,20	42,71	0,46	1,07

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,7	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	16,81	18,75	17,78	17,78	0,97	5,46	26,83	27,01	26,20	26,68	0,43	1,59	39,03	37,98	38,60	38,54	0,53	1,37	38,91	39,32	42,77	40,53	2,00	4,94

Resistência à compressão

Argamassa 10% Metacaulino

0,35	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	121,60	127,60	126,60	125,27	3,22	2,57	175,70	173,10	174,10	174,57	1,33	0,76	178,10	174,40	175,60	176,03	1,89	1,07	182,00	180,00	182,60	181,53	1,36	0,75

0,4	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	108,60	110,20	109,40	109,40	0,80	0,73	165,60	163,20	165,30	164,70	1,31	0,79	167,40	165,80	166,53	166,58	0,80	0,48	177,70	174,60	176,90	176,40	1,61	0,91

0,5	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	73,40	69,33	65,43	69,39	3,99	5,74	121,50	118,60	120,40	120,17	0,93	1,22	124,60	125,30	126,70	125,53	1,07	0,85	129,50	125,00	128,40	127,63	2,35	1,84

0,6	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	51,63	52,93	54,49	53,02	1,43	2,70	89,40	87,90	89,60	88,97	0,93	1,04	91,70	95,20	93,40	93,43	1,75	1,87	95,60	96,80	93,80	95,40	1,51	1,58

0,7	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	38,12	37,83	33,45	36,47	2,62	7,18	65,90	60,10	60,30	62,10	3,29	5,30	67,80	66,30	66,90	67,00	0,76	1,13	75,50	73,50	76,80	75,27	1,66	2,21

Resistência à compressão

Argamassa 20% Metacaulino

0,35	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	129,50	130,90	132,90	131,10	1,71	1,30	188,70	193,70	190,50	190,97	2,53	1,33	210,10	206,80	208,30	208,40	1,65	0,79	213,50	210,00	211,30	211,60	1,77	0,84

0,4	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	110,30	112,30	108,90	110,50	1,71	1,55	176,20	178,00	174,50	176,23	1,75	0,99	176,60	183,30	179,36	179,75	3,37	1,87	181,20	183,50	185,40	183,37	2,10	1,15

0,5	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	77,20	78,30	80,03	78,51	1,43	1,82	124,90	129,90	128,60	127,80	2,59	2,03	137,00	134,50	135,90	135,80	1,25	0,92	135,90	138,30	137,40	137,20	1,21	0,88

0,6	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	56,37	58,29	56,80	57,15	1,01	1,76	97,90	101,90	99,60	99,80	2,01	2,01	102,70	101,90	102,90	102,50	0,53	0,52	103,10	106,60	105,80	105,17	1,83	1,74

0,7	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	38,49	40,37	40,84	39,90	1,24	3,12	71,40	78,30	75,60	75,10	3,48	4,63	81,10	81,20	78,90	80,40	1,30	1,62	82,20	83,50	81,20	82,30	1,15	1,40

Resistência à compressão

Argamassa 30% Metacaulino

0,35	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	114,30	115,80	113,70	114,60	1,08	0,94	196,50	197,00	198,00	197,17	0,76	0,39	199,40	204,30	200,60	201,43	2,55	1,27	208,70	212,50	209,30	210,17	2,04	0,97

0,4	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	103,60	101,60	100,30	101,83	1,66	1,63	171,70	170,10	172,30	171,37	1,14	0,66	186,30	183,30	185,30	184,97	1,53	0,83	184,50	185,30	186,00	185,27	0,75	0,41

0,5	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	62,24	63,40	60,60	62,08	1,41	2,27	118,30	121,10	119,50	119,63	1,41	1,17	120,90	119,20	122,10	120,73	1,46	1,21	121,20	118,00	126,10	121,77	4,08	3,35

0,6	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	48,15	48,25	49,27	48,56	0,62	1,28	92,30	89,30	90,80	90,80	1,50	1,65	89,40	89,90	92,30	90,53	1,55	1,71	93,60	87,90	96,30	92,60	4,29	4,63

0,7	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	32,22	32,34	32,39	32,32	0,09	0,27	60,60	62,00	60,30	60,97	0,91	1,49	71,10	70,60	69,90	70,53	0,60	0,85	74,90	73,90	76,00	74,93	1,05	1,40

Resistência à compressão

Argamassa 10% Cinzas Volantes + 10% Metacaulino

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,35	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	118,20	113,00	113,50	114,90	2,87	2,50	160,80	159,80	157,60	159,40	1,64	1,03	166,90	165,30	163,40	165,20	1,75	1,06	188,40	198,30	199,10	195,27	5,96	3,05

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,4	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	104,10	100,90	100,30	101,77	2,04	2,01	142,50	140,50	140,00	141,00	1,32	0,94	156,30	151,20	149,90	152,47	3,38	2,22	184,40	177,90	182,10	181,47	3,30	1,82

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,5	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	65,00	65,40	60,60	63,67	2,66	4,18	98,70	95,40	97,00	97,03	1,65	1,70	116,30	113,80	115,20	115,10	1,25	1,09	120,60	116,70	117,30	118,20	2,10	1,78

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,6	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	50,88	50,55	51,31	50,91	0,38	0,75	78,80	76,50	74,10	76,47	2,35	3,07	88,20	88,80	90,20	89,07	1,03	1,15	103,70	101,90	99,70	101,77	2,00	1,97

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,7	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	35,71	37,70	37,74	37,05	1,16	3,13	59,00	62,20	61,70	60,97	1,72	2,82	79,00	76,87	78,40	78,09	1,10	1,41	91,40	89,70	90,20	90,43	0,87	0,97

Resistência à compressão

Argamassa 30% Cinzas Volantes + 10% Metacaulino

0,35	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	115,60	110,90	114,20	113,57	2,41	2,12	115,30	155,40	155,30	154,67	1,19	0,77	177,70	181,00	178,10	178,93	1,80	1,01	196,20	193,30	195,80	195,10	1,57	0,81

0,4	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	109,30	106,50	108,60	108,13	1,46	1,35	133,50	133,40	133,60	133,50	0,10	0,07	155,00	156,00	158,00	156,33	1,53	0,98	172,80	180,40	174,60	175,93	3,97	2,26

0,5	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	66,20	65,80	69,00	67,00	1,74	2,60	88,20	86,50	83,60	86,10	2,33	2,70	109,50	106,50	104,70	106,90	2,43	2,27	115,80	118,60	111,20	115,20	3,74	3,24

0,6	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	39,06	40,00	43,10	40,72	2,11	5,19	59,30	60,00	59,90	59,73	0,38	0,63	77,60	75,80	72,90	75,43	2,37	3,14	90,40	84,80	87,70	87,63	2,80	3,20

0,7	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	29,77	29,79	29,38	29,65	0,23	0,78	46,31	44,30	43,91	44,84	1,29	2,87	56,00	58,00	59,70	57,90	1,85	3,20	60,40	62,20	59,90	60,83	1,21	1,99

Resistência à compressão

Argamassa 50% Cinzas Volantes + 10% Metacaulino

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,35	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação%
	94,00	92,60	92,70	93,10	0,78	0,84	138,00	140,00	138,90	138,97	1,00	0,72	162,10	162,20	165,00	163,10	1,65	1,01	173,30	168,40	170,20	170,63	2,48	1,45

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,4	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	64,40	62,60	60,20	62,40	2,11	3,38	99,00	100,40	98,90	99,43	0,84	0,84	119,70	111,70	113,60	115,00	4,18	3,63	140,30	133,30	138,90	137,50	3,70	2,69

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,5	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	37,44	36,42	38,00	37,28	0,80	2,15	52,30	51,06	54,65	52,67	1,82	3,46	75,00	70,10	71,10	72,07	2,59	3,59	94,00	95,20	94,90	94,70	0,62	0,66

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,6	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	21,47	22,91	23,80	22,73	1,18	5,17	38,36	36,03	38,60	37,66	1,42	3,77	55,50	52,30	53,60	53,80	1,61	2,99	72,80	70,00	68,30	70,37	2,27	3,23

	7 dias						28 dias						90 dias						180 dias					
0,7	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação	Pro.1	Pro.2	Pro.3	Média	Desvio	C.Variação
	5,89	6,29	6,57	6,25	0,34	5,47	26,57	26,09	26,70	26,45	0,32	1,21	34,65	31,58	34,35	33,53	1,69	5,05	39,90	40,00	42,00	40,63	1,19	2,92