



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL COM RETRACÇÃO CONTROLADA

Miguel José Pereira das Dores Santos de Oliveira
(Mestre)

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil

Orientador: Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro
Co-Orientador: Professor Doutor Fernando José Forte Garrido Branco

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Fevereiro de 2012

À minha família

AGRADECIMENTOS

O culminar deste trabalho é fruto da vivência, dia a dia, com muitas pessoas que colaboraram comigo directa ou indirectamente, quer a nível profissional, quer a nível particular. Esta fase tem um grande significado pessoal pois traduz-se no atingir de uma meta que implicou vencer muitas etapas. Poderia dizer que a primeira etapa teve início em 1993 quando começou o meu trabalho como Docente na Universidade do Algarve. Desde então, e uma vez que não é possível agradecer a todas as pessoas, gostaria de salientar:

Engenheiro António Bettencourt Ribeiro que desde o meu primeiro contacto em 2002, aquando da realização da Tese de Mestrado, manifestou sempre um profissionalismo e companheirismo exemplar.

Professor Fernando Branco, pela disponibilidade e profissionalismo.

Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve, pelas condições facultadas para a realização deste trabalho, que embora não tenham sido as ideais foram as possíveis e representaram um esforço apreciável. Em termos humanos, aos técnicos Fernando Oliveira e Hugo Semião sem os quais a parte experimental teria sido muito difícil de realizar. Engenheiro Morgado André pelo apoio e amizade ao longo de tantos anos.

Elementos do Núcleo de Betões do Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela colaboração prestada.

Empresas que gentilmente facultaram os materiais utilizados: Cimpor, Industria de cimentos, S.A.; BASF – Constructions Chemicals Portugal, S.A.e Sika Portugal S.A..

À minha família pelo apoio e paciência em todos os momentos.

Ao meu grande amigo João Paulo.

RESUMO

O betão autocompactável apresenta-se actualmente como um material inovador, o qual tem provado possuir um elevado potencial, nas áreas da produtividade, condições de trabalho e até mesmo em matérias resultantes das suas características intrínsecas. Nomeadamente, apresenta propriedades especiais, que justificam a sua preferência em muitas aplicações. No entanto são conhecidos vários casos de comportamento inadequado, devido principalmente ao comportamento deficiente deste material durante o processo de hidratação e secagem.

A retracção tem uma importância significativa na concepção, dimensionamento, processo construtivo e comportamento em serviço das estruturas de betão. No entanto, não estão ainda completamente esclarecidos os mecanismos básicos a ela inerentes e a forma como interagem entre si. Os modelos de previsão existentes e exigências normativas específicas não consideram de forma adequada a influência dos factores existentes. Além disso, a possibilidade de utilização de novos materiais limita fortemente a aplicação do conhecimento existente.

Nesse sentido, e de modo contribuir para a resolução de uma das principais desvantagens do material betão autocompactável – a sua elevada retracção, foi planeada uma extensa campanha de ensaios em provetes, tendo em vista a avaliação da respectiva retracção. Entre outros materiais ou técnicas foi dada especial importância à utilização de adjuvantes redutores de retracção e adições expansivas.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados, foi possível avaliar a eficiência da utilização dos materiais testados e estabelecer algumas limitações de utilização.

Obtiveram-se melhoramentos significativos nas propriedades estudadas, que permitiram formular algumas perspectivas promissoras sobre desenvolvimentos futuros.

Apenas com a utilização de materiais disponíveis no mercado português apresentam-se soluções técnicas satisfatórias em termos melhoramento de comportamento e viabilidade económica.

Palavras-chave:

Betão autocompactável; Retracção; Retracção autogénea; Adjuvantes redutores de retracção; Adições expansivas.

ABSTRACT

The self-compacting concrete is nowadays an innovator product, which has proved to have a high potential, in areas of productivity, working conditions and even in matters resulting of its own characteristics.

It presents, expressly, special properties, which justify the preference for its use. However several accidents of improper behavior are actually known, mainly due to the inadequate behavior of this material during the hydration and drying process.

The shrinkage has a significant importance in the conception, dimensioning, constructive process and functioning behavior of the concrete structures. However its basic mechanisms and the way they interact are not yet completely clear. The actual foresight models and specific standard demands do not consider in an appropriate way the influence of the existing factors. Besides the possibility of new materials utilization strongly restrains the application of the actual knowledge.

So, and in order to contribute for the solution of one of the most important disadvantages of the self-compacting concrete – its high shrinkage, an extensive campaign of essays in specimens was planned to evaluate its reaction. Among other materials it was given a special importance to the using of shrinkage reducing admixtures and expansive products.

Based on the achieved results, it was possible to evaluate the efficiency in the utilization of the tested materials and determinate some limitations for its using.

Some significant improvements in the studied properties were achieved, which have allowed formulating several promising perspectives over future developments.

Counting only with the utilization of available materials in the portuguese market, satisfactory technical solutions are present in order to make better its behavior and economical viability

Keywords:

Self-compacting concrete; Shrinkage; Autogenous shrinkage; Shrinkage reducing admixtures and Expansive products.

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	2
1.2	Objectivo e metodologia	3
1.3	Estrutura do documento	3
2	BETÕES AUTOCOMPACTÁVEIS.....	5
2.1	PRINCÍPIOS.....	5
2.2	Estudo de composições	8
2.3	Classificação e aplicação	14
2.4	– Enquadramento dos betões utilizados neste trabalho.....	17
3	RETRACÇÃO.....	19
3.1	Variações de volume no betão - Enquadramento	19
3.2	Forças actuantes	21
3.2.1	Retracção Química e Retracção Autogénea.....	21
3.2.1.1	Autodessecação	25
3.2.1.2	Mecanismo da retracção autogénea	28
3.2.1.2.1	Teoria de base - Modelo de Powers`	29
3.2.1.2.2	Influência da composição do ligante.....	31
3.2.1.2.3	Influência da relação A/C.....	33
3.2.1.2.4	Influências de outros factores	34
3.2.1.3	Métodos de redução da retracção autogénea	37
3.2.2	Retracção por secagem	38
3.2.2.1	Factores que afectam a retracção por secagem	41
3.2.2.1.1	Influência da humidade relativa e tempo de secagem.....	41
3.2.2.1.2	Influência da quantidade e tipo de agregado	42
3.2.2.1.3	Influência da pasta (constituição e quantidade).....	42
3.2.2.1.4	Influência da geometria do elemento.....	43
3.2.2.1.5	Influência de adjuvantes	43
3.2.2.1.6	Utilização de cimentos expansivos	44
3.2.2.2	Métodos de redução da retracção por secagem	44
3.2.3	Retracção por carbonatação	45
3.2.4	Hidratação e distribuição de humidade.....	45
3.2.5	Variações térmicas nas primeiras idades	47
3.3	Cura interna.....	49

3.3.1	Mecanismo da cura interna com água	53
3.3.1.1	Aplicação do modelo de Powers`	54
3.3.2	Materiais e métodos para a realização da cura interna.....	58
3.3.2.1	Agregados normais	58
3.3.2.2	Agregados reciclados	58
3.3.2.3	Polímeros superabsorventes (PSA)	59
3.3.2.4	Substâncias com água retida fisicamente	60
3.3.2.5	Selagem interna.....	60
3.3.3	Utilização de agregados leves pré-saturados.....	60
3.3.4	Avaliação da eficiência da cura interna com água	62
3.3.4.1	Humidade relativa interna	62
3.3.4.2	Grau de saturação.....	62
3.3.4.3	Absorção isotérmica.....	63
3.3.4.4	Grau de hidratação.....	63
3.3.4.5	Deformação autogénea	64
3.3.5	Influência da cura interna noutras propriedades do betão.....	64
3.3.5.1	Reologia do betão fresco.....	64
3.3.5.2	Segregação	64
3.3.5.3	Efeito na retracção de secagem.....	65
3.4	Tempo zero	65
3.5	Betão de retracção compensada	69
3.6	Adjuvantes redutores de retracção.....	72
3.6.1	Introdução.....	72
3.6.2	Mecanismo de acção	72
3.6.3	Efeito na retracção	74
3.6.4	Efeito noutras propriedades.....	74
3.6.5	Utilização simultânea de dois ARR.....	75
3.6.6	Combinação com o efeito de adições expansivas	76
3.7	Evolução dos métodos de ensaio	79
3.7.1	Determinação da retracção autogénea nas primeiras idades.....	79
3.7.2	Principais ensaios de retracção restringida.....	81
3.7.2.1	Ensaio em anéis	81
3.7.1.1	Ensaio em painéis	81
3.7.1.2	Ensaio longitudinais	82
3.7.1.2.1	Longitudinais qualitativos.....	82

3.7.1.2.2	Longitudinais passivos	83
3.7.1.2.3	Longitudinais activos	84
4	TRABALHO EXPERIMENTAL	85
4.1	Materiais utilizados.....	85
4.1.1	Cimentos.....	85
4.1.2	Adições.....	86
4.1.3	Adjuvantes	87
4.1.4	Agregados.....	89
4.1.4.1	Agregados de Densidade Normal.....	89
4.1.4.1.1	Massa volúmica e absorção de água	89
4.1.4.1.2	Granulometria	89
4.1.4.2	Agregados Leves.....	90
4.1.5	Água	91
4.2	Métodos de ensaio	92
4.2.1	Métodos de ensaio utilizados na Fase I.....	92
4.2.1.1	Amassadura	92
4.2.1.2	Ensaio de espalhamento.....	93
4.2.1.3	Ensaio de escoamento no funil V.....	93
4.2.1.4	Ensaio da caixa L	94
4.2.1.5	Resistência mecânica	95
4.2.2	Métodos de ensaio utilizados na fase II.....	95
4.2.2.1	Condições climáticas da sala de trabalho	95
4.2.2.2	Amassadura	96
4.2.2.3	Preparação e conservação de provetes	97
4.2.2.4	Pesagem.....	99
4.2.2.5	Medição da retracção – método convencional	100
4.2.2.6	Medição da retracção autogénea desde o estado fresco	101
4.2.2.7	Medição da resistência	102
4.2.2.8	Medição da porosidade	103
4.3	Composições.....	105
4.3.1	Composições desenvolvidas na Fase I.....	105
4.3.2	Composições desenvolvidas na Fase II	106
4.3.2.1	Composições desenvolvidas a partir da composição BAC b-R	106
4.3.2.2	Composições desenvolvidas a partir da composição BAC b±R ...	107
4.3.2.3	Composições desenvolvidas a partir da composição BAC b+R	107
4.4	Número de provetes, condições de cura e posterior troca de humidade	109

5	Apresentação e Análise de Resultados	111
5.1	Resultados referentes à 1ª Fase da Investigação.....	111
5.1.1	Autocompactibilidade dos BACb-R, BACb±R e BACb+R	111
5.1.2	Resistência à compressão	112
5.2	Resultados referentes à 2ª fase da investigação	113
5.2.1	Apresentação e análise de resultados referentes à composição BAC-R....	113
5.2.1.1	Variação de massa.....	113
5.2.1.1.1	Apresentação de resultados.....	113
5.2.1.1.2	Análise de resultados	116
5.2.1.2	Variação da dimensão longitudinal	120
5.2.1.2.1	Apresentação de resultados.....	120
5.2.1.2.2	Análise de resultados	122
5.2.1.3	Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco	128
5.2.1.4	Resistência à compressão	131
5.2.1.5	Porosidade.....	132
5.2.2	Apresentação e análise de resultados referentes à composição BAC±R...	133
5.2.2.1	Variação de massa.....	133
5.2.2.1.1	Apresentação de resultados.....	133
5.2.2.1.2	Análise de resultados	136
5.2.2.2	Variação da dimensão longitudinal	139
5.2.2.2.1	Apresentação de resultados.....	139
5.2.2.2.2	Análise de resultados	142
5.2.2.3	Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco	147
5.2.2.4	Resistência à compressão	150
5.2.3	Apresentação e análise de resultados referentes à composição BAC+R...	150
5.2.3.1	Resultados referentes à utilização da cinza volante de Sines (CVs)...	150
5.2.3.1.1	Variação de massa	150
5.2.3.1.2	Variação da dimensão longitudinal	152
5.2.3.1.3	Resistência à compressão.....	155
5.2.3.2	Resultados referentes à utilização da cinza volante de Compostilha (CVc)	155
5.2.3.2.1	Resultados obtidos a partir das amassaduras de 30 litros.....	155
5.2.3.2.1.1	Variação de massa.....	155

5.2.3.2.1.2	Varição da dimensão longitudinal.....	158
5.2.3.2.2	Resultados obtidos a partir das amassaduras de 1,4 litros.....	161
5.2.3.2.2.1	Varição de massa.....	161
5.2.3.2.2.2	Varição da dimensão longitudinal (uso dos ARR).....	164
5.2.3.2.2.3	Varição da dimensão longitudinal (uso combinado da AE com os ARR e ALS).....	165
5.2.3.2.3	Varição dimensional longitudinal desde o estado fresco.....	170
5.2.3.2.4	Resistência à compressão.....	172
5.2.4	Análise comparativa dos BAC Ref.....	173
5.2.4.1	Análise comparativa da variação de massa.....	173
5.2.4.2	Análise comparativa da variação dimensional longitudinal.....	174
5.2.4.3	Análise comparativa com os valores preconizados no EC2.....	177
5.2.4.3.1	BAC-R Ref.....	177
5.2.4.3.2	BAC±R Ref.....	178
5.2.4.3.3	BAC+R.....	180
5.2.5	Análise do efeito da cura.....	181
5.2.6	Análise do efeito dos adjuvantes redutores de retracção.....	184
5.2.7	Análise do efeito combinado dos adjuvantes redutores de retracção com a adição expansiva.....	188
5.2.8	Viabilidade económica das composições desenvolvidas.....	192
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	195
6.1	Principais conclusões do trabalho experimental.....	195
6.2	Proposta de áreas a desenvolver.....	196
6.3	Conclusão.....	197

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fluido newtoniano	6
Figura 2 - Modelo de Bingham	7
Figura 3- Comportamento reológico comparado de um BAC (Adaptado de [11])	7
Figura 4 - Metodologia para alcançar a autocompactabilidade	8
Figura 5 - Mecanismo de bloqueio	9
Figura 6 - Diferenças qualitativas entre a composição dos BAC e a dos betões correntes [14]	10
Figura 7- Alterações de Volume – Enquadramento (Adaptado de [33])	20
Figura 8 - Representação esquemática da retracção química	22
Figura 9 - Relação entre retracção química e retracção autogénea	23
Figura 10 - relação entre a retracção química e a retracção autogénea na direcção horizontal (Adaptado de [35])	24
Figura 11 - relação entre a retracção química e a retracção autogénea na direcção vertical (Adaptado de [35])	25
Figura 12 - A autodessecação como consequência da retracção química (Adaptado de [36])	26
Figura 13 - Distribuição volumétrica da pasta de cimento ($A/C > 0.42$)	30
Figura 14 - Distribuição volumétrica da pasta de cimento ($A/C < 0.42$)	31
Figura 15 - Relação entre a retracção química e autogénea para diferentes cimentos	32
Figura 16 - Efeito da relação A/C na deformação autogénea em: a) pasta de cimento (Adaptado de [60]), b) betão (Adaptado de [61])	33
Figura 17 - Relação entre a retracção total e retracção autogénea para betões (Adaptado de [67])	36
Figura 18 - Retracção autogénea e a retracção por secagem, para betões correntes e betões de alta resistência. (Adaptado de [46])	36
Figura 19 - Métodos de redução da retracção autogénea	37
Figura 20 - Retracção total em função de diferentes humidades relativas (Adaptado de [76])	42
Figura 21 - Métodos de redução da retracção por secagem	44
Figura 22 - Descrição esquemática do desenvolvimento da resistência e calor de hidratação (Adaptado de [93])	48
Figura 23 - Influência da dimensão da secção dos provetes no calor de hidratação (Adaptado de [93])	48
Figura 24 - Métodos de cura	53
Figura 25 - Aplicação do modelo de Powers` com água de cura interna	54
Figura 26 - Quantidades mínimas de água de cura interna para se obter um grau de hidratação máximo (Adaptado de [111])	56
Figura 27 - Transição suspensão-sólido (Adaptado de [140])	66
Figura 28 - Presa e endurecimento (Adaptado de [141])	66
Figura 29 - Erro associado ao início da medição (Adaptado de [142])	67
Figura 30 - Evolução de várias propriedades mecânicas em função do grau de hidratação (Adaptado de [145])	68

Figura 31 - Variação de comprimento típica de um BRC e um betão convencional (Adaptado de [147])	71
Figura 32 - Efeito típico da realização da cura por diferentes métodos na expansão (Adaptado de [147])	72
Figura 33 - Efeito de um ARR na tensão superficial da água (Adaptado de [156])	73
Figura 34 - Efeito típico da utilização dos ARR em argamassas (Adaptado de [167]) .	74
Figura 35 - Influência dos ARR na retracção autogénea (Adaptado de [1])	75
Figura 36 - Influência dos ARR na retracção total (Adaptado de [1])	76
Figura 37 - Expansão de dois betões distintos obtida com base nos mecanismos de formação de etringite e de hidróxido de cálcio (Adaptado de [178])	77
Figura 38 - Reparação estrutural com betão autocompactável de elevada estabilidade dimensional	78
Figura 39 - Equipamento para medição da retracção autogénea em betões (Adaptado de [185])	80
Figura 40 - Descrição esquemática de um ensaio de retracção restringida num anel .	81
Figura 41 - Descrição esquemática de um ensaio de retracção restringida num painel	82
Figura 42 - Descrição esquemática de um ensaio longitudinal qualitativo (Adaptado de [190])	83
Figura 43 - Descrição esquemática de um ensaio longitudinal passivo (Adaptado de [191])	83
Figura 44 - Descrição esquemática de um ensaio longitudinal passivo, recomendado pelo JCI (Adaptado de [192])	84
Figura 45 - Descrição esquemática de um ensaio longitudinal activo	84
Figura 46 - Curvas granulométricas dos agregados de densidade normal	90
Figura 47 - Curva granulométrica do agregado leve	91
Figura 48 - Misturadora utilizada na produção dos betões	92
Figura 49 - Ensaio de espalhamento de betões	93
Figura 50 - Funil V (utilizado no presente trabalho)	94
Figura 51 - Caixa L (utilizada no presente trabalho)	94
Figura 52 - Máquina de compressão	95
Figura 53 - Equipamento de controlo da temperatura e humidade relativa	96
Figura 54 - Misturadoras para amassaduras de 1,5 l	96
Figura 55 - Moldes utilizados na preparação de provetes para medição da resistência e respectivo enchimento	98
Figura 56 - Moldes utilizados na preparação de provetes para medição da retracção.	98
Figura 57 - Molde coberto com uma placa de vidro	98
Figura 58 – Tanque para conservação dos provetes até à desmoldagem	98
Figura 59 - Provetes para a medição da retracção: com secagem livre, à esquerda (não protegidos) e selados à direita.	99
Figura 60 - Armários abertos para colocação dos provetes	99
Figura 61 - Conservação de provetes imersos	99
Figura 62 - Equipamento medidor de comprimentos, utilizado no presente trabalho.	100
Figura 63 - Equipamento medidor de comprimentos desde o estado fresco, utilizado no presente trabalho	102

Figura 64 - Máquina de compressão e flexão de prismas	102
Figura 65 - Curva típica de uma análise de porosimetria de mercúrio	103
Figura 66 - Representação da curva de porosimetria de mercúrio, em função da variação de volume para um incremento de pressão.....	104
Figura 67 - Porosímetro de mercúrio	104
Figura 68 - Variantes realizadas a partir da composição BAC b-R.....	106
Figura 69 - Variantes realizadas a partir da composição BAC b±R	107
Figura 70 - Variantes realizadas a partir da composição BAC b+R, utilizando as cinzas volantes de Sines	108
Figura 71 - Variantes realizadas a partir da composição BAC b+R, utilizando as cinzas volantes de Compostilha	109
Figura 72 - Auto-compactibilidade do betão BACb-R (a) - Ensaio de espalhamento; b) - pormenor do bordo do ensaio de espalhamento e c) - Ensaio na caixa L)	112
Figura 73 - Autocompactibilidade do betão BACb±R (a) - Ensaio de espalhamento; b) - pormenor do bordo do ensaio de espalhamento e c) - Ensaio na caixa L)	112
Figura 74 - Auto-compactibilidade do betão BACb+R (a) - Ensaio de espalhamento; b) - pormenor do bordo do ensaio de espalhamento e c) - Ensaio na caixa L)	112
Figura 75 - Resistência à compressão das composições BAC base.....	113
Figura 76 - Variação de massa da composição BAC-R Ref	114
Figura 77 - Variação de massa da composição BAC-R ARR I.....	114
Figura 78 - Variação de massa da composição BAC-R ARR II.....	114
Figura 79 - Variação de massa da composição BAC-R ARR (I+II).....	115
Figura 80 - Variação de massa da composição BAC-R ARR (I+II) + 20 AE	115
Figura 81 - Variação de massa da composição BAC-R ARR (I+II) + 40 AE	115
Figura 82 - Variação de massa da composição BAC-R, referente aos provetes imersos	117
Figura 83 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito dos ARR nos provetes sem cura	117
Figura 84 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito da AE nos provetes sem cura.....	118
Figura 85 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE nos provetes sem cura.....	118
Figura 86 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito dos ARR nos provetes com cura de 7 dias.....	119
Figura 87 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito da AE nos provetes com cura de 7 dias.....	119
Figura 88 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE nos provetes com cura de 7 dias.....	119
Figura 89 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R Ref	120
Figura 90 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR I.....	120
Figura 91 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR II.....	121
Figura 92 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR (I+II).....	121
Figura 93 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR (I+II) + 20 AE	121
Figura 94 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR (I+II) + 40 AE	122

Figura 95 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR nos provetes imersos.....	122
Figura 96 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito da AE nos provetes imersos	123
Figura 97 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE nos provetes imersos.....	123
Figura 98 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR na retracção autogénea.....	124
Figura 99- Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito da AE na retracção autogénea	124
Figura 100 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE na retracção autogénea	125
Figura 101 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR na retracção total dos provetes sem cura	125
Figura 102 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito da AE na retracção total dos provetes sem cura	126
Figura 103 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE na retracção total dos provetes sem cura	126
Figura 104 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR na retracção total dos provetes com cura de 7 dias	127
Figura 105 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito da AE na retracção total dos provetes com cura de 7 dias.....	128
Figura 106 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE na retracção total dos provetes com cura de 7 dias.....	128
Figura 107 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC-R Ref.....	129
Figura 108 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC-R ARR (I+II)	129
Figura 109 - Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as composições BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II), zerados em T0 e 24 h.....	130
Figura 110 - Variação dimensional longitudinal para as composições BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II), zerados às 24 h (Método convencional e Tubos corrugados) – Influência do agregado grosso	131
Figura 111 - Resistência à compressão das composições BAC-R.....	131
Figura 112 - Diâmetro dos poros do provete 527, secção 1. (BAC-R ARR II)	132
Figura 113 - Diâmetro dos poros do provete 543, secção 5. (BAC-R ARR II)	133
Figura 114 - Variação de massa da composição BAC±R Ref	134
Figura 115 - Variação de massa da composição BAC±R ARR I.....	134
Figura 116 - Variação de massa da composição BAC±R ARR II.....	134
Figura 117 - Variação de massa da composição BAC±R ARR (I+II).....	135
Figura 118 - Variação de massa da composição BAC±R ARR (I+II) + 20 AE	135
Figura 119 - Variação de massa da composição BAC±R ARR (I+II) + 30 AE	135
Figura 120 - Variação de massa dos vários provetes imersos da classe BAC±R	136
Figura 121 - Variação de massa, influência dos ARR nos provetes não submetidos à cura.....	137

Figura 122 - Variação de massa, influência da AE nos provetes não submetidos à cura	137
Figura 123 - Variação de massa, influência dos ARR e da AE nos provetes não submetidos à cura	137
Figura 124 - Variação de massa, influência dos ARR nos provetes submetidos a uma cura de 5 dias	138
Figura 125 - Variação de massa, influência da AE nos provetes submetidos a uma cura de 5 dias	138
Figura 126 - Variação de massa, influência dos ARR e da AE nos provetes submetidos a uma cura de 5 dias	139
Figura 127 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R Ref	140
Figura 128 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR I	140
Figura 129 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR II	140
Figura 130 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR (I+II) ...	141
Figura 131 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR (I+II) + 20 AE	141
Figura 132 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR (I+II) + 30 AE	141
Figura 133 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR nos provetes imersos	142
Figura 134 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR e da AE nos provetes imersos	142
Figura 135 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, comparação do efeito dos ARR e dos ARR com AE nos provetes imersos	143
Figura 136 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR na retracção autogénea	143
Figura 137 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR juntamente com a AE na retracção autogénea	144
Figura 138 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR e dos ARR juntamente com a AE na retracção autogénea	144
Figura 139 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR na retracção total dos provetes sem cura	145
Figura 140 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR juntamente com a AE na retracção total dos provetes sem cura	145
Figura 141 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR e dos ARR e AE na retracção total dos provetes sem cura	146
Figura 142 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR na retracção total dos provetes com cura de 5 dias	146
Figura 143 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR juntamente com a AE na retracção total dos provetes com cura de 5 dias	147
Figura 144 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR e dos ARR e AE na retracção total dos provetes com cura de 5 dias	147
Figura 145 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC±R Ref	148
Figura 146 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC±R ARR (I+II)	148

Figura 147 - Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as composições BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II), zerados em T0 e 18 h	149
Figura 148 - Variação dimensional longitudinal para as composições BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II), zerados às 18 h (Método convencional e Tubos corrugados) – Influência do agregado grosso	149
Figura 149 - Resistência à compressão das composições BAC±R	150
Figura 150 - Variação de massa da composição BAC+R CVs Ref.....	151
Figura 151 - Variação de massa da composição BAC+R CVs ARR I	151
Figura 152 - Variação de massa das composições BAC+R CVs, efeito do ARR nos provetes sem cura.....	152
Figura 153 - Variação de massa das composições BAC+R CVs, efeito do ARR nos provetes submetidos a uma cura de 3 dias.....	152
Figura 154 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVs Ref	153
Figura 155 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVs ARR I..	153
Figura 156 - Variação dimensional longitudinal, BAC+R CVs, efeito do ARR na retracção autogénea	153
Figura 157 - Variação dimensional longitudinal, BAC+R CVs, efeito do ARR na retracção total dos provetes com cura de 3 dias.....	154
Figura 158 - Variação dimensional longitudinal, BAC+R CVs, efeito do ARR na retracção total dos provetes sem cura.....	154
Figura 159 - Resistência à compressão da composição BAC+R CVs Ref.....	155
Figura 160 - Variação de massa da composição BAC+R CVc Ref.....	156
Figura 161 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + ALS	156
Figura 162 - Variação de massa da composição BAC+R CVc 20AE	156
Figura 163 - Variação de massa das composições BAC+R CVc (Ref; ARR (I+II) + ALS e 20 AE), provetes sem cura	157
Figura 164 - Variação de massa das composições BAC+R CVc (Ref; ARR (I+II) + ALS e 20 AE), sujeitas a um período de cura adicional de 3 dias	157
Figura 165 - Variação de massa das composições BAC+R CVc (Ref; ARR (I+II) + ALS e 20 AE), provetes imersos.....	158
Figura 166 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc Ref	158
Figura 167 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + ALS.....	159
Figura 168 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc 20 AE..	159
Figura 169 - Variação dimensional longitudinal, efeito dos ARR com o ALS e AE na retracção autogénea	160
Figura 170 - Variação dimensional longitudinal, efeito dos ARR com o ALS e da AE na retracção total. Provetes submetidos a uma cura de 3 dias.....	160
Figura 171 - Variação dimensional longitudinal, efeito dos ARR com o ALS e da AE na retracção total. Provetes não submetidos à cura	161
Figura 172 - Variação dimensional longitudinal, efeito dos ARR com o ALS e da AE na retracção total. Provetes imersos	161
Figura 173 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 10 AE.....	162
Figura 174 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE.....	162
Figura 175 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 30 AE.....	162
Figura 176 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 40 AE.....	163

Figura 177 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ALS	163
Figura 178 - Variação de massa dos provetes imersos das composições BAC+R CVc ARR (I+II) + 10 AE; BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE, BAC+R CVc ARR (I+II) + 30 AE e BAC+R CVc ALS	163
Figura 179 - Variação dimensional longitudinal das composições BAC+R CVc Ref e BAC+R CVc ARR (I+II) nos provetes selados	164
Figura 180 - Variação dimensional longitudinal das composições BAC+R CVc Ref e BAC+R CVc ARR (I+II) na retracção total dos provetes sem cura	165
Figura 181 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 10 AE	165
Figura 182 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE	166
Figura 183 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 30 AE	166
Figura 184 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 40 AE	166
Figura 185 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ALS	167
Figura 186 - Variação dimensional longitudinal das composições BAC+R CVc 20 AE e BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE	167
Figura 187 - Variação dimensional longitudinal, efeito da utilização conjunta dos ARR e AE na retracção autogénea	168
Figura 188 - Variação dimensional longitudinal, efeito da utilização conjunta dos ARR e AE na retracção autogénea, registada entre os 7 e os 270 dias	168
Figura 189 - Variação dimensional longitudinal, efeito da utilização individual do ALS e conjunta com os ARR na retracção autogénea	169
Figura 190 - Variação dimensional longitudinal, efeito da utilização conjunta dos ARR com a AE nos provetes imersos	169
Figura 191 - Variação dimensional longitudinal das composições BAC+R CVc 20 AE e BAC+R CVc ARR (I+II) 20 AE nos provetes imersos	170
Figura 192 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC+R CVc Ref	171
Figura 193 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC+R CVc ARR (I+II)	171
Figura 194 - Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as composições BAC+R Ref e BAC+R ARR (I+II), zerados em T0 e 8 h	172
Figura 195 - Resistência à compressão das composições BAC+R CVc	173
Figura 196 - Retracção autogénea dos três BAC de referência obtidas no ensaio de deformação desde o estado fresco, zerados em T0	175
Figura 197 - Retracção total das composições Ref, provetes sem cura	176
Figura 198 - Retracção total das composições Ref, provetes submetidos ao nível de cura máximo	176
Figura 199 - BAC-R Ref, retracção autogénea, comparação com o EC2	177
Figura 200 - BAC-R Ref, retracção total sem cura, comparação com o EC2	178
Figura 201 - BAC-R Ref, retracção total, com cura, comparação com o EC2	178
Figura 202 - BAC±R Ref, retracção autogénea, comparação com o EC2	179
Figura 203 - BAC±R Ref, retracção total sem cura, comparação com o EC2	179

Figura 204 - BAC±R Ref, retracção total, com cura, comparação com o EC2.....	180
Figura 205 – BAC+R Ref, retracção autogénea, comparação com o EC2.....	180
Figura 206 – BAC+R Ref, retracção total sem cura, comparação com o EC2.....	181
Figura 207 - BAC±R Ref, retracção total, com cura, comparação com o EC2.....	181
Figura 208 - Contribuição do custo dos materiais (BAC±R Ref)	194
Figura 209 - Contribuição do custo dos materiais (BAC±R ARR I).....	194
Figura 210 - Contribuição do custo dos materiais (BAC±R ARR (I+II)).....	194
Figura 211 - Contribuição do custo dos materiais (BAC±R ARR (I+II) + 20 AE)	194

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Limites para o cálculo de composições, com e sem agentes de viscosidade [19].....	13
Tabela 2 - Intervalos comuns em composições de BAC [20].....	13
Tabela 3 - Valores medianos, mínimos e máximos de composições em BAC [21]	14
Tabela 4 - Classificação das características dos BAC no estado fresco [22].....	15
Tabela 5 - Propriedades dos BAC para diferentes tipos de aplicações [20].....	16
Tabela 6 - Categorias de BAC em função da geometria dos elementos [29].....	16
Tabela 7 - Critérios de conformidade de propriedades dos BAC em função da sua categoria [29].....	17
Tabela 8 - Coeficiente de dilatação térmica em função da idade do betão	49
Tabela 9 - Água de cura interna.....	61
Tabela 10 - Tipos de cimentos expansivos e seus constituintes	70
Tabela 11 - Características químicas dos cimentos utilizados	86
Tabela 12 - Características físicas dos cimentos utilizados	86
Tabela 13 - Características físicas das cinzas volantes utilizadas	87
Tabela 14 - Características da adição expansiva	87
Tabela 15 - Características dos adjuvantes superplastificantes.....	88
Tabela 16 - Características dos adjuvantes redutores de retracção.....	88
Tabela 17 - Massas volúmicas e absorção dos agregados.....	89
Tabela 18 - Teores de finos e módulo de finura dos agregados	90
Tabela 19 - Dimensões dos agregados	90
Tabela 20 - Características do agregado leve	91
Tabela 21 - Proporções das 3 composições base	105
Tabela 22- Autocompactabilidade dos betões base	111
Tabela 23 - Tempo zero das composições BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II).....	130
Tabela 24 - Tempo zero das composições BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II)	148
Tabela 25 - Tempo zero das composições BAC+R CVc Ref e BAC+R CVc ARR (I+II)	171
Tabela 26 - Variação de massa das composições de referência (Ref) nos provetes sem cura	174
Tabela 27 - variação de massa das composições de referência (Ref) nos provetes submetidos ao nível de cura máximo.....	174
Tabela 28 - T0 das composições Ref.....	175
Tabela 29 - Efeito da cura a longo prazo na retracção total.....	182
Tabela 30 - Efeito da cura nas primeiras idades na retracção total da classe BAC-R	183
Tabela 31 - Efeito da cura nas primeiras idades na retracção total da classe BAC±R	183
Tabela 32 - Efeito da cura nas primeiras idades na retracção total da classe BAC+R	183
Tabela 33 - Efeito dos ARR a longo prazo na retracção total	184
Tabela 34 - Efeito dos ARR a curto prazo na retracção total da classe BAC-R	185
Tabela 35 - Efeito dos ARR a curto prazo na retracção total da classe BAC±R.....	185

Tabela 36 - Efeito dos ARR a curto prazo na retracção total da classe BAC+R	185
Tabela 37 - Efeito dos ARR a longo prazo na retracção autogénea.....	186
Tabela 38 - Efeito dos ARR nas primeiras idades na retracção autogénea da classe BAC-R	186
Tabela 39 - Efeito dos ARR nas primeiras idades na retracção autogénea da classe BAC±R	187
Tabela 40 - Efeito dos ARR nas primeiras idades na retracção autogénea da classe BAC+R	187
Tabela 41 - Efeito dos ARR a longo prazo na retracção total dos provetes imersos ..	187
Tabela 42 - Efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total a longo prazo.....	188
Tabela 43 - Efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total nas primeiras idades nas composições da classe BAC-R	188
Tabela 44 - Efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total nas primeiras idades nas composições da classe BAC±R	189
Tabela 45 - Efeito da AE na retracção total nas primeiras idades na composição BAC±R CVc 20AE.....	189
Tabela 46 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a longo prazo na retracção autogénea.....	190
Tabela 47 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a curto prazo na retracção autogénea das composições da classe BAC-R.....	190
Tabela 48 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a curto prazo na retracção autogénea das composições da classe BAC±R.....	191
Tabela 49 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a curto prazo na retracção autogénea das composições da classe BAC+R.....	191
Tabela 50 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a longo prazo na retracção total dos provetes imersos das composições das classes BAC-R e BAC±R	191
Tabela 51 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE nas primeiras idades na retracção total dos provetes imersos das composições da classe BAC-R	192
Tabela 52 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE nas primeiras idades na retracção total dos provetes imersos das composições da classe BAC±R	192
Tabela 53 - Custo dos materiais	193
Tabela 54 - Custos de várias composições em função do nível de compensação da retracção	193

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	água não combinada com o cimento
A/C	relação água-cimento em massa
ACI	instituto americano do betão
AE	adição expansiva
Ae	água exsudada
ALS	agregado leve saturado
AMV	adjuvante modificador da viscosidade
ARR	adjuvante redutor de retracção
BAC	betão autocompactável
BAC b+R	BAC base de maior resistência
BAC b±R	BAC base de média resistência
BAC b-R	BAC base de menor resistência
BRC	betão de retracção controlada
C	cimento não hidratado
C ₂ S	silicato bicálcico
C ₃ A	aluminato tricálcico
C ₄ AF	aluminoferrato tetracálcico
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
CV	cinzas volantes
d	diâmetro do poro
d/D	dimensão do agregado
D _M	diâmetro médio dos poros
D _{máx}	máxima dimensão do agregado
EN	norma europeia
ISO	organização internacional de normalização
JCI	instituto japonês do betão
JSCE	sociedade japonesa de engenheiros civis
L _{plug}	comprimento médio das tampas

L_{ref}	comprimento da barra de referência
$L(t)$	comprimento do provete (pasta ou argamassa) no tempo t
LMC	laboratório de materiais de construção do ISE/UAlg
LNEC	laboratório nacional de engenharia civil
MF	módulo de finura
MV _{mi}	massa volúmica do material impermeável
MV _{sat}	massa volúmica do material saturado com a superfície seca
MV _{sec}	massa volúmica do material seco
NP	norma portuguesa
p	porosidade
P	pressão
p'	pressão no líquido
p''	pressão no vapor
PL	classe de capacidade de passagem no ensaio da caixa L
Prh	produtos hidratados
PJ	classe de capacidade de passagem no ensaio do anel J
PSA	polímero superabsorvente
r	raio da curvatura do menisco
R	constante do gás
$R(t)$	comprimento registado no deflectómetro com o provete
Ref	composição de referência
s/v	relação superfície de secagem-volume
S_{as}	coeficiente de retracção autógena
S_{cs}	coeficiente de retracção química, %
SF	classe de espalhamento
SF _J	classe de espalhamento no anel J
SP	adjuvante superplastificante
S_p	coeficiente de volume de vazios
SR	classe de resistência à segregação
t_{500}	tempo em segundos até um espalhamento de diâmetro 500 mm, no ensaio com o cone de Abrams

t_{500J}	tempo em segundos até um espalhamento de diâmetro 500 mm, no ensaio com o anel J
T	temperatura (° Kelvin)
Va	volume de água combinada
Vaa	volume de água antes da hidratação
Vc	volume de cimento hidratado
Vca	volume de cimento antes da hidratação
VF	classe de viscosidade no ensaio do funil-V
Vh	vazios gerados durante a hidratação
VJ	classe de viscosidade no anel J em que se determina t_{500J}
VM	valor máximo do volume de intrusão
Vph	volume de produtos hidratados
VS	classe de viscosidade no ensaio de espalhamento em que se determina t_{500}
We	água evaporável

Letras gregas

$\Delta\varepsilon_a$	deformação relativa à retracção autogénea
Δ	coeficiente de dilatação térmica
ΔS_{cs}	coeficiente de retracção química no tempo de início de presa
ΔT	variação de temperatura (°C)
$\Delta\varepsilon$	deformação total
$\Delta\varepsilon'$	deformação térmica
\varnothing	humidade relativa interna
α	grau de hidratação
θ	ângulo de molhagem
μ	viscosidade
v	volume molar da água
σ	tensão superficial do líquido capilar
τ	tensão de corte
τ_0	tensão de cedência
ω	velocidade

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos avanços verificados nos últimos anos na tecnologia do betão prendem-se com o uso de betões com muito baixas relações água/ligante. Nestes betões a retracção total e, em particular, a retracção autogénea tornaram-se factores dominantes. A retracção autogénea é já considerada como o “Tendão de Aquiles” dos betões de alta resistência/alto desempenho. Os betões autocompactáveis (BAC) devido à utilização de menores dosagens de agregado grosso e de maiores dosagens de pó também são incluídos no mesmo grupo.

Este fenómeno não é causado por influências externas, resulta da retracção química.

Estes betões apresentam uma elevada tendência para manifestarem fissurações nas primeiras idades a não ser que sejam tomadas medidas especiais.

Conforme o uso dos betões de alta resistência/alto desempenho se foi tornando mais comum foram desenvolvidas novas técnicas de combate ao referido fenómeno.

Os métodos de mitigação da retracção incluem a utilização de cimentos modificados, adições, adjuvantes, fibras, controle das condições de cura e métodos avançados de cura interna.

Os processos de cura convencionais, como por exemplo com recurso a água, não são em geral eficientes devido ao facto de a penetração da água pelo exterior do elemento ser bastante limitada.

Na última década foram desenvolvidos os adjuvantes redutores de retracção (ARR), os quais se caracterizam pelo seu principal mecanismo que se traduz na redução da tensão superficial do líquido existente nos poros intersticiais.

Recentemente Ribeiro et al [1], com vista à redução da retracção autogénea, testaram a sinergia de dois ARR. Os resultados indicaram um efeito cumulativo na redução da retracção.

Antes do desenvolvimento dos ARR, os cimentos modificados expansivos são usados à mais de 30 anos para minimizar o efeito da retracção de secagem. Essa utilização provou ser eficiente no aumento do espaçamento das juntas e diminuição do tempo de cura, mas requer precauções especiais.

Hori *et al.* [2] concluiu ser possível compensar o efeito da retracção autogénea com o uso de adições expansivas em várias argamassas de alta fluidez.

Actualmente são intensamente estudados novos métodos de mitigação da retracção autogénea baseados em métodos de cura interna avançados. O mais popular método de cura interna com água consiste no uso de agregados leves saturados (ALS). Kovler [3] sumariza o estado da arte destas novas tecnologias.

Por outro lado os BAC, possuem propriedades especiais que justificam a sua aplicação em muitos trabalhos de reparação. No entanto, em algumas aplicações, observaram-se comportamentos inadequados devidos principalmente ao aparecimento de fissuras e delaminação nas primeiras idades. Persson [4] afirma que deve ser dada uma especial atenção aos fenómenos de retracção dos BAC, especialmente nas idades mais novas, pois podem ser substancialmente mais elevados do que num betão convencional.

1.1 MOTIVAÇÃO

A normalização no campo dos produtos de construção, e em particular no campo dos betões de ligantes hidráulicos, tem vindo a proporcionar um incremento dos requisitos de qualidade e durabilidade das estruturas de betão. [5]

Efectivamente, para se obter um desenvolvimento sustentável na construção continuando a utilizar o betão deve-se, entre outros aspectos, proceder à maximização da durabilidade das estruturas. Segundo Mehta [6] essa solução representa um grande passo na optimização dos recursos na indústria da construção.

De acordo com Swamy [7], para além disso, é necessário garantir que as capacidades dos materiais e elementos das estruturas que se projectam e constroem sejam totalmente exploradas e maximizadas em serviço, no respectivo período de vida útil.

A redução da fissuração por retracção é muito importante do ponto de vista da durabilidade, assim como da resistência e do comportamento em serviço.

Uma vez que alguns dos produtos compensadores da retracção existentes nos mercados são recentes, existe pouca informação sobre o seu comportamento e eventuais limitações. Os valores constantes na regulamentação específica correspondem a valores médios relativos ao uso de materiais convencionais pelo que não são aplicáveis nestes casos.

Estudos relativos à redução da retracção, como o presente, fornecem informação sobre os efeitos do uso de diferentes produtos redutores da retracção, melhorando o conhecimento visando o controlo da retracção nos betões.

1.2 OBJECTIVO E METODOLOGIA

Tendo por base o trabalho explanado em [8], no qual se desenvolveram misturas em BAC sem fíler e económicas, incentivando a industria da construção a utilizar este tipo de betões sem necessidade de alterar o processo de fabrico, procurou-se agora, com este trabalho, aperfeiçoar o desempenho do BAC através do controle da retracção.

Para atingir esse primordial objectivo foram desenvolvidas as seguintes acções:

- estudo da influência dos métodos de cura (externa e interna);
- estudo da influência do uso individual ou em simultâneo de materiais compensadores da retracção.

Com o objectivo de viabilizar tecnicamente a aplicabilidade dos resultados obtidos foram admitidas duas condicionantes base:

- utilização de materiais disponíveis no mercado português.
- utilização de materiais que manifestaram uma influência limitada na autocompactibilidade.

De modo a tornar o estudo abrangente, as acções foram aplicadas a três BAC de referência, diferenciados pelas resistências alvo.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos.

O primeiro, introdutório, apresenta sucintamente os motivos impulsionadores deste trabalho de investigação, os objectivos estabelecidos para a realização do trabalho e descrição da estrutura do documento.

No Capítulo 2, com o título “Betões Autocompactáveis”, descrevem-se os conceitos gerais referentes a este tipo de betão. É abordado o estudo de composições, sendo por último descrita a classificação.

O Capítulo 3, dedicado à “Retracção”, apresenta, como base na bibliografia existente, uma análise às diversas forças actuantes. É dada atenção à retracção por secagem e em especial à retracção química e autogénea. Os temas relacionados com a variação térmica nas primeiras idades, assim como os relacionados com a hidratação e distribuição de humidade, também são revistos.

O mecanismo de cura interna e os efeitos do uso de adições e adjuvantes eficazes na redução da retracção também são abordados.

Alguns métodos de ensaio existentes são também objecto de revisão.

No Capítulo 4, intitulado “Trabalho experimental”, são descritos os materiais e métodos utilizados no trabalho de investigação. Descrevem-se ainda as composições estudadas e a organização dos ensaios efectuados.

No Capítulo 5 apresentam-se e analisam-se os resultados do estudo. É feita uma divisão referente ao trabalho desenvolvido na primeira fase, que corresponde á optimização de 3 composições BAC com níveis de resistência distintos. Na segunda fase, são apresentados e analisados os resultados relacionados com o objectivo principal do trabalho – o controlo da retracção.

No último e sexto capítulo, tecem-se as considerações finais deste trabalho. São resumidas as principais conclusões e é referida a aplicabilidade dos resultados obtidos. Tendo em conta que este trabalho é apenas um contributo para o conhecimento científico, expõem-se sugestões para trabalhos de investigação futuros que dêem sequência a alguns dos aspectos abordados nesta dissertação.

2 BETÕES AUTOCOMPACTÁVEIS

2.1 PRINCÍPIOS

As questões relacionadas com a durabilidade do betão têm vindo a constituir motivo de grande interesse por parte da comunidade científica, face à grande dimensão dos custos de reparação de algumas estruturas de betão armado e pré-esforçado.

Como é sabido, a durabilidade das estruturas de betão depende da compacidade da mistura, na qual tem elevada importância a eficiência da compactação. Por outro lado, cada vez mais as estruturas de betão são sujeitas a níveis de exigência mais elevados, o que se reflecte na produção de peças (ou zonas de peças) densamente armadas.

Normalmente, o betão aplicado na construção actual exige uma compactação forçada (principalmente pelo método do vibrador de agulha) para garantir uma boa compacidade. Esta vibração mecânica exige a utilização de equipamento e de mão-de-obra, que representam um custo, além de provocar ruído e poder provocar problemas de saúde.

Okamura [9], refere que no Japão, os procedimentos habituais de colocação do betão foram considerados dispendiosos, muitas vezes ineficientes (utilização de mão-de-obra não especializada) e inadequados (em zonas urbanas).

Foi com estas preocupações que se iniciou o desenvolvimento, em 1988, a partir do conceito do Prof. Okamura, do betão autocompactável.

Este tipo de betão tem a capacidade de se mover, libertar o ar e preencher completamente os espaços no interior da cofragem envolvendo as armaduras, sem receber qualquer energia, para além da que resulta da acção da gravidade.

As principais exigências funcionais de um betão autocompactável são: a capacidade de enchimento; a resistência à segregação e a facilidade de passagem [10].

Entende-se por capacidade de enchimento, a facilidade com que o betão preenche o interior da cofragem e envolve as armaduras.

A resistência à ocorrência de segregação é entendida como a capacidade das partículas em suspensão manterem a homogeneidade durante a mistura, transporte e colocação. São exemplos de falta de resistência à segregação a exsudação e o assentamento de partículas mais grossas.

A facilidade de passagem é entendida como a capacidade do betão em passar por espaços estreitos, resultantes da configuração da cofragem e das armaduras.

As características reológicas de um BAC influenciam o comportamento do mesmo no estado fresco, durante a colocação e a consolidação. De modo bastante resumido, pode considerar-se o betão fresco como uma suspensão de partículas, com uma granulometria extensa, em que as suas propriedades variam ao longo do tempo devido às reacções de hidratação.

David [11] refere que os betões que apresentam alguma fluidez revelam comportamentos que se aproximam dos fluidos newtonianos. Num fluido newtoniano existe uma relação linear entre a tensão de corte (τ) aplicada ao fluido e a correspondente velocidade (ω) (Equação 1 e Figura 1). O declive da recta corresponde à viscosidade do fluido.

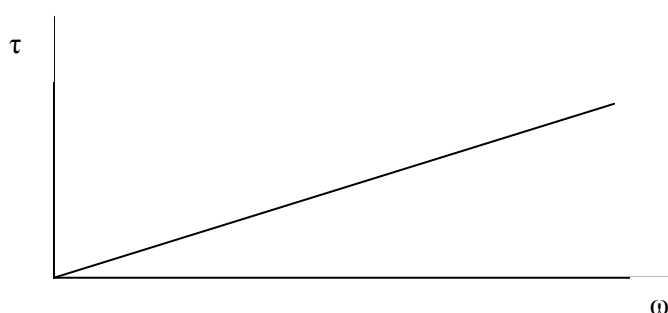


Figura 1 - Fluido newtoniano

$$\tau = \mu \times \omega$$

Equação 1

Em que μ representa a viscosidade (em Pa.s , se τ for expresso em Pa e ω em s^{-1}). São exemplos de fluidos newtonianos muitos solventes e certos óleos.

As pastas de cimento e, por extensão, as argamassas e os betões diferem do comportamento dos fluidos newtonianos. Geralmente o comportamento reológico dos betões no estado fresco é representado pelo modelo de Bingham (Equação 2 e Figura 2). No entanto, este modelo não representa convenientemente o comportamento dos betões de consistência seca ou outros como sejam os drenantes, ciclópicos, etc.

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \omega$$

Equação 2

Em que τ_0 é uma tensão de cedência que traduz a resistência inicial ao movimento.

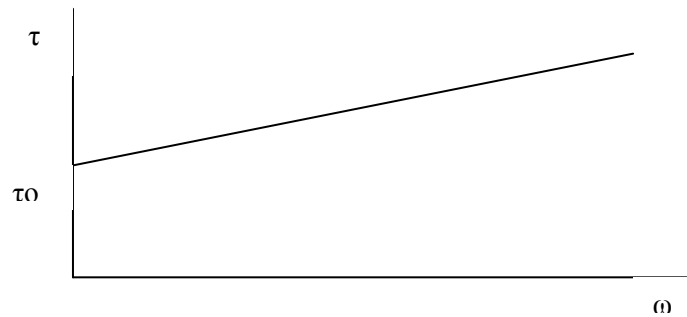


Figura 2 - Modelo de Bingham

Como se pode observar, existe uma resistência inicial ao movimento (τ_0), que depende principalmente do volume de pó da mistura. Outros mecanismos que influenciam a reologia são o atrito interno das partículas e a quantidade de água livre, os quais dependem da tensão superficial e da dispersão das partículas. Estas, por sua vez, podem ser modificadas com o uso dos adjuvantes redutores de água.

Um material com alguma viscosidade, o suficiente para minimizar os riscos de segregação e com uma resistência ao movimento reduzida, apresenta-se como um material homogêneo que flui facilmente. São estas características que se exigem aos betões autocompactáveis.

A Figura 3 representa o comportamento reológico de um BAC em comparação com outros betões conhecidos.

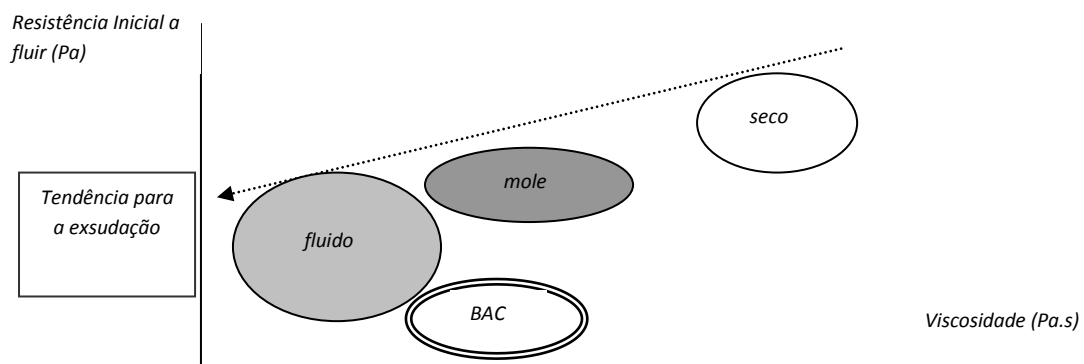


Figura 3- Comportamento reológico comparado de um BAC (Adaptado de [11])

Muitas vezes, o termo betão autocompactável é confundido com betão fluído. Um betão autocompactável é um betão com elevada fluidez mas com suficiente coesão. Distingue-se de um betão fluído porque necessita de mais energia quando inicia o movimento, pelo que flui mais lentamente e não necessita vibração.

Um betão autocompactável não é necessariamente autonivelante, já que pode apresentar alguma coesão.

Os betões autocompactáveis podem ser utilizados na maioria das aplicações onde se usa o betão convencional. Intencionalmente, pode incorporar um volume de ar residual, assim como fibras. Tanto pode ser aplicado em betonagens “in situ” como em betonagens de elementos pré-fabricados.

2.2 ESTUDO DE COMPOSIÇÕES

Tal como referido anteriormente, um betão autocompactável exige a combinação das três propriedades fundamentais, no estado fresco: capacidade de enchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de passagem.

Na Figura 4 apresenta-se, esquematicamente, a metodologia a seguir para se alcançarem essas propriedades.

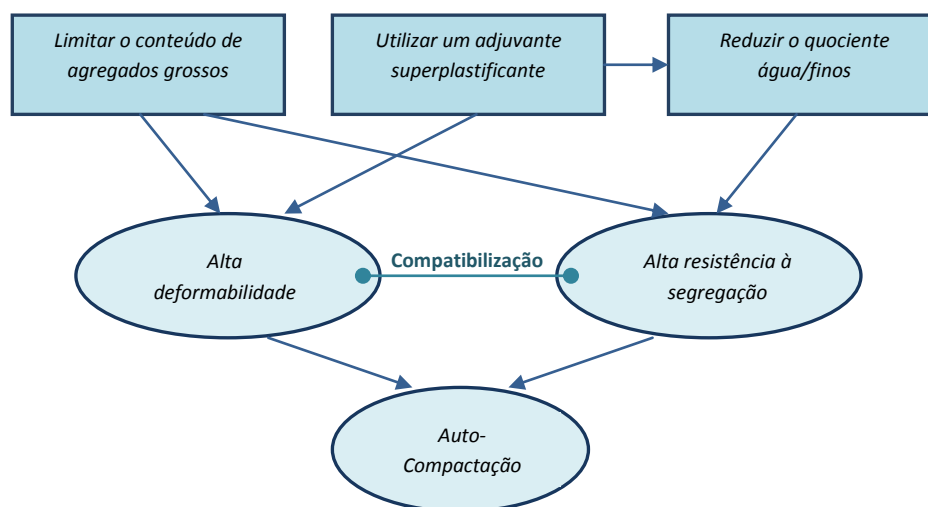


Figura 4 - Metodologia para alcançar a autocompactabilidade

A utilização de dosagens limitadas de agregado grosso reduz a colisão entre as partículas grossas, o que facilita a capacidade de passagem, e, naturalmente, obriga ao aumento do volume de pasta. A diminuição do quociente água/finos e a utilização dos superplastificantes promovem, em conjunto, a deformabilidade e a resistência à segregação.

Para responder à dupla exigência de deformabilidade e de resistência à segregação, as composições de BAC apresentam algumas diferenças relativamente aos betões

correntes, com o objectivo de apresentar uma baixa tensão de cedência e uma viscosidade adequada. Uma baixa tensão de cedência é importante para uma elevada deformabilidade, permitindo o preenchimento total da cofragem, enquanto que é necessária uma elevada viscosidade plástica para prevenir a segregação durante o escoamento do betão por zonas muito congestionadas ou com misturas de grande quantidade de agregados grossos [12, 13].

A elevada deformabilidade do betão pode ser conseguida limitando o teor de agregado grosso, de modo a que cada partícula deste agregado esteja envolta por uma camada de pasta ou argamassa, permitindo assim o seu movimento relativo reduzindo o risco de formação de arcos de agregados (Figura 5). Deste modo facilita-se o escoamento do betão quando passa por zonas estreitas, ou seja, aumenta-se a sua capacidade de passagem. A resistência à segregação pode ser obtida controlando a reologia da matriz, seja pela redução da razão água/finos, pelo aumento do teor de finos, ou ainda utilizando adjuvantes modificadores da viscosidade (AMV).

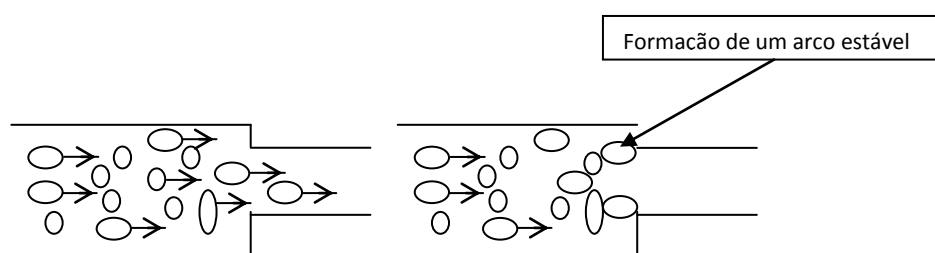


Figura 5 - Mecanismo de bloqueio

A combinação destes requisitos leva a que, de um modo geral, as composições dos BAC se diferenciem das dos betões correntes nas seguintes características [14]:

- menor teor em agregados grossos;
- maior teor de pasta;
- baixa razão água-finos;
- elevado teor em finos (material <math><125\mu\text{m}</math>);
- elevada dosagem de superplastificante;
- eventual utilização de AMV.

Na Figura 6 ilustram-se esquematicamente os valores relativos dos constituintes, evidenciando as diferenças entre os BAC e os betões correntes.

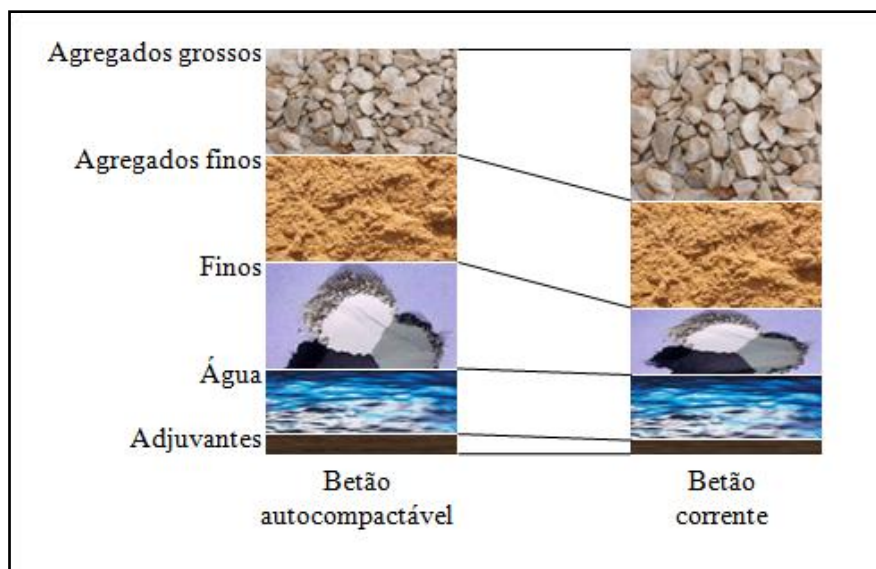


Figura 6 - Diferenças qualitativas entre a composição dos BAC e a dos betões correntes [14]

Em função do método utilizado para evitar a ocorrência de segregação, distinguem-se três tipos de BAC:

Tipo finos – apresenta um elevado volume de finos.

Tipo agente de viscosidade – para o qual é utilizado um AMV.

Tipo misto – apresenta uma combinação dos dois tipos anteriores.

De seguida, apresentam-se alguns aspectos relativos a cada um destes tipos de composições.

- Composições do tipo finos.

Aumentando a quantidade de finos, mas mantendo o volume de pasta constante, tanto a tensão de cedência como a viscosidade plástica irão aumentar. Por outro lado, a utilização de um superplastificante faz com que a tensão de cedência diminua, podendo chegar a valores nulos para dosagens de adjuvante elevadas. No entanto, a viscosidade não diminui. Estes tipos de BAC apresentam, em geral, elevada resistência e durabilidade.

- Composições do tipo agentes de viscosidade.

Estas composições são consideradas evoluções das empregues em betões subaquáticos. A característica mais comum deste tipo de composições é a elevada fluidez, mesmo com quantidades de finos relativamente pequenas, mantendo a homogeneidade da mistura.

- Composições do tipo misto.

Este tipo de composições tem sido utilizado para prevenir os problemas de alterações nas características reológicas dos betões devidos, por exemplo, a variações no teor de humidade dos agregados. Esta prevenção obtém-se adicionando pequenas quantidades de AMV nas composições do tipo finos.

A extensa diversidade de aplicações em BAC mostra que existe uma grande variedade deste tipo de betões. Muitos materiais foram utilizados com sucesso no fabrico de BAC, na sua grande maioria iguais aos usados no betão convencional.

Também é consensual que não existe uma única solução para uma aplicação particular. Por outro lado, é impossível elaborar um método de cálculo de BAC universal, devido à grande variedade de materiais disponíveis. Um procedimento adequado de cálculo deverá ter em conta a variedade de requisitos, e a necessidade de usar materiais disponíveis localmente. [15]

Até ao momento, foram desenvolvidos vários métodos de cálculo de composições de BAC, os quais são baseados em diferentes princípios. Fundamentalmente, eles apresentam duas grandes diferenças em relação aos métodos de cálculo de betão convencional. A primeira grande preocupação na produção de BAC é obter auto-compactação, não sendo normalmente condicionantes as propriedades exigidas ao betão no estado endurecido. A necessidade de autocompactação é que determina o conteúdo de pasta e o quociente água/finos. A resistência à segregação é, numa segunda fase, optimizada através de uma combinação apropriada dos diferentes finos. Por outro lado, o número de possíveis combinações dos materiais (cimentos, adições, superplastificantes, agentes de viscosidade, etc) obriga a que uma grande parte das variáveis sejam definidas através de ensaios preliminares, uma vez que as suas interacções são difíceis de prever com alguma certeza. Assim, depois de caracterizados os materiais, é indispensável a realização de vários ensaios, por vezes extensos, às pastas ou argamassas. Quando alcançados os vários parâmetros pretendidos, são executados os ensaios finais ao betão. Estes últimos são sempre considerados indispensáveis.

Todos os métodos têm limitações inerentes, ou nos materiais em que foram desenvolvidos, ou na gama de betões que são capazes de produzir. Por exemplo, uma das maiores restrições consiste no facto de a maioria dos métodos de cálculo não contempla o uso de agentes de viscosidade [15].

Os diferentes métodos são de complexidade variada, e obrigam ao conhecimento de informações diversas sobre os materiais que utilizam. Todos consideram composições volumétricas, com a conseqüente conversão para proporções em massas.

Uma grande parte dos métodos consistem em sequências, em que a etapa seguinte depende da precedente. De acordo com a tradição local, ou considerando desenvolvimentos entretanto adoptados, são diversos os métodos empregues para quantificar as composições dos BAC. Genericamente os métodos de estudo de composição dos BAC mais referenciados na literatura agrupam-se em:

Método com base na optimização da argamassa - Na formulação dos betões deve-se optimizar as características da argamassa. A dosagem de areia é estabelecida arbitrariamente. Experimentalmente, encontram-se as dosagens de água e de superplastificante para determinado teor de ligante, respeitando determinados critérios reológicos para a argamassa. O volume de argamassa deve ser limitado a metade do volume de betão. [16]

Métodos com base na optimização do volume de pasta - O betão é considerado como uma mistura bifásica, com uma fase sólida, os agregados, e uma fase líquida, a pasta. Na quantificação da pasta, aplica-se a noção de excesso de pasta. Esta noção baseia-se no princípio de ser necessário um volume de pasta mínimo para preencher os espaços entre os agregados, excedendo-o de modo a afastar os agregados uns dos outros, permitindo assim que o betão flua sem problemas de bloqueio [17].

Métodos com base na optimização do esqueleto granular - Considera o modelo bifásico para o betão. Quanto mais água existir, de modo a afastar as partículas, mais a mistura se torna fluida. Para uma quantidade de água constante, a minimização da porosidade do conjunto granular maximiza o volume de água disponível para fluidificar a mistura [18].

Outros métodos existentes baseiam-se em recomendações, traduzidas por limites para os vários componentes das misturas. Diferentes entidades indicam intervalos típicos.

Por exemplo a JSCE ("Japan Society of Civil Engineers") propôs um procedimento que prevê o uso de vários tipos de agentes de viscosidade [19]. Os limites apresentados são aplicados a composições contendo um agregado grosso com uma máxima dimensão de 20 ou 25 mm (Tabela 1).

Tabela 1 - Limites para o cálculo de composições, com e sem agentes de viscosidade [19]

Parâmetro	Sem agente de viscosidade	Tipo de agente de viscosidade			
		celulose	acrílico	“glycol”	“Polysaccharide”
Inerte grosso	0.3 – 0.32 m ³ /m ³ (nota 1)				
Água (nota 2)	155 – 175 Kg/m ³	170 - 180 Kg/m ³			155 – 170 Kg/m ³
Água/finos (nota3)	0.28 – 0.37 (em massa)	Depende das propriedades exigidas no estado endurecido			
Finos	0.16 – 0.19 m ³ /m ³	300 – 450 Kg/m ³	400 – 450 Kg/m ³	400 – 480 Kg/m ³	> 0.13 m ³ /m ³
Ar	Normalmente = 4.5% (nota 4)				
Inerte fino	Por cálculo, a partir do inerte grosso, água, finos e ar				
Adjuvante superplastificante	A partir de ensaios à pasta ou de acordo com as recomendações do fabricante				
Agente de viscosidade		0.15 – 0.3 % da água	3 – 5% da água	2 – 3% da água	0.05% da água

(nota 1): Pode ser mais alto, se um grau mais baixo de autocompactabilidade for requerido.

(nota 2): Se a durabilidade não for uma grande preocupação, pode ir até aos 190 Kg/m³.

(nota 3): Se o grau de autocompactabilidade não é muito importante, então pode-se adicionar mais filler para reduzir a razão água/finos.

(nota 4): Depende da máxima dimensão, resistência exigida e condições de exposição.

Outra organização (EFNARC) [20] propõe os valores típicos constantes na Tabela 2.

Tabela 2 - Intervalos comuns em composições de BAC [20]

Componente	Massa (kg/m ³)	Volume (l/m ³)
Finos	380-600	–
Pasta	–	300-380
Água	150-210	150-210
Agregado grosso	750-1000	270-360
Agregado fino	45 a 55% do total de agregado	–
Água/Finos	–	0,85-1,10

Na Tabela 3 apresenta-se o resultado de um levantamento geral efectuado por Domone [21]. Distinguem-se os resultados em função da máxima dimensão dos agregados, do seu tipo, rolado ou britado, e da utilização ou não de AMV.

Tabela 3 - Valores medianos, mínimos e máximos de composições em BAC [21]

Parâmetro	Composições	Mediana	Mínimo	Máximo
Teor de agregado grosso em volume, %	Todas	31,0	28,0	38,6
	16-20 mm	31,0	28,0	38,6
	10-15 mm	33,3	28,3	34,9
	Britado	30,9	28,3	37,7
	Rolado	30,9	29,5	38,6
Teor de pasta em volume, %	Todas	34,6	30,4	41,5
	16-20 mm	34,5	30,4	41,5
	10-15 mm	37,4	33,4	40,4
	Britado	34,6	31,2	41,5
	Rolado	33,7	32,2	38,4
Teor de finos, kg/m ³	Todas	500	385	635
	Sem AMV	526	434	610
	Com AMV	500	385	635
Água/finos (massa)	Todas	0,34	0,26	0,48
	Sem AMV	0,34	0,26	0,48
	Com AMV	0,35	0,26	0,48
Finos/argamassa (volume)	Todas	47,6	38,1	52,9

Por último, acrescenta-se que no trabalho [8], já referenciado, foram desenvolvidas composições em BAC, empregando agregados com a mesma proveniência dos utilizados no presente trabalho. Além disso, foram ainda avaliados os efeitos, em termos de autocompactibilidade e resistências mecânicas, decorrentes das seguintes modificações:

- Alteração do volume de pasta
- Alteração do volume de cimento
- Alteração do volume de cinzas volantes (CV)
- Alteração do volume de agregado fino
- Alteração do volume de agregado grosso
- Alteração da máxima dimensão do agregado (D_{máx})
- Inclusão de um AMV

2.3 CLASSIFICAÇÃO E APLICAÇÃO

Os requisitos específicos para o BAC no estado fresco dependem do tipo de aplicação e especialmente:

- Das condições de confinamento relacionadas com a geometria do elemento de betão e com o tipo, localização e número de inserções (densidade da armadura, espaçamento, recobrimentos, etc);
- Do equipamento de colocação (bomba, caminhão misturador, balde);

- Dos métodos de colocação (número de pontos de descarga);
- Do método de acabamento.

Considerando a normalização em vigor, nomeadamente a recente EN 206-9 [22], na qual se estabelecem as exigências relativas à produção de BAC, indicam-se na Tabela 4 as classificações previstas para estes betões no seu estado fresco.

Refere-se ainda que, no anexo L da citada norma, e de forma a cobrir os requisitos supra referidos, a especificação do BAC deve considerar a definição de quatro parâmetros chave de ensaio:

- Fluidez e capacidade de preenchimento - Espalhamento SF
- Viscosidade - Viscosidade VS ou VF
- Capacidade de passagem - Capacidade de passagem PL ou PJ
- Resistência à segregação - Estabilidade SR

Tabela 4 - Classificação das características dos BAC no estado fresco [22]

Classe	Espalhamento, mm EN 12350-8 [23]	Classe	Desnível no anel J, mm NP EN 12350-12 [26]
SF1	550 a 650	PJ1	≤ 10 com 12 varões
SF2	660 a 750	PJ2	≤ 10 com 16 varões
SF3	760 a 850		
Classe	$t_{500,S}$ EN 12350-8	Classe	Espalhamento no anel J, mm NP EN 12350-12 [26]
VS1	< 2	SF _J 1	480 a 600
VS2	≥ 2	SF _J 2	610 a 720
		SF _J 3	730 a 840
Classe	Tempo no funil V, s EN 12350-9 [24]	Classe	$t_{500,J,S}$ NP EN 12350-12 [26]
VF1	< 9	VJ1	< 3
VF2	9 a 25	VJ2	≥ 3
Classe	Razão H2/H1 na caixa L NP EN 12350-10 [25]	Classe	Segregação, % NP EN 12350-11 [27]
PL1	≥ 0,80 com 2 varões	SR1	≤ 20
PL2	≥ 0,80 com 3 varões	SR2	≤ 15

A EFNARC prescreve num relatório de recomendações [20], na secção 6.4., um conjunto de especificações que relacionam estas classificações com as aplicações. Na Tabela 5 reproduz-se o quadro proposto naquele relatório, o qual foi adaptado a partir de [28].

Tabela 5 - Propriedades dos BAC para diferentes tipos de aplicações [20]

Viscosidade				Segregação/Capacidade de passagem
VS2 VF2	Rampas			Especificar PL ou PJ para BAC de SF1 e SF2
VS1 ou 2 VF1 ou 2 ou valor alvo		Paredes e pilares	Elementos altos e esbeltos	Especificar SR para BAC de SF3
VS1 VF1	Pavimentos e lajes			Especificar SR para BAC de SF2 e SF3
	SF1	SF2	SF3	
	Espalhamento			

Estas recomendações não têm em conta condições de confinamento, geometria dos elementos, processos de colocação ou características dos materiais a utilizar na produção do betão. Deste modo, e em resultado de um trabalho de um projecto nacional Francês, foram elaborados critérios de conformidade para algumas das propriedades dos BAC em função da geometria dos elementos a betonar e do máximo percurso que o betão poderia fluir [29]. Foram definidas três categorias de BAC em função da espessura das camadas de betonagem, para aplicações horizontais, e de um intervalo de escoamento (l). As referidas categorias apresentam-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Categorias de BAC em função da geometria dos elementos [29]

	Elemento horizontal		Elemento vertical
	Espessura < 300 mm	Espessura > 300 mm	
$l \geq 100$	1	2	2
$80 \leq l < 100$	2	2	2
$l < 80$	3	3	3

As categorias 2 e 3 são ainda subdivididas em duas sub-categorias cada, dependendo do máximo percurso horizontal que o betão pode percorrer: categorias 2a e 3a para um percurso máximo de 5 m; 2b e 3b para um percurso até 10m. Para cada categoria de BAC são ainda definidos os critérios de conformidade a verificar de acordo com o que está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Critérios de conformidade de propriedades dos BAC em função da sua categoria [29]

Valor limite	Categoria				
	1	2a	2b	3a	3b
Resistência à segregação	≤ 20%	≤ 20%	≤ 15%	≤ 15%	≤ 10%
Razão H_2/H_1 na caixa L	Sem especificação	≥ 0,80 com 2 varões	≥ 0,80 com 2 varões	≥ 0,80 com 3 varões	≥ 0,80 com 3 varões

2.4 – ENQUADRAMENTO DOS BETÕES UTILIZADOS NESTE TRABALHO

Como referido, existe uma grande variedade de BAC, que se manifestam essencialmente no comportamento no estado fresco. Em termos de composição, e para o efeito do âmbito deste trabalho, se pode traduzir em variações da razão A/C e do volume de agregados, as quais se procuram simular nos betões estudados.

3 RETRACÇÃO

3.1 VARIAÇÕES DE VOLUME NO BETÃO - ENQUADRAMENTO

A fissuração do betão nas primeiras idades tem sido, desde há muito tempo, considerada um problema persistente. Concretamente, são referenciadas em [30] e [31] preocupações relativas ao comportamento de betões nas primeiras idades na construção de barragens na década de 1930.

A evolução que se tem verificado na tecnologia do betão, concretamente nos betões de alta resistência e elevado desempenho, assim como nos betões autocompactáveis, através da obtenção de melhores desempenhos quer no estado fresco como endurecido, implicou o uso de novos materiais, e deu origem a betões que podem apresentar uma maior propensão para apresentarem uma elevada retracção nas primeiras idades e conseqüentemente fissuração.

Existem dois tipos de fissuração possíveis de observar nas primeiras idades, associadas à variação de volume. O primeiro corresponde à fissuração que pode ocorrer num estado líquido ou semi-líquido, que se verifica antes da presa. Esta é a fissuração por contracção plástica, a qual também nos betões de alta resistência ou desempenho, assim como nos betões auto-compactáveis, pode ser considerável, uma vez que estes betões apresentam geralmente maiores quantidades de finos e menor relação A/C , o que implica uma menor tendência para exsudarem. No entanto, as medidas a tomar de modo a evitar este tipo de fissuração são similares às tomadas para o betão convencional, nomeadamente a execução de uma cura adequada e eventualmente o uso de fibras de baixo módulo de elasticidade.

O segundo tipo de fissuração pode ocorrer já num estado semi-sólido ou sólido, após a presa. Nesta fase, as práticas tradicionais de cura adequadas para betão tradicional podem revelar-se insuficientes. Esta é a problemática abordada durante o presente trabalho.

Segundo [32], de modo a lidar com o comportamento de um betão nas primeiras idades, a análise deve ser realizada tendo em conta três níveis em termos de materiais e estrutura:

- Comportamento microscópico da matriz cimentícia;
- Comportamento macroscópico do betão tendo também em consideração a dimensão da peça;
- Restrições induzidas na estrutura.

As forças actuantes nas primeiras idades são originadas por mecanismos associados às alterações micro-estruturais e reacções que ocorrem depois da amassadura. No entanto, o eventual aumento das forças actuantes e por conseguinte das tensões capazes de originar fissuração depende das características macro-estruturais, como por exemplo as dimensões das peças e restrições impostas, internas (exemplo: armaduras) ou externas (exemplo: apoios).

Deve ainda ter-se em conta que a retracção não é uniforme ao longo da secção da peça de betão. Existem variações na distribuição da temperatura e da humidade, acrescidas do facto deste sistema apresentar uma natureza dinâmica, no qual as propriedades vão se alterando ao longo do tempo.

Ainda segundo [32], as forças actuantes podem facilmente ultrapassar 50% da resistência à tracção existente. Um factor inesperado, como a variação da temperatura ou a descofragem, pode acrescentar tensões originado fissuração. Sendo esta uma explicação para o facto de várias observações relativas à fissuração apontarem para acontecimentos aleatórios e irreproduzíveis.

De acordo com Lange [33], a variação de volume de uma peça de betão pode ser descrita de acordo com a Figura 7, na qual os fenómenos de deformação térmica, retracção, fluência e expansão, contribuem para a observação global.

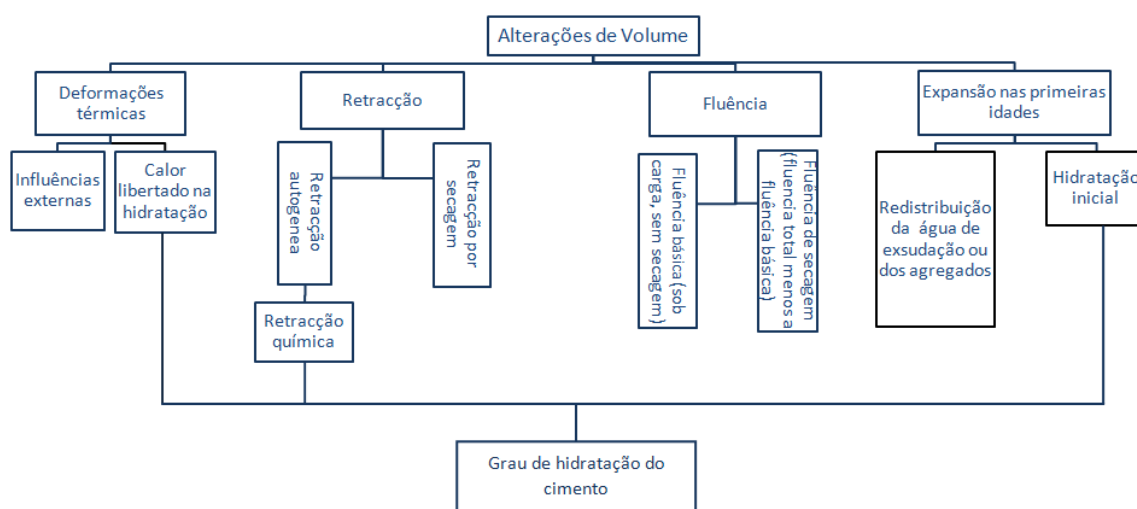


Figura 7- Alterações de Volume – Enquadramento (Adaptado de [33])

Alguns dos termos anteriormente referidos encontram-se na bibliografia específica de forma relativamente ambígua, não sendo clara a sua definição. Neste trabalho, é adoptada a seguinte terminologia:

Retracção Química – é a redução de volume interno (microscópico), o qual resulta do facto do volume absoluto dos produtos hidratados ser menor do que o volume dos reagentes. Na fase inicial, existe proporcionalidade entre a redução de volume e o grau de hidratação.

Autodessecação – corresponde à redução interna de humidade, num sistema selado, devido ao consumo de água na hidratação. Este fenómeno verifica-se quando a retracção química actua num betão que já desenvolveu um esqueleto rígido.

Retracção Autogénea – é a redução dimensional externa (macroscópica), volumétrica ou linear, a qual ocorre sob temperatura constante e sem variação externa de humidade (provetes selados). A retracção autogénea é originada principalmente pela retracção química. Na fase considerada fluida as duas são equivalentes. Na fase subsequente, a retracção autogénea é menor devido ao desenvolvimento de um esqueleto auto-portante.

Deformação Térmica – é a deformação externa (macroscópica), volumétrica ou linear, induzida pelos efeitos térmicos provenientes das reacções de hidratação ou de condições ambientais.

Expansão Autogénea – é o aumento dimensional externo (macroscópico), observado em provetes selados.

3.2 FORÇAS ACTUANTES

3.2.1 Retracção Química e Retracção Autogénea

Tendo em conta a variação de volume macroscópica, Le Chatelier [34] mostrou que a hidratação do cimento produz um importante decréscimo no volume total. Além disso, demonstrou também que este fenómeno, designado por retracção química, serve para avaliar a dinâmica de hidratação.

A retracção química resulta do volume absoluto dos produtos hidratados ser menor que a soma do volume dos reagentes (cimento, adições tipo II e água) antes da hidratação. A retracção química é descrita pela equação (3.1), exemplificada na Figura 8.

$$S_{cs} = \frac{(V_c + V_a) - V_{ph}}{V_{ca} + V_{aa}} \times 100 \quad \text{Eq. 3.1}$$

S_{cs} : Coeficiente de retracção química, %

V_c : Volume de cimento hidratado

V_a : Volume de água combinada

V_{ph} : Volume de produtos hidratados

V_{ca} : Volume de cimento antes da hidratação

V_{aa} : Volume de água antes da hidratação

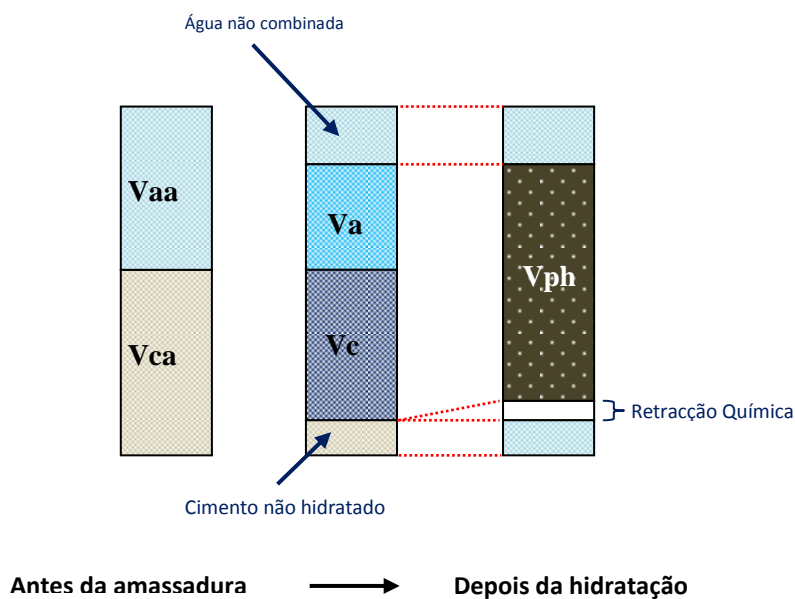


Figura 8 - Representação esquemática da retracção química

Após a presa, a pasta de cimento é formada pela fase sólida, constituída por cimento não hidratado e produtos hidratados, fase líquida, constituída pela água não combinada com o cimento, e fase gasosa, constituída pelos vazios existentes após a amassadura e criados pela hidratação. A retracção química corresponde à redução de volume dos produtos que reagiram (cimento e água). Por outro lado, a retracção autogénea corresponde à redução do volume externo, macroscópico, verificado após a formação da estrutura sólida.

Após a formação da estrutura sólida, e na ausência de fontes exteriores de água, o processo da hidratação resulta na formação de vazios adicionais na microestrutura da pasta. No entanto, a redução macroscópica exterior, isto é a retracção autogénea, é muito menor do que a retracção química.

A retracção autogénea não engloba as variações de volume devido à perda ou ingresso de substâncias, variação de temperatura ou aplicação de restrições ou forças exteriores. Normalmente, é expressa por uma variação de comprimento mas também pode ser expressa pela percentagem de redução de volume.

Uma vez que a retracção autogénea é geralmente utilizada para a previsão da fissuração, as deformações verificadas no período em que os materiais cimentícios ainda estão numa fase líquida ou semi-líquida, devem ser excluídas.

A relação entre a retracção autogénea e a retracção química da pasta de cimento sem evaporação e sem ingresso exterior de água é esquematicamente representada na Figura 9 e descrita na equação 3.2. [35]

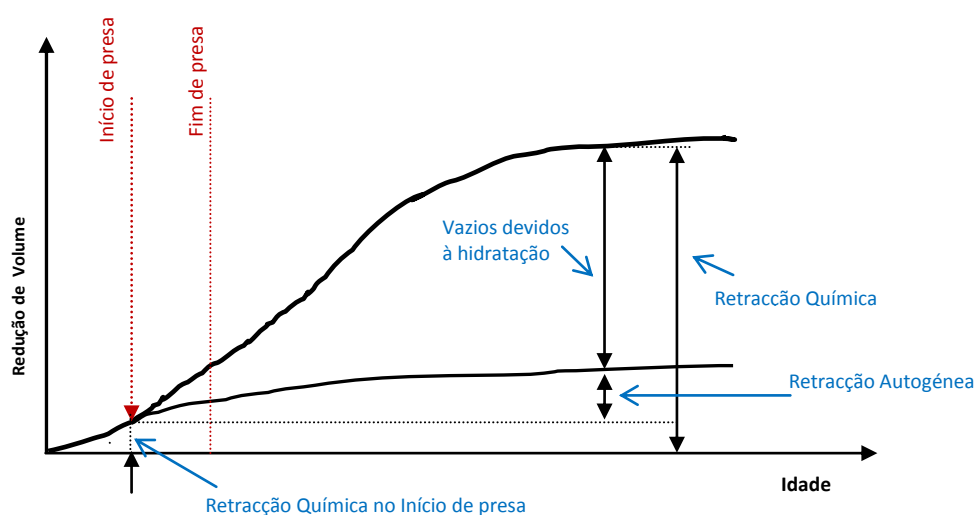


Figura 9 - Relação entre retracção química e retracção autogénea (Adaptado de [35])

$$S_{cs} \approx S_p + S_{as} + \Delta S_{cs} \quad \text{Eq. 3.2}$$

S_p : Coeficiente de volume de vazios criados no processo de hidratação em relação ao volume de pasta endurecida (%).

S_{as} : Coeficiente de retracção autogénea (%).

ΔS_{cs} : Coeficiente de retracção química no tempo de início de presa (%).

Na equação 3.2, o somatório dos três coeficientes não é explicitamente igual ao coeficiente de retracção química, uma vez que o volume inicial para cálculo da

retracção química é o verificado no final da amassadura, enquanto para o cálculo da retracção autogénea é o verificado no início da presa.

Dado que, na equação 3.2, o termo ΔS_{cs} corresponde a deformação em fase líquida, para aplicações práticas o S_{cs} é calculado a partir da equação 3.3.

$$S_{cs} \approx S_p + S_{as} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Quando o efeito da gravidade não é desprezável, a variação de comprimento na horizontal é diferente da variação na vertical.

A relação entre a retracção química e a retracção autogénea na direcção horizontal é esquematicamente representada na Figura 10.

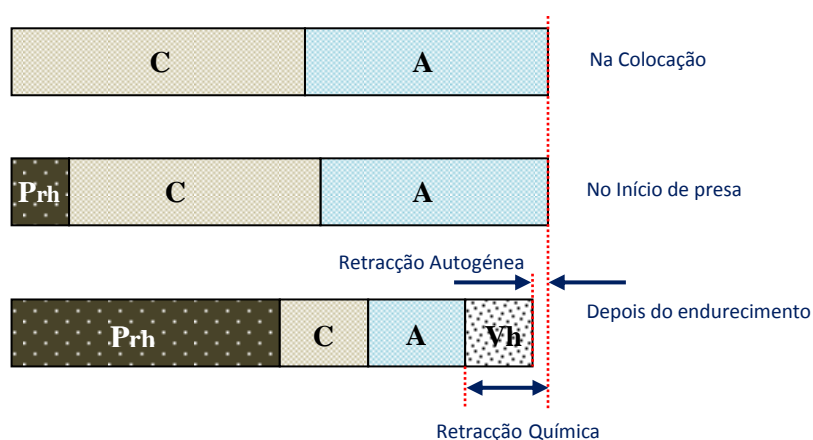


Figura 10 - relação entre a retracção química e a retracção autogénea na direcção horizontal (Adaptado de [35])

onde:

A: Água não combinada com o cimento

C: Cimento não hidratado

Prh: Produtos hidratados

Vh: Vazios gerados durante a hidratação

A relação entre a retracção química e a variação de comprimento na direcção vertical é apresentada na figura Figura 11 a), para misturas sem exsudação e Figura 11 b) para misturas com exsudação.

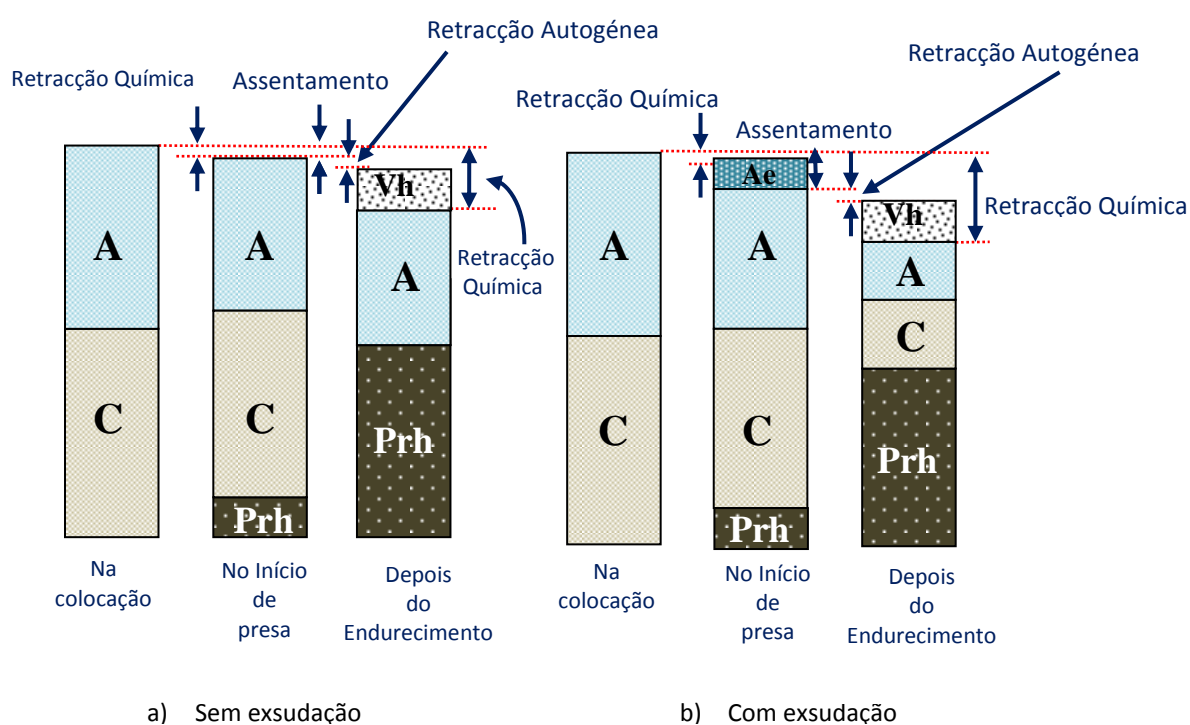


Figura 11 - relação entre a retracção química e a retracção autógena na direcção vertical (Adaptado de [35])

onde:

Ae: Água exsudada

3.2.1.1 Autodessecação

As consequências da retracção química são assim distintas dependendo da fase em que o betão se encontra. Na fase em que o betão pode ser considerado como um fluído, a retracção química originará uma redução de volume equivalente à redução total da retracção química. Na fase em que o betão começa a ter um comportamento visco-elástico, com um esqueleto rígido autoportante e com a superfície parcialmente selada, observam-se contracções não lineares. Neste período inicia-se a autodessecação com a formação de poros parcialmente cheios de ar. Este processo de autodessecação irá aumentar com o processo de hidratação (Figura 12).

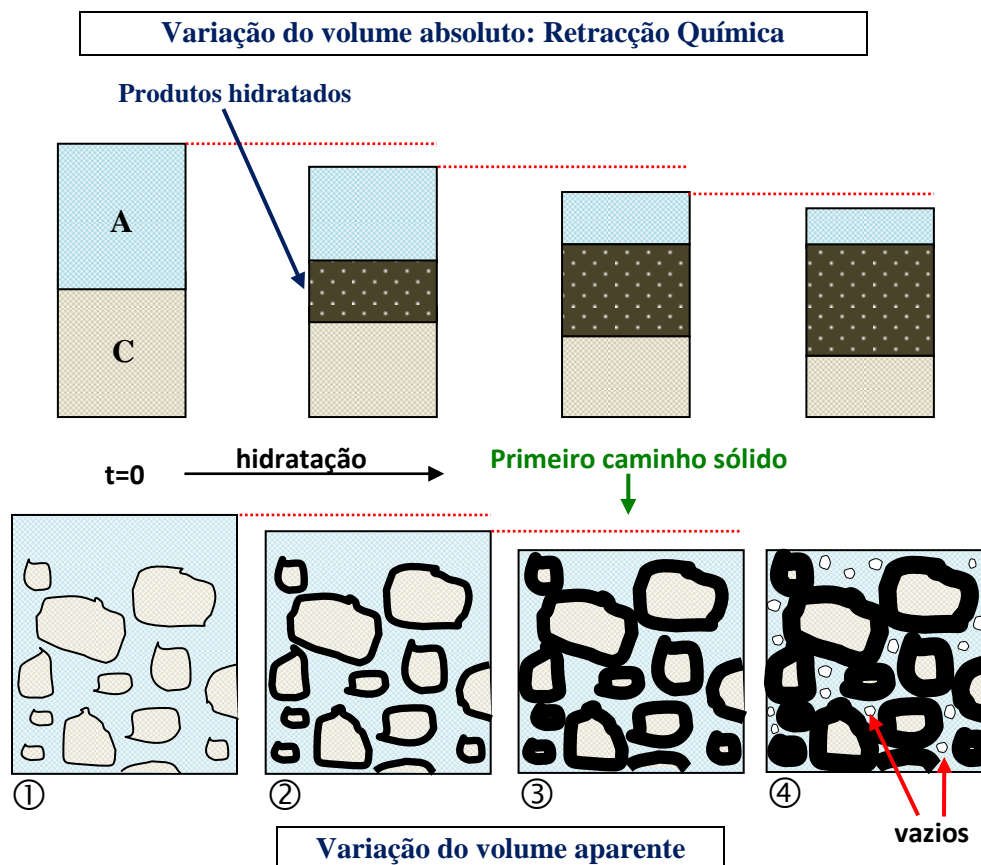


Figura 12 - A autodessecação como consequência da retracção química (Adaptado de [36])

Durante as fases 1 e 2, a mistura comporta-se como uma suspensão e os constituintes sólidos estão separados pela fase líquida. A mistura não resiste à variação de volume e a retracção química e autógena são iguais. Segundo Bisschop [37], este período pode ser curto, especialmente para relações A/C baixas (por exemplo 40 minutos para pastas com A/C igual a 0,28). Durante a fase 3, a rigidez do material aumenta em paralelo com o processo de hidratação. Nesta fase verifica-se o primeiro “caminho sólido”, também conhecido por “limiar da percolação”, o qual pode ser detectado pelo uso dos ultra-sons [38]. Este limiar corresponde ao momento em que as curvas da retracção química e autógena começam a divergir (Figura 9). As variações de volume impostas pelas reacções de hidratação são localmente prejudicadas pelos contactos das partículas sólidas diminuindo a retracção autógena quando comparada com a retracção química. Entre as fases 3 e 4, ocorre uma transição no comportamento semi-líquido para sólido. Posteriormente, a variação de volume devido à hidratação é superior à observada globalmente, levando ao aparecimento de um volume significativo de poros.

Deste modo as pastas de cimento endurecidas podem estar sujeitas a um processo de secagem resultante do consumo de água capilar durante o processo de hidratação. Quando os vazios criados durante a hidratação não estão sujeitos a fontes externas de água, o material cimentício pode secar substancialmente sem evaporação. Se um elemento com uma microestrutura densa ou com uma grande secção for submetido à presença de água, esta apenas penetra numa pequena espessura, mesmo quando esta está submersa, ficando o respectivo núcleo sujeito à autodessecação.

A autodessecação dificilmente afecta o estado de humidade num betão com A/C maior que 0,40. Nos betões com A/C menores ou iguais a 0,40, o grau de hidratação diminui substancialmente devido à autodessecação. A água reage quimicamente com o cimento diminuindo a humidade relativa interna do betão (\emptyset). Para valores baixos de A/C, o valor de humidade relativa interna pode chegar aos 72%. [39]

A autodessecação é mais pronunciada nos betões de alta resistência, devido ao facto de a reduzida quantidade de água utilizada na amassadura ser rapidamente consumida nas primeiras idades correspondentes à hidratação do cimento.

Esta humidade relativa baixa afecta fortemente várias características: hidratação, corrosão das armaduras, difusão de cloretos, difusão de gases, etc. [39]

Na Suécia, a autodessecação tem vindo a ser utilizada intencionalmente, com o objectivo de diminuir a humidade relativa interna na execução de pavimentos, desde 1990. Actualmente outros países estão também a adoptar esta tecnologia [40].

Persson [41], apresenta algumas fórmulas para previsão da autodessecação:

$$\emptyset(t, w/c)s = 1.13[1 - 0.065 \times \ln(t)] \times (w/c)^{0.24 \times [1 - 0.1 \times \ln(t)]} \quad \{R^2 = 0.76\} \text{ Eq. 3.4}$$

$$\emptyset(t, w/c) = 1.09 \times (w/c)^{0.17 \times (1 + 0.0451 \times t)} \quad \{R^2 = 0.54\} \text{ Eq. 3.5}$$

Onde:

- t idade do betão (1 < t < 15 meses)
- w/c quociente água/cimento (0.22 < w/c < 0.58)
- s 10% de sílica de fume

$$\emptyset(t, w/(c + s)) = 0.38 \times \left[\frac{w}{c + 2 \times s} + 2.4 - 0.1 \times \ln(t) \right] + \Delta \emptyset_{sl} \quad \{R^2 = 0.83\} \text{ Eq. 3.6}$$

Onde:

- c dosagem de cimento por m³ de betão
- s dosagem de sílica de fumo por m³ de betão
- t idade do betão (1 < t < 1000 dias)
- w dosagem de água por m³ de betão

$\Delta\phi_{sl} = -0.035$ para percentagens de sílica de fumo de 5 a 10, $t \leq 28$ dias

$$\phi = 0.965 \times t^{0.0188} \times (w/c)^{0.0331 \times \ln(t) + 0.0505} \quad \{R^2 = 0.53\} \text{ Eq.3.7}$$

($1 < t < 1000$ dias; $0.25 < w/c < 0.38$)

3.2.1.2 Mecanismo da retracção autogénea

O termo “retracção autogénea do betão” foi usado por C. G. Lyman, acerca de 40 anos, quando pela primeira vez registou o encurtamento do betão sem qualquer variação de massa ou temperatura. Depois disso, apenas no início da década de 90 a importância da retracção autogénea foi devidamente retratada, coincidindo com a produção dos betões de alta resistência associada ao desenvolvimento dos adjuvantes superplastificantes ou ao uso de adições como por exemplo a sílica de fumo.

Os betões que apresentam baixas relações água/finos e grandes dosagens de finos como os betões de alta resistência e betões autocompactáveis apresentam uma retracção autogénea elevada resultando em alguns casos e sob determinadas circunstâncias a ocorrência de fissuração. [42, 43]

A retracção autogénea corresponde a uma variação de volume macroscópica, para a qual não houve ou foi insuficiente o fornecimento de água de fonte exterior. Conforme a hidratação do cimento vai progredindo são gerados poros dentro da pasta endurecida devido à retracção química. Durante o processo a água capilar, e numa fase posterior, a água de gel é consumida e forma-se o menisco nos poros capilares, resultando retracção devido à pressão negativa gerada. Este mecanismo pode ser explicado pela teoria das tensões capilares usada no caso da retracção por secagem. [35, 44, 45]

De maneira a reduzir a retracção autogénea, é necessário reduzir os poros finos ou reduzir a tensão superficial na água dos poros. [46]

As tensões capilares geradas pelo processo de autodessecação são consideradas por muitos autores como a principal origem da retracção autogénea. No entanto, existem muitas evidências que outros processos contribuem para a totalidade da deformação autogénea, nomeadamente, os efeitos da temperatura, tensões superficiais e redistribuição de água no material hidratado.

3.2.1.2.1 Teoria de base - Modelo de Powers`

Em 1948, baseado em 12 anos de investigação, Powers and Brownyard [47] apresentaram um modelo empírico de distribuição dos constituintes da pasta de cimento, o qual representa uma marca histórica na investigação do cimento. Nos anos seguintes, Powers alterou o modelo [48, 49], sendo actualmente conhecido por modelo de Powers`. Esse estudo baseou-se no estudo das isotérmicas de adsorção de vapor de água e na água quimicamente ligada em pastas de cimento endurecido.

O conhecimento da relação existente entre a água evaporável (w_e) e a humidade relativa interna (ϕ), apresenta um elevado interesse, uma vez que expressa a quantidade de água que irá sair do betão até estabelecer um equilíbrio com a humidade relativa interna, face a uma temperatura constante.

A água existente nas pasta de cimento é classificada em três grupos: água capilar (água livre), água fisicamente ligada (água de gel) e água quimicamente ligada (água não evaporável).

O modelo de Powers` apresenta a água quimicamente ligada ao cimento com a relação de 0,23 g de água por grama de cimento hidratado. Esta água é chamada de água quimicamente ligada, ou água não evaporável, uma vez que é parte integrante da estrutura e só pode ser eliminada a temperaturas acima dos 105°C.

Na superfície do gel sólido existe água ligada fisicamente, aproximadamente equivalente a 0,19 g de água por 1 g de cimento hidratado. Esta água, água de gel, é variável de acordo com a humidade relativa interna.

A água não ligada é designada por água livre ou água capilar, corresponde à água presente nos grandes poros capilares. Em princípio, apenas a água livre é acessível para hidratar o cimento. A água capilar é considerada em equilíbrio com 100% de humidade relativa.

Os produtos formados durante a hidratação do cimento têm um volume menor do que a água e o cimento existentes antes da hidratação. Esta redução de volume (retracção química) assume valores aproximados a 6,4 ml por 100 gramas de cimento hidratado. As figuras seguintes (Figura 13 e Figura 14) representam o modelo de Powers` para valores representativos da composição do cimento Portland. Com base nessas figuras, é possível obter os vários volumes relacionados com a hidratação de pastas de cimento, excluindo o ar.

$$V_{cs} = \rho_c \times 6.4 \times 10^{-5} \times (1 - p) \times \alpha \quad (\text{retracção química}) \quad \text{Eq. 3.8}$$

$$V_{cw} = p - (\rho_c/\rho_w) \times (0.19 + 0.23) \times (1 - p) \times \alpha = p - 1.32 \times (1 - p) \times \alpha$$

(água capilar) Eq. 3.9

$$V_{gw} = (\rho_c/\rho_w) \times 0.19 \times (1 - p) \times \alpha = 0.60 \times (1 - p) \times \alpha$$

(água de gel) Eq. 3.10

$$V_{gs} = (1 - \rho_c \times 6.4 \times 10^{-5} + (\rho_c/\rho_w) \times 0.23) \times (1 - p) \times \alpha = 1.52 \times (1 - p) \times \alpha$$

(gel sólido) Eq. 3.11

$$V_{uc} = (1 - p) \times (1 - \alpha)$$

(cimento não hidratado) Eq. 3.12

Onde:

- V_i Volume relativo de cada fracção (m³/m³ de pasta)
- α Grau de hidratação (kg de cimento reagido/kg de cimento inicial)
- ρ_c 3150 kg/m³ (massa volúmica do cimento)
- p porosidade inicial; $p = (w/c)/(w/c + \rho_w/\rho_c)$; w/c razão água cimento em massa

Na hidratação total, 1 grama de cimento combina aproximadamente 0,23 gramas de água quimicamente ligada e 0,19 g de água de gel. A hidratação completa é apenas possível para razões A/C acima dos 0,42 (0,23+0,19).

A Figura 13 apresenta a relação volumétrica referente à hidratação de uma pasta de cimento com uma elevada relação A/C, calculada de acordo com o modelo de Powers`.

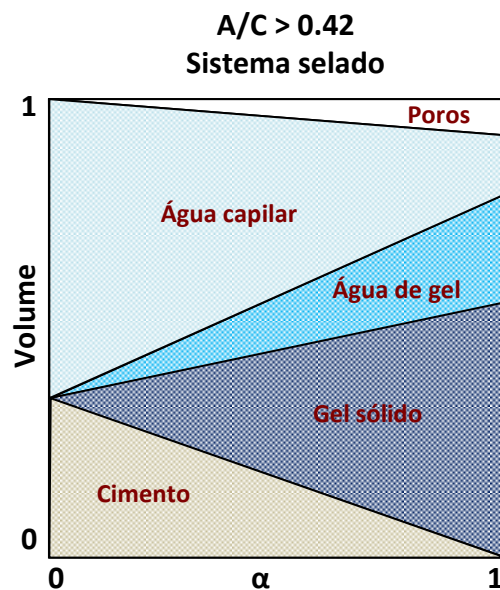


Figura 13 - Distribuição volumétrica da pasta de cimento (A/C > 0.42)

O diagrama refere-se a um sistema fechado (selado), sem trocas de humidade com o meio envolvente. Devido à elevada relação A/C ($>0,42$), a pasta de cimento completamente hidratada apresenta água capilar nos poros de maiores dimensões. O cimento hidrata completamente e forma o gel sólido. Para relações A/C abaixo de 0,42, não existe água capilar suficiente para a total hidratação do cimento (Figura 14). Na superfície do gel sólido a água de gel é ligada por forças de adsorção. Devido o facto de o gel sólido ocupar menos espaço que o cimento e a água antes da hidratação, são formados poros.

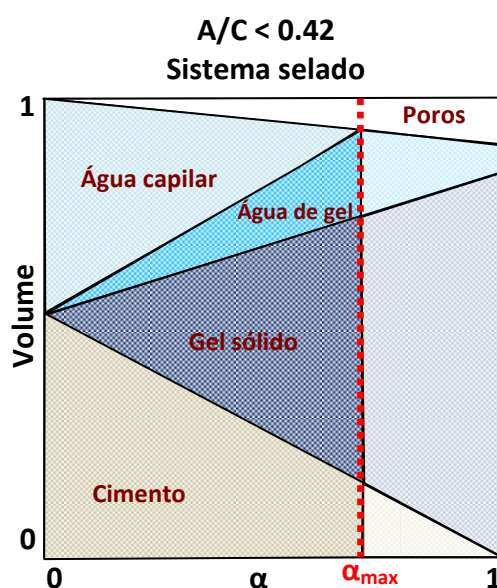


Figura 14 - Distribuição volumétrica da pasta de cimento ($A/C < 0.42$)

3.2.1.2.2 Influência da composição do ligante

Uma vez formada a estrutura sólida após a presa, a pasta de cimento não pode encurtar o equivalente à retracção química. São então formados poros na microestrutura. A diminuição macroscópica de volume, ou seja a retracção autogénea, é dependente da rigidez da microestrutura a qual tem uma relação próxima com a morfologia dos produtos hidratados. [50, 51]

A retracção autogénea do cimento é influenciada pela sua composição mineral e pela taxa de hidratação [52].

Nas primeiras fases de hidratação do cimento é formada etringite. Essa formação origina grande volume de poros finos na estrutura endurecida. As reacções de hidratação dos silicatos continuam lentamente num longo período, produzindo C-S-H.

A formação de etringite e C-S-H é fortemente afectada pela composição do cimento e condições de cura. A quantidade de C-S-H formada aumenta significativamente quando se usam escórias de alto forno ou sílica de fumo. [46]

A retracção autógena de betões com baixa relação água finos, contendo sílica de fumo ou escórias de alto forno, é superior à registada nos betões convencionais. [53, 54]

Por outro lado, a retracção autógena diminui com o uso de cinzas volantes ou fílers calcários. [53, 55]

A retracção autógena também ocorre nos betões que incorporam adições expansivas, no entanto os valores finais são substancialmente reduzidos. [53, 56]

A partir da definição de retracção química e retracção autógena, é claro que não existe uma correlação directa entre ambas. A Figura 15 apresenta a relação existente entre a retracção química e retracção autógena para diferentes tipos de cimentos [57]. Verifica-se que os cimentos com menores quantidades de aluminatos apresentam menores valores referentes à retracção autógena, mesmo com retracções químicas similares.

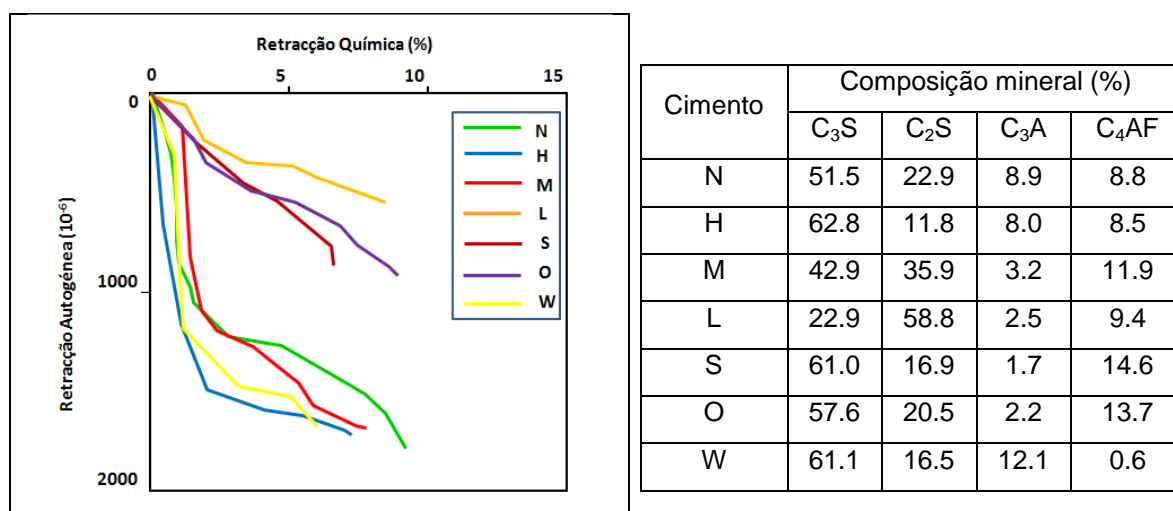


Figura 15 - Relação entre a retracção química e autógena para diferentes cimentos (Adaptado de [57])

Também [58] refere que os cimentos que contêm maiores dosagens de C₂S, como os de baixo calor de hidratação, apresentam menor retracção química. Contrariamente, conteúdos elevados de C₃A ou C₄AF originam uma elevada retracção química.

A retracção autógena pode ser estimada através da equação 3.13, a partir da composição mineral dos diferentes tipos de cimento. Dessa maneira, é possível comprovar que o C₃A e C₄AF apresentam uma grande influência na retracção autógena. A equação deriva de uma regressão em função do coeficiente de

hidratação de cada mineral e do respectivo conteúdo para cada tipo de cimento, com uma relação A/C constante e igual a 0.3. [52]

$$\varepsilon_{as}(t) = -0.12 \times \alpha \times C_3S(t) \times (\%C_3S) - 0.070 \times \alpha \times C_2S(t) \times (\%C_2S) + 2.256 \times \alpha \times C_3A(t) \times (\%C_3A) + 0.859 \times \alpha \times C_4AF(t) \times (\%C_4AF) \quad \text{Eq. 3.13}$$

Onde:

- $\varepsilon_{as}(t)$ retracção autogénea na idade (t)
 $\alpha \times \text{---}(t)$ coeficiente de hidratação de cada mineral na idade (t)
 (% ____) Percentagem em massa de cada mineral

Justnes et al. [59], testou a influência de 10 tipos de cimentos Portland na retracção química e autogénea, tendo concluído que a reactividade inicial depende em grande parte da finura do cimento e do seu conteúdo em constituintes mais reactivos, nomeadamente: C_3A , C_3S , alcalis e sulfatos.

3.2.1.2.3 Influência da relação A/C

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos em medições realizadas à variação de comprimento referentes à retracção autogénea em pastas de cimento [60] e em betões com máxima dimensão de 10 mm [61]. A variação da relação A/C produz um efeito nítido na deformação autogénea. Baixas relações A/C produzem elevadas retracções autogéneas. Note-se ainda que nas relações A/C acima de 0,40 podem verificar-se expansões a curto prazo.

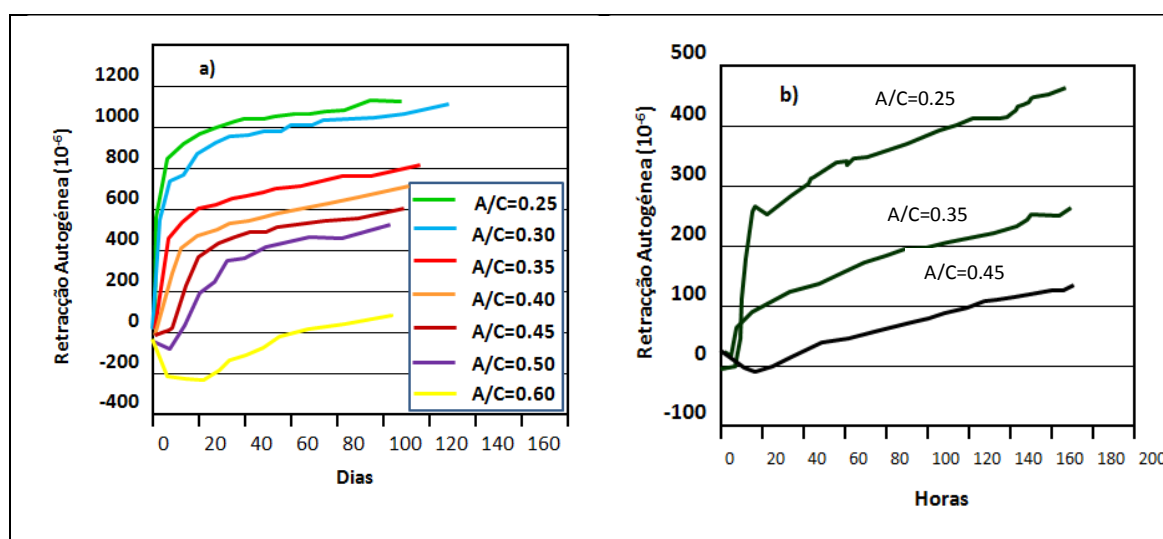


Figura 16 - Efeito da relação A/C na deformação autogénea em: a) pasta de cimento (Adaptado de [60]), b) betão (Adaptado de [61])

Segundo [62], as baixas relações água/finos originam uma rápida retracção autogénea, devido à existência de uma estrutura porosa mais fina e uma mais baixa humidade. A alta retracção autogénea verificada nos betões com baixa relação água/finos (menor que 0,40) é maioritariamente registada nos primeiros dias.

Nas relações água/finos altas (maiores que 0,40) existe a possibilidade de ocorrência de expansão inicial. Segundo o mesmo autor, as explicações podem estar associadas ao acesso à água interna (agregado poroso ou exsudação interna) ou água externa (reabsorção de água de exsudação). Estas expansões podem também estar associadas à formação de etringite ou de hidróxido de cálcio (ver secção 3.5).

3.2.1.2.4 Influências de outros factores

A Retracção autogénea, em pastas, pode variar desde valores próximos de zero até valores próximos de 1000×10^{-6} durante a primeira semana. Composições com baixas relações água/finos podem originar retracções autogéneas bastante elevadas, tanto nas primeiras idades como a longo prazo. [62]

Em certas situações têm-se registado expansões nas primeiras idades. A origem destas expansões não está devidamente identificada. Pode ocorrer após a matriz cimentícia desenvolver a estrutura de auto-suporte, e é mais comum nas misturas que apresentam elevadas relações água/finos e cimentos com reduzidas superfícies específicas, sendo também em alguns casos observadas nas misturas com baixas relações água/finos imediatamente após a presa. As causas podem ser atribuídas a vários mecanismos associados à hidratação como por exemplo pressões capilares, formação de etringite ou portlandite como também devido à reabsorção de água exsudada. [63]

A magnitude da retracção autogénea depende de vários factores, tais como: variação de temperatura, estrutura porosa, rigidez do esqueleto sólido e propriedades de fluência e relaxação. [63]

Segundo [64], o aumento da temperatura da cura incrementa a retracção inicial, mas origina valores inferiores a longo prazo.

A retracção autogénea aumenta com o conteúdo de finos, ou seja, com a diminuição da concentração de agregados. Embora o modelo de Hobb's, traduzido na Eq. 3.14 [65] tenha sido proposto para a previsão da retracção por secagem de betões com diferentes teores de agregados, o mesmo também pode ser utilizado para o mesmo fim, mas aplicado à retracção autogénea. [46].

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{(1 - Va) \times \left(\frac{Ka}{kp} + 1\right)}{1 + \frac{Ka}{kp} + Va \times \left(\frac{Ka}{kp} - 1\right)}$$

Eq. 3.14

Onde:

ε_c	Retracção autogénea do betão
ε_p	Retracção autogénea da pasta de cimento
Va	Volume de agregado
Ka	$E_a / (3 \times (1 - 2\mu))$
Kp	$E_p / (3 \times (1 - 2\mu))$
E_a	Módulo de elasticidade do agregado
E_p	Módulo de elasticidade da pasta de cimento
μ	Coefficiente de Poisson

A retracção autogénea não ocorre sozinha mas sim em simultâneo com outras variações de volume, nomeadamente:

Variação de volume devido ao calor de hidratação. Tazawa e al [66] referem que a retracção autogénea sob a influência da variação de temperatura pode ser estimada pelo conceito de maturidade. Os autores referem ainda que o princípio de sobreposição é válido para a retracção autogénea e variação térmica de acordo com a Equação 3.15.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon' + \Delta\varepsilon_a \quad \text{Eq. 3.15}$$

$$\Delta\varepsilon' = \alpha t \times \Delta T \quad \text{Eq. 3.16}$$

Onde:

$\Delta\varepsilon$	deformação total
$\Delta\varepsilon'$	deformação térmica
$\Delta\varepsilon_a$	deformação relativa à retracção autogénea
αt	coeficiente de deformação térmica
ΔT	variação de temperatura (°C)

Retracção por secagem. Quando o betão fica sujeito às condições de secagem após a cura, a retracção por secagem ocorre em simultâneo com a retracção autogénea.

A Figura 17 apresenta a relação entre provetes selados e provetes sujeitos à secagem, tendo o comprimento inicial sido registado após 24 horas. [67]

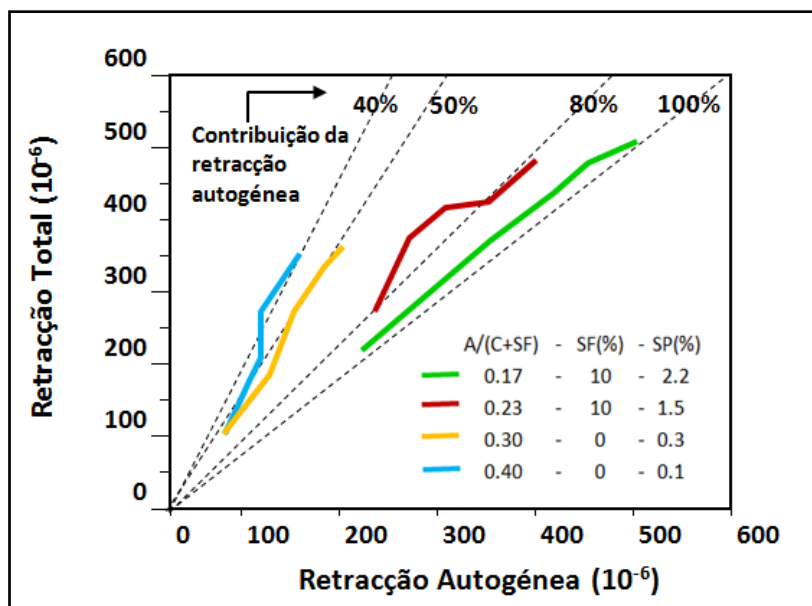


Figura 17 - Relação entre a retracção total e retracção autogénea para betões (Adaptado de [67])

Observa-se que a retracção dos provetes sujeitos à secagem é bastante superior, quando comparada com os provetes selados no que se refere aos betões com relação água/finos de 0,40. Por outro lado, para a relação água/finos de 0,17, os valores para os dois tipos de retracção são praticamente idênticos. Este facto sugere que a maior parte da retracção total não se deverá à evaporação mas à retracção autogénea.

A Figura 18 apresenta uma relação esquemática para a relação entre a retracção autogénea e a retracção por secagem, para betões correntes e betões de alta resistência.

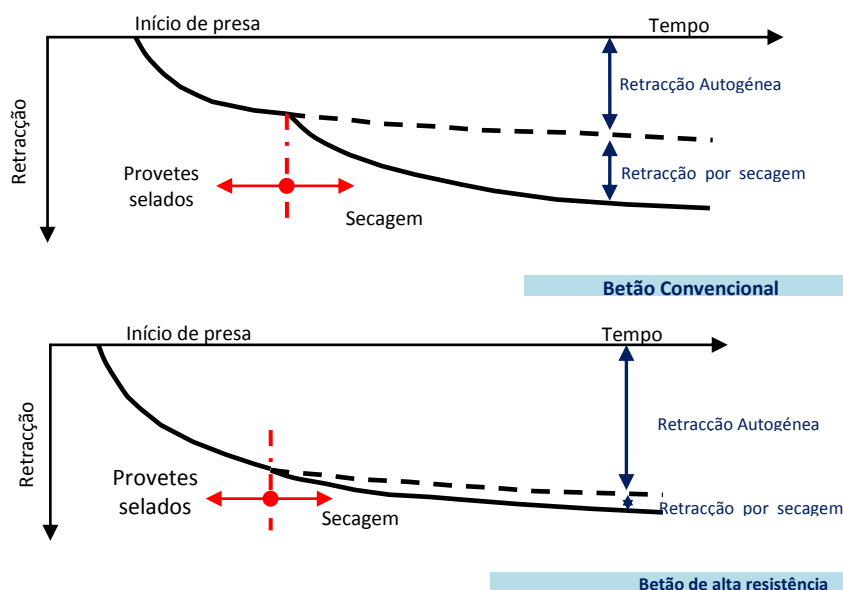


Figura 18 - Retraccção autogénea e a retraccção por secagem, para betões correntes e betões de alta resistência. (Adaptado de [46])

Retracção por carbonatação - (Ver secção 3.2.3). Para muitos autores, a combinação da retracção por carbonatação e retracção autogénea não necessita de ser considerada nas práticas de engenharia [46].

3.2.1.3 Métodos de redução da retracção autogénea

Baseado nos mecanismos e factores da retracção autogénea, resumem-se os possíveis métodos de redução:

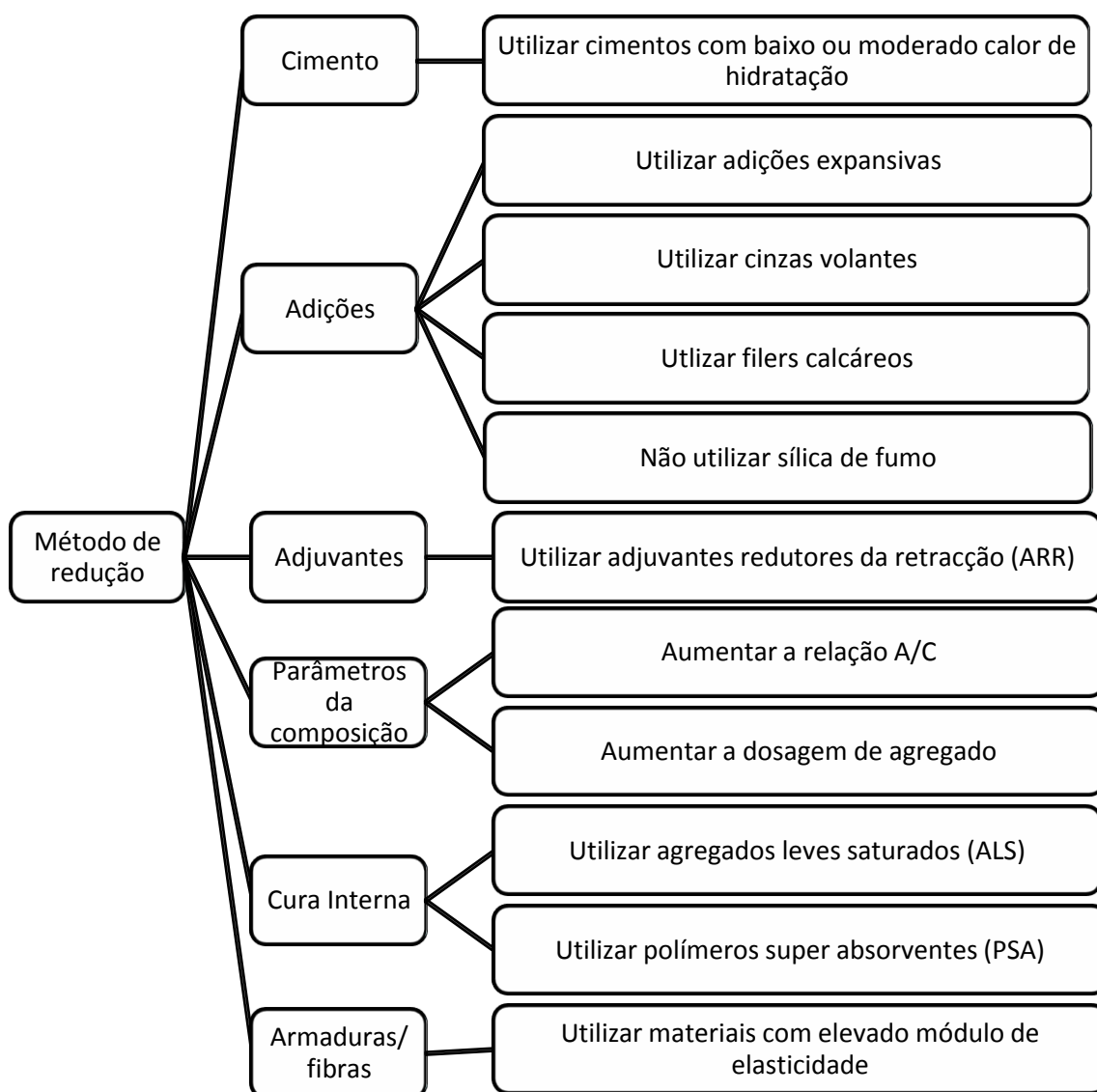


Figura 19 - Métodos de redução da retracção autogénea

3.2.2 Retracção por secagem

A retracção por secagem é definida como a deformação registada ao longo do tempo devido à perda de água, quando um elemento é submetido a uma temperatura e humidade constantes, num sistema livre (não restringido externamente) e não sujeito a cargas.

Embora a retracção por secagem tenha sido intensivamente estudada a nível mundial, o seu mecanismo a nível microscópico ainda não foi totalmente entendido. No que respeita à retracção por secagem e para betões de cimento Portland Normal, Hansen [68] estabelece 4 mecanismos principais: 1 – Tensões Capilares; 2 – Pressão de Disjunção; 3 - Energia Superficial (Gibbs-Baugham) e 4 - Movimentação da Água Intersticial.

Globalmente aceita-se que mais que um mecanismo se encontra envolvido no processo relativo à retracção por secagem, dependendo da humidade relativa.

Em [68], foram investigados os mecanismos envolvidos na retracção de secagem de pastas e betões de cimento Portland com relações A/C de 0.4 e 0.6. Foram realizados ensaios à variação de comprimento, perda de massa e estrutura porosa, através da técnica de intrusão realizada por um porosímetro de mercúrio. Os resultados apontam o efeito da energia superficial como o principal mecanismo, o qual foi significativo desde 0 a 95% de humidade relativa. O mecanismo explicado pelas tensões capilares foi considerado expressivo para humidades relativas acima dos 25%.

Grande parte da primeira retracção por secagem é irreversível. Helmut [69] e Pickett [70] demonstraram que a parcela irreversível pode chegar aos 60% da primeira retracção por secagem obtida durante um grande período de secagem.

Hansen [68], concluiu que o efeito resultante da energia superficial pode ser apenas responsável de 33% da primeira retracção por secagem. Os restantes 67% da primeira retracção por secagem correspondem a retracção irreversível devido a um decréscimo do espaço intercalar devido ao efeito da energia superficial e tensão capilar.

Grasley [71], considera que a retracção de secagem pode ser atribuída a três mecanismos principais. A contribuição de cada mecanismo depende da humidade relativa interna da estrutura porosa do betão. Para uma humidade relativa interna intermédia a alta (>45%), as tensões capilares, juntamente com a pressão de disjunção, são consideradas como mecanismos principais causadores da retracção por secagem. Abaixo dos 40%, o autor considera a energia superficial como factor dominante.

A retracção atribuída ao mecanismo relativo à pressão de disjunção resulta da redução das forças atractivas existentes entre os produtos sólidos hidratados. A

pressão de disjunção corresponde a uma força repulsiva existente entre as partículas sólidas devido à existência de água de adsorção. Conforme esta água vai secando, a pressão de disjunção vai diminuindo, originando retracção até que as forças atinjam novo equilíbrio.

No mecanismo de retracção normalmente referenciado por tensões capilares, ou mais correctamente por pressões capilares, verifica-se que conforme o betão vai secando, conduz ao esvaziamento, primeiramente, dos poros de maiores dimensões, seguindo-se sucessivamente os poros de menores dimensões. Quando se atinge um diâmetro médio dos poros de cerca de 50 nm [71], a tensão superficial da água origina um menisco. Para manter o equilíbrio estático, forma-se um diferencial entre o líquido e a fase correspondente ao vapor, com a pressão no líquido a diminuir relativamente à pressão no vapor. Conforme o processo de evaporação contínua e progressivamente vai esvaziando poros mais pequenos, a curvatura do menisco aumenta juntamente com o diferencial de pressão. Este diferencial de pressão pode ser quantificado pela equação de Laplace. (Equação 3.17)

$$p'' - p' = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}$$

Eq. 3.17

Onde:

- p'' - pressão no vapor
- p' - pressão no líquido
- σ - tensão superficial do líquido capilar
- r - raio da curvatura do menisco
- θ - ângulo de molhagem

Se se assumir que o líquido humidifica totalmente as paredes do poro, e que o poro se assemelha a um cilindro, então o raio da curvatura do menisco é igual ao raio do poro. Scherer [72], documentou que a pressão de disjunção é mais relevante no final da secagem, ou seja quando o distanciamento das superfícies sólidas é menor. Bentz et al. [73] provou existir, para humidades relativas acima dos 80%, uma grande concordância entre os valores teóricos obtidos a partir do mecanismo relativo às tensões capilares, considerado sozinho, e os resultados obtidos experimentalmente.

A humidade relativa interna pode fornecer informações sobre o mecanismo de retracção que assume maior importância. Apresenta ainda uma relação primária com a retracção causada pela redução da pressão capilar. Igualando as equações de Kelvin e Laplace (Eq. 3.17), a humidade relativa interna pode ser associada com o diferencial

de pressão que causa a retracção. A equação de Kelvin vem expressa da seguinte maneira:

$$\frac{2\sigma}{r} = \frac{\ln(RH) RT}{v}$$

Eq. 3.18

Onde: σ e r já foram previamente definidos

RH - humidade relativa interna

R - constante do gás

T - temperatura ($^{\circ}$ Kelvin)

v - volume molar da água

A equação “combinada” Kelvin-Laplace traduz-se conforme se apresenta:

$$p'' - p' = \frac{\ln(RH) RT}{v}$$

Eq. 3.19

Esta equação relaciona directamente a humidade relativa interna com o diferencial de pressão que causa a retracção.

A retracção por secagem é considerada a causa principal da fissuração por retracção. No entanto, o tipo e grau de restrições determinam a extensão e configuração das fissuras. A fissuração pode manifestar-se em função de restrições internas ou externas.

Existem três tipos de restrições internas:

O primeiro tipo de fissuração devido a uma restrição interna designa-se por auto-restricção. Esta fissuração resulta da distribuição não uniforme da retracção, causada pelos gradientes de humidade gerados durante a secagem. Origina tensões de tracção na face de secagem e tensões de compressão no interior do elemento. Quando as tensões atingem o valor da resistência à tracção do betão, surgem as primeiras fissuras.

O segundo tipo de restrição interna é devido à presença de agregado e o terceiro tipo verifica-se devido à presença de armaduras.

No que respeita às restrições externas, e uma vez que as restrições internas estão sempre presentes, estas contribuem de uma forma adicional para a fissuração.

Existe um grande grau de incerteza na previsão da retracção das estruturas de betão, principalmente devido a que esta propriedade varia consideravelmente com muitos factores, incluindo a composição do betão, tipo de agregado, humidade relativa do meio ambiente, geometria dos provetes ou peças da estrutura, mais especificamente, através do quociente entre a área exposta e o volume. Acresce ainda o facto da retracção se desenvolver lentamente, o que torna difícil a previsão baseada em ensaios de laboratório de curta duração. Como resultado [74], considera-se normal a existência de desvios na ordem de 20% na previsão desta propriedade.

3.2.2.1 Factores que afectam a retracção por secagem

O relatório técnico do American Concrete Institute (ACI), [74], considera como principais os seguintes factores que afectam a retracção por secagem: humidade relativa do meio ambiente, tipo e dosagem de agregado, dosagem de água e velocidade de evaporação (influenciada pela geometria do elemento, humidade relativa, distância à face exposta e tempo de secagem). Nos pontos seguintes pormenoriza-se a influência de alguns destes factores.

3.2.2.1.1 *Influência da humidade relativa e tempo de secagem*

Os resultados apresentados por Troxell et al. [76], demonstram que baixas humidades relativas originam elevadas retracções finais e elevadas taxas iniciais. Na Figura 20 observa-se ainda que ocorre expansão se o betão for exposto a um contínuo fornecimento de água. Esse processo é conhecido como expansão. A expansão dos betões correntes é considerada pequena quando comparada com a retracção, e ocorre apenas quando a humidade relativa se mantém acima de 94%. [77]

A Figura 20 [76] mostra, ainda, que a retracção por secagem é um processo muito lento, o qual demora muitos anos até atingir o valor final. O fenómeno é controlado pelo processo de difusão.

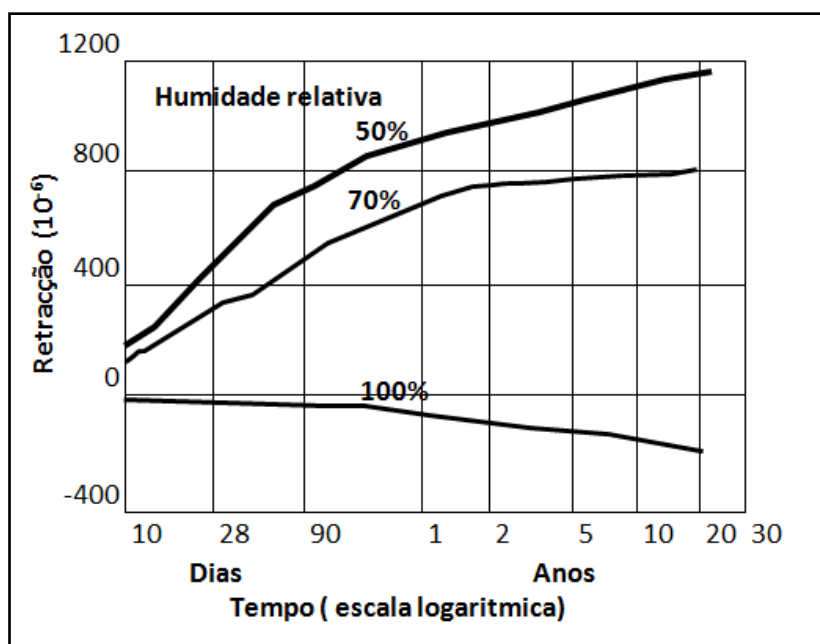


Figura 20 - Retracção total em função de diferentes humidades relativas (Adaptado de [76])

3.2.2.1.2 Influência da quantidade e tipo de agregado

A retracção é primariamente devida à diminuição de volume da pasta de cimento. A presença do agregado reduz a retracção total através da promoção de uma restrição. A retracção não é apenas relacionada com o conteúdo de agregado, deve ainda levar-se em conta o efeito traduzido pelo módulo de elasticidade do agregado.

A influência da capacidade de absorção do agregado foi investigada por Carlson [78]. A absorção do agregado, a qual traduz a porosidade acessível, influencia o módulo de elasticidade. Um baixo módulo de elasticidade está normalmente associado a uma alta absorção.

Embora a compressibilidade do agregado seja uma propriedade muito importante, o agregado também pode secar. Isto pode verificar-se em alguns agregados com elevada capacidade de absorção.

De um modo geral, agregados com um elevado módulo de elasticidade e baixa absorção produzem betões com baixa retracção.

3.2.2.1.3 Influência da pasta (constituição e quantidade)

Embora seja globalmente aceite que a composição do cimento afecta a retracção, e em particular a retracção por secagem, verifica-se que o efeito não está

completamente determinado. O conteúdo em C_3A e Alcalis foi registado como factor dominante, devendo o mesmo ser limitado. [75]

No que respeita à dosagem de água, é totalmente aceite que a redução origina uma redução na retracção de secagem. Assim, o conteúdo de água (e pasta) da mistura deve ser reduzido ao mínimo, de modo a minimizar a retracção por secagem e a tendência de fissuração.

3.2.2.1.4 Influência da geometria do elemento

A dimensão e forma dos elementos de uma estrutura, juntamente com a porosidade da pasta de cimento, influenciam a velocidade de secagem e por conseguinte a retracção.

A forma define o coeficiente superfície de secagem/volume (s/v). Um elevado s/v origina uma maior retracção por secagem.

Para um dado betão, a retracção registada numa determinada idade diminui com o aumento da dimensão do elemento [79].

Como consequência da difusão da humidade, desenvolvem-se gradientes de humidade da superfície para o núcleo. Num elemento em que a água evapora em todas as faces, a deformação resultante da retracção por secagem é maior nas secções exteriores, onde a humidade relativa interna é menor. Essa distribuição não uniforme origina tensões. Geram-se tensões de tracção perto das faces exteriores e tensões de compressão no núcleo.

Se a retracção por secagem ocorre de uma maneira assimétrica, geram-se tensões internas descompensadas. Em [74] é referido o exemplo das lajes, nas quais a retracção de secagem é considerada como causa primária na origem da fissuração.

Nestes elementos, e nos primeiros dias, a secagem verifica-se unicamente pela superfície superior, levando a que nessa zona se verifique uma maior retracção de secagem. A deformação do betão da zona superior é restringida pelo betão das camadas inferiores, o qual apresenta maior humidade interna.

3.2.2.1.5 Influência de adjuvantes

Existem, disponíveis no mercado, inúmeros tipos de adjuvantes adequados para a incorporação no betão visando alcançar determinadas propriedades, redução do custo da composição ou ambas. Normalmente, os adjuvantes influenciam a retracção através da interferência na formulação da composição. As interacções com o cimento,

adições e outros adjuvantes são relativamente complexas e difíceis de generalizar. Na secção 3.6 aborda-se especificamente o efeito dos adjuvantes redutores de retracção. Em [75], é referido que os adjuvantes que contêm cloreto de cálcio incrementam substancialmente a retracção por secagem.

3.2.2.1.6 Utilização de cimentos expansivos

As propriedades e utilização de cimentos modificados visando a compensação da retracção por secagem estão documentadas nos seguintes relatórios técnicos: ACI 223 (1970), ACI SP-38 e ACI SP-64. Na secção 3.5 é dada especial relevância a este tema.

3.2.2.2 Métodos de redução da retracção por secagem

As principais medidas que se podem tomar para minimizar a retracção por secagem incluem:

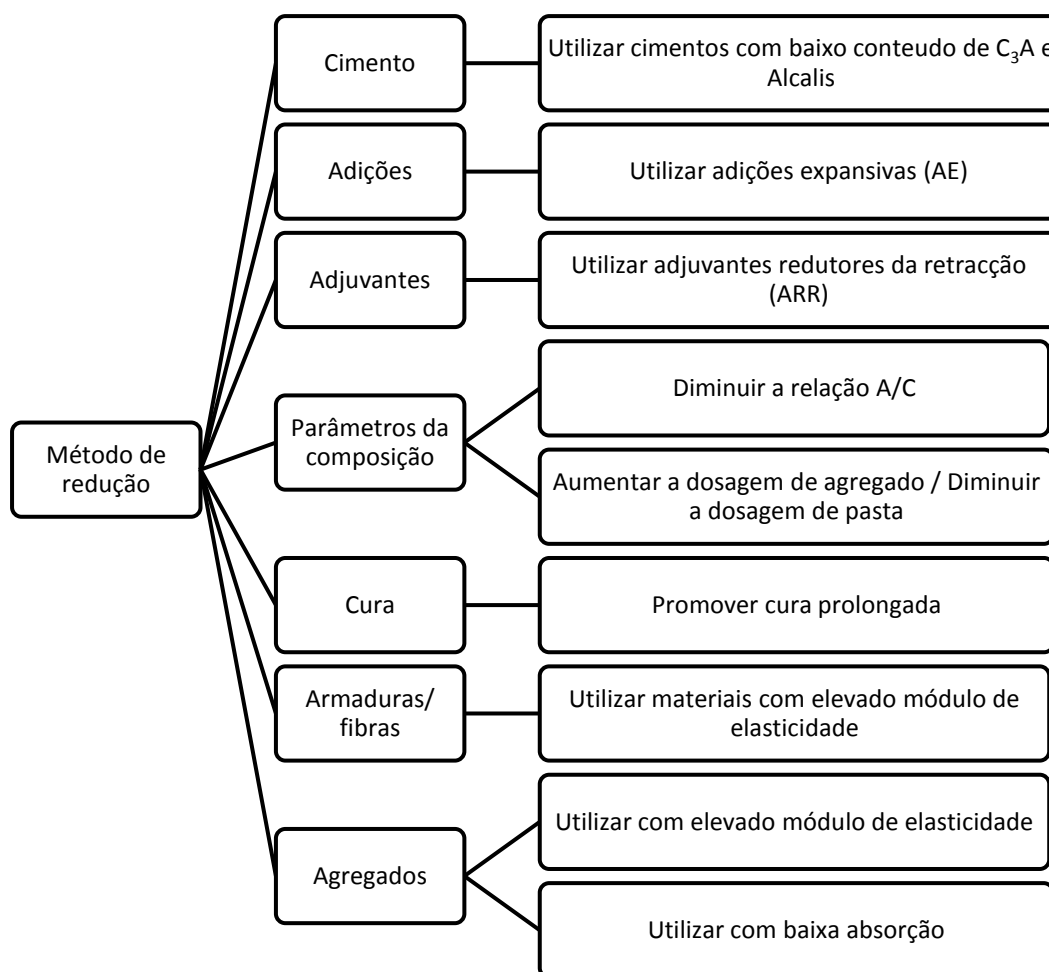


Figura 21 - Métodos de redução da retracção por secagem

3.2.3 Retracção por carbonatação

Em acréscimo à retracção autogénea e retracção por secagem, a pasta de cimento está também sujeita à retracção por carbonatação. Este tipo de retracção resulta da acção do dióxido de carbono nas reacções químicas do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) induzindo uma concomitante redução de água interna. O hidróxido de cálcio é transformado em carbonato de cálcio através da reacção com o dióxido de carbono existente na atmosfera. Devido ao facto de o dióxido de carbono não penetrar mais do que cerca de 12 mm na superfície de um betão de alta qualidade com uma baixa porosidade, a retracção por carbonatação é considerada com pouca importância na análise da retracção global da maior parte das estruturas. [74]

A carbonatação pode, no entanto, revelar-se importante em ensaios laboratoriais de pequenos provetes ou em estruturas construídas com betão de baixa qualidade, bastante poroso, particularmente agravados por uma longa exposição à secagem. O total da retracção por carbonatação observado em pequenos provetes pode ser superior à retracção total numa estrutura [74]. Esse efeito resulta do grande quociente superfície/volume que se verifica nalguns provetes. Esta retracção pode ser detectada e medida quando os provetes de betão registam um aumento de massa [80].

A retracção por carbonatação é condicionada pela humidade relativa, sendo maior para valores perto de 50% [81].

Verbeck, em [82], descreve em detalhe a retracção por carbonatação.

3.2.4 Hidratação e distribuição de humidade

O processo de hidratação, ao consumir moléculas de água provoca uma redução de água na pasta, um endurecimento da microestrutura (desenvolvimento de resistência) e refinamento da estrutura porosa com implicações na redução da porosidade e das propriedades de transporte de líquidos ou gasosos tais como a permeabilidade, difusão, etc.

Em peças seladas, e para um dado grau de hidratação do cimento, e dependendo do conteúdo de água inicial, o betão apresenta autodessecação (secagem interna). Tal facto provoca uma redução da humidade interna durante o processo de hidratação (quando não existe uma fonte adicional de água).

O processo de autodessecação depende da composição da mistura. Para betões correntes, com relações água/finos compreendidas entre 0,45 a 0,50, este processo é

diminuto, sendo a humidade relativa interna aproximada a 95% ao fim de 3 meses [83-85].

Pelo contrário, para betões de alto desempenho, com baixa relação água/finos (abaixo dos 0,4) e com sílica de fumo, o processo de autodessecação é elevado e começa bastante cedo. Por exemplo, para betões com relação água/finos de 0,26 e relação sílica de fumo/ cimento igual a 0,10 a humidade relativa pode baixar até aos 75% ao fim de 3 meses [84,86-88].

A humidade relativa interna pode baixar até aos 68% em betões muito resistentes [89]. O processo de autodessecação continua durante vários meses.

Segundo [90] os principais factores que influenciam a autodessecação são: razão água/finos; dosagem de sílica de fumo; finura do cimento e composição do cimento em C_3A e alcalis.

A distribuição da humidade durante o processo de hidratação depende das condições de humidade exterior e interior, tamanho do elemento, etc. No caso de se tratar de um elemento selado, em que o betão está protegido das trocas de humidade pela superfície, a humidade diminui em função do tempo de uma maneira homogénea ao longo da sua secção [90].

No caso de elementos que apresentem grandes secções, existe uma maior elevação de temperatura no núcleo, devido ao calor de hidratação, o que acelera as reacções químicas nessa zona, originando uma maior diminuição da humidade e, por conseguinte, uma heterogeneidade na distribuição da humidade.

Nas situações em que o betão é exposto ao contacto directo com a água, esta é absorvida e pode contrariar a autodessecação. No entanto, em betões com razão água/finos média ou baixa, surge um gradiente de humidade entre o núcleo e a superfície.

A profundidade e a taxa de penetração dependem principalmente da densidade da microestrutura que por sua vez resulta da composição da mistura. Quanto maior for a densidade da microestrutura menor será a profundidade de penetração.

Nas composições com baixas razões água/finos a profundidade de penetração é pequena pelo que no núcleo continua a existir o processo de autodessecação mesmo em betões conservados submersos por bastante tempo [90].

Nas situações em que se usam agregados leves saturados ou polímeros super absorvente para a execução da chamada cura interna, a humidade relativa dos betões é fortemente afectada pela água transferida dos agregados ou polímeros para os poros da pasta. Este método de redução do processo de autodessecação, e consequentemente da retracção autógena, será desenvolvido na secção 3.3.

Na maior parte das situações de utilização de um betão, este está sujeito ao processo de secagem. Assim, existe uma distribuição da humidade interna em função dos processos de hidratação e secagem. Consequentemente, ocorre um gradiente de humidade entre o núcleo e a superfície.

A diferença de humidade relativa existente entre o núcleo (função do processo de autodessecação) e a superfície (função das condições externas) influenciam a magnitude do gradiente de humidade e o tempo de equilíbrio termodinâmico [91,92].

Para betões com baixa razão água/finos e numa situação de não selagem das superfícies a autodessecação e a secagem ocorrem em simultâneo. Principalmente, na zona superficial, existe uma “competição” na procura da água pela hidratação e secagem.

O processo de circulação da água numa rede de poros finos em materiais cimentícios é muito lento. Por exemplo, o tempo necessário para se verificar o equilíbrio numa peça de poucos milímetros pode levar alguns meses, até mais do que um ano, em função das variações de humidade relativa considerada. Dependendo das composições, podem permanecer gradientes significativos durante períodos bastante longos [90].

3.2.5 Variações térmicas nas primeiras idades

A variação térmica corresponde à variação linear ou volumétrica exterior, macroscópica, induzida pelos efeitos térmicos. Nas primeiras idades correspondentes à hidratação as variações térmicas podem ser induzidas pelas reacções exotérmicas de natureza química. A deformação térmica ocorre simultaneamente com a deformação provocada pela retracção (autogénea, secagem e carbonatação).

Os efeitos térmicos verificam-se, predominantemente, nas primeiras horas. A temperatura registada no interior do betão é devida ao calor de hidratação do cimento, o qual pode variar de 300 a 450 J/g de cimento (Figura 22). Este fenómeno é intensificado pelo efeito de massa em estruturas com elementos de grandes secções (Ver Figura 23) e é particularmente alterado em função da temperatura ambiente, armaduras, tipo e espessura de cofragem, etc. [93].

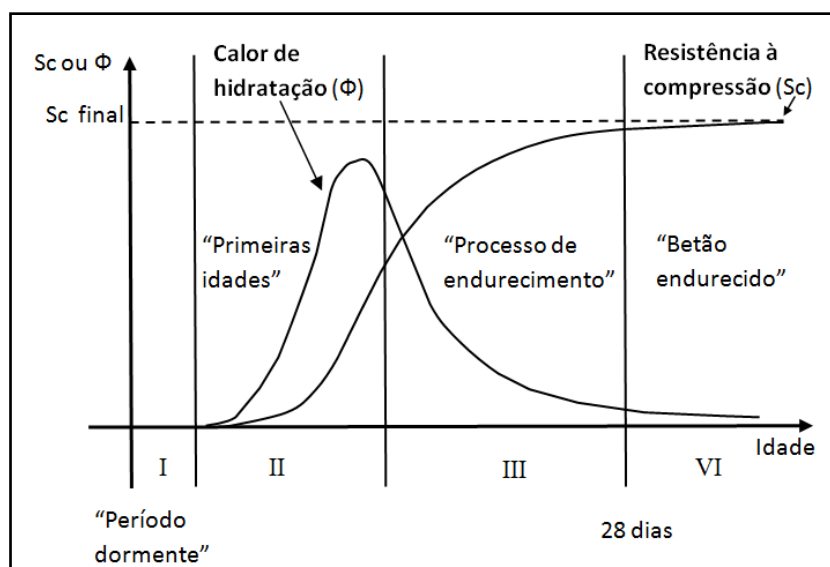


Figura 22 - Descrição esquemática do desenvolvimento da resistência e calor de hidratação (Adaptado de [93])

A Figura 22 representa, de forma esquemática, o desenvolvimento da resistência e o calor de hidratação nas primeiras idades.

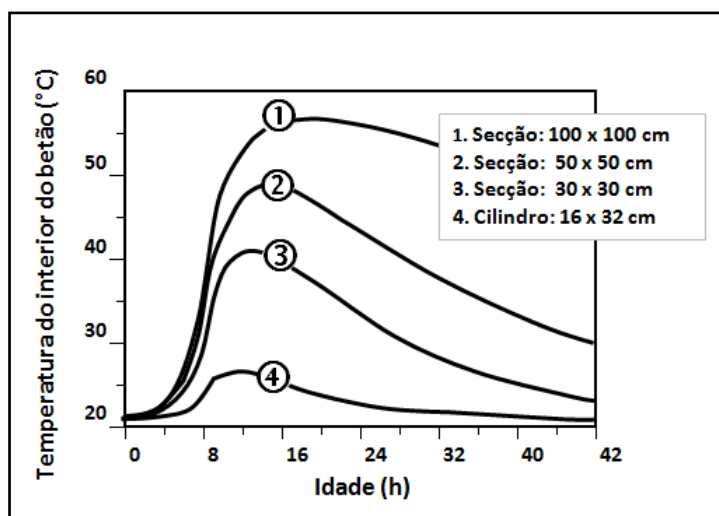


Figura 23 - Influência da dimensão da secção dos provetes no calor de hidratação (Adaptado de [93])

O parâmetro que permite converter o efeito da variação de temperatura em deformações ou tensões geradas em sistemas restritos é o chamado coeficiente de dilatação térmica, Δ .

Este coeficiente foi fortemente investigado e reportado na bibliografia específica.

O valor de Δ para a pasta de cimento endurecida depende do estado de humidade dos poros. [94]

No estado de saturados ou secos, Δ assume valores mais baixos, 10 a $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Na situação de parcialmente saturados, Δ assume valores mais elevados, 18 a $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Segundo o mesmo autor esse facto deve-se à redistribuição da água nos poros e respectivas alterações nas tensões capilares.

Nos betões, onde cerca de 25 a 35% do volume é pasta, o efeito de variação da humidade é inferior. Neste caso, o coeficiente Δ depende fortemente do tipo de agregado utilizado no betão. Esse facto tem a sua justificação na percentagem elevada que o agregado representa no volume total de um betão. Os coeficientes Δ dos agregados variam sensivelmente desde os 11 a $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, para minerais siliciosos até 1 a $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para os minerais calcários. [95,96]

Agregados graníticos poderão apresentar Δ de 1,8 a $11,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. [94]

Em [97-100], considera-se que o Δ assume valores elevados, antes da presa, aproximadamente $70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e baixa para cerca de $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ durante a presa. Os elevados valores verificados no estado fresco são devidos à predominância da fase líquida, a qual tem coeficientes de dilatação térmica superiores quando comparados com a fase sólida.

Quando se dá a formação da estrutura sólida no betão, verificam-se Δ bastante menores, aproximados dos que caracterizam o betão durante a sua utilização.

Em [101-103], são indicados valores médios de Δ , para betão convencional, em função da idade (Tabela 8).

Tabela 8 - Coeficiente de dilatação térmica em função da idade do betão

Idade do betão	Betão fresco	8 a 24 horas	1 a 6 dias	Betão endurecido
Δ	20 E^{-6}	15 E^{-6}	12 E^{-6}	11 E^{-6}

A determinação do Δ em betões torna-se bastante complicada, devido à existência de deformações tardias. Essas deformações são, provavelmente, causadas pela perda de equilíbrio da água existente nos poros devido à variação de temperatura. [62].

A partir da bibliografia analisada, observa-se que existe alguma incerteza quanto ao valor preciso do Δ de betões, nas primeiras horas.

3.3 CURA INTERNA

Um aspecto muito importante, que deve ser lembrado, é que a cura é materializada não só para promover a hidratação, mas também para minimizar a retracção.

Os avanços registados na tecnologia do betão ao longo dos últimos anos proporcionaram o uso generalizado de betões com baixas relações água/finos. No entanto, esses betões são propícios a manifestarem fissuração nas primeiras idades, caso não sejam tomadas medidas especiais. Devido ao relativamente baixo conteúdo de água que estas misturas possuem, apresentam menor retracção por secagem e maior retracção autogénea.

A retracção autogénea é, normalmente, insignificante nos betões com razão água/finos maior que 0,4. À medida que essa razão diminui, a retracção autogénea aumenta, e pode tornar-se no factor dominante.

Efectivamente, em betões com razão água/finos de aproximadamente 0,30, a retracção autogénea pode representar cerca de metade da retracção total [104].

A incorporação de adições de sílica de fumo ou escórias de alto forno pode aumentar significativamente a retracção autogénea. Essa ocorrência nas primeiras idades torna o betão muito susceptível à fissuração uma vez que a resistência à tracção é mínima e os elementos estão sujeitos aos possíveis efeitos relacionados com os diferenciais de temperatura.

Os processos convencionais de cura, nomeadamente com água, não são suficientes para reduzir a retracção autogénea. Podem eliminar a retracção autogénea apenas nos elementos de pequenas secções, devido ao facto da penetração da água pela superfície ser muito limitada.

Tendo em conta as limitações referidas, foram desenvolvidos recentemente várias estratégias baseadas na cura interna do betão.

Os processos de cura interna podem ser classificados em duas categorias:

- Cura interna com água. O agente de cura constitui um reservatório de água, o qual gradualmente liberta água.
- Selagem interna, no qual o agente de cura atrasa ou previne a perda de água do betão endurecido.

Após a colocação do betão, deve ser promovido o processo de cura que consiste em manter a humidade e temperatura do betão. Este processo é vital para se obter um betão com qualidade. A cura tem grande influência nas propriedades do betão endurecido, tais como: durabilidade; resistência; resistência à abrasão; estabilidade volumétrica; resistência ao gelo/degelo, etc.

As superfícies das lajes expostas são extremamente sensíveis à falta de cura. A resistência e impermeabilidade das camadas superficiais podem ser substancialmente reduzidas quando o processo de cura é deficiente.

A realização da cura promove as reacções químicas entre o cimento e a água, no chamado processo de hidratação. A maior parte dos betões frescos contém mais água do que aquela que é necessária para a hidratação completa do cimento. No entanto, uma perda de água apreciável por evaporação ou devida a outras causas pode limitar a hidratação. Se a temperatura for favorável, o processo de hidratação é relativamente rápido e decorre principalmente nos primeiros dias após a colocação do betão. Promover a retenção da água neste período é especialmente importante.

A maior parte dos processos de cura baseiam-se na aplicação externa e incluem a aplicação de água superficial, coberturas húmidas, coberturas plásticas, membranas de cura, etc. Podem ser aplicados individualmente ou em combinação, e podem incluir ainda métodos de cura acelerados.

Os processos de cura externos podem ser divididos em dois grupos:

- Cura com aplicação de água – aqueles que adicionam humidade ao betão prevenindo em simultâneo a sua perda.
- Execução de selagens – aqueles que apenas previnem a perda de a humidade do betão.

A aplicação de água no betão, a colocação de filmes impermeáveis ou membranas de cura formuladas a partir de resinas ou ceras dissolvidas num solvente volátil ou em água emulsionada são os processos mais utilizados na materialização da cura do betão.

Para betões de alta resistência/desempenho Aitcin [105] considera mais eficiente a promoção da cura com a aplicação de água.

Os betões com baixas razões água/finos contêm água em quantidade insuficiente para manter os poros capilares cheios de água para suportar a hidratação do cimento e as reacções pozolânicas. Aceita-se de forma consensual que os métodos de fornecimento de água interna são mais eficientes neste tipo de betões. O fornecimento de água interna é preferível, uma vez que os processos de cura convencionais não previnem a autodessecação.

A cura interna é um novo conceito de promover a cura do betão, que difere substancialmente das aplicações externas anteriormente referidas. Este método implica a introdução na mistura dum componente que serve de agente de cura. Esse agente pode ser um agregado normal introduzido na mistura numa condição específica (por exemplo no estado saturado) ou um novo componente (por exemplo um adjuvante ou um agregado especial).

A cura interna pode ser classificada em dois grupos, à semelhança da cura externa:

- Cura interna com água, no qual o agente de cura funciona como reservatório, o qual gradualmente liberta água.
- Selagem interna, na qual o agente introduzido atrasa ou previne a perda de água do betão endurecido.

Os métodos mais usuais de cura interna com água correspondem à utilização de agregados saturados e polímeros super-absorventes.

Os agregados usados tradicionalmente num betão convencional podem conter água, a qual é usada na cura interna. Se forem pré-saturados, poderão reduzir a retracção autogénea [106,107].

No entanto, os agregados leves, devido à sua elevada porosidade aberta, quando adicionados ao betão na condição de pré-saturados, são considerados muito mais eficientes.

A ideia de contrariar a autodessecação através do uso de agregados leves pré-saturados foi estudada por vários autores. As investigações sugerem o uso de agregados leves finos pré-saturados de modo a que a água seja libertada internamente, para compensar o consumo devido à retracção química ocorrida durante a hidratação. Conforme o cimento vai hidratando, esta água será transferida dos poros relativamente grandes dos agregados leves para os poros bastante mais pequenos da pasta. Essa transferência de água minimiza o desenvolvimento da retracção autogénea, uma vez que as tensões que originam a retracção são controladas pelas menores dimensões dos poros vazios, através da equação Kelvin-Laplace [108].

Um novo método para prevenção da autodessecação através do uso de polímeros superabsorventes foi proposto recentemente [109]. Durante a mistura, as partículas do polímero absorvem grande quantidade de água, a qual será consumida durante a hidratação do cimento promovendo a cura interna na pasta envolvente de cada partícula do polímero.

Recentemente [110], foi sugerido um novo método de cura (selagem interna) que não envolve nenhuma aplicação externa e não se baseia na adição de água. Este novo conceito envolve a adição durante a mistura duma solução química solúvel na água a qual reduz a evaporação de água durante a secagem do betão. São polímeros solúveis na água que promovem a retenção de água no betão, aumentando o grau de hidratação.

A figura seguinte resume os métodos de cura utilizados com o objectivo de manter a humidade dos betões.

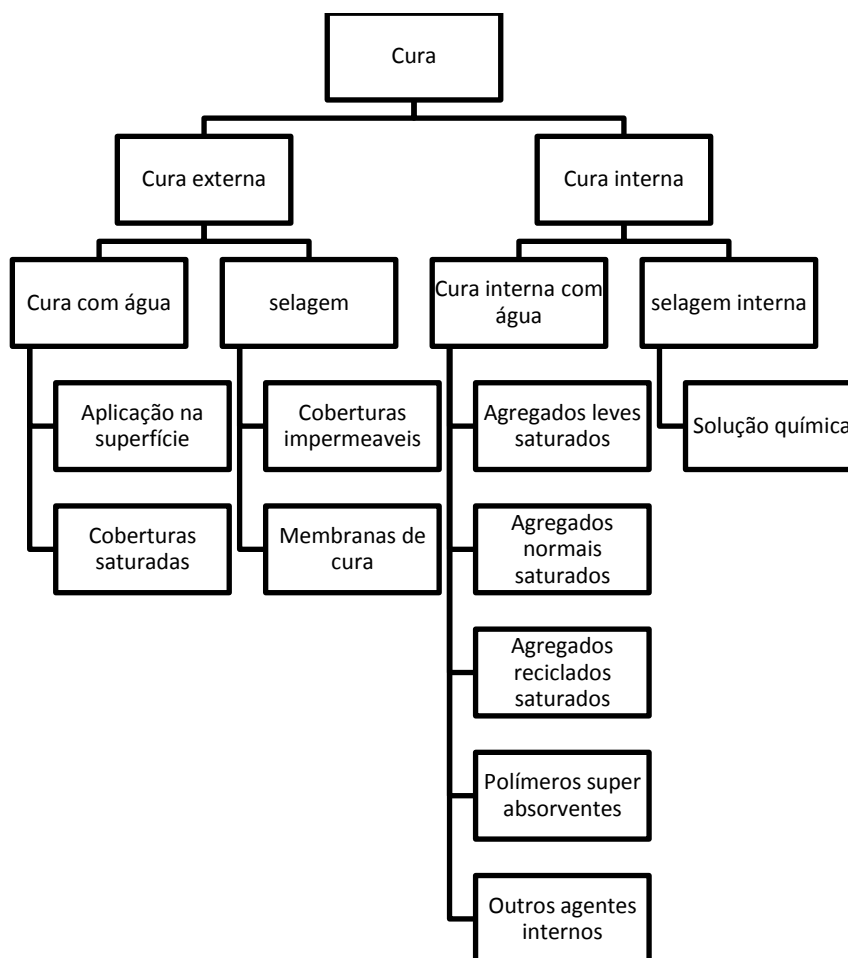


Figura 24 - Métodos de cura

3.3.1 Mecanismo da cura interna com água

A cura interna com água refere-se à incorporação de um agente de cura na amassadura do betão de modo a constituir um “reservatório” de água.

A questão essencial para o correcto funcionamento da cura interna através do uso de água prende-se na disponibilidade da água armazenada. Essa disponibilidade pode ser diferenciada nos seguintes tópicos: quantidade total de água, disponibilidade termodinâmica da água e disponibilidade cinética da água [111].

A quantidade de água necessária depende da composição da mistura, das condições de cura externas e do objectivo da cura interna.

Potencialmente a cura interna com água também pode ser usada para compensar a perda de água do betão para o ambiente. No entanto, é na mitigação da autodessecação e na consequente redução da retracção autógena que se tem centralizado a investigação.

A quantidade de água de cura interna teórica necessária para compensar a autodessecação pode ser calculada através do modelo de Powers` [109].

A disponibilidade termodinâmica da água em relação à hidratação do cimento obriga que exista uma humidade relativa de equilíbrio perto dos 100%. Mesmo uma pequena descida na humidade relativa afecta significativamente o grau de hidratação do cimento [112].

Basicamente, só a água contida nos poros grandes pode ser considerada útil para a realização da cura interna.

A disponibilidade cinética refere-se ao transporte da água das zonas armazenadas para todas as partes do material cimentício afectado pela autodessecação. Primeiro, é necessário que a água não esteja retida e que seja gradualmente libertada conforme a humidade relativa vai baixando. Em segundo lugar, a água de cura interna deve estar bem distribuída em todo o volume do betão considerado.

3.3.1.1 Aplicação do modelo de Powers`

Uma pasta de cimento com água de cura interna é uma pasta que, no seu estado fresco, foi pré-concebida com poros cheios de água. Essa água de cura pode ser utilizada para compensar a autodessecação durante o processo de hidratação.

A Figura 25 apresenta a distribuição das fases de uma pasta de cimento com baixa razão A/C, para a qual é livremente adicionada água durante o processo de hidratação. Esta água adicional permite ao cimento alcançar um maior estado de hidratação, na sequência do qual são formados micro-poros. A água externa representada na Figura 25, que também pode ser considerada como água de cura interna, ficará à disposição do cimento, sendo gradualmente substituída por vazios durante a hidratação.

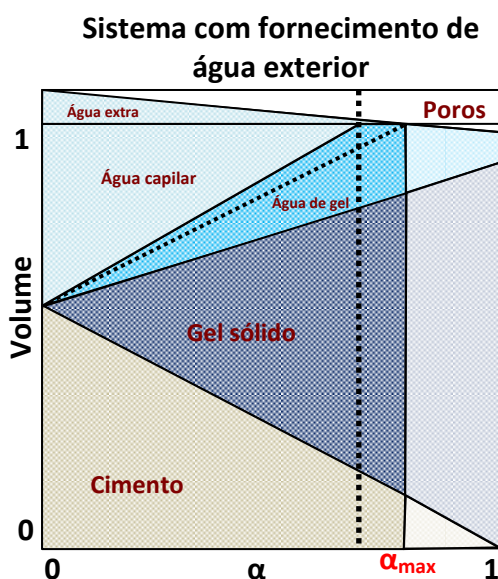


Figura 25 - Aplicação do modelo de Powers` com água de cura interna

Uma vez que a presença de poros tem, geralmente, uma influência negativa nas propriedades da pasta, apenas deve ser utilizada uma quantidade de água de cura interna suficiente para prevenir a autodessecação.

Do ponto de vista do cálculo, Powers considerou a água de gel indisponível para a hidratação do cimento. Assim, se se assumir, em concordância com o modelo de Powers, que a hidratação cessa quando todos os espaços livres ficarem preenchidos com água de gel, gel sólido e cimento não hidratado, tem-se a partir das equações 3.8 a 3.12:

$$\{ \alpha = \alpha_{max} \text{ para } V_{gw} + V_{gs} + V_{uc} = 1 \} \Rightarrow 0.60(1-p)\alpha_{max} + 1.52(1-p)\alpha_{max} + (1-p)(1-\alpha_{max}) = 1 \quad \text{Eq. 3.20}$$

Assim, para um sistema aberto com uma baixa relação A/C, vem:

$$\alpha_{max} = \frac{p}{1.1(1-p)} \quad \text{Eq. 3.21}$$

O volume relativo de água de cura interna inicialmente adicionada, $V_{icw.0}$, (Figura 25) deve ser igual à retracção química verificada para o máximo grau de hidratação dado na Eq. 3.21. Deste modo, através das equações 3.21 e 3.8, vem:

$$V_{icw.0} = 0.20(1-p)\alpha_{max} = 0.18p = 0.18V_{cw.0} \quad \text{Eq. 3.22}$$

Na base kg de água/kg de cimento, a água de cura interna e a água capilar, podem ser expressas através de:

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{ic} = \frac{V_{icw.0}\rho_w}{V_{c.0}\rho_c}; \left(\frac{w}{c}\right) = \frac{V_{cw.0}\rho_w}{V_{c.0}\rho_c} \quad \text{Eq. 3.23}$$

Com base nas equações 3.22 e 3.23, a quantidade de água de cura interna, apontando a obtenção da máxima hidratação, obtém-se por:

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{ic} = 0.18 \left(\frac{w}{c}\right); \text{ para } w/c \leq 0.36 \quad \text{Eq. 3.24}$$

A equação 3.24, aplica-se somente para $w/c \leq 0.36$. Acima dessa razão, a hidratação completa pode ser alcançada com menor quantidade de água de cura interna. De acordo com o modelo de Powers, a hidratação completa é possível para intervalos de $0.36 \leq w/c \leq 0.42$ se:

$$\left(\frac{w}{c}\right) + \left(\frac{w}{c}\right)_{ic} = 0.42 ; \text{ para } w/c \leq 0.36 \quad \text{Eq. 3.25}$$

Pelo que, para esse intervalo, a condição necessária para se obter α_{max} é:

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{ic} = 0.42 - \left(\frac{w}{c}\right) ; 0.36 \leq w/c \leq 0.42 \quad \text{Eq. 3.26}$$

Para manter a condição de saturação na hidratação da pasta de cimento, a retracção química deve ser compensada pela água de cura interna. Para $w/c > 0.36$, essa quantidade é dada por:

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{ic} = 0.064 ; \text{ para } w/c > 0.36 \quad \text{Eq. 3.27}$$

Assim, apresentam-se na Figura 26 indicações sobre as quantidades mínimas de água de cura interna necessárias para se obter um grau de hidratação máximo.

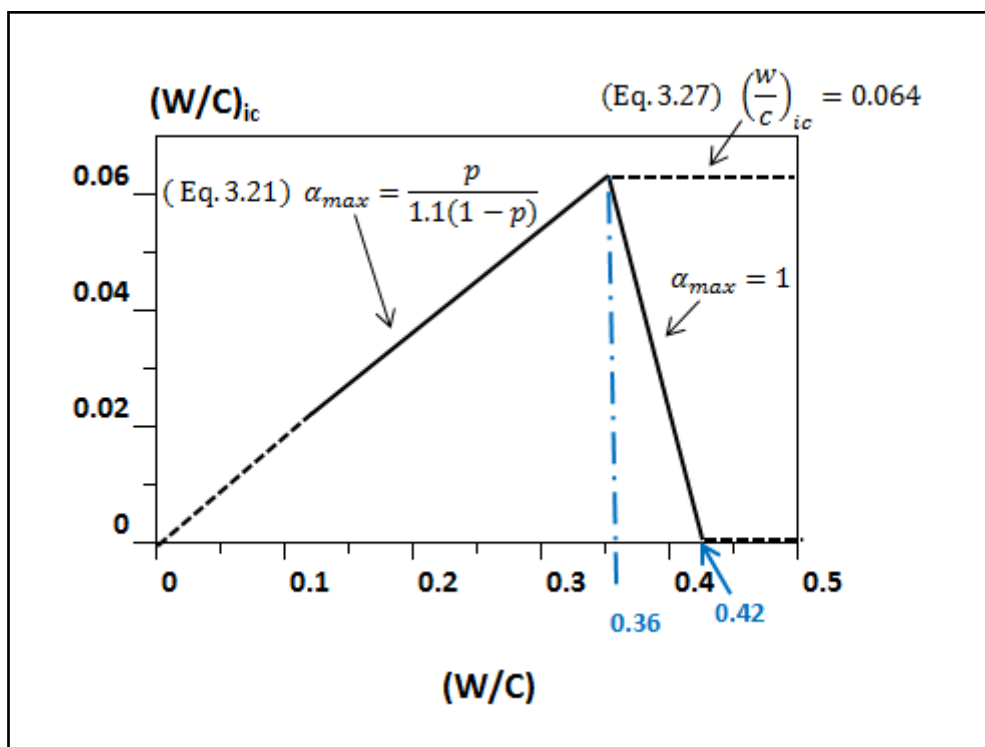


Figura 26 - Quantidades mínimas de água de cura interna para se obter um grau de hidratação máximo (Adaptado de [111])

Conforme pode ser observado na Figura 26 a quantidade máxima de água de cura interna é a correspondente a uma relação A/C igual a 0,36 e corresponde a 0,064 kg de água por kg de cimento.

Os cálculos seguintes convertem os valores indicados na figura em kg de água por m³ de betão: (betão sem fase gasosa)

$$1 = V_{agg} + V_{pasta} = V_{agg} + V_w + V_c \quad \text{Eq. 3.28}$$

Onde: V_i é o volume relativo de cada componente i , em m³ por m³ de betão e V_{agg} representa o volume de agregado.

O conteúdo de agregado num betão de alto desempenho é normalmente menor que num betão convencional. Admitindo esse conteúdo igual a 0.60 (lado da segurança), vem:

$$(1 - 0.6) = M_c \cdot (w/c) / \rho_c + M_c / \rho_c = M_c \cdot (0.36/1000 + 1/3150) \quad \text{Eq. 3.29}$$

Onde: M_i é a massa em kg/m³ e ρ_i a massa volúmica em kg/m³ de cada componente.

Obtém-se: $M_c = 590 \text{ kg/m}^3$, que representa o limite superior de dosagem de cimento.

Teoricamente, a quantidade de água de cura interna máxima $M_{icw.max} = 590 \times 0.064 \approx 40 \text{ kg/m}^3$.

Se o conteúdo em agregados for superior a 0.60, ou se a relação w/c for diferente de 0.36, é necessária uma quantidade de água de cura interna menor.

Deve ter-se em conta que o modelo de Powers` assume que o volume da pasta é constante durante a hidratação. Isto é apenas parcialmente verdade, uma vez que a retracção plástica e a deformação autogénea afectam o volume da pasta. Esta redução de volume reduz o volume de poros vazios na pasta de cimento, isto é, o volume de poros vazios será menor do que o calculado através do volume da retracção química.

Tendo em conta este efeito, a quantidade de água de cura interna deve ser reduzida numa pequena percentagem [111].

3.3.2 Materiais e métodos para a realização da cura interna

A realização da cura interna com água implica o uso de “reservatórios” capazes de fornecer a água durante as reacções de hidratação.

Nos betões, os reservatórios de água podem formar-se antes ou depois do início da mistura. As partículas que retêm água devem ser suficientemente resistentes para resistirem à amassadura. Se a formação dos reservatórios de água ocorrer depois do início da amassadura deve terminar antes da presa. Após a presa, a água “armazenada” deve estar acessível para a hidratação do cimento.

No geral, os reservatórios de água funcionam baseados em diferentes princípios físicos e químicos:

- Água ligada quimicamente, exemplo: água cristalina na etringite.
- Água absorvida fisicamente, exemplo: água nos polímeros super absorventes.
- Água retida fisicamente, exemplo: água capilar contida nos poros finos.
- Água não ligada, exemplo: água encapsulada.

3.3.2.1 Agregados normais

Os agregados utilizados num betão convencional podem conter água que poderá funcionar como água de cura interna. Esta água está fisicamente retida nos poros naturais dos agregados. Para porosidades totalmente preenchidas com água e elevados conteúdos de agregados as quantidades de água retidas podem ultrapassar as necessidades referentes à cura interna. No entanto, a distribuição de água retida nos agregados grossos não é favorável, pois apenas os agregados finos se apresentam capazes de fornecer a água necessária à pasta envolvente.

Nesta aplicação, o elemento mais importante é a porosidade do agregado. Nos betões de elevado desempenho, onde a cura interna é particularmente interessante para compensar a autodessecação são utilizados agregados densos uma vez que a resistência dos agregados limita a resistência do betão. Esses agregados densos apresentam uma muito baixa porosidade, pelo que nestes casos é necessário promover a cura interna através de outro agente.

3.3.2.2 Agregados reciclados

Os agregados reciclados consistem, geralmente, em partículas de rocha com argamassa agregada. O volume de argamassa pode variar de 20 a 60%, o que origina

uma elevada absorção dos agregados reciclados quando comparados com os agregados convencionais [113].

No entanto, a elevada absorção de água dos agregados reciclados é difícil de ser utilizada. A fracção da pasta de cimento, quando se utilizam agregados reciclados, apresenta, tipicamente, uma estrutura porosa fina, a qual não é susceptível de fornecer água para a pasta de cimento em hidratação nas primeiras idades. Acresce ainda o facto de as partículas de rocha do agregado reciclado, cuja porosidade pode conter potencialmente água de cura interna, estarem parcialmente cobertas com argamassa, o que diminui a cedência de água. Isto significa que a disponibilidade termodinâmica e cinética da água contida nos agregados reciclados se encontra diminuída.

Devido a estas razões, os agregados reciclados são menos úteis do que os agregados normais para a realização da cura interna com água [114].

3.3.2.3 Polímeros superabsorventes (PSA)

Um polímero super absorvente é um material capaz de absorver uma quantidade significativa de líquido do meio envolvente e de reter essa água dentro da sua estrutura sem o dissolver [115].

Os PSA são usados principalmente para absorverem água e soluções aquosas. Teoricamente, a capacidade máxima de absorção de água pode ir até 5000 vezes do seu próprio peso. No entanto, a absorção dos PSA comercializados é de cerca de 50g/g para soluções de sais e é normalmente inferior a 20g/g quando utilizados nos materiais cimentícios [116].

A absorção de água nos PSA é baseada em ligações químicas secundárias. Devido à sua natureza iónica e estrutura inter-conectada podem absorver grandes quantidades de água ou outras soluções aquosas.

Quando comparados com os agregados leves, os PSA apresentam algumas peculiaridades. Os PSA podem ser usados no seu estado natural uma vez que absorvem a água durante a amassadura. Além disso, o uso dos PSA permite uma melhor concepção em termos de formato e dimensão dos poros e respectiva distribuição no betão. Os poros introduzidos no betão através do uso dos PSA devem, preferencialmente, apresentar dimensões entre 50 a 300 μm [114].

3.3.2.4 Substâncias com água retida fisicamente

Existe um grande número de materiais naturais ou produzidos artificialmente potencialmente úteis para conter água de cura interna, devido a apresentarem uma significativa porosidade aberta. Estes materiais apresentam diferentes composições e estrutura porosa. Grande parte deles são usados como agregados leves no betão.

Para funcionarem como agentes de cura interna, devem ser pré-saturados. A saturação completa pode demorar algumas horas ou dias. Se os materiais forem adicionados secos, a absorção durante a amassadura é parcial e inclui partículas cimentícias. Esse facto aumenta a ligação com a pasta, mas também afecta a eficiência da cura interna.

O mecanismo primário responsável pela retenção da água nesses materiais são as forças capilares. Apenas os poros com dimensões acima dos 100 µm são úteis para o armazenamento da água de cura interna. Os poros de menores dimensões retêm fortemente a água não a disponibilizando para as reacções de hidratação [114].

Como exemplos de substâncias capazes de reter água fisicamente, podem citar-se [114]: pedra-pomes, perlite, materiais argilosos expandidos, fibras e pós derivados da madeira.

3.3.2.5 Selagem interna

A selagem interna do betão é uma técnica que permite reduzir a perda de água do betão durante a secagem.

Dhir et al [110] sugere que o mecanismo interno inclui o abaixamento do potencial químico dos poros com água e/ou o bloqueio da superfície dos poros. Sugere também uma série de substâncias que funcionam dessa maneira.

3.3.3 Utilização de agregados leves pré-saturados

O conceito de usar agregados leves pré-saturados para executar a cura interna corresponde à técnica mais utilizada dentro dos métodos de cura interna.

A ideia que a autodessecação pode ser contrariada pelo uso de agregados leves pré-saturados foi comprovada por muitos autores. A incorporação dos agregados leves saturados na mistura disponibiliza a água necessária para substituir a consumida pela hidratação. Conforme o cimento hidrata, esta água extra desloca-se dos poros relativamente grandes do agregado leve para os poros pequenos da pasta de cimento. Este facto minimiza o desenvolvimento da retracção autogénea, uma vez que as

tensões são controladas pelo diâmetro dos pequenos poros vazios, traduzidas através da equação de Kelvin-Laplace [117].

Vários autores demonstraram experimentalmente que este método de cura pode compensar totalmente a retracção autógena.

A Tabela 9 resume vários resultados experimentais. O conteúdo de água determinado experimentalmente para eliminar a retracção autógena foi, na generalidade, superior ao estimado teoricamente.

Tabela 9 - Água de cura interna
(valores calculados vs valores obtidos experimentalmente) [118]

Referência	A/Pó	Água de absorção do agregado %	Grau de saturação do agregado	Água de cura interna kg/m ³	
				Valor obtido experimentalmente	Valor calculado
[119]	0.33	11.0	0.5-1	24-64	18-19
[120]	0.37	13.0	0.2-0.6-1.0	42-70	19-23
[121]	0.32	8.3-17.6	1	24-78	24
[122]	0.34-0.39	14.0	0.5-1	38-76	22-23
[123]	0.28-0.32	13.0	0.5	31-70	19-20
[124]	0.37	15.2	1	83	19-23
[125]	0.34	16.7	0.95	35	28

A fracção fina dos agregados leves mostrou-se mais efectiva na distribuição da água de cura interna, e apresentou uma esfera de influência entre 0,1 a 0,2 mm como máximo [126].

Lura et al. [127] determinou a esfera de influência através de diferentes métodos, obtendo resultados situados nos poucos milímetros.

As principais variáveis que afectam a eficiência são [118]:

- a) grau de saturação dos agregados leves;
- b) nível de substituição dos agregados normais por agregados leves;
- c) tamanho das partículas do agregados leve, a qual está relacionada com o espaçamento das partículas.

No que respeita ao grau de saturação, é preferível proceder à introdução de agregados completamente saturados, de modo a promover uma cura interna apropriada. Quando são introduzidos na condição de não saturados, o espaçamento entre as partículas leves deve ser reduzido de maneira a compensar a redução de

eficiência da cura interna e, no mínimo, introduzir a mesma quantidade de água de cura interna.

O efeito do tamanho das partículas foi avaliado em vários estudos. Quando o conteúdo total de agregados leves é mantido constante, a utilização de agregados mais finos corresponde a um menor espaçamento das partículas influenciando o transporte da humidade interna aumentando a eficiência da cura interna.

O efeito da substituição parcial ou total dos agregados normais pelos agregados leves saturados foi avaliado por vários autores. Por exemplo em [128], são apresentados os resultados da deformação autogénea para misturas com diferentes percentagens de substituição. É possível concluir que, quanto maior é a percentagem de substituição dos agregados normais pelos agregados leves saturados, maior é a redução da retracção autogénea.

3.3.4 Avaliação da eficiência da cura interna com água

3.3.4.1 Humidade relativa interna

A humidade relativa interna encontra-se relacionada com a actividade química da água na pasta de cimento.

Após a anulação do efeito dos sais dissolvidos na água dos poros, pode calcular-se o raio do poro (Kelvin) a partir da humidade relativa interna [129].

Em [130], foi estudada a variação da humidade relativa em função do tempo, para amassaduras realizadas com cura interna comparadas com uma amassadura de referência. As medições registadas evidenciam uma elevada humidade relativa nas misturas onde foi executada a cura interna com água.

Outra técnica de medição da humidade relativa baseia-se na incorporação no betão fresco de sensores, os quais podem ser colocados no betão fresco de uma estrutura possibilitando a monitorização da humidade relativa interna. No entanto, a variação da temperatura afecta as medições, obrigando a correcções [131].

3.3.4.2 Grau de saturação

Uma pasta em hidratação com acesso livre à água exterior apresenta os poros saturados. Assim, a quantidade de água presente nos poros de grandes dimensões serve de indicador sobre a eficiência da cura interna com água.

Uma vez que os agentes de cura contêm água, deve-se ter especial cuidado na realização das medições, separando essa água da água capilar existente na pasta de cimento.

A quantidade de água e a sua distribuição nos diferentes poros pode ser medida directamente por várias técnicas, por exemplo através do uso do calorímetro, ressonância nuclear magnética, entre outras. [132].

Esta última, permite a medição da quantidade de água presente em diferentes poros, possibilitando a distinção da água de hidratação na pasta da água presentes nos agentes de cura. [133]

3.3.4.3 Absorção isotérmica

A absorção isotérmica dos betões com água de cura interna ocorre de forma diferente do observado nos betões normais [134]. Tendo por base essa informação, é possível conhecer a distribuição da dimensão dos poros e a respectiva distribuição dos fluidos.

Uma possível fonte de erro na interpretação das isotérmicas de absorção reside no facto de a água utilizada na cura interna poder ser confundida com a água contida nos poros da pasta de cimento. Em particular, grande parte da humidade presente nas humidades relativas altas deve-se à presença de água nos agentes de cura interna.

As desvantagens resultam da necessidade de existirem múltiplos provetes para a realização de ensaios ao longo da hidratação.

3.3.4.4 Grau de hidratação

De acordo com o modelo de Powers`, a hidratação do cimento Portland nas pastas com livre acesso à água termina quando todos os poros capilares ficam cheios com os produtos da hidratação ou quando o cimento fica totalmente hidratado [135].

Através da medição do grau de hidratação do betão curado com água interna, pode aferir-se o grau de eficiência da cura através da comparação com os resultados do modelo de Powers` ou em alternativa com pequenos provetes de referência imersos em água.

Na referência [136], foram esmagados betões contendo agregados leves saturados, sendo por peneiração separada a pasta de cimento. Através da análise termo-gravimétrica registaram-se aumentos no grau de hidratação de 0,67 para 0,82 respectivamente dos 180 aos 360 dias após a betonagem. Para as mesmas misturas, utilizando a difracção de raios X registaram-se maiores quantidades de silicato de cálcio hidratadas, hidróxidos de cálcio e etringite aos 360 dias do que aos 180 dias.

3.3.4.5 Deformação autogénea

Uma vez que a redução da água nos poros capilares é compensada pela água contida nos agentes de cura interna, desenvolvem-se baixas tensões nos poros e a autodessecação é reduzida. A realização da cura interna com água pode levar à expansão nas primeiras horas [137].

A utilização de agentes de cura interna pode afectar, só por si, a deformabilidade do betão e indirectamente a retracção do mesmo. Por exemplo, a utilização de agregados leves reduz o módulo de elasticidade do betão. Potencialmente, esse facto pode contribuir para o aumento da retracção do betão.

3.3.5 **Influência da cura interna noutras propriedades do betão**

3.3.5.1 Reologia do betão fresco

O grau de saturação inicial dos agregados leves utilizados com o intuito de promover a cura interna é muito importante para a reologia inicial e respectiva evolução. Este aspecto é muito importante para a trabalhabilidade e colocação do betão, nomeadamente no que respeita à facilidade de bombagem. Caso os agregados leves sejam introduzidos no estado seco, a água de amassadura penetra nos poros acessíveis, reduzindo a trabalhabilidade e facilidade de bombagem.

No que respeita ao uso de polímeros superabsorventes, Mechtcherine [138] refere que a utilização dos PSA não tem efeitos negativos na trabalhabilidade, caso se adicione água extra visando a grande absorção que os PSA retêm durante a amassadura.

3.3.5.2 Segregação

Uma amassadura muito intensa pode produzir efeitos negativos em alguns agregados leves, nomeadamente segregação e libertação preliminar de água absorvida [139].

No que respeita à utilização dos PSA [138], conclui que as misturas com PSA normalmente apresentam melhores comportamentos no que respeita à resistência à segregação.

3.3.5.3 Efeito na retracção de secagem

A comparação das diferentes técnicas de cura interna demonstra que, nas condições de selagem e de secagem, a retracção autogénea diminui, mas a retracção de secagem aumenta. A deformação total (autogénea mais secagem) varia dependendo da técnica de cura interna usada [118].

O estudo do funcionamento dos vários mecanismos, retracção autogénea e de secagem simultaneamente necessita de ser sistematizado, sendo esta uma área de investigação futura [118].

3.4 TEMPO ZERO

O tempo zero é definido como o correspondente à duração entre o instante em que a água entra em contacto com o cimento e o instante em que o betão desenvolve uma estrutura capaz de gerar tensões internas.

Por outras palavras, é o intervalo de tempo com início na mistura da água com os ligantes até ao instante de transição suspensão-sólido. Este tempo é grosseiramente equivalente ao tempo de presa mas não é forçosamente igual.

Uma vez que a retracção autogénea é geralmente usada para prever a tendência que um betão pode apresentar para fissurar, interessa saber qual o instante correcto para se iniciar a medição.

No período em que o betão está fresco (antes da presa) as tensões geradas são insignificantes, sendo importante determinar o momento em que a retracção autogénea origina tensões internas.

Na Figura 27, na qual é representada a retracção autogénea versus a retracção química, é apresentada a transição suspensão-sólido, a qual ocorre quando diminui acentuadamente a relação retracção química/retracção autogénea.

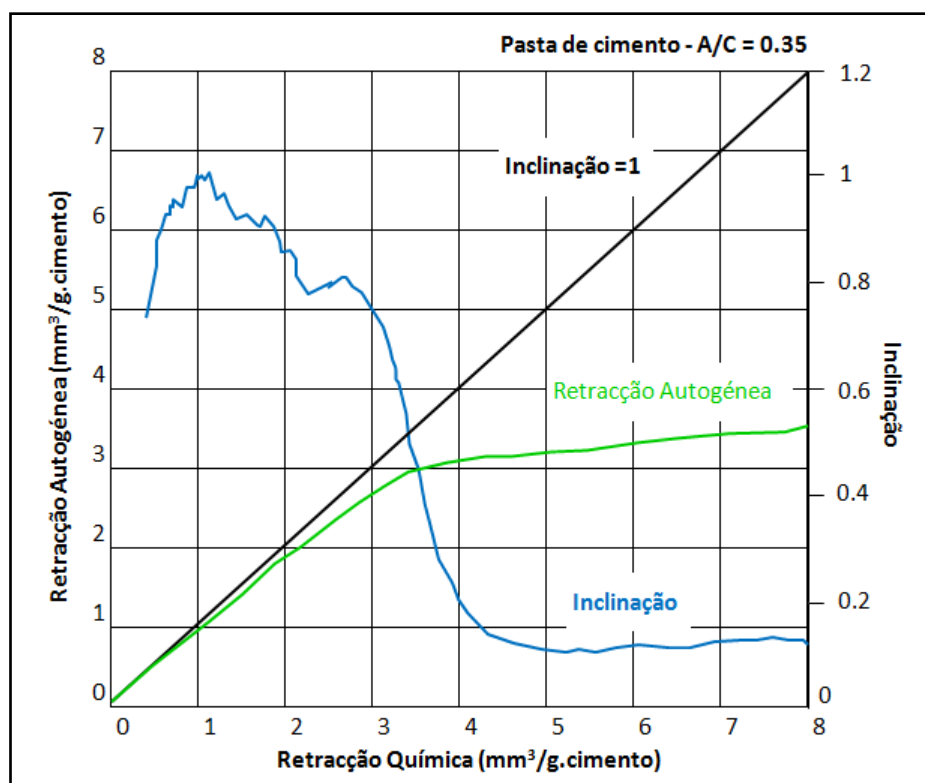


Figura 27 - Transição suspensão-sólido (Adaptado de [140])

Habitualmente, são usados dois termos para descrever o comportamento de transição dos betões nas primeiras idades, a presa e o endurecimento. Conforme presente na Figura 28, a presa está relacionada com o ganho de rigidez, enquanto o endurecimento está relacionado com a possível medição da resistência.

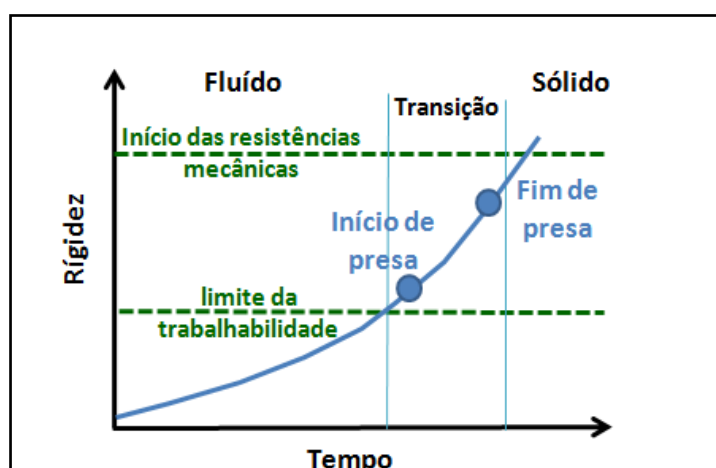


Figura 28 - Presa e endurecimento (Adaptado de [141])

Embora estes conceitos sejam úteis, não precisam a idade em que se geram tensões nos elementos. Esta determinação é essencial para a continuidade da investigação.

Aitcin [142] demonstra (ver Figura 29) que, nas situações em que o início da medição da retracção não coincide com o tempo zero, a medição efectuada pode subestimar a dimensão correcta da retracção existente.

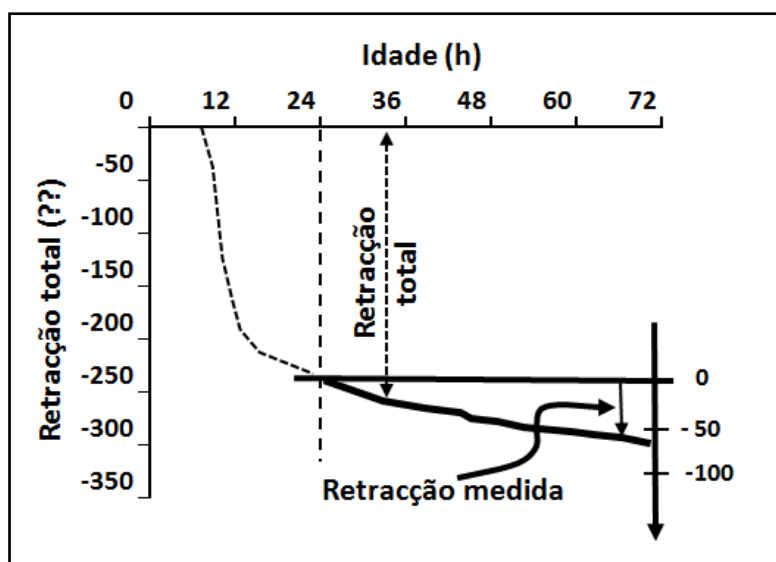


Figura 29 - Erro associado ao início da medição (Adaptado de [142])

Verifica-se uma falta de uniformização nesta matéria, o que dificulta a comparação directa do comportamento de diferentes materiais, teorias e modelos.

Deve-se ter em atenção que o tempo zero é afectado pela temperatura do betão. Sistemas com temperaturas mais elevadas originam reacções químicas mais rápidas, que conduzem a menores tempos zero.

Por essa razão, Weiss [141] defende que uma função baseada na maturidade é mais apropriada para descrever o comportamento das misturas.

Os ensaios mais comuns usados para determinar o momento em que os betões iniciam o desenvolvimento das propriedades mecânicas são os ensaios de penetração, que normalmente reportam o início e o fim de presa. Do mesmo modo, mas para pastas, usa-se o ensaio de penetração com a agulha de Vicat (NP EN 196-3) [143]. Devido à relativa arbitrariedade destes métodos, o JCI (Japan Concrete Institute) [144] assume que os mesmos não correspondem exactamente ao tempo zero.

Uma outra aproximação ao processo de endurecimento em betões consiste na observação da taxa de libertação de calor devido às reacções de hidratação. A Figura 22 apresenta um diagrama de evolução típico. De modo semelhante ao dos ensaios de penetração, o diagrama de libertação de calor não possibilita a determinação

precisa do tempo zero, no entanto contém informação importante para a análise da dinâmica de hidratação.

Outros autores utilizaram medições eléctricas de condutibilidade nas primeiras idades mas, devido à rápida mudança da estrutura porosa e temperaturas, as variações de condutividade eléctrica registadas revelam correlações com as reacções químicas e não directamente com as alterações das propriedades mecânica [141].

Vários autores estudaram a determinação do tempo zero a partir do desenvolvimento das propriedades mecânicas. Por exemplo, Olken and Rostasy [145] apresentam a evolução de várias propriedades mecânicas em função do grau de hidratação.

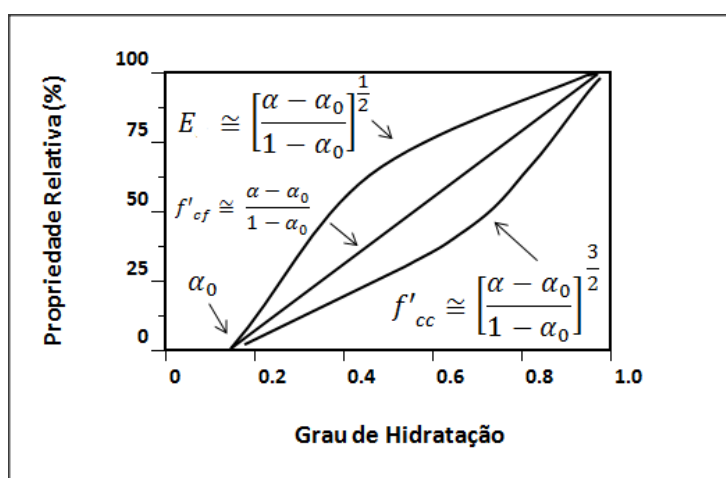


Figura 30 - Evolução de várias propriedades mecânicas em função do grau de hidratação (Adaptado de [145])

Conforme se pode observar na Figura 30, embora as evoluções da resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade difiram, tudo indica que têm origem num grau de hidratação crítico (alfa 0).

A determinação precisa do tempo zero é crítica para os desenvolvimentos futuros, uma vez que essa precisão é decisiva para as medições correctas nos trabalhos experimentais e respectivas aplicações em modelos.

Boivin [146] refere que o tempo zero ocorre mais cedo para betões com relações água/finos baixas e com cimentos de maior finura, devido ao facto de existir uma maior uniformidade e antecipação nos contactos sólido-sólido.

3.5 BETÃO DE RETRACÇÃO COMPENSADA

Com o propósito de minimizar a fissuração do betão devido à retracção por secagem e consequentemente a corrosão das armaduras e a capacidade resistente do betão, o betão de retracção controlada (BRC) tem sido utilizado desde há algumas décadas. Especialmente nos Estados Unidos da América em execução de lajes de pavimentos ou outras estruturas, e em trabalhos de reparação, com o propósito de contrariar a natural redução de volume (retracção de secagem), por exemplo através de reacções que originam expansão.

O ACI 223 [147] define betão de retracção compensada como um betão que, adequadamente restringido pelas armaduras ou por outros meios, expande numa quantidade igual, ou ligeiramente superior à retracção de secagem prevista. A retracção de secagem irá reduzir a deformação de expansão mas, idealmente, deverá permanecer no betão uma expansão residual, eliminando desse modo a fissuração por retracção.

De modo resumido pode dizer-se que existem duas formas de produzir o BRC. A primeira consiste na utilização de cimentos expansivos. São exemplos os cimentos tipo K, M e S referidos no ACI 223. Estes três tipos de cimentos diferem essencialmente na percentagem e tipos de aluminatos que contêm. A segunda consiste na adição de componentes expansivos ou que reduzem a retracção (adições ou adjuvantes). Este processo proporciona um melhor ajuste em função dos requisitos de cada obra.

A maior fonte potencial de expansão consiste na formação de etringite. Essa utilização foi, durante décadas, desenvolvida e investigada [148-150]. No entanto, são frequentemente referidas dificuldades no controlo da hidratação. A expansão depende fortemente da reactividade do componente e da sua distribuição espacial [151].

Além do mecanismo de desenvolvimento de etringite (“Etringite System”), também existe a possibilidade de se alcançar a compensação na retracção através do desenvolvimento de cristais de hidróxidos de cálcio (“Lime Based System”).

No mecanismo de desenvolvimento da etringite, verifica-se que a reacção da água com as fases aluminato do clínquer e com o gesso origina a formação do mineral chamado etringite, o qual apresenta uma densidade de cerca de 1.7 e é composto principalmente por água. Existe, no entanto, por parte de alguns investigadores, alguma preocupação na utilização deste mecanismo de expansão pois pode estar

também associado à formação tardia de etringite, que é assumido como uma das causas principais de deterioração prematura do betão [152].

O processo de obtenção de expansão pela formação de hidróxido de cálcio em detrimento da etringite exclui a possibilidade de ocorrência de formação tardia de etringite [152].

Grande parte dos cimentos utilizados com funções expansivas é constituída pelos mesmos constituintes dos cimentos Portland normais, acrescidos de fontes de aluminatos e sulfato de cálcio. Por exemplo, na Tabela 10 são apresentados os três tipos de cimentos expansivos previstos em [147], diferenciados pelo composto de aluminato que origina a formação de etringite.

Tabela 10 - Tipos de cimentos expansivos e seus constituintes

Cimento expansivo	Constituintes principais	Aluminatos reactivos disponíveis para a formação de etringite
K	- Cimento Portland - Sulfato de cálcio - Cimento Portland contendo C_4A_3S	C_4A_3S
M	- Cimento Portland - Sulfato de cálcio - Cimento de cálcio-aluminatos (CA e $C_{12}A_7$)	CA e $C_{12}A_7$
S	- Cimento Portland contendo C_3A - Sulfato de cálcio	C_3A

O tipo de aluminato usado influencia a quantidade de etringite formada nas primeiras idades. O potencial de expansão é dominado pelo tipo e quantidade de aluminatos e sulfato de cálcio e respectivas taxas de formação de etringite [147].

Os dois factores essenciais que controlam a expansão são a existência adequada de sulfatos solúveis e a disponibilidade de água para a hidratação. O processo de formação de etringite inicia-se quase imediatamente após a introdução da água. Para originar expansão efectiva, a maior parte de formação de etringite deve ocorrer após o desenvolvimento de um certo grau de resistência, caso contrário as forças de expansões são dissipadas na deformação do betão ainda no estado plástico.

Após a expansão inicial, os BRC formados à base do uso de expansivos apresentam variações de volume idênticas aos betões convencionais. A Figura 31 ilustra a variação de comprimento dum BRC e dum betão convencional obtidos em ensaios de retracção restringida de acordo com a norma ASTM C 878 [153].

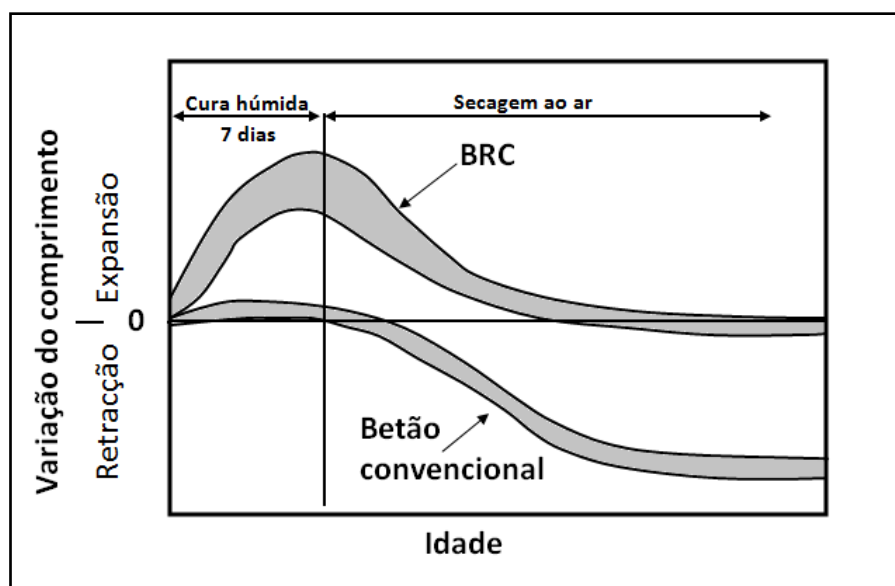


Figura 31 - Variação de comprimento típica de um BRC e um betão convencional (Adaptado de [147])

Para ensaios executados de acordo com [153], o valor mínimo de expansão recomendado para um BRC é de 0.03 por cento. A expansão dum betão convencional de cimento Portland raramente excede 0.01 por cento. [147]

O funcionamento dum BRC está também relacionado com a presença de armaduras internas que produzem um certo tipo de restrição. Outros tipos de restrição podem existir, nomeadamente a presença de elementos estruturais adjacentes, restrição na base no caso de reparações, etc.

Para [147], a quantidade mínima de armaduras internas exigidas, tendo em conta a variação térmica, excede o mínimo recomendado para o correcto funcionamento dos BRC.

À semelhança dos betões tradicionais, um BRC também necessita de uma cura contínua e adequada, para prevenir a perda prematura da água de amassadura e proporcionar um correcto desenvolvimento da hidratação. No entanto, a presença de água num BRC é crítica para a ocorrência de expansão. Qualquer deficiência do método de cura pode reduzir a expansão inicial e comprometer a compensação da retracção de secagem a longo prazo. O efeito típico da realização da cura por diferentes métodos na expansão é ilustrado na Figura 32 [147].

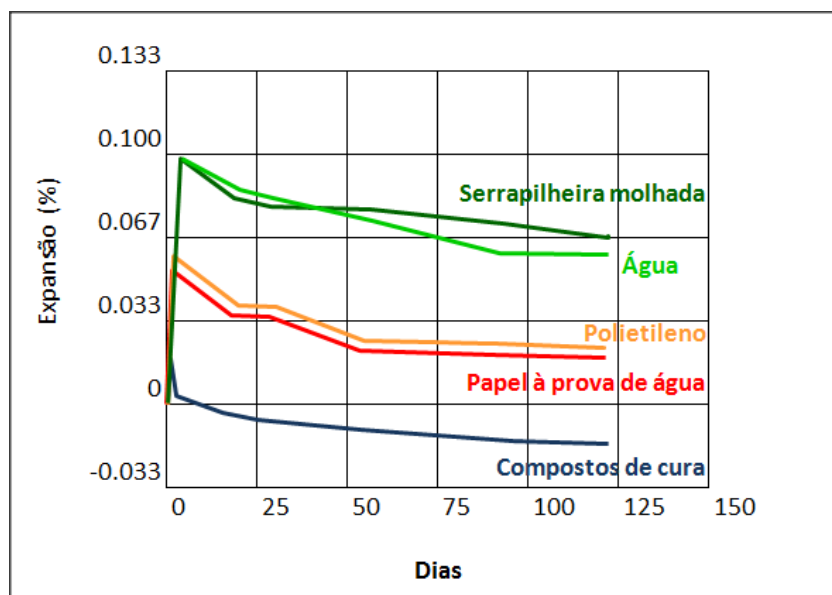


Figura 32 - Efeito típico da realização da cura por diferentes métodos na expansão (Adaptado de [147])

3.6 ADJUVANTES REDUTORES DE RETRACÇÃO

3.6.1 Introdução

Uma das possíveis soluções para minimizar a retracção e conseqüentemente o risco de fissuração consiste na incorporação de um adjuvante redutor de retracção (ARR). Os ARR pertencem a um grupo especial de químicos orgânicos surfactantes que, quando misturados na água, reduzem a tensão superficial do líquido. Aceita-se de forma consensual que a redução da tensão superficial do líquido intersticial existente nos poros do betão reduz substancialmente as tensões capilares e portanto a retracção quando o betão perde humidade, através da secagem ou autodessecação. A investigação sobre os ARR teve início no Japão na década de 80, com o desenvolvimento da primeira geração de ARR [154]. Actualmente, estão disponíveis no mercado vários ARR e, embora não tenham a mesma composição química, são de natureza semelhante. Durante os últimos anos foram realizados muitos estudos sobre o desempenho dos ARR na redução da retracção. Em [155] é apresentado um resumo sobre a bibliografia disponível.

3.6.2 Mecanismo de acção

Devido à diminuição da humidade relativa no interior do betão, resultante da secagem ou da autodessecação, verifica-se após a colocação do betão, a formação de uma

interface ar/água (menisco) dentro dos poros capilares da pasta de cimento do betão. Este fenómeno ocorre num prazo relativamente curto, dependendo principalmente da relação água/cimento. Porque a água tem uma tensão superficial elevada, origina forças capilares sobre as paredes internas dos vasos e poros capilares onde se formou o menisco. Essas forças capilares induzem compressão no esqueleto sólido e levam à diminuição de volume.

Na Figura 33 [156] apresenta-se o efeito de um ARR na tensão superficial da água. Para baixas concentrações de ARR, é visível uma redução drástica na tensão superficial.

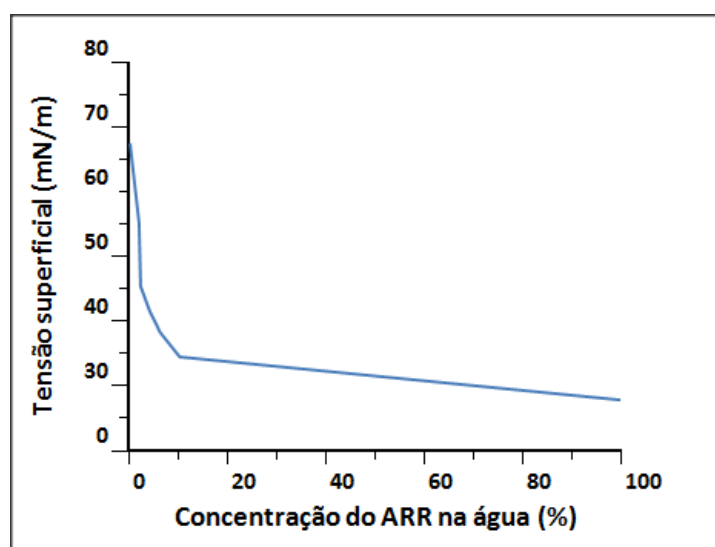


Figura 33 - Efeito de um ARR na tensão superficial da água (Adaptado de [156])

Através da já referida equação de Laplace, (Equação 3.17) pode quantificar-se o diferencial de pressão originado pela redução da tensão superficial da água existente em poros capilares.

$$p'' - p' = \frac{2\sigma\cos\theta}{r}$$

Eq. 3.17

Onde:

- p'' - pressão no vapor
- p' - pressão no líquido
- σ - tensão superficial da água
- r - raio da curvatura do menisco
- θ - ângulo de molhagem

3.6.3 Efeito na retracção

Foi demonstrado por vários investigadores que a diminuição da tensão superficial do líquido intersticial existente nos poros do betão pode reduzir a retracção de secagem, em alguns casos acima de 50% [157-162]. Do mesmo modo, está devidamente documentado que a utilização dos ARR em betões de baixa razão A/C reduz as tensões capilares e portanto a retracção autogénea. [163-166]

Na Figura 34, apresenta-se o efeito típico da utilização dos ARR em argamassas [167]. Observa-se também que a partir de uma dosagem limite, 1,5% neste caso, não se obtêm ganhos de eficiência.

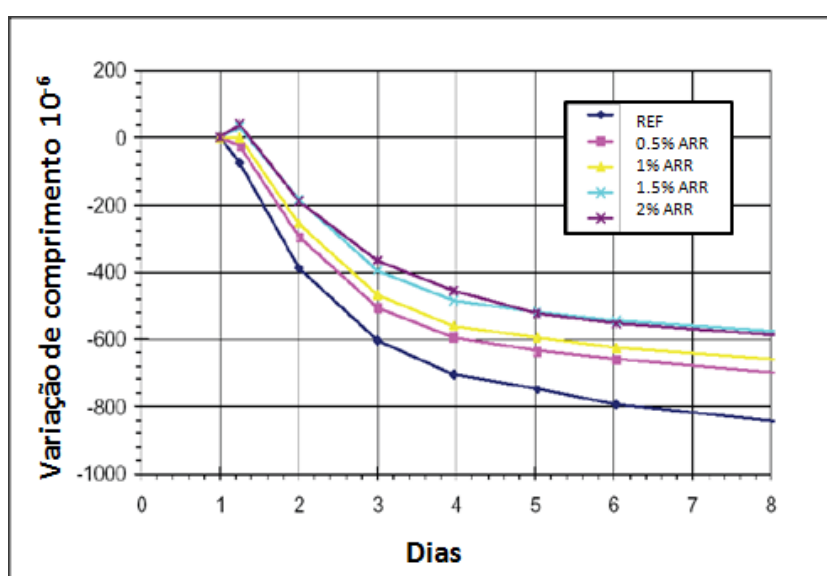


Figura 34 - Efeito típico da utilização dos ARR em argamassas (Adaptado de [167])

A utilização dos ARR tem também proporcionado uma melhor resistência à fissuração por contracção plástica [168,169].

3.6.4 Efeito noutras propriedades

Contrastando com os benefícios anteriormente referidos, os ARR apresentam efeitos secundários, normalmente considerados negativos. Nomeadamente, em [170-175] foram observadas reduções no grau de hidratação do cimento e no desenvolvimento da resistência do betão. Nas primeiras idades, foram registadas reduções significativas nas resistências mecânicas [158,159,164,176].

Em comparação com provetes de referência, os autores [159,160,162,164,177] observaram atrasos significativos nos tempos de presa.

Weiss et al. [155], concluíram que as misturas contendo ARR apresentam menores ou iguais coeficientes de penetração aos cloretos.

3.6.5 Utilização simultânea de dois ARR

Ribeiro et al. [1] testaram o efeito resultante da utilização conjunta de dois ARR, baseados em moléculas distintas (Poliglicol e Alquil-éteres), em argamassas. Em relação à perda de massa por secagem foram registadas perdas de massa superiores com as composições que continham ARR, quer individualmente, quer quando utilizados simultaneamente. Esse facto foi atribuído à existência de maiores taxas de evaporação devidas à redução da tensão superficial.

Analisando a perda de massa devido à utilização individual de cada ARR, verificaram-se distintos comportamentos, principalmente nas primeiras idades.

No que respeita à influência da utilização dos ARR nas resistências mecânicas, observaram-se diminuições na resistência à compressão e à tracção. A diminuição é maior nas primeiras idades, comprovando o retardamento da hidratação já verificado por outros autores. A longo prazo, a resistência à tracção é menos afectada do que a resistência à compressão. Comparando o efeito dos dois produtos, verifica-se um maior efeito de retardamento da hidratação no produto que tem o componente principal constituído por Alquil-éteres. As maiores reduções verificadas na resistência correspondem à utilização simultânea dos dois produtos.

A influência na retracção autógena é retratada na Figura 35. Os resultados indicam que ambos ARR reduzem em mais de 30% a retracção autógena a longo prazo. A utilização conjunta revela benefícios na redução da retracção autógena.

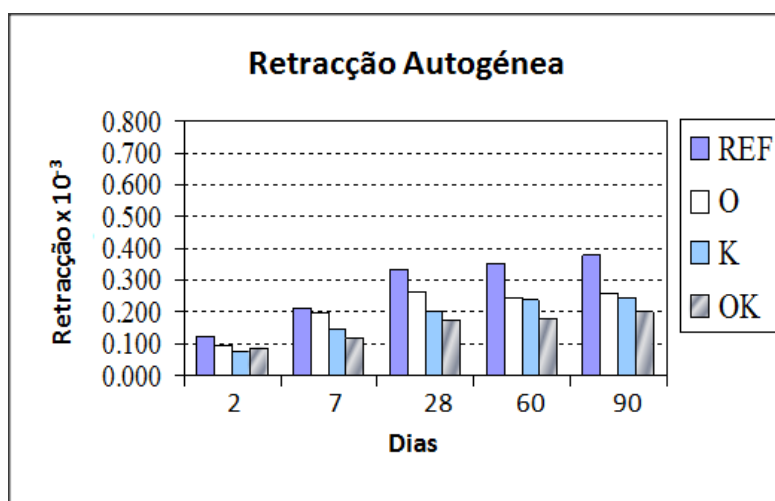


Figura 35 - Influência dos ARR na retracção autógena (Adaptado de [1])

No que respeita à influência na retracção total, Figura 36, os resultados indicam que ambos ARR reduzem significativamente a retracção total. No entanto os produtos originaram comportamentos distintos. O ARR que tem o componente principal constituído por Alquil-éteres origina uma menor redução na retracção por secagem. A combinação dos dois produtos incrementa o nível de redução da retracção por secagem. Ao fim de 90 dias, a redução é superior a 45%.

Em suma, através da utilização simultânea dos ARR, foi evidenciado um efeito cumulativo na redução da retracção, permitindo uma maior redução da retracção quando comparada com o uso individual de cada ARR.

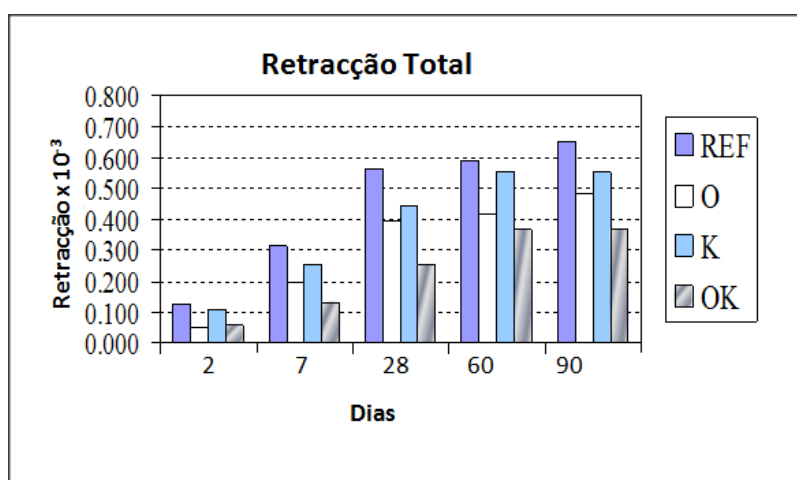


Figura 36 - Influência dos ARR na retracção total (Adaptado de [1])

3.6.6 Combinação com o efeito de adições expansivas

Com o objectivo de ultrapassar as limitações decorrentes do uso individual de produtos capazes de minimizar a retracção, nos últimos 6 anos alguns investigadores têm vindo a testar o efeito combinado do uso de ARR e adições expansivas (AE). Em toda a bibliografia revista está evidenciado um efeito sinérgico resultante do uso combinado do ARR e da AE [179-184].

Maioritariamente, o mecanismo de expansão utilizado baseia-se no desenvolvimento de cristais de hidróxidos de cálcio ("Lime Based System"). Neste caso a reacção consiste na transformação do óxido de cálcio em hidróxido de cálcio ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$).

Num betão de retracção compensada, a expansão deve ocorrer num determinado período, ou seja, quando o betão já desenvolveu um esqueleto sólido capaz de transmitir tensões de tracção que contrariem a compressão no betão. Qualquer

expansão verificada muito cedo, no estado plástico, não produz efeito. Por outro lado, se o mecanismo de expansão se desenvolver muito tarde, obriga à execução de um período de cura com água até idades muito avançadas.

Sob este ponto de vista, as reacções de formação de etringite ou de hidróxido de cálcio resultam diferentes. Na Figura 37, é apresentada a expansão de dois betões distintos (1100 $\mu\text{m}/\text{m}$ ao fim de uma semana) obtida com base nos mecanismos de formação de etringite e de hidróxido de cálcio, respectivamente [178].

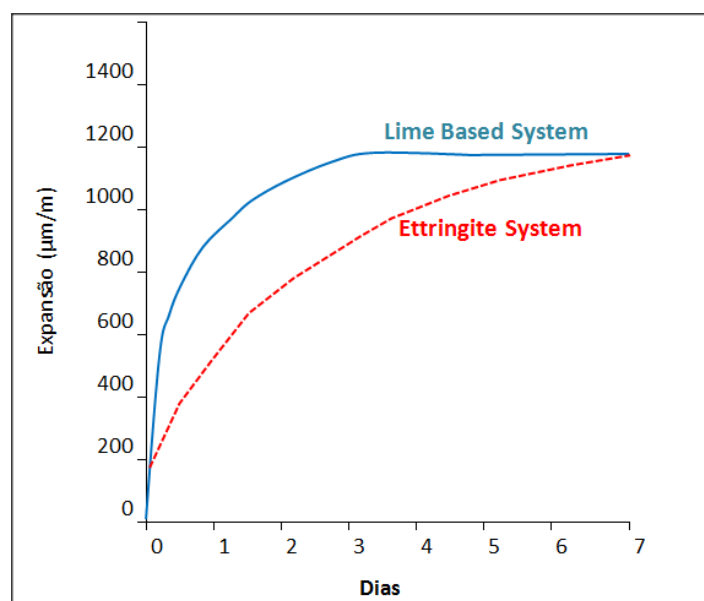


Figura 37 - Expansão de dois betões distintos obtida com base nos mecanismos de formação de etringite e de hidróxido de cálcio (Adaptado de [178])

O processo de formação de hidróxido de cálcio ocorre maioritariamente entre o primeiro e o segundo dia, enquanto que para a formação de etringite são necessários entre 5 a 7 dias para se verificar o desenvolvimento de toda a expansão potencial. [179]

Maltese et al. (2005) [180], com o objectivo de melhorar a estabilidade dimensional de argamassas cimentícias, testou o uso combinado de um ARR e uma adição expansiva baseada no efeito expansivo do óxido de cálcio. Obteve argamassas com comportamento melhorado e menos sensíveis à secagem.

Ainda em 2005, Collepardi et al. [179], testaram o efeito combinado do uso de um ARR com uma adição de efeito expansivo à base de hidróxido de cálcio. Constataram um efeito sinérgico relativo ao uso simultâneo do ARR e da AE. Verificaram um comportamento mais efectivo na expansão verificada na ausência de cura com água. Referem ainda que não observaram nenhum efeito sinérgico quando usaram uma adição de mecanismo expansivo resultante da formação de etringite.

Em 2008, Meddah et al. [181] analisaram o efeito sinérgico do uso simultâneo do ARR e da AE na retracção autógena de betões de alta performance. Obtiveram uma ligeira redução nas resistências à compressão e à tracção e uma redução significativa na retracção autógena. Relatam ainda que, com dosagens apropriadas de ARR e AE, foi possível mitigar a retracção autógena nos betões com relações água/pó de 0.23. Concluem, referindo que o sistema combinado (ARR+AE) pode, efectivamente, melhorar a durabilidade deste tipo de betões através da redução da retracção nas idades iniciais.

Em 2009, Pistolesi et al. [182], estudaram o efeito sinérgico anteriormente indicado em betões autocompactáveis de baixa retracção. As composições foram produzidas através do uso de um pó pré-misturado especialmente desenvolvido para a produção de betões autocompactáveis contendo, além do cimento e de outros ligantes com efeito pozolânico, filler, superplastificante e agente de viscosidade. O efeito combinado (ARR+AE) foi investigado no sentido de obter betões autocompactáveis com elevada estabilidade dimensional, mesmo em condições de ausência de humidade, que ocorrem em muitos trabalhos de reparação. O estudo incluiu aplicações in situ (Figura 38).



Figura 38 - Reparação estrutural com betão autocompactável de elevada estabilidade dimensional

Com base nos resultados obtidos, transcrevem-se as principais conclusões:

- i) A utilização da adição expansiva (baseada na formação de hidróxido de cálcio) produz resultados excelentes em ambientes com humidade relativa elevada. Num ambiente seco (50% de humidade relativa) não se verificam níveis de expansão suficientes.
- ii) O uso de betões autocompactáveis incorporando o sistema combinado (ARR+AE) em reparações de grandes estruturas proporcionou excelentes resultados não tendo sido evidenciada nenhuma fissura.

Já em 2011, Meddah et al [183], estudaram a influência do uso combinado de AE e ARR na deformação autogénea de betões de alta performance contendo sílica. Observaram que mais de 90% da retracção autogénea ocorreu nas primeiras 24 horas. Obtiveram, através do sistema combinado, misturas com uma estabilidade dimensional bastante elevada. Por outro lado, registaram um ligeiro decréscimo na tensão de rotura e no módulo de elasticidade.

3.7 EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios de retracção e fissuração nas primeiras idades têm vindo a ganhar relevância devido aos seguintes desenvolvimentos:

- Necessidade de assegurar tempos de vida útil elevados, onde a fissuração desempenha um papel decisivo nos betões de alta qualidade.
- Maior tendência de fissuração nos betões de elevada resistência / desempenho, devido às elevadas dosagens de cimento e baixas relações água/finos, onde a retracção autogénea é significativa.

A maior parte dos ensaios pormenorizados na bibliografia específica, nomeadamente os ensaios de retracção restringida têm vindo a ser utilizados no sentido de se obterem respostas qualitativas. No entanto, e embora os mesmos sejam úteis na comparação de diferentes misturas, os mesmos não são suficientes para o estudo dos mecanismos envolvidos.

Bentur [184] considera o conhecimento dos mecanismos um passo essencial para o desenvolvimento de novas estratégias e produtos para o controlo da fissuração.

Não constituindo parte do objectivo deste trabalho a execução de um levantamento exaustivo dos métodos de ensaio existentes, apenas será feita uma breve referência aos considerados mais relevantes.

3.7.1 Determinação da retracção autogénea nas primeiras idades

Actualmente, a retracção autogénea é um assunto objecto de investigação crescente, com actividades a serem desenvolvidas em vários países inclusive com conferências dedicadas quase exclusivamente a este assunto.

No entanto, a retracção autogénea é difícil medir com exactidão nas primeiras idades, sendo reportado em várias publicações que podem existir grandes variações em

função da metodologia utilizada, quer nas magnitudes quer, inclusive, com variações de retracções para expansões e vice-versa.

Hammer [185] indica como principais fontes de erro o atrito existente entre o betão e os moldes, a exsudação, a variação de temperatura e o comportamento do material utilizado na selagem.

As medições da retracção autogénea podem ser afectadas pela presença da água exsudada presente nas superfícies do betão. Após a presa, esta água vai ser reabsorvida pelo betão durante o processo de autodessecação, originando uma redução na retracção autogénea ou até mesmo expansão. Além disso, outras fontes de água, como a água presente nos agregados e a água exsudada internamente, podem influenciar de maneira significativa, uma vez que apenas uma quantidade pequena de água é suficiente para alterar o estado de equilíbrio dos poros e afectar a retracção autogénea [185].

Segundo Bjontegaard [186] a retracção autogénea é a propriedade do betão que mais depende da variação de temperatura.

As reacções de hidratação podem elevar consideravelmente a temperatura do betão nas primeiras idades, dependendo da composição, dimensões do provete e espessura e isolamento das paredes dos moldes.

Nesse sentido, alguns investigadores desenvolveram métodos para manter a temperatura constante através da circulação de fluidos em moldes apropriados [186,187], ou através da imersão de todo o sistema num fluido com temperatura constante [188].

Com a intenção de minimizar as fontes de erro referidas anteriormente, Hammer [185] recomenda o uso do equipamento presente na Figura 39.

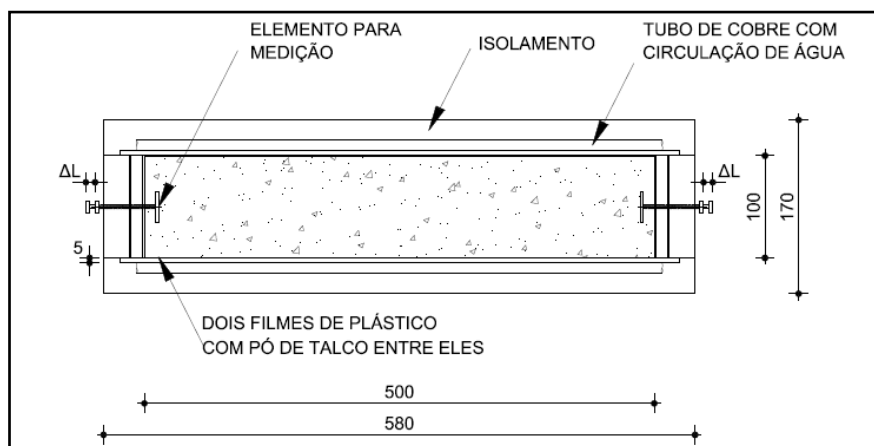


Figura 39 - Equipamento para medição da retracção autogénea em betões (Adaptado de [185])

3.7.2 Principais ensaios de retracção restringida

Os ensaios de retracção restrita podem ser classificados em 3 categorias:

- Ensaios em anéis.
- Ensaios em painéis.
- Ensaios longitudinais.

3.7.2.1 Ensaios em anéis

São os mais comuns e têm sido usados ao longo de muitos anos. São utilizados para avaliar tanto a retracção plástica como a retracção e fissuração no estado endurecido. O seu princípio é bastante simples: o betão é colocado em volta duma zona central (geralmente metálica). Devido à restrição da retracção, serão geradas tensões no betão (Figura 40).

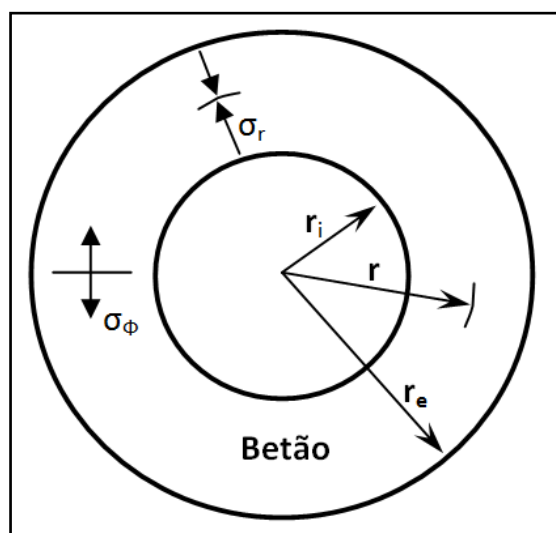


Figura 40 - Descrição esquemática de um ensaio de retracção restringida num anel

A avaliação é feita através da variação do diâmetro, ou da observação do número de fissuras, da sua largura média e máxima e do respectivo instante em que ocorrem.

3.7.1.1 Ensaios em painéis

Estes ensaios foram desenvolvidos em vários laboratórios com a intenção de avaliar o desempenho de fibras para reduzir a fissuração por retracção plástica.

O mais usual é representado esquematicamente na Figura 41 [189]. O betão é colocado num molde quadrado de dimensões normalmente menores que 1 m², com bandas na periferia. A superfície do betão é exposta a uma ventilação normalmente com ar quente, simulando as condições de secagem.

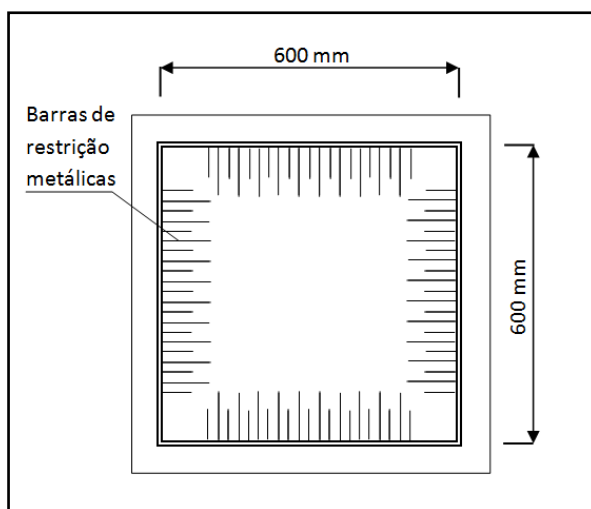


Figura 41 - Descrição esquemática de um ensaio de retração restringida num painel

O desempenho do betão é quantificado após a observação das fissuras em termos de número total, comprimentos e larguras.

3.7.1.2 Ensaio longitudinal

Os ensaios longitudinais podem ser divididos em três categorias:

- i. Longitudinais qualitativos
- ii. Longitudinais passivos
- iii. Longitudinais activos

3.7.1.2.1 *Longitudinais qualitativos*

Neste tipo de ensaios apenas é possível verificar a existência de fissuração.

A Figura 42 apresenta uma breve descrição dum ensaio deste tipo idealizado segundo Berke e Dallaire [190].

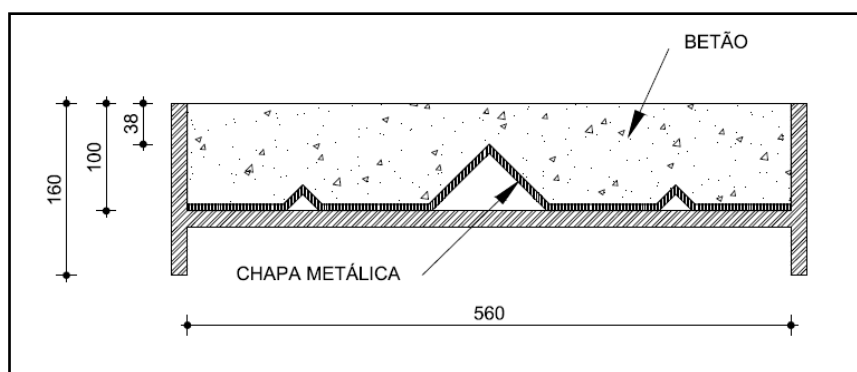


Figura 42 - Descrição esquemática de um ensaio longitudinal qualitativo (Adaptado de [190])

3.7.1.2.2 Longitudinais passivos

Neste tipo de ensaios é possível, através de instrumentação própria, medir forças. A Figura 43 ilustra o ensaio recomendado pela RILEM [191].

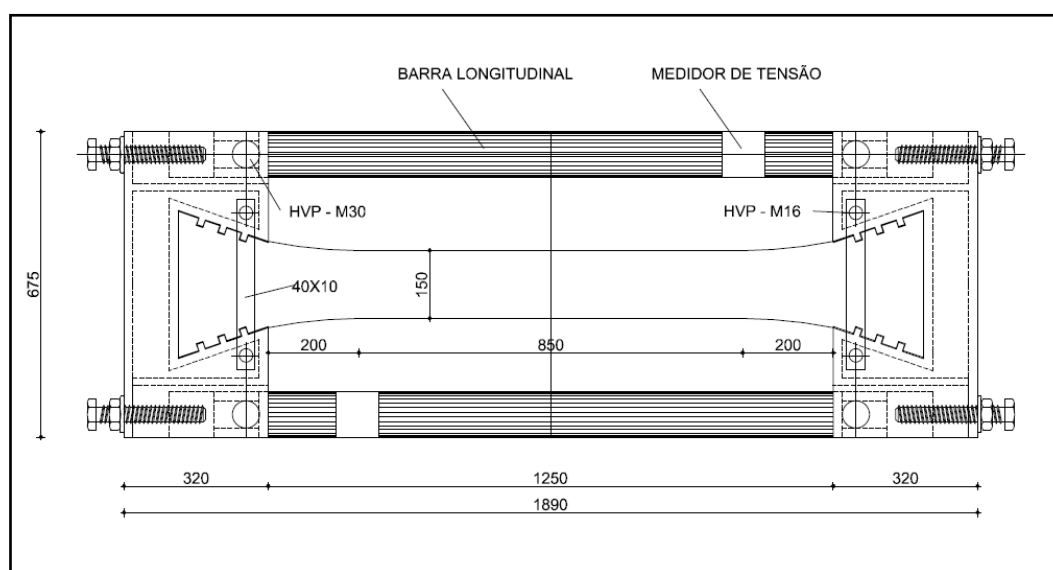


Figura 43 - Descrição esquemática de um ensaio longitudinal passivo (Adaptado de [191])

Neste, caso a deformação não é completamente eliminada e as tensões geradas são medidas pelos transdutores instalados nas barras de aço.

O instituto Japonês do Betão [192] recomenda a utilização dum molde com uma barra de restrição interna, Figura 44, para avaliação da tendência de fissuração por retracção autogénea e efeitos térmicos.

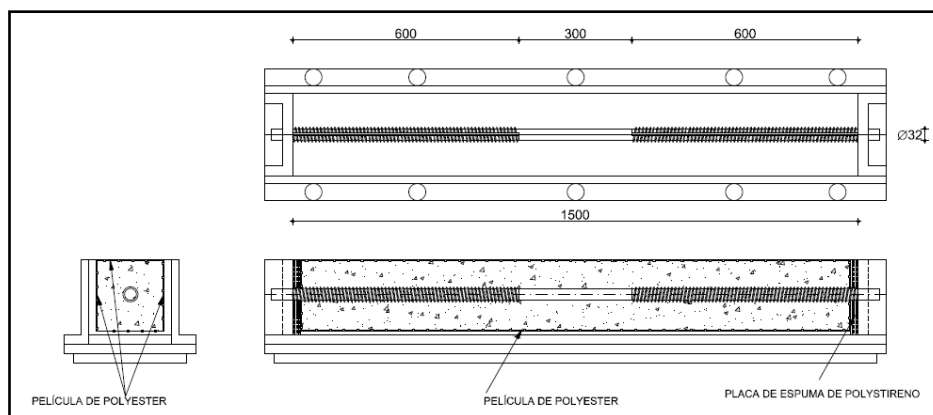


Figura 44 - Descrição esquemática de um ensaio longitudinal passivo, recomendado pelo JCI (Adaptado de [192])

3.7.1.2.3 Longitudinais activos

As tensões geradas nos ensaios longitudinais passivos são também função do elemento de restrição. Assim, os ensaios longitudinais activos foram desenvolvidos com o objectivo de proporcionar uma restrição total.

Neste caso, uma fixação é estática e a outra é móvel. Periodicamente, a fixação móvel é recolocada na posição inicial, sendo então medida a carga aplicada.

Estes ensaios longitudinais activos podem ser divididos em dois, dependendo da posição do provete: vertical ou horizontal. Os horizontais permitem medições imediatamente a seguir à betonagem.

Na Figura 45, apresenta-se o equipamento vertical, desenvolvido por Bentur [193].

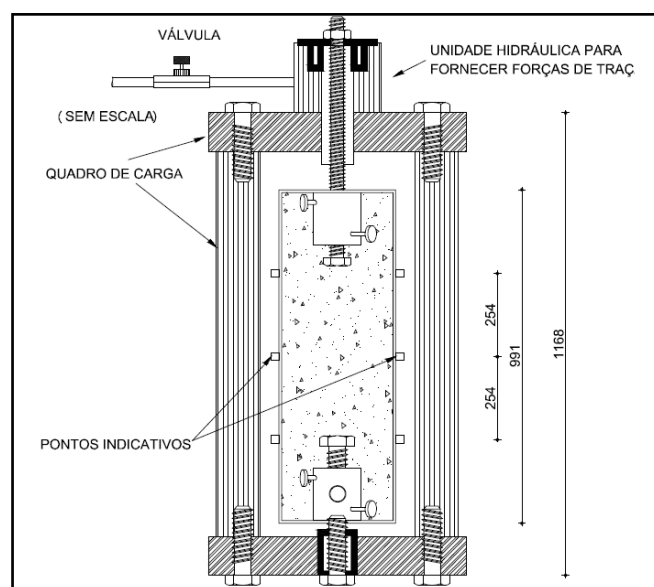


Figura 45 - Descrição esquemática de um ensaio longitudinal activo (Adaptado de [193])

4 TRABALHO EXPERIMENTAL

No presente capítulo são apresentados os materiais e os métodos de ensaio utilizados neste estudo. São também descritas as composições estudadas para os diferentes sistemas cimentícios, bem como os ensaios efectuados. Finaliza-se este capítulo com uma síntese dos elementos apresentados, pretendendo-se facilitar, por meio de organigramas, a compreensão do conjunto do trabalho experimental efectuado.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A avaliação das características dos materiais teve em conta as propriedades consideradas mais relevantes para o comportamento dos sistemas cimentícios face ao objectivo do estudo e, naturalmente, também as exigências especificadas nos documentos normativos respectivos de cada material.

Os critérios que conduziram à escolha dos materiais foram, numa primeira fase, a sua disponibilidade no mercado nacional, sendo ainda que, para os agregados, procurou-se utilizar materiais disponíveis no Algarve. Numa segunda fase, a utilização dos materiais ficou condicionada pela optimização de três composições base de betão autocompactável, com comportamento adequado no estado fresco e com níveis de resistência distintos.

Assim, foram utilizados 3 tipos de cimento. A sua escolha prendeu-se com os critérios de resistência à compressão estabelecidos. Uma vez que a utilização de adições é fundamental na produção de BAC, foram utilizadas cinzas volantes. Por motivos de disponibilidade foram utilizadas 2 cinzas distintas.

Em termos de adjuvantes, foram utilizados 3 superplastificantes, com a finalidade de obter o desempenho pretendido para os BACs no estado fresco. Especificamente para o controle da retracção, foram utilizados dois adjuvantes redutores de retracção e uma adição expansiva. Com o mesmo objectivo foi ainda utilizado um agregado leve.

4.1.1 Cimentos

As características dos 3 tipos de cimento utilizados são apresentadas nas tabelas seguintes. A Tabela 11 apresenta as características químicas, enquanto a Tabela 12 apresenta as características físicas. Os valores presentes correspondem a valores médios indicados pelo fabricante.

Tabela 11 - Características químicas dos cimentos utilizados

Ensaio	Documento Normativo	Un.	CEM I 52,5R	CEM II/A-L 42,5R	CEM II/B-L 32,5N
Perda ao fogo	NP EN 196-2 [194]	%	1,37	7,59	11,17
Resíduo insolúvel		%	1,00	1,57	1,60
Óxido de silício		%	19,55	17,74	16,05
Óxido de alumínio		%	5,64	4,93	4,46
Óxido de ferro		%	3,36	2,80	2,53
Óxido de cálcio total		%	63,7	61,08	60,29
Óxido de magnésio		%	1,84	1,14	1,10
Teor de Sulfatos		%	3,05	3,22	3,02
Teor de cloretos		%	0,02	0,02	0,02
Cal livre	ASTM C 114 [195]	%	1,00	1,00	1,00

Tabela 12 - Características físicas dos cimentos utilizados

Ensaio	Documento Normativo	Un.	CEM I 52,5R	CEM II/A-L 42,5R	CEM II/B-L 32,5N
Massa volúmica	E(LNEC)-64 [196]	g/cm ³	3,10	3,05	3,02
Superfície específica Blaine	NP EN 196-6 [197]	cm ² /g	4204	4520	4280
Água de Pasta	NP EN 196-3 [198]	%	31,3	28,6	26,1
Início de presa		min	135	125	120
Fim de presa		min	185	185	175
Expansibilidade		mm	0,5	1,0	1,2
Resistência à compressão aos 2 dias	NP EN 196-1 [199]	MPa	39,6	29,0	19,0
Resistência à compressão aos 7 dias		MPa	51,9	44,2	30,9
Resistência à compressão aos 28 dias		MPa	61,0	53,7	38,8

4.1.2 Adições

Foram utilizadas três adições, duas cinzas volantes (CV) e uma adição expansiva (AE), com o objectivo de contrariar a retracção.

As cinzas volantes foram provenientes da central termoeléctrica de Sines, adiante designadas por CVs, e da central termoeléctrica de Compostilha (Espanha), adiante designadas por CVc.

Os ensaios de caracterização das cinzas volantes foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Algarve. A Tabela 13 apresenta os respectivos resultados.

Tabela 13 - Características físicas das cinzas volantes utilizadas

Ensaio	Documento Normativo	Unidade	CVs	CVc
Massa volúmica	E(LNEC)-64 [196]	g/cm ³	2.50	2.24
Superfície específica Blaine	NP EN 196-6 [197]	cm ² /g	2910	4015
Índice de Actividade aos 28 dias	NP EN 450-1 [200]	---	0.77	0.80
Índice de Actividade aos 90 dias	NP EN 450-1 [200]	---	0.94	0.97

Na Tabela 14 constam as características da adição expansiva. Os valores apresentados foram indicados pelo fabricante.

Tabela 14 - Características da adição expansiva

Característica	AE
Componente principal	Cimento modificado (1)
Estado	Pó
Côr	cinzento
Massa volúmica	3,09 g/cm ³
ph	≥ 12
Dosagem recomendada	20 a 25 kg/m ³

Quando comparado com outros agentes expansivos que dão origem à formação de etringite, a adição expansiva utilizada neste trabalho apenas necessita de um reduzido tempo de cura necessário para garantir a expansão. Essa característica foi considerada importante, dado prever-se a sua utilização na classe de BAC de elevada resistência.

4.1.3 Adjuvantes

Foram utilizados 3 adjuvantes superplastificantes, respectivamente, em cada uma das composições base em betão autocompactável. Na Tabela 15 são apresentadas as principais características dos adjuvantes superplastificantes, de acordo com a informação cedida pelo fabricante.

¹ resulta de um clínquer rico em cal livre e cujos componentes menores são silicatos de cálcio, aluminatos, ferro aluminatos e sulfatos de cálcio.

Posteriormente, as referências aos adjuvantes superplastificantes seguem as seguintes nomenclaturas:

- Superplastificante utilizado no BAC mais resistente: SP BAC+R
- Superplastificante utilizado no BAC de média resistência: SP BAC±R
- Superplastificante utilizado no BAC de menor resistência: SP BAC-R

Tabela 15 - Características dos adjuvantes superplastificantes

Característica	SP BAC+R	SP BAC±R	SP BAC-R
Componente principal	éter policarboxílico	éter policarboxílico	éter policarboxílico
Estado	Líquido	Líquido	Líquido
Côr	Amarela	Castanha	Amarela
Massa volúmica	1,06 g/cm ³	1,06 g/cm ³	1,07 g/cm ³
Viscosidade (20°C)	135 CPS	---	---
Teor em iões cloreto	≤ 0,1%	≤ 0,1%	≤ 0,1%
pH	7 ± 1	7,3 ± 1,5	6 ± 1
Dosagem recomendada	0,6 a 1,0 l por 100 kg de material fino (< 0,1mm)	1 - 1,7 kg por 100 kg de material fino (< 0,1mm)	0,6 a 1,2% sobre o peso do cimento (ligante)

Visando o controlo da retracção, foram utilizados 2 adjuvantes redutores de retracção. A Tabela 16 apresenta as principais características de acordo com as informações cedidas pelos produtores. Posteriormente, as referências aos adjuvantes redutores de retracção seguem as seguintes nomenclaturas:

- Adjuvante redutor de retracção I: ARR1
- Adjuvante redutor de retracção II: ARR2

Tabela 16 - Características dos adjuvantes redutores de retracção

Característica	ARR1	ARR2
Componente principal	Poliglicol	Alquil-éteres
Estado	Líquido	Líquido
Côr	Incolor	Amarelada
Massa volúmica	0,98 g/cm ³	1,00±0,02 g/cm ³
Viscosidade (20°C)	< 30 CPS	----
Teor em iões cloreto	≤ 0,1 %	≤ 0,1 %
pH	7 ± 1	10,5
Dosagem recomendada	5 a 7,5 l / m ³ de betão	Entre 0,5% e 2% da massa do cimento

4.1.4 Agregados

4.1.4.1 Agregados de Densidade Normal

Os agregados utilizados neste trabalho foram os seguintes: um agregado grosso de origem calcária, proveniente da Serra de Loulé e adiante designado por brita, e uma areia fina, siliciosa de origem natural, proveniente do mar/ria da zona de Tavira.

Procurou-se, com a utilização de apenas dois agregados agilizar a preparação e uso dos agregados no trabalho experimental.

Os resultados que a seguir se apresentam foram determinados no LMC.

4.1.4.1.1 *Massa volúmica e absorção de água*

Estas propriedades foram caracterizadas segundo o procedimento descrito na NP EN 1097-6:2003 [201], apresentando-se na Tabela 17 os resultados obtidos para as massas volúmicas do material impermeável (MVmi), do material saturado com a superfície seca (MVsat) e do material seco (MVsec). Na última linha desta tabela apresentam-se os resultados da absorção de água dos agregados.

Tabela 17 - Massas volúmicas e absorção dos agregados

Agregado	Brita	Areia
MVmi, (kg/m ³)	2680	2680
MVsat, (kg/m ³)	2620	2650
MVsec, (kg/m ³)	2580	2640
Absorção, (%)	1,5	0,6

4.1.4.1.2 *Granulometria*

Na Figura 46 apresentam-se as curvas granulométricas dos agregados. Estes resultados foram determinados de acordo com a NP EN 933-1:2000 [202]. Este procedimento permite aferir o teor de finos dos agregados, conforme definido na NP EN 12620:2004 [203], que se regista na Tabela 18. Também se apresenta o montante de material de dimensão inferior a 125 µm, que é o limite escolhido para o material ser considerado fino no estudo das composições das misturas. Nesta tabela indicam-se igualmente os módulos de finura dos agregados.

As dimensões dos agregados são definidas de acordo com a NP EN 12620:2004 [203] em termos das aberturas do peneiro inferior (d) e do superior (D), expressa como d/D. Na Tabela 19 apresentam-se as classificações dos agregados utilizados, bem como a respectiva categoria conforme a norma atrás indicada.

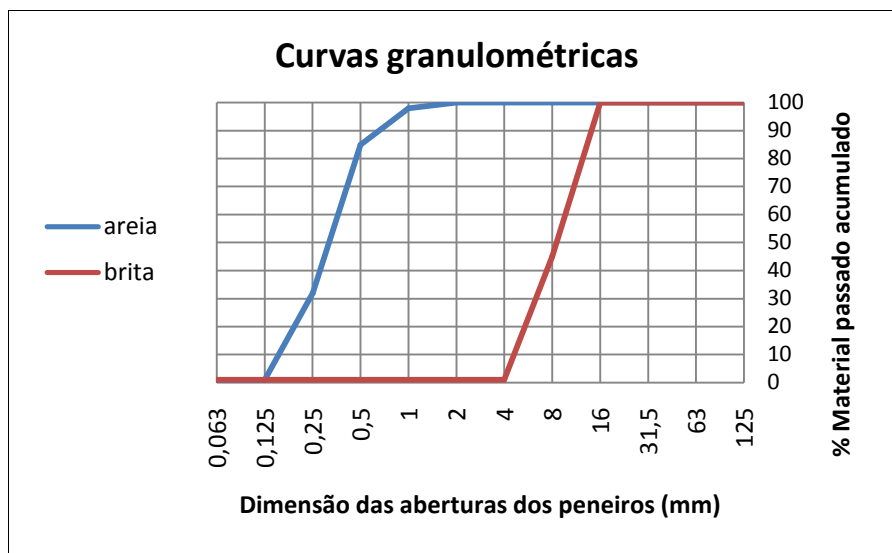


Figura 46 - Curvas granulométricas dos agregados de densidade normal

Tabela 18 - Teores de finos e módulo de finura dos agregados

Agregado	Brita	Areia
% < 63 µm	1,0	0,6
% < 125 µm	1,2	1,0
MF	6,49	1,87

Tabela 19 - Dimensões dos agregados

Agregado	Brita	Areia
d/D	4/12,5	0/2
Categoria	G _C 90/15	G _F 85

4.1.4.2 Agregados Leves

Visando o controlo da retracção autogénea, foi também utilizado um agregado leve comercializado no mercado português.

Na Figura 47 apresenta-se a curva granulométrica do agregado. Estes resultados foram determinados de acordo com a NP EN 933-1:2000 [202]. A Tabela 20 apresenta as principais propriedades de acordo com a informação indicada pelo fabricante.

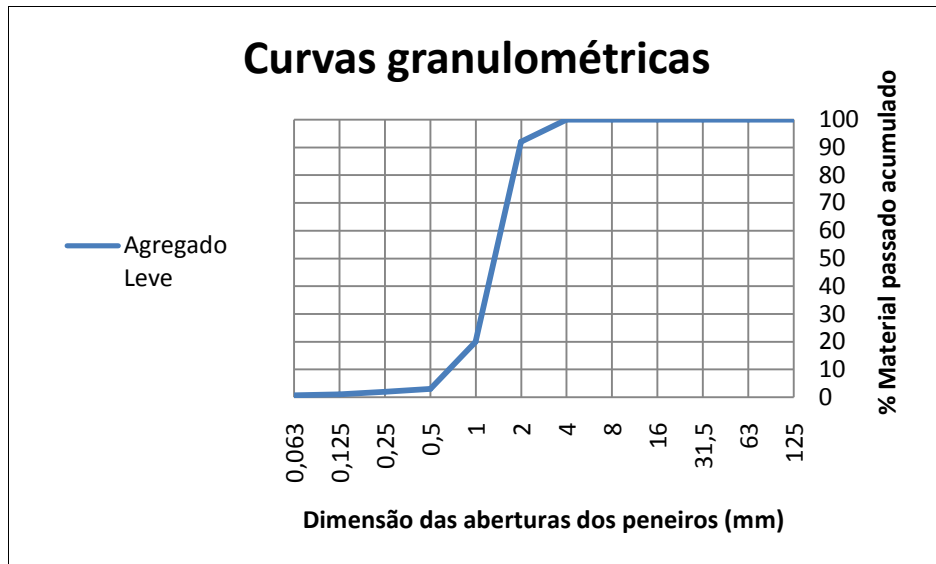


Figura 47 - Curva granulométrica do agregado leve

Tabela 20 - Características do agregado leve

Tipo de agregado leve	Argila expandida
Características químicas	
Teor de cloretos	< 0,1 %
Sulfato solúvel em ácido	< 0,4 %
Teor de enxofre total	< 0,2 %
pH	9-10
Características físicas	
Resistência ao esmagamento	1,1 MPa
MVmi, (NP EN 1097-6. Anexo C) (*)	1370 kg/m ³
Absorção (NP EN 1097-6. Anexo C) (*)	18,4 %

(*) Valores determinados no LMC

4.1.5 Água

A água utilizada provinha da rede pública. Sendo esta água potável e de acordo com a NP EN 1008:2003 [204] é considerada apta para o fabrico de betão. Ainda assim, não foi caracterizada por não se considerar relevante a contribuição das características da água utilizada para o objectivo deste trabalho.

4.2 MÉTODOS DE ENSAIO

O trabalho experimental teve uma primeira fase (Fase I), que constou na optimização de 3 composições em betão autocompactável com comportamento adequado no estado fresco e com 3 níveis de resistência.

Posteriormente, o trabalho experimental centrou-se na medição da retracção em virtude da condição específica de cada caso de estudo (variáveis introduzidas) - (Fase II).

4.2.1 Métodos de ensaio utilizados na Fase I

4.2.1.1 Amassadura

As amassaduras dos betões foram efectuadas em volumes de 30 l na misturadora de eixo vertical que se apresenta na Figura 48.



Figura 48 - Misturadora utilizada na produção dos betões

As amassaduras foram efectuadas de acordo com a seguinte ordem de acções:

1. Juntar os materiais sólidos, introduzindo os ligantes em último lugar;
2. Colocar cerca de 2/3 da água no tambor. Início da contagem do tempo;
4. Misturar durante 2 min;
5. Juntar a restante água e os adjuvantes;
6. Misturar durante mais 2 min.

O início da amassadura corresponde ao instante em que a água entra em contacto com o cimento.

As amassaduras efectuadas em volumes de 30 l foram realizadas numa sala não climatizada.

4.2.1.2 Ensaio de espalhamento

Este método de ensaio é objecto da norma europeia EN 12350-8 [23]. Basicamente, consiste em medir o espalhamento após se ter elevado um cone previamente cheio com betão, sem compactação (Figura 49). O cone utilizado tem as dimensões do cone de Abrams. Além do espalhamento final (SF), que resulta da média de dois diâmetros ortogonais entre si, sendo um deles o maior da massa espalhada, também se pode determinar o tempo que o espalhamento levou a chegar ao diâmetro de 500 mm (t_{500}).



Figura 49 - Ensaio de espalhamento de betões

4.2.1.3 Ensaio de escoamento no funil V

Este ensaio também está descrito na norma europeia EN 12350-9 [24].

Após se encher o funil (Figura 50), mantendo a saída fechada e sem compactar, determina-se o tempo desde a abertura da comporta da saída até que se veja claridade olhando de cima para o interior do funil. Este é o tempo de escoamento do betão (VF).



Figura 50 - Funil V (utilizado no presente trabalho)

4.2.1.4 Ensaio da caixa L

Este ensaio foi efectuado conforme está descrito na norma europeia EN 12350-10 [25]. A caixa L (Figura 51) é utilizada para avaliar a capacidade de passagem dos BAC através de aberturas estreitas, incluindo os espaços entre as armaduras, sem segregação ou obstrução. O ensaio realizado utilizou três barras na saída. Após o enchimento da componente vertical da caixa, sem compactação, foi içada a comporta deixando o betão fluir livremente através dos espaços entre as barras. Quando o betão parou, mediu-se a altura de betão no final da caixa (H_2) e na zona imediatamente antes das barras (H_1). A razão entre estas medições (H_2/H_1) é a grandeza que se relaciona com a capacidade de passagem do BAC.



Figura 51 - Caixa L (utilizada no presente trabalho)

4.2.1.5 Resistência mecânica

A resistência mecânica dos betões foi caracterizada por meio do ensaio de resistência à compressão efectuado de acordo com a norma NP EN 12390-3 [205]. Estes ensaios foram realizados em cubos de 15 cm de aresta às idades de 3, 7 e 28 dias. A Figura 52 apresenta o equipamento utilizado.



Figura 52 - Máquina de compressão

4.2.2 Métodos de ensaio utilizados na fase II

4.2.2.1 Condições climáticas da sala de trabalho

As operações de pesagem, pré-armazenamento (incluindo a água), amassaduras de 1,5 litros, preparação e conservação dos provetes e respectivas medições foram realizadas na sala de ensaios de cimentos do LMC, a qual dispõe de um sistema de controlo automático de temperatura e humidade relativa.

A Figura 53 apresenta o equipamento de controlo da temperatura e humidade relativa (HR). Os valores programados durante a execução deste trabalho foram de 20 ± 2 °C no que respeita à temperatura, e HR compreendida entre 50 e 60%.



Figura 53 - Equipamento de controlo da temperatura e humidade relativa

4.2.2.2 Amassadura

Nesta fase as amassaduras dos betões foram efectuadas em volumes de 30 l ou 1,5 l. Com a realização das amassaduras de 1,5 litros, procurou-se adequar as quantidades de materiais a utilizar face ao número de provetes necessários para o caso de estudo em causa.

As amassaduras de 30 l realizaram-se segundo o anteriormente descrito em 4.2.1.1.

As amassaduras de 1,5 l foram efectuadas em misturadoras do tipo prescrito na NP EN 196-1:2006 [199], que consiste essencialmente num recipiente em aço inoxidável com uma capacidade total de cerca de 5 l, e por uma pá misturadora accionada por um motor eléctrico. Na Figura 54 mostra-se a misturadora utilizada na produção dos betões.



Figura 54 - Misturadoras para amassaduras de 1,5 l

A pá misturadora roda sobre si mesma, acompanhada de um movimento planetário em torno do eixo do recipiente. Os dois sentidos de rotação são opostos. As velocidades de rotação são as definidas no Quadro 2 da NP EN 196-1:2006 [199].

As amassaduras foram efectuadas de acordo com a seguinte ordem de acções:

1. Juntar os materiais sólidos na panela;
3. Colocar cerca de 2/3 da água na panela e iniciar a contagem do tempo;
4. Misturar a velocidade lenta durante 1 min e 30 s;
5. Retirar a panela, e misturar manualmente durante 1 min e 30 s, raspando o material depositado nas paredes da panela e na pá misturadora;
6. Juntar a restante água e os adjuvantes;
7. Reposicionar a panela e misturar a velocidade lenta durante 1 min;
8. Passar a misturar a velocidade rápida durante 1 min;
9. Retirar a panela, e misturar manualmente durante 1 min, raspando o depositado nas paredes da panela e na pá misturadora;
10. Reposicionar a panela e misturar a velocidade rápida durante 30 s.

Considera-se como início da amassadura o instante em que a água entra em contacto com o cimento.

4.2.2.3 Preparação e conservação de provetes

Os provetes (prismas com as dimensões de 40mm x 40 mm x 160 mm) foram preparados através do uso dos moldes descritos na NP EN 196-1:2006 [199] (Figura 55). Os provetes destinados à medição da retracção foram preparados em moldes providos de um sistema de fixação dos pernos (Figura 56).

Uma vez que o presente estudo envolve apenas betões autocompactáveis, não foi aplicada nenhuma energia de compactação adicional.



Figura 55 - Moldes utilizados na preparação de provetes para medição da resistência e respectivo enchimento.

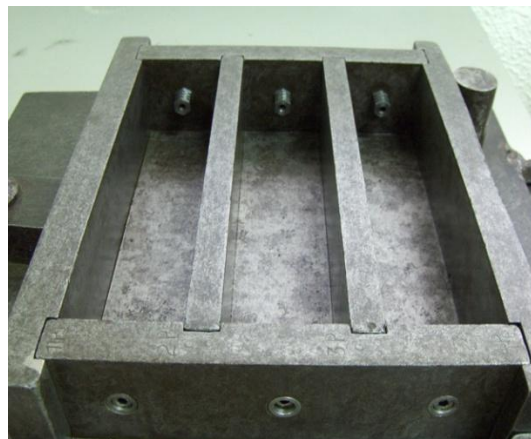


Figura 56 - Moldes utilizados na preparação de provetes para medição da retracção.

Posteriormente, os moldes foram cobertos com uma placa de vidro (Figura 57) e colocados num tanque hermeticamente fechado, o qual continha uma lâmina de água no fundo de modo a garantir uma atmosfera com cerca de 100% de humidade relativa (Figura 58).

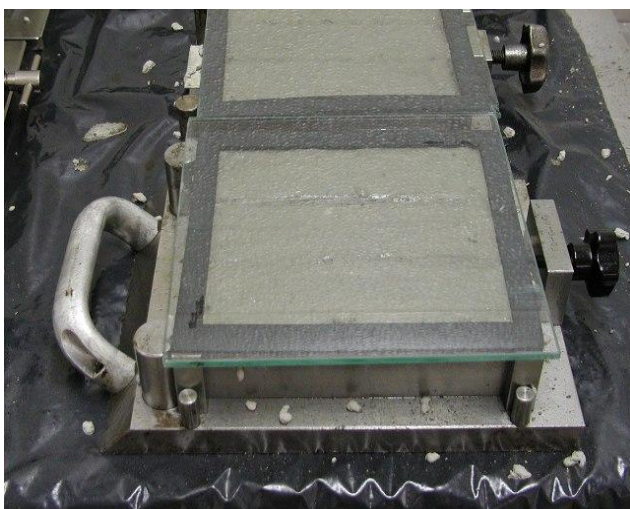


Figura 57 - Molde coberto com uma placa de vidro



Figura 58 - Tanque para conservação dos provetes até à desmoldagem

A desmoldagem foi realizada quando os provetes apresentavam uma resistência à compressão compreendida entre 2 e 5 MPa.

Os provetes destinados à medição da retracção autógena foram selados através do envolvimento sucessivo de um filme plástico e colagem com silicone na zona dos pernos de modo a evitar a perda de massa. (Figura 59)



Figura 59 - Provetes para a medição da retracção: com secagem livre, à esquerda (não protegidos) e selados à direita.

Os provetes não protegidos e os selados foram colocados em armários abertos. (Figura 60)

As posições dos provetes não protegidos foram alternadas em cada recolocação.

Os provetes com cura prevista dentro de água foram conservados imersos em pequenos tanques, sendo a água renovada no máximo uma vez por mês. (Figura 61)



Figura 60 - Armários abertos para colocação dos provetes



Figura 61 - Conservação de provetes imersos

4.2.2.4 Pesagem

As pesagens foram realizadas numa balança digital com a resolução de milésima de grama.

4.2.2.5 Medição da retracção – método convencional

Para a realização da medição dos comprimentos dos provetes seguiu-se o procedimento descrito na Especificação do LNEC E398-1993 [206]. Foram efectuadas leituras através de um medidor de comprimentos dotado de um deflectómetro, com uma sensibilidade de 1 µm. A estabilidade do medidor foi verificada antes de cada leitura através do uso de barras comparadoras (Figura 62).

Foram efectuadas medições de comprimentos dos provetes no momento da desmoldagem, seguindo-se leituras aos 1, 2, 3, 7, 14, 28 dias e aos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 meses.

Antes de cada leitura, e para cada provete, foram limpas as superfícies côncavas de cada perno através da passagem de uma porção de algodão com o auxílio de um instrumento rotativo.

O sistema de pernos utilizado envolveu o uso de duas esferas de aço com o diâmetro de 9,52 mm, as quais foram regularmente limpas.

O cálculo da retracção ou expansão é realizado através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{re} = \frac{c_f - c_i}{c_i} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Onde:

ε_{re} retracção ou expansão do provete

c_f comprimento do provete no final do período de ensaio, mm

c_i comprimento do provete no início do período de ensaio, mm



Figura 62 - Equipamento medidor de comprimentos, utilizado no presente trabalho.

4.2.2.6 Medição da retracção autogénea desde o estado fresco

Para a realização deste ensaio seguiram-se as recomendações constantes na norma ASTM C 1698-09 [207].

O ensaio consiste na preparação de um provete de pasta de cimento ou de argamassa através do enchimento de um molde corrugado, o qual oferece uma pequena resistência à deformação longitudinal. O molde é selado para prevenir a perda de massa do provete por secagem e é conservado a uma temperatura constante. Seguidamente, é realizada a medição do comprimento inicial através de um deflectómetro digital dotado de uma resolução de 0.001 mm. O zero do deflectómetro é feito regularmente através do uso de uma barra comparadora com um comprimento de 425 ± 0.5 mm.

A variação de comprimento do provete é registada ao longo do tempo até à idade designada.

A variação de comprimento e o comprimento inicial são usados para cálculo da retracção autogénea, de acordo com as seguintes expressões:

$$L(t) = L_{ref} + R(t) - 2 \cdot L_{plug} \quad \text{Eq.4.2}$$

Onde:

$L(t)$ comprimento do provete (pasta ou argamassa) no tempo t , mm

L_{ref} comprimento da barra de referência, mm

$R(t)$ comprimento registado no deflectómetro com o provete colocado no dilatómetro, mm

L_{plug} comprimento médio das tampas, mm

A retracção autogénea do provete, verificada no tempo t , expressa em $\mu\text{m/m}$, é calculada pela expressão seguinte:

$$\varepsilon_{autog\ énea} = \frac{L(t) - L(t_{fs})}{L(t_{fs})} \cdot 10^6 = \frac{R(t) - R(t_{fs})}{L(t_{fs})} 10^6 \mu\text{m/m} \quad \text{Eq.4.3}$$

Onde:

t_{fs} tempo correspondente à leitura inicial

A norma refere a necessidade da realização da monitorização da perda de massa dos provetes. A título indicativo, é referido que a troca de humidade com o meio ambiente

por parte de provetes de pasta de cimento, resulta num erro na retracção medida na ordem dos 200 μ m/m por grama de massa cedida. No caso de argamassas, o valor ronda os 80 μ m/m.



Figura 63 - Equipamento medidor de comprimentos desde o estado fresco, utilizado no presente trabalho

4.2.2.7 Medição da resistência

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a NP EN 196-1 [199]. A Figura 64 apresenta o equipamento de compressão utilizado na determinação da resistência dos prismas.

Foram realizados ensaios de determinação da resistência após a desmoldagem, aos 1,2,3,5,7,14 e 28 dias e aos 2,4 e 9 meses de idade.



Figura 64 - Máquina de compressão e flexão de prismas

4.2.2.8 Medição da porosidade

A determinação da porosidade foi realizada através da técnica de intrusão de mercúrio. Esta prática baseia-se no facto de um líquido não molhável (com um ângulo de contacto maior que 90°) apenas penetrar nos poros capilares sob determinada pressão. A relação entre a pressão e o diâmetro do poro capilar onde existe intrusão é descrita como:

$$P = \frac{-4\gamma\cos\theta}{d} \quad \text{Eq. 4.4}$$

Onde:

- P pressão
 γ tensão superficial do líquido
 θ ângulo de contacto do líquido
 d diâmetro do poro

Durante a porosimetria de mercúrio, é medida a pressão realizada sob o mercúrio e o volume de mercúrio que penetra a amostra nessa pressão.

Na Figura 65, consta a representação típica de uma curva de porosimetria de mercúrio.

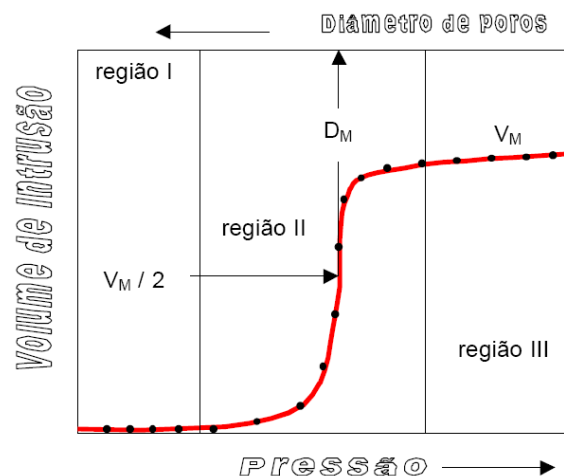


Figura 65 - Curva típica de uma análise de porosimetria de mercúrio

Conforme a pressão aumenta e não existem poros com dimensões que satisfaçam a equação 4.4, não ocorre intrusão de mercúrio e o volume de intrusão permanece igual a zero (região I). Quando a pressão é suficiente para preencher poros de determinado tamanho ocorre penetração de mercúrio e variação do volume de intrusão (região II). Após o preenchimento dos poros com o mercúrio, a penetração de mercúrio cessa (região III).

O valor máximo de volume de intrusão, V_M , determina o volume de poros abertos da amostra, enquanto o diâmetro de poros para $V_M/2$ pode ser considerado como diâmetro médio dos poros, D_M .

A representação da curva pode ser feita em função da variação de volume para um incremento de pressão. Neste caso, assume a configuração presente na Figura 66.

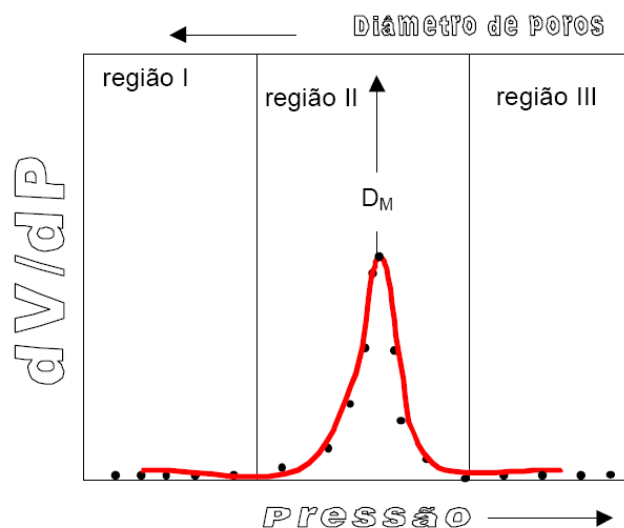


Figura 66 - Representação da curva de porosimetria de mercúrio, em função da variação de volume para um incremento de pressão

Na Figura 67, consta o equipamento existente no laboratório de Ensaios e Desgaste & Materiais do Instituto Pedro Nunes em Coimbra, utilizado no presente trabalho. Os procedimentos de ensaio respeitaram a norma ISO 15901-1 [208].



Figura 67 - Porosímetro de mercúrio

4.3 COMPOSIÇÕES

O estudo em betões foi composto por três partes distintas: uma primeira, em que se pretendeu desenvolver betões autocompactáveis com níveis de autocompactabilidade semelhantes. De modo a possibilitar uma resposta abrangente face aos objectivos do presente trabalho, considerou-se adequado desenvolver três composições base. Para esse fim, foi definida a resistência como a propriedade diferenciadora.

Na segunda fase foram testadas nas composições base várias técnicas, visando a mitigação da retracção.

Na terceira fase, foram repetidas algumas amassaduras com o intuito de registar a retracção autogénea desde o instante zero, de acordo com o procedimento descrito em 4.2.2.6.

4.3.1 Composições desenvolvidas na Fase I

As 3 composições base foram desenvolvidas na continuidade do trabalho apresentado em [8]. Considerou-se benéfico dar continuidade à não inclusão de fíler nas composições, a não ser o proveniente do cimento, de modo a que o presente estudo correspondesse melhor a eventuais aplicações práticas, uma vez que a maior parte das centrais de betonagem nacionais não dispõem desta adição regularmente inserida no processo de fabrico.

O critério de selecção dos tipos e classes de cimento, assim como dos superplastificantes de cada composição base, prendeu-se com a disponibilidade no mercado nacional e do nível de resistência pretendido para a composição.

Na Tabela 21 apresentam-se as proporções das 3 composições base. Posteriormente, as referencias às composições base seguem as seguintes nomenclaturas:

- BAC base de menor resistência: BAC b-R
- BAC base de média resistência: BAC b±R
- BAC base de maior resistência: BAC b+R

Tabela 21 - Proporções das 3 composições base

Composição	BAC b-R	BAC b±R	BAC b+R
Cimento (kg/m ³)	264,3 (II B-L 32,5 N)	283,8 (II A-L 42,5 R)	315,2 (I 52,5 R)
CVc (kg/m ³)	172,7	172,3	178,4
Areia (kg/m ³)	773,4	770,2	811,3
Brita (kg/m ³)	755,8	754,4	790,7
Água (l/m ³)	200,2	194,5	151,1
Superplastificante (l/m ³)	5,1 (SP BAC-R)	9,5 (SP BAC±R)	13,1 (SP BAC+R)

4.3.2 Composições desenvolvidas na Fase II

4.3.2.1 Composições desenvolvidas a partir da composição BAC b-R

Após a validação do desempenho no estado fresco e no estado endurecido, no que se refere à resistência, da composição BAC b-R, foram executadas 6 amassaduras de 30 litros.

Além da composição de referência (Ref), foram introduzidos os seguintes componentes:

- Utilização do adjuvante redutor de retracção I (ARR I) na dosagem de 7,5 l/ m³ de betão.
- Utilização do adjuvante redutor de retracção II (ARR II) na dosagem de 2% da massa do cimento.
- Utilização simultânea dos dois adjuvantes redutores de retracção (ARR I+II), nas dosagens anteriormente referidas.
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e 20 kg/m³ da adição expansiva (ARR (I+II) + 20AE).
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e 40 kg/m³ da adição expansiva (ARR (I+II) + 40AE).

A Figura 68 sintetiza as variantes realizadas, tendo por base a composição BAC b-R.

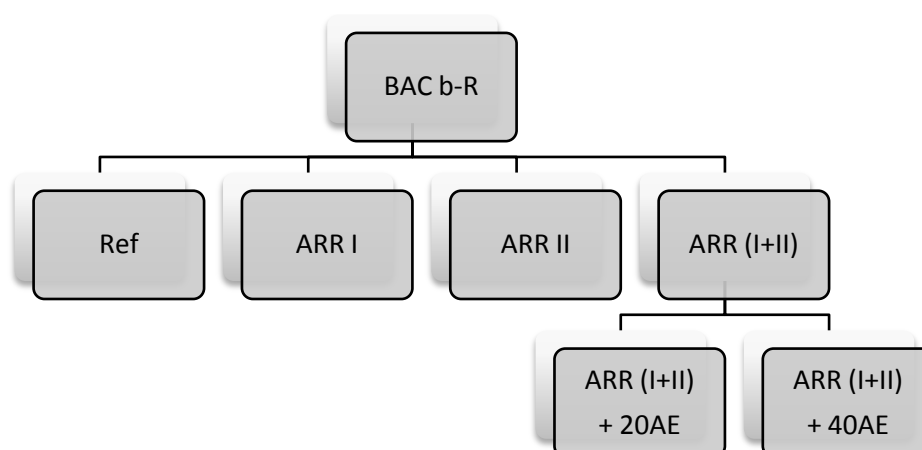


Figura 68 - Variantes realizadas a partir da composição BAC b-R

4.3.2.2 Composições desenvolvidas a partir da composição BAC b±R

Após a validação do desempenho no estado fresco e no estado endurecido, no que se refere à resistência, da composição BAC b±R foram executadas 6 amassaduras de 30 litros.

Foram também introduzidos os seguintes componentes:

- Utilização do adjuvante redutor de retracção I (ARR I) na dosagem de 7,5 l/ m³ de betão.
- Utilização do adjuvante redutor de retracção II (ARR II) na dosagem de 2% da massa do cimento.
- Utilização simultânea dos dois adjuvantes redutores de retracção (ARR I+II) nas dosagens anteriormente referidas.
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e 20 kg/m³ da adição expansiva (ARR (I+II) + 20AE).
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e 30 kg/m³ da adição expansiva (ARR (I+II) + 30AE).

A

Figura 69 sintetiza as variantes realizadas tendo por base a composição BAC b±R.

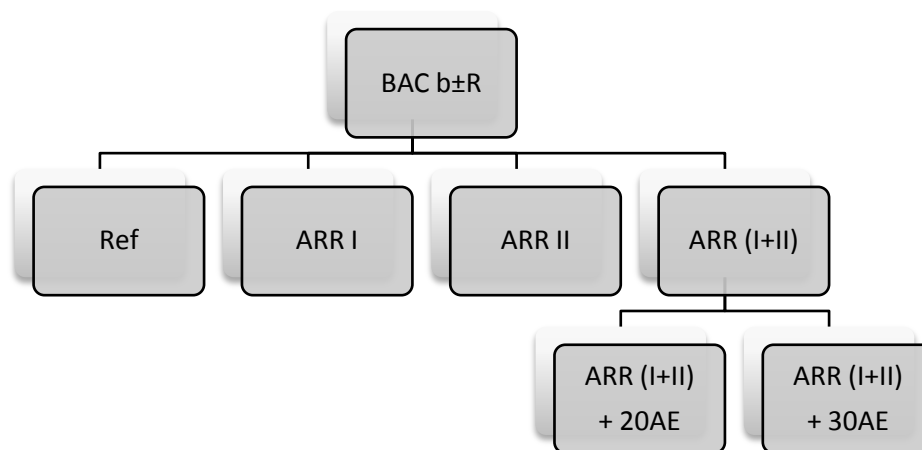


Figura 69 - Variantes realizadas a partir da composição BAC b±R

4.3.2.3 Composições desenvolvidas a partir da composição BAC b+R

Após a validação do desempenho da composição BAC b+R, foram executadas 5 amassaduras de 30 litros e 6 amassaduras de 1,5 litros.

Devido à descontinuidade do fornecimento de cinzas volantes, o trabalho, no que respeita à presente classe de BAC, englobou a utilização, em separado, de duas cinzas volantes (Cinzas volantes de Sines – CVs e cinzas volantes de Compostilha – CVc).

Foram ainda introduzidos os seguintes componentes:

- Utilização do adjuvante redutor de retracção I (ARR I) na dosagem de 7,5 l/ m³ de betão.
- Utilização simultânea dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens de 7,5 l/ m³ de betão (ARR I) e de 2% da massa do cimento (ARR II).
- Utilização de 20 kg/m³ da adição expansiva (20AE)
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e 10 kg/m³ da adição expansiva (ARR (I+II) + 10AE).
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e 20 kg/m³ da adição expansiva (ARR (I+II) + 20AE).
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e 30 kg/m³ da adição expansiva (ARR (I+II) + 30AE).
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e 40 kg/m³ da adição expansiva (ARR (I+II) + 40AE).
- Utilização do agregado leve saturado (ALS).
- Utilização combinada dos dois adjuvantes redutores de retracção nas dosagens anteriormente referidas e o agregado leve saturado (ARR (I+II) + ALS).

A Figura 70 para a composição BAC b+R, utilizando as cinzas volantes de Sines e a Figura 71 para a composição BAC b+R, utilizando as cinzas volantes de Compostilha, sintetizam as variantes realizadas tendo por base a composição BAC b+R.

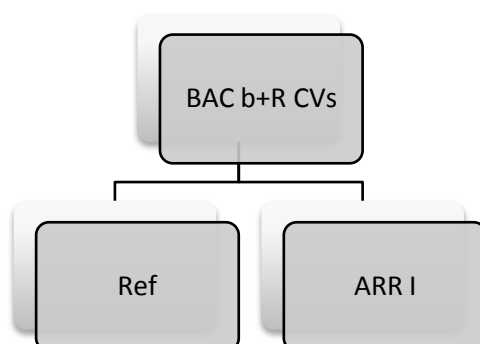


Figura 70 - Variantes realizadas a partir da composição BAC b+R, utilizando as cinzas volantes de Sines

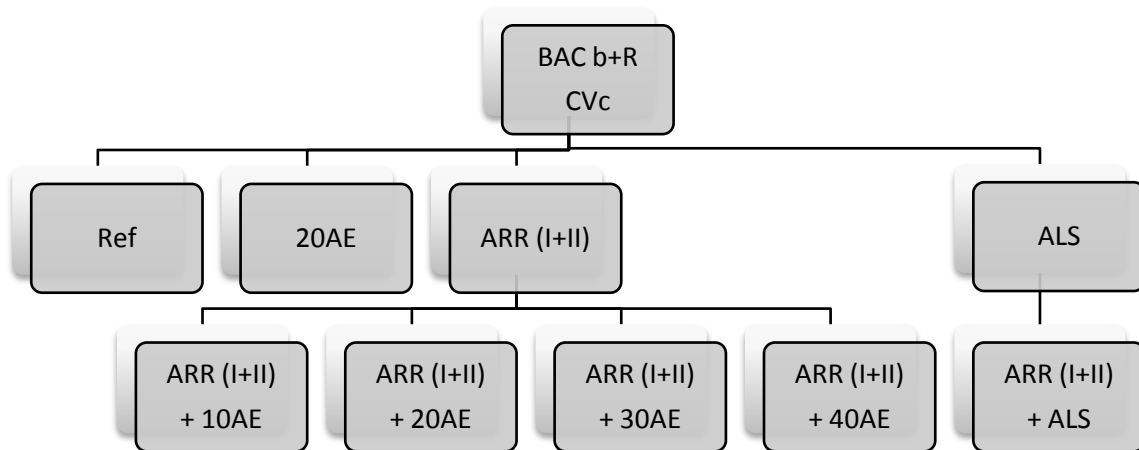


Figura 71 - Variantes realizadas a partir da composição BAC b+R, utilizando as cinzas volantes de Compostilha

4.4 NÚMERO DE PROVETES, CONDIÇÕES DE CURA E POSTERIOR TROCA DE HUMIDADE

Não sendo possível, através do método de ensaio descrito em 4.2.2.5, efectuar a medição da retração desde o instante zero, procurou-se proceder à desmoldagem e execução das primeiras leituras o mais cedo possível. Após a execução de várias amassaduras experimentais, estabeleceu-se o valor recomendado de resistência à compressão para proceder à desmoldagem o qual se situou entre os 2 e os 5 MPa.

Esse valor de resistência proporcionou os seguintes tempos, após o início da amassadura para a execução da desmoldagem:

- BAC b-R: 24 a 28 horas
- BAC b±R: 16 a 19 horas
- BAC b+R: 7 a 9 horas

Após a desmoldagem, foram definidos 3 níveis de cura:

- Sem cura.
- Cura até à idade em que o betão atinge cerca de 50% da resistência média aos 28 dias.
- Cura até à idade em que o betão atinge cerca de 70% da resistência média aos 28 dias.

Para os 3 níveis de cura referidos foram obtidos os seguintes dias, conforme a classe de BAC em causa, respectivamente:

- BAC b-R: 0, 3 e 7 dias.
- BAC b±R: 0, 2 e 5 dias.
- BAC b+R: 0, 1 e 3 dias.

Após o período de cura, os provetes sujeitos a secagem ao ar e os destinados à imersão foram conservados nas condições referidas em 4.2.2.1..

No que respeita ao número de provetes, e de uma maneira geral, cada amassadura de 30 litros proporcionou a preparação de 29 prismas para a medição da retracção e 54 prismas para a medição da resistência.

No que respeita aos provetes para medição da retracção, os mesmos foram agrupados formando normalmente os seguintes conjuntos:

4 prismas para medição da retracção autogénea (prismas selados);

7 prismas para secagem ao ar (submetidos ao primeiro nível de cura – cura até à desmoldagem);

7 prismas para secagem ao ar (submetidos ao segundo nível de cura – aproximadamente 50% da resistência);

7 prismas para secagem ao ar (submetidos ao terceiro nível de cura – aproximadamente 70% da resistência) e

4 prismas para imersão.

As amassaduras de 1,5 litros para a preparação de provetes de 40 x 40 x 160 mm envolveram, normalmente, a preparação de 8 prismas.

As amassaduras de 1,5 litros para a medição da retracção autogénea desde o estado fresco envolveram a preparação de 2 provetes.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos no trabalho experimental desenvolvido. Numa primeira fase, apresentam-se os resultados referentes à autocompactibilidade e resistência dos betões base: BAC b-R, BAC b \pm R e BAC b+R. Posteriormente, são apresentados os resultados directamente relacionados com o objectivo do presente trabalho, nomeadamente a variação de massa, variação dimensional longitudinal, resistência e porosidade.

Intercaladamente será feita a análise dos respectivos resultados.

Os valores apresentados nos itens seguintes correspondem à média dos conjuntos de provetes agrupados conforme descrito em 4.4.

Entende-se como conjunto o grupo formado pelos provetes que apresentam a mesma idade, composição, cura e condições de troca de humidade.

Será também dado especial destaque à dispersão de resultados através de referências ao desvio padrão.

5.1 RESULTADOS REFERENTES À 1ª FASE DA INVESTIGAÇÃO

5.1.1 Autocompactibilidade dos BACb-R, BACb \pm R e BACb+R

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados obtidos e classes referentes ao desempenho dos betões autocompactáveis no estado fresco. A Figura 72, Figura 73 e Figura 74 apresentam os respectivos registos fotográficos.

Tabela 22- Autocompactabilidade dos betões base

Ensaio	BACb-R	BACb \pm R	BACb+R
Espalhamento (EN 12350-8 [23])	68 cm SF2	68 cm SF2	69 cm SF2
Escoamento (funil) (EN 12350-9 [24])	4 s VF1	19 s VF2	39.5 s VF2
Caixa L (3 barras) (EN 12350-10 [25])	0,84 PA2	0,85 PA2	0.90 PA2



Figura 72 - Auto-compactibilidade do betão BACb-R (a) - Ensaio de espalhamento; b) - pormenor do bordo do ensaio de espalhamento e c) - Ensaio na caixa L)



Figura 73 - Autocompactibilidade do betão BACb±R (a) - Ensaio de espalhamento; b) - pormenor do bordo do ensaio de espalhamento e c) - Ensaio na caixa L)



Figura 74 - Auto-compactibilidade do betão BACb+R (a) - Ensaio de espalhamento; b) - pormenor do bordo do ensaio de espalhamento e c) - Ensaio na caixa L)

5.1.2 Resistência à compressão

Na Figura 75 apresentam-se os valores da resistência à compressão do betão das três classes, obtidos a partir de ensaios de cubos de 15 cm de arestas com diferentes idades.

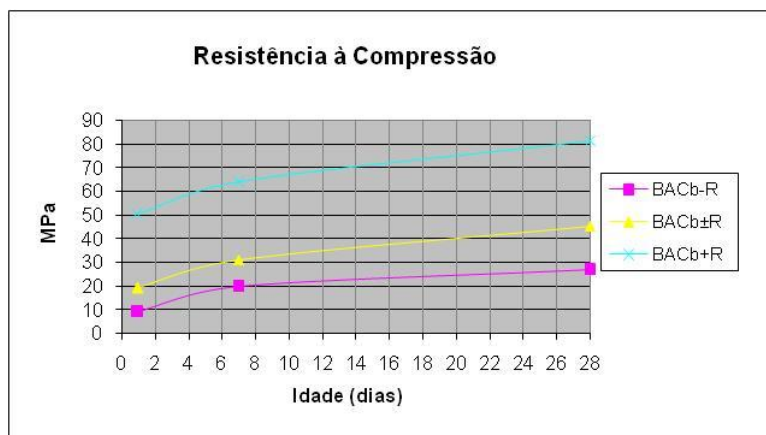


Figura 75 - Resistência à compressão das composições BAC base

5.2 RESULTADOS REFERENTES À 2ª FASE DA INVESTIGAÇÃO

5.2.1 Apresentação e análise de resultados referentes à composição BAC-R

5.2.1.1 Variação de massa

5.2.1.1.1 *Apresentação de resultados*

Os gráficos das figuras seguintes (Figura 76 à Figura 81) apresentam a variação de massa para as composições: Ref; ARR I; ARR II; ARR (I+II); ARR (I+II) + 20AE e ARR (I+II) + 40AE, registada até aos 9 meses de idade. Traduzem a média do conjunto de provetes.

A variação de massa apresentada foi calculada em percentagem da massa inicial, registada após a desmoldagem.

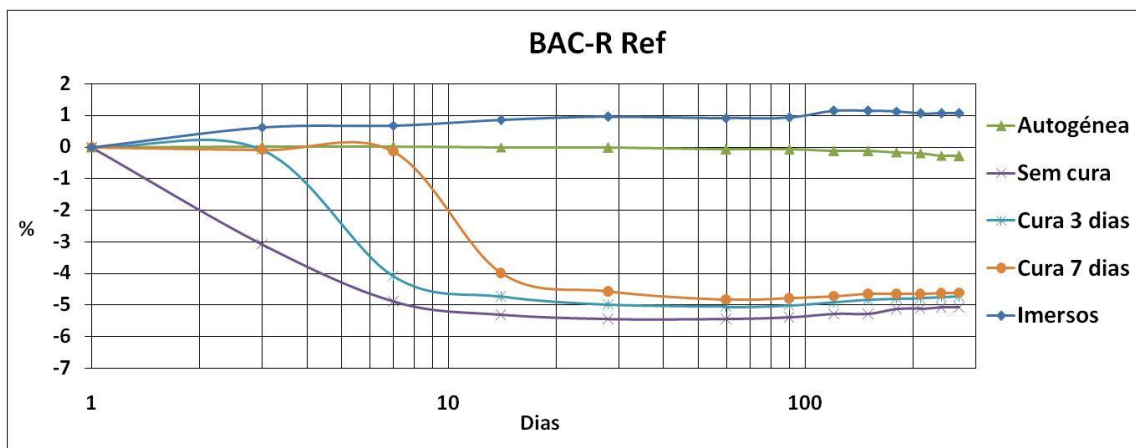


Figura 76 - Variação de massa da composição BAC-R Ref

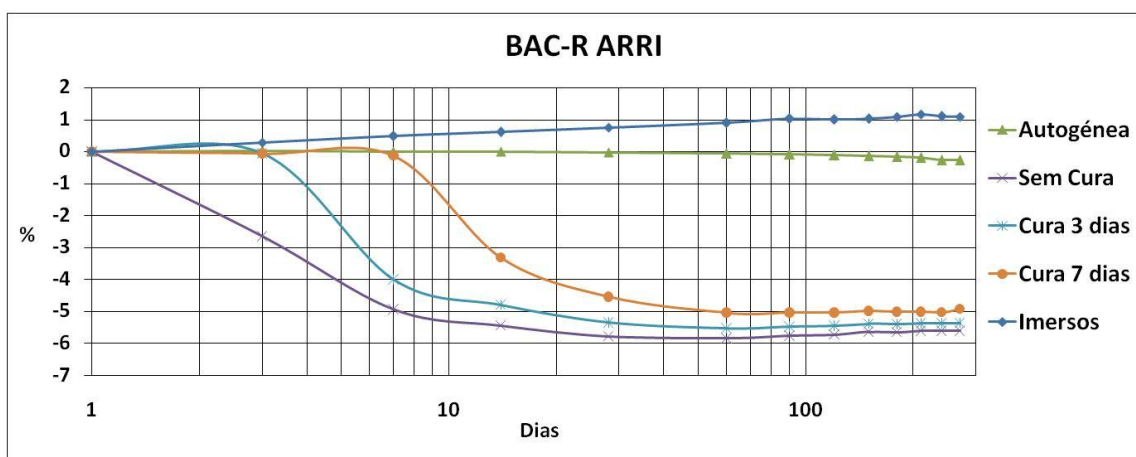


Figura 77 - Variação de massa da composição BAC-R ARR I

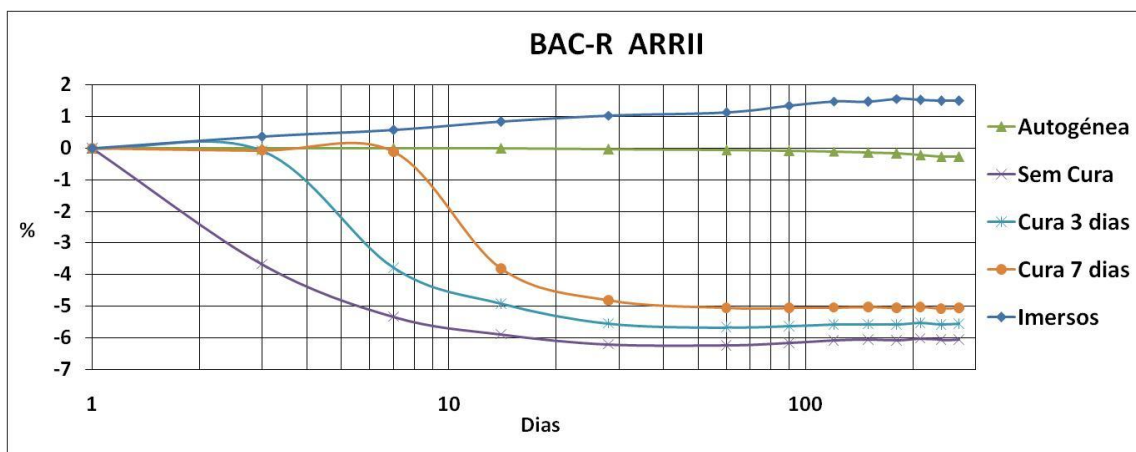


Figura 78 - Variação de massa da composição BAC-R ARR II

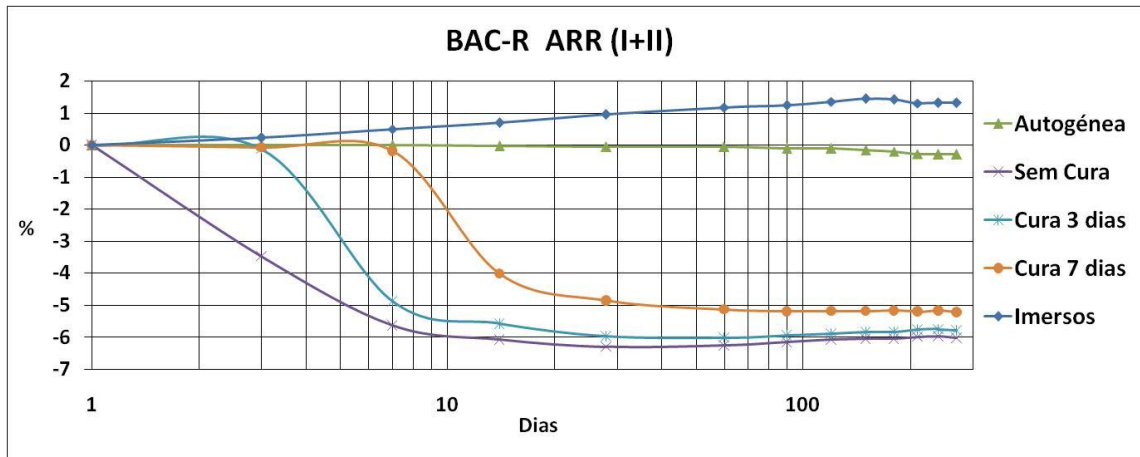


Figura 79 - Variação de massa da composição BAC-R ARR (I+II)

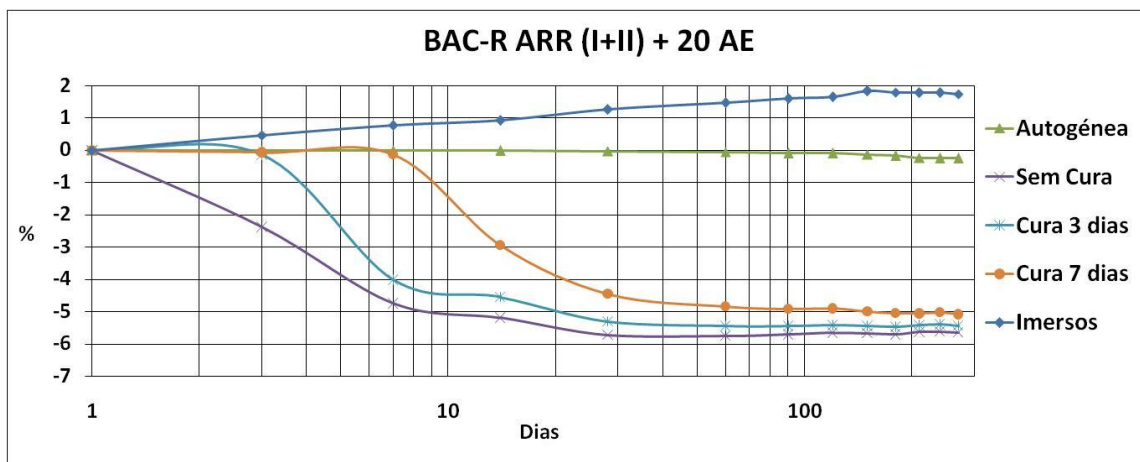


Figura 80 - Variação de massa da composição BAC-R ARR (I+II) + 20 AE

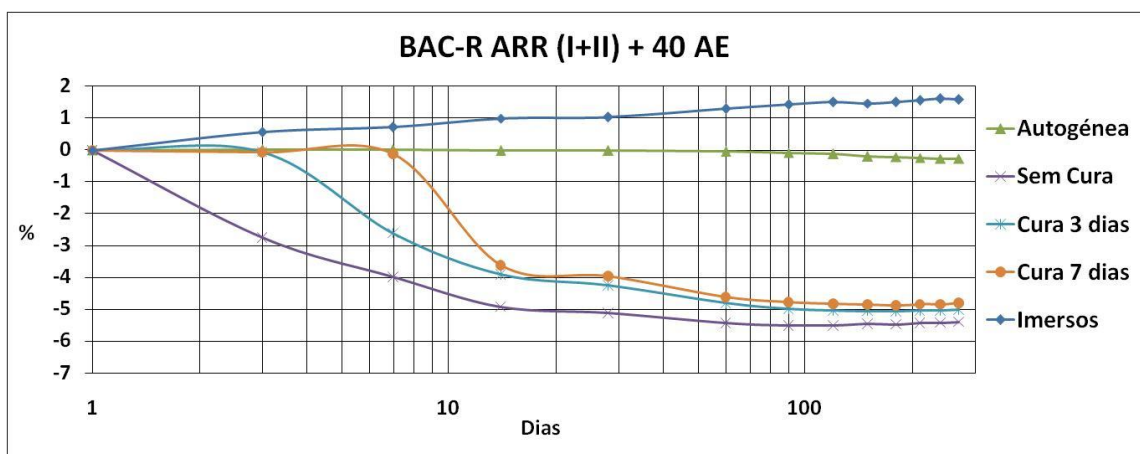


Figura 81 - Variação de massa da composição BAC-R ARR (I+II) + 40 AE

5.2.1.1.2 *Análise de resultados*

Os ensaios de determinação da variação de massa registaram um valor de desvio padrão médio, considerando todas as amassaduras, de 0,08%. Assim, nos gráficos relativos à variação de massa das várias amassaduras, são apresentados os valores médios, sendo considerada desprezável a dispersão de resultados.

Os provetes selados, para medição da retracção autogénea, registaram uma perda de massa média, ao fim de 9 meses de 0,27%. Este valor é considerado baixo e garante que a parcela correspondente à variação dimensional apresentada para os provetes selados no item 5.2.1.2 corresponde essencialmente à retracção autogénea.

Globalmente verifica-se um ganho de massa dos provetes imersos, devendo-se esse facto à absorção de água que os mesmos apresentam.

Em relação ao efeito de cura, observa-se que os provetes sujeitos à cura (3 ou 7 dias) apresentam uma menor perda de massa ao longo dos 9 meses. Efectivamente, a cura promove uma melhor hidratação do cimento, originando uma estrutura porosa mais fechada, inibindo a troca de humidade com o meio ambiente.

Comparando a variação de massa dos provetes imersos face à utilização dos ARR e da AE (Figura 82) verifica-se um incremento em todos os provetes das diferentes amassaduras quando comparados com os provetes da amassadura de referência, com excepção da amassadura com o ARR I, o qual apresenta valores semelhantes. Os provetes das amassaduras, contendo adições expansivas, apresentam valores de incremento de massa ao longo do tempo, tendencialmente superiores aos relativos às amassaduras contendo ARR.

Os resultados evidenciam assim o que era esperado, ou seja, o retardo da hidratação devido aos ARR permite um ganho de massa superior, por maior porosidade.

Já no que se refere aos betões com AE, o consumo de água pela etringite fica bem evidenciado nesta figura.

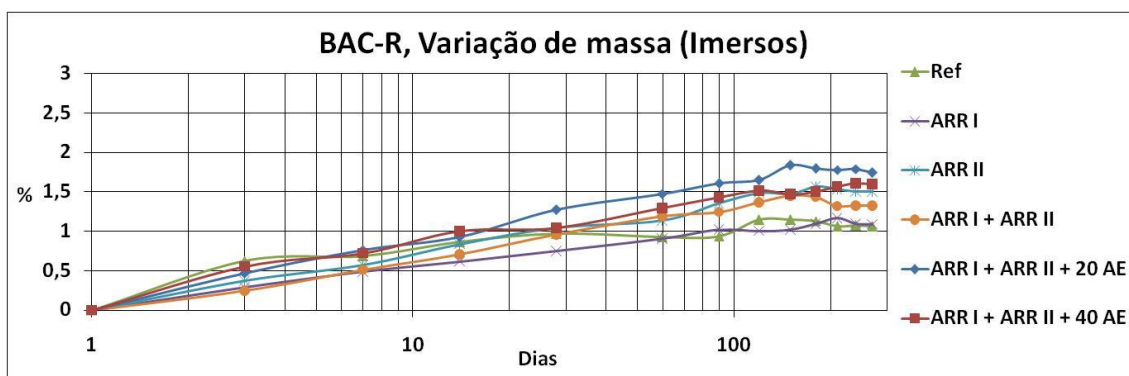


Figura 82 - Variação de massa da composição BAC-R, referente aos provetes imersos

Analisando os resultados dos provetes que não foram submetidos à cura e especificamente em relação à utilização dos ARR (Figura 83), verifica-se um aumento da perda de massa para todas as composições que incorporam os ARR. Verifica-se ainda que as composições que contêm o ARR II apresentam valores de perda de massa superiores. Mais um vez o efeito retardador dos ARR é colocado em evidência.

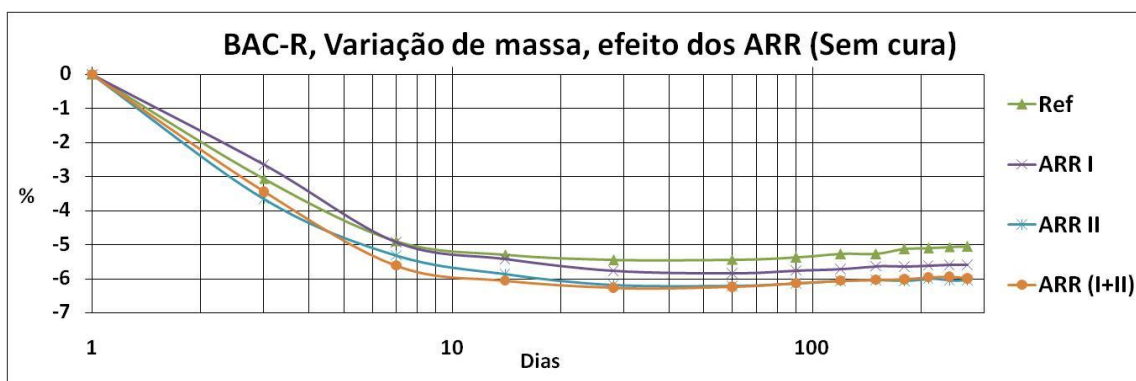


Figura 83 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito dos ARR nos provetes sem cura

No que respeita à utilização das adições expansivas nos provetes que não foram submetidos à cura (Figura 84), verifica-se que as composições que contêm a AE apresentam valores de perda de massa semelhantes quando comparados com a composição de referência, o que sugere que o efeito da AE contraria o retardo provocado pelos ARR, por acção da sua hidratação.

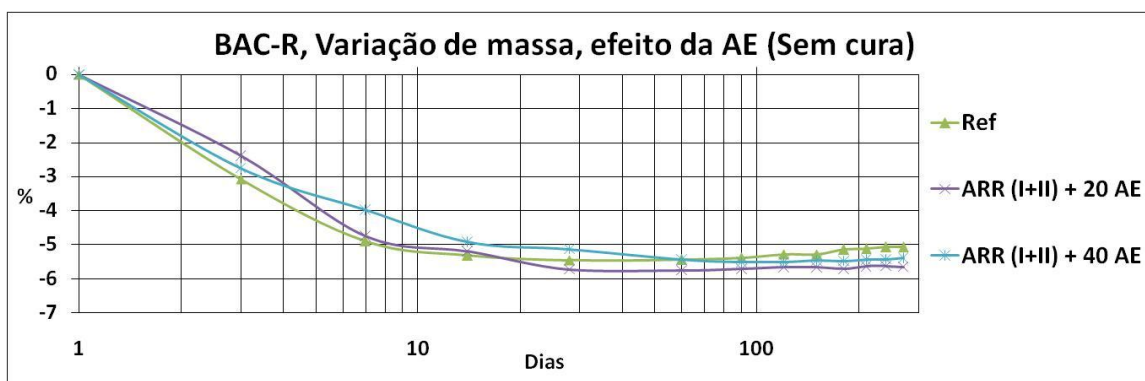


Figura 84 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito da AE nos provetes sem cura

Quando comparado o efeito da utilização dos ARR e da AE (Figura 85) constata-se que, efectivamente, a AE provoca uma diminuição da perda de massa.

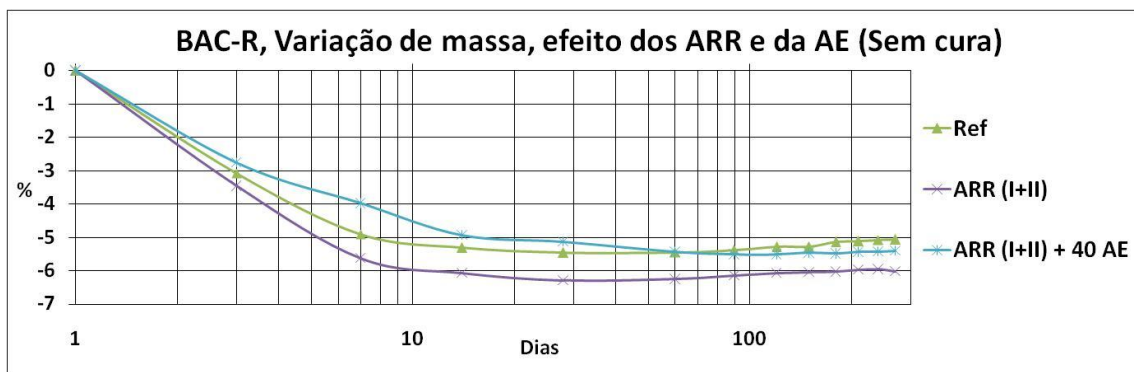


Figura 85 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE nos provetes sem cura

No que respeita à variação de massa nos provetes sujeitos a um período de cura de 7 dias e, concretamente, tendo em conta a influência dos ARR (Figura 86), verifica-se um aumento semelhante para todas as amassaduras que incorporam os ARR, sendo o efeito dos ARR praticamente nulo nas primeiras idades, devido à maior cura, mas já observável ao longo do tempo.

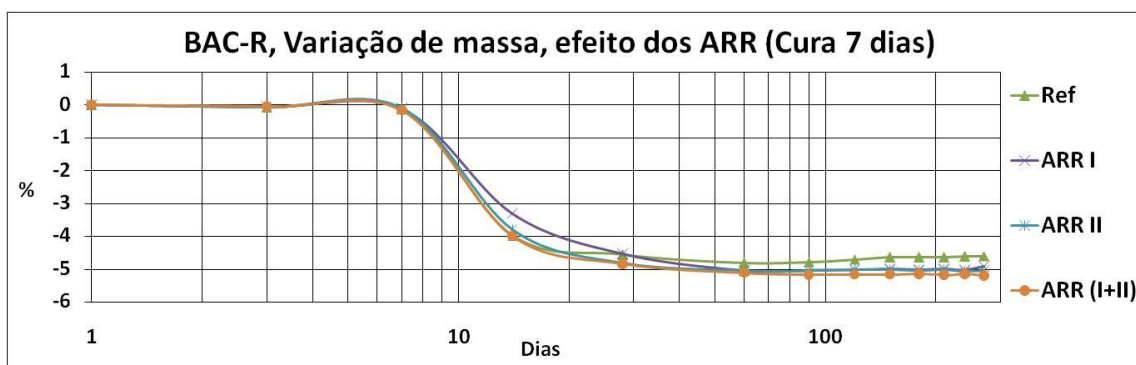


Figura 86 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito dos ARR nos provetes com cura de 7 dias

O uso das AE provoca uma menor perda de massa até cerca dos 60 dias. Para idades superiores, verifica-se um aumento na perda de massa (Figura 87). O que corrobora as observações anteriores, no que se refere ao efeito da hidratação da AE.

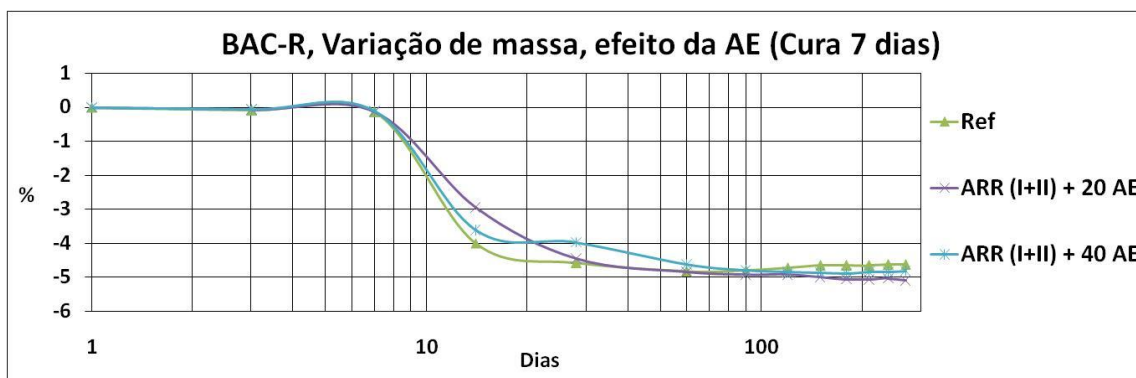


Figura 87 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito da AE nos provetes com cura de 7 dias

Esta evidência é bem ilustrada na Figura 88, em que se verifica que o uso da AE provoca uma diminuição da perda de massa a idades mais jovens, efeito que vai diminuindo ao longo do tempo.

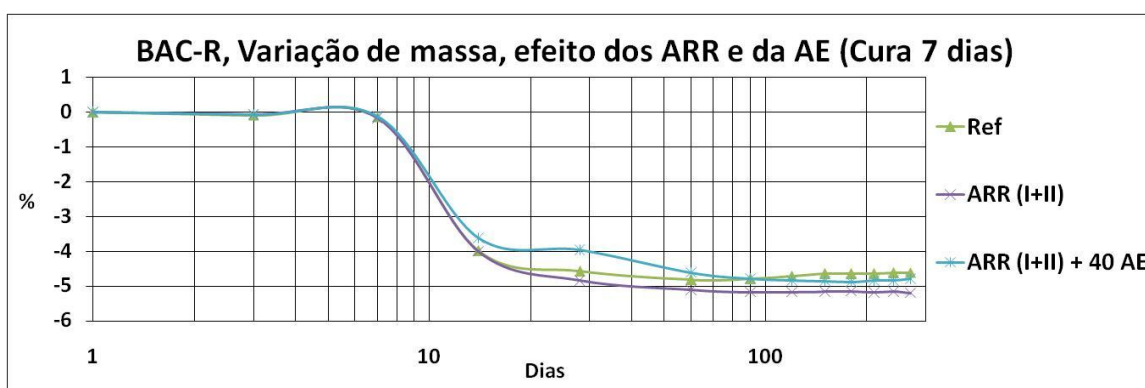


Figura 88 - Variação de massa da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE nos provetes com cura de 7 dias

5.2.1.2 Variação da dimensão longitudinal

5.2.1.2.1 *Apresentação de resultados*

Os gráficos das figuras seguintes (Figura 89 à Figura 94) apresentam a variação da dimensão longitudinal dos provetes das composições: Ref; ARR I; ARR II; ARR (I+II); ARR I(I+II) + 20 AE e ARR (I+II) + 40 AE, registada até aos 9 meses de idade. Traduzem a média do conjunto das medições. De modo a facilitar a análise dos resultados, incluindo a dispersão inerente ao método de ensaio utilizado, considerou-se oportuno apresentar a média do conjunto e a média do conjunto acrescida e diminuída de um desvio padrão (a traço interrompido).

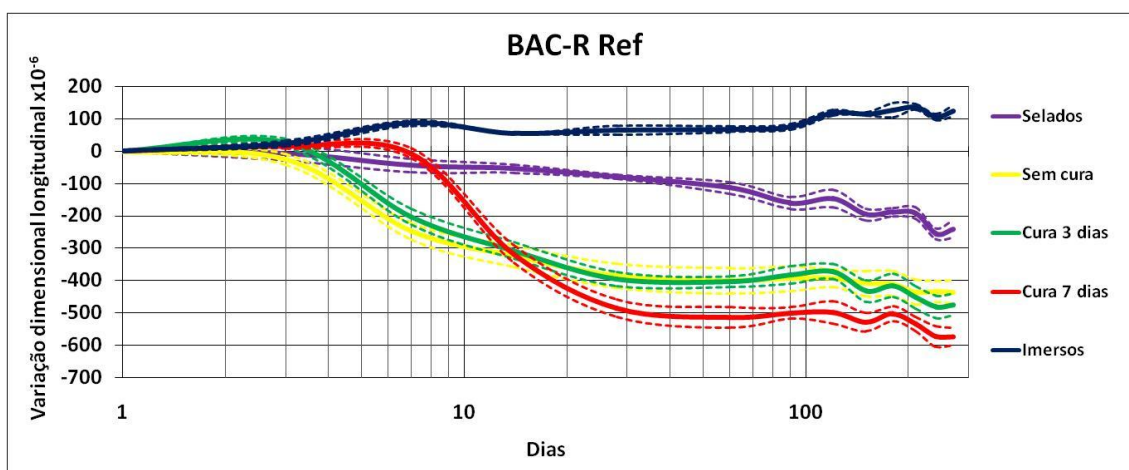


Figura 89 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R Ref

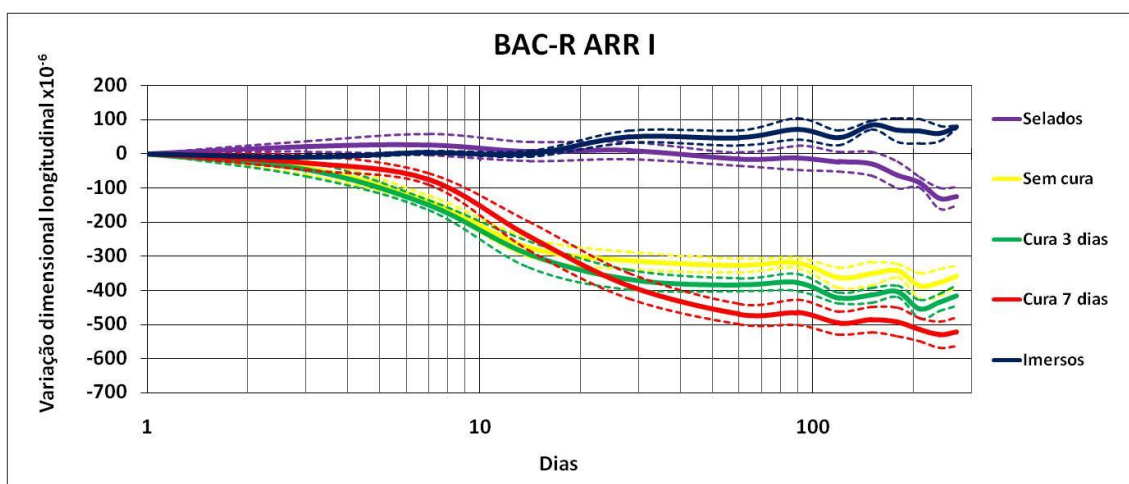


Figura 90 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR I

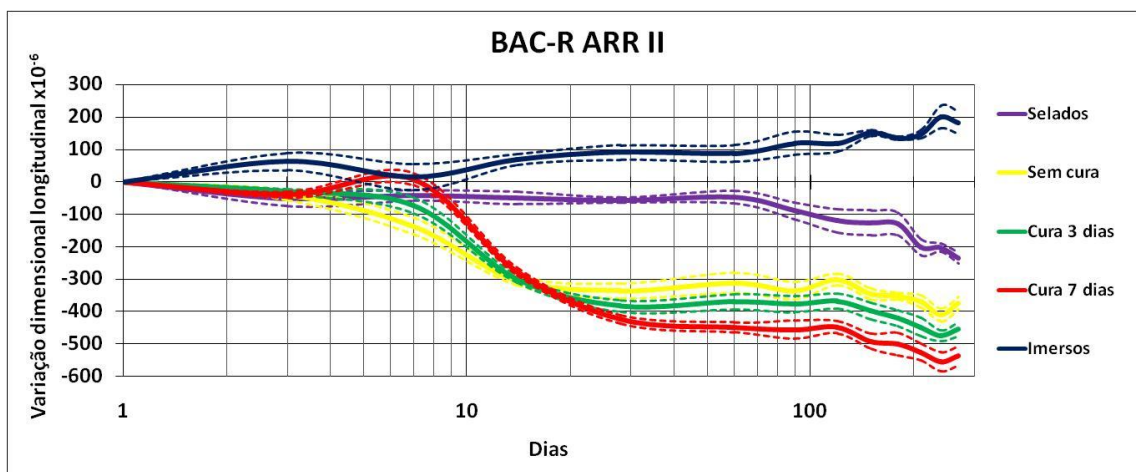


Figura 91 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR II

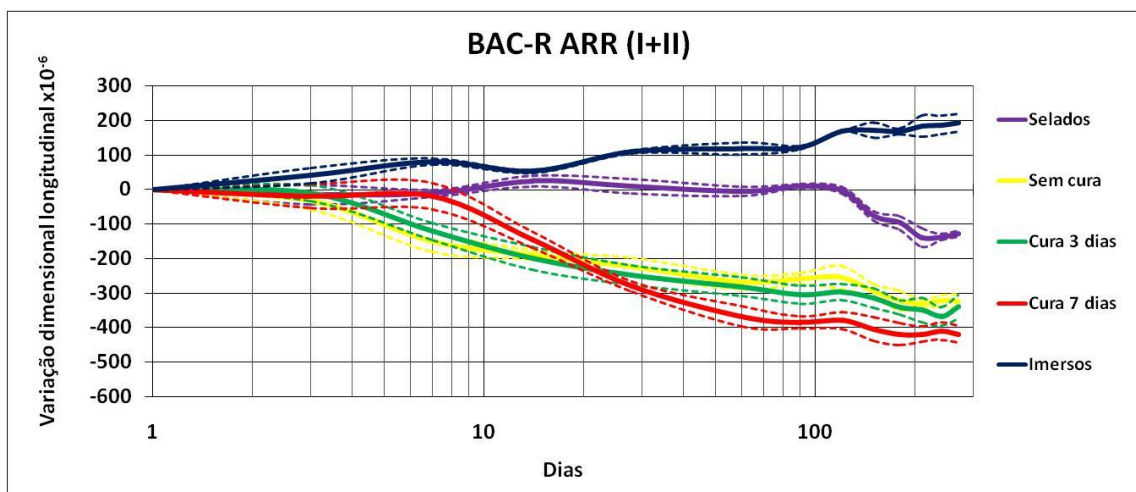


Figura 92 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR (I+II)

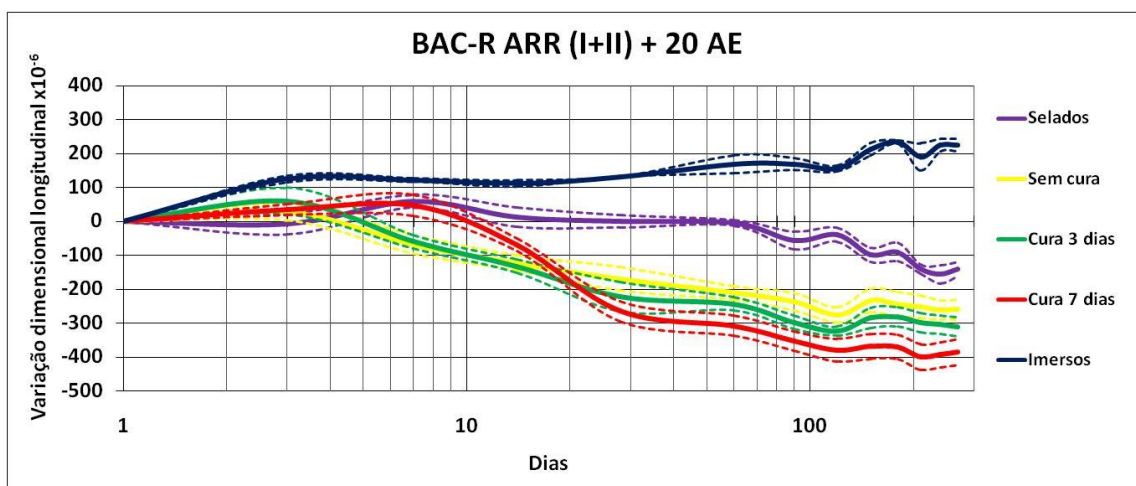


Figura 93 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR (I+II) + 20 AE

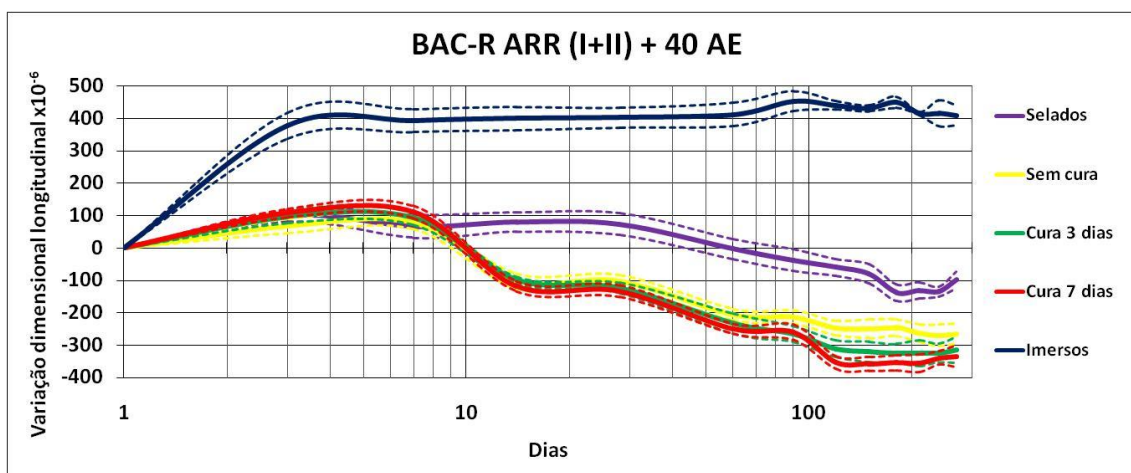


Figura 94 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R ARR (I+II) + 40 AE

5.2.1.2.2 Análise de resultados

Todos os provetes sujeitos à imersão em água registaram expansões. Na Figura 95 é comparada a expansão dos provetes imersos referentes às amassaduras contendo os ARR.

As amassaduras contendo o ARR II revelam uma tendência em apresentarem maiores expansões que a amassadura de referência. Para a amassadura contendo o ARR I verifica-se um efeito contrário. No entanto, tendo em conta a dispersão de resultados, são observações que não se diferenciam significativamente da composição de referência.

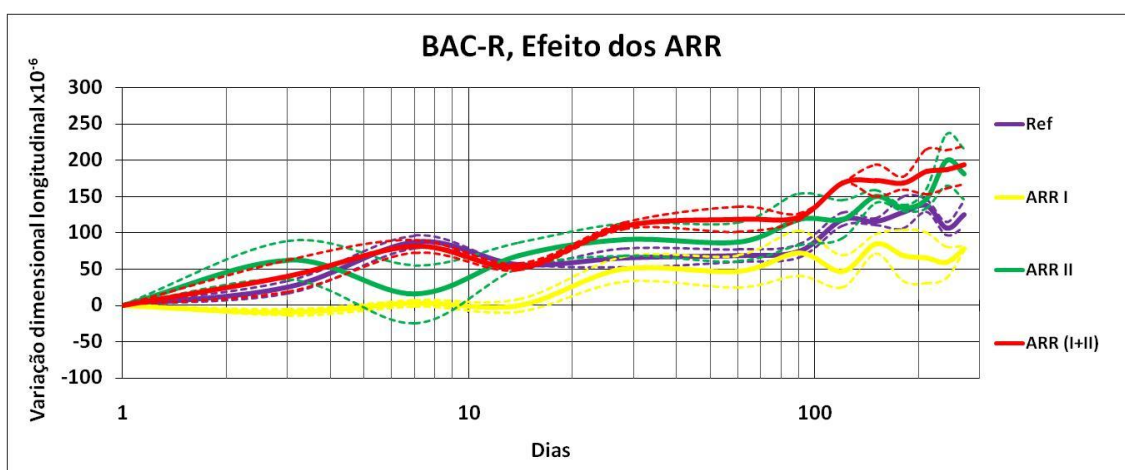


Figura 95 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR nos provetes imersos

A Figura 96 permite analisar o efeito da AE na expansão registada nos provetes imersos. É possível visualizar uma expansão significativa nas primeiras idades, que estará relacionada com a formação de hidróxido de cálcio ou, eventualmente, etringite. A utilização de 40 kg/m^3 de AE provocou uma expansão nas primeiras idades aproximadamente igual a 400×10^{-6} . Esse valor elevado condiciona a utilização das AE, devido a prováveis efeitos nocivos que uma estrutura pode apresentar na presença de humidades elevadas.

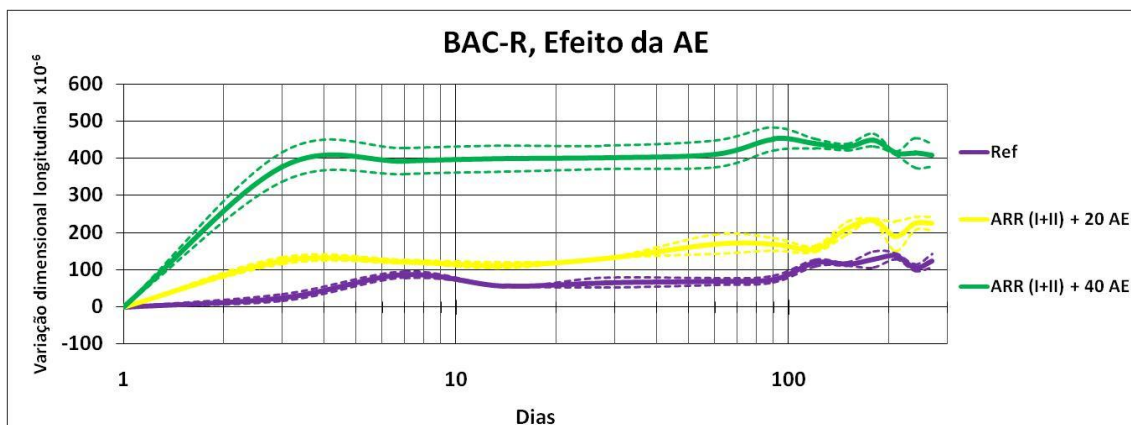


Figura 96 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito da AE nos provetes imersos

No gráfico da Figura 97 é comparada a expansão dos provetes registada na composição contendo os dois ARR com os provetes da composição contendo os dois ARR e 40 kg/m^3 da AE. Nesta figura, é bem observável o efeito da AE nas primeiras idades, mas a partir daí o comportamento das diferentes misturas não se diferencia significativamente.

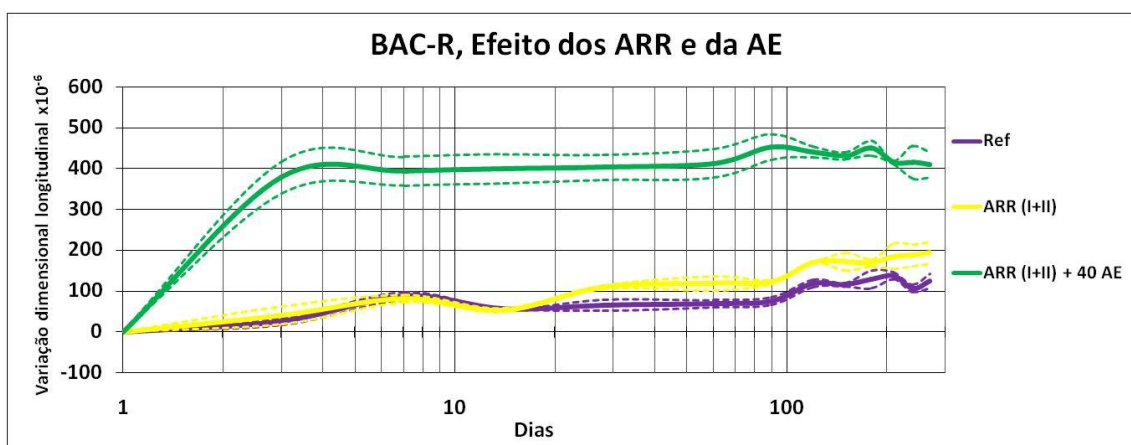


Figura 97 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE nos provetes imersos

Analisando agora o efeito dos ARR na retracção autógena (Figura 98), ou seja, nos provetes conservados sem trocas de humidades, verifica-se uma tendência genérica de redução da retracção para ambos os ARR. Contudo, a utilização do ARR I, individualmente ou em conjunto, manifesta-se mais eficiente na redução desta retracção, o que se coaduna com a maior capacidade deste adjuvante para reduzir a tensão superficial da solução intersticial [1].

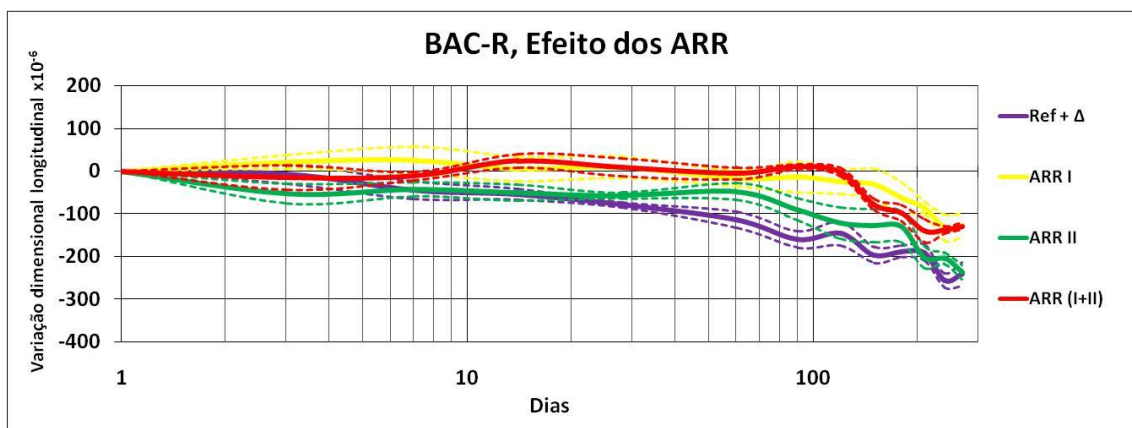


Figura 98 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR na retracção autógena

No gráfico da Figura 99, visualiza-se o efeito da utilização dos ARR em simultâneo com a AE, na redução da retracção autógena. As dosagens de 20 e 40 kg de AE por m^3 de betão apresentam tendências de redução semelhantes, evidenciando que o efeito expansivo inicial é reduzido na ausência de água exterior e que esse efeito se dilui ao longo do tempo, para dosagens superiores a 20 kg/m^3 .

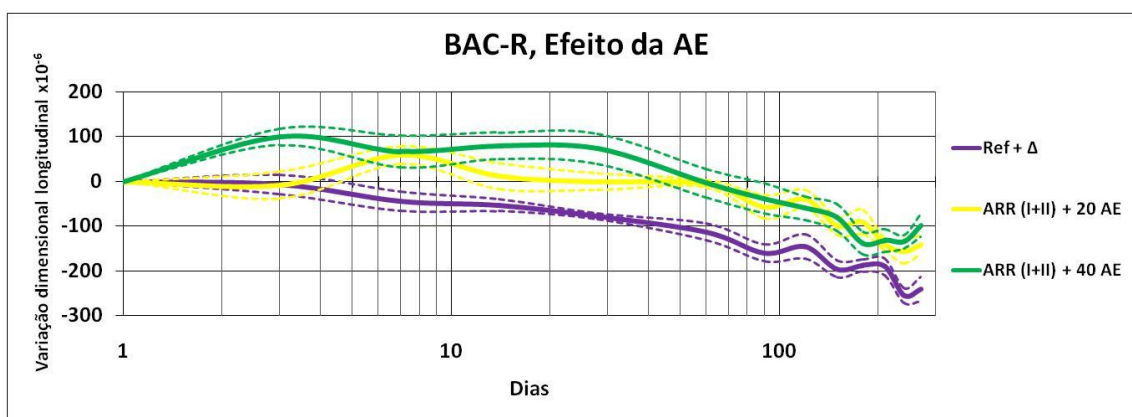


Figura 99- Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito da AE na retracção autógena

A Figura 100 apresenta a evolução da retracção autogénea das composições com os ARR e com os ARR juntamente com a AE face à composição de referência. Observa-se um efeito a longo prazo idêntico, no entanto a evolução nas primeiras idades é diferente. A composição que contém a AE apresenta uma expansão superior nas primeiras idades, verificando-se posteriormente um aumento da retracção autogénea, mas semelhante à da composição de referência. A composição que contém os dois ARR apresenta um retardamento na evolução da retracção autogénea, sendo que a 9 meses não se regista benefício pelo uso da AE face à eficiência dos ARR.

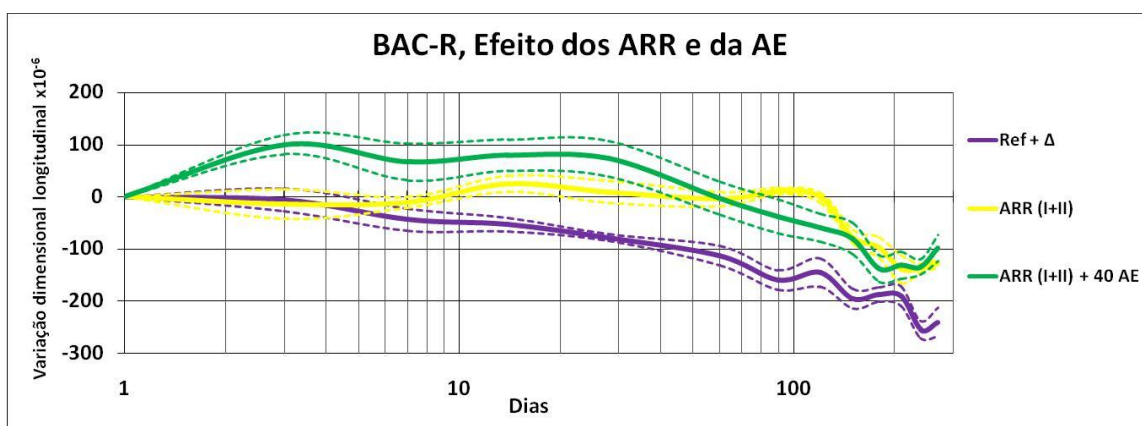


Figura 100 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE na retracção autogénea

Já no que respeita aos provetes não submetidos à cura, a Figura 101 apresenta o efeito dos ARR na redução da retracção total. Verifica-se uma eficácia semelhante nos dois produtos quando utilizados individualmente, e um incremento no desempenho quando utilizados em simultâneo, confirmando as observações de [1].

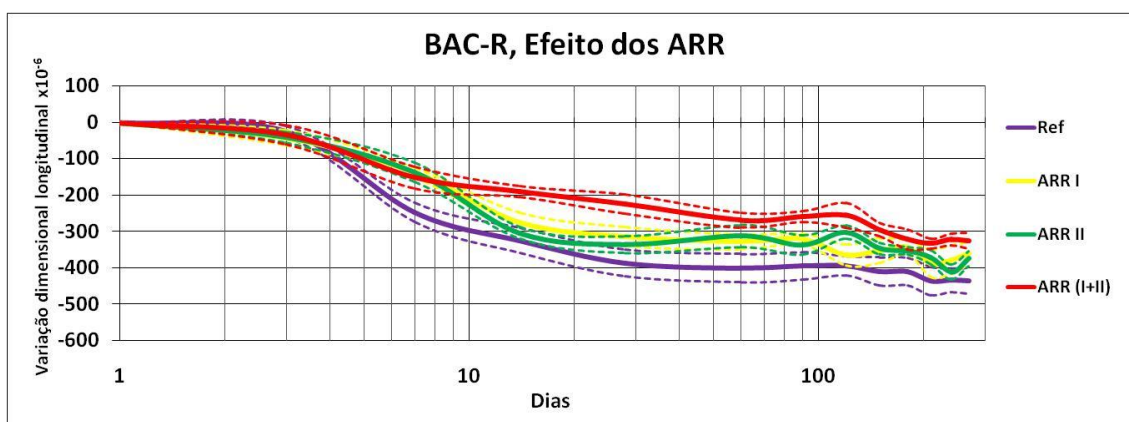


Figura 101 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR na retracção total dos provetes sem cura

No que respeita ao efeito da AE nos provetes sem cura (Figura 102), observa-se que a utilização de 20 ou 40 kg/m³ apresenta uma tendência de redução da retracção total a longo prazo idêntica. Ambas composições apresentam expansão inicial. Também nestas observações, é notável a ausência de benefício do incremento da AE, para além dos 20 kg/m³, a longo prazo.

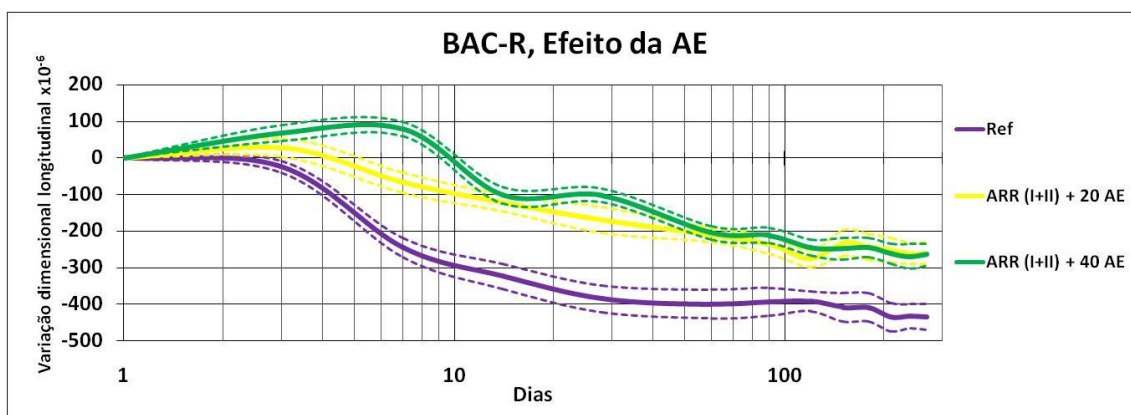


Figura 102 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito da AE na retracção total dos provetes sem cura

Quando comparado o efeito da utilização dos ARR e dos ARR juntamente com a AE nos provetes não submetidos à cura (Figura 103), observam-se pequenos ganhos na redução da retracção total a longo prazo com o uso da AE, mas o benefício a curto prazo é evidente.

Conjugando estas observações com as mostradas na Figura 87, conclui-se que, na ausência de água, o uso da AE nas primeiras idades é muito eficaz, sendo a longo prazo menos interessante.

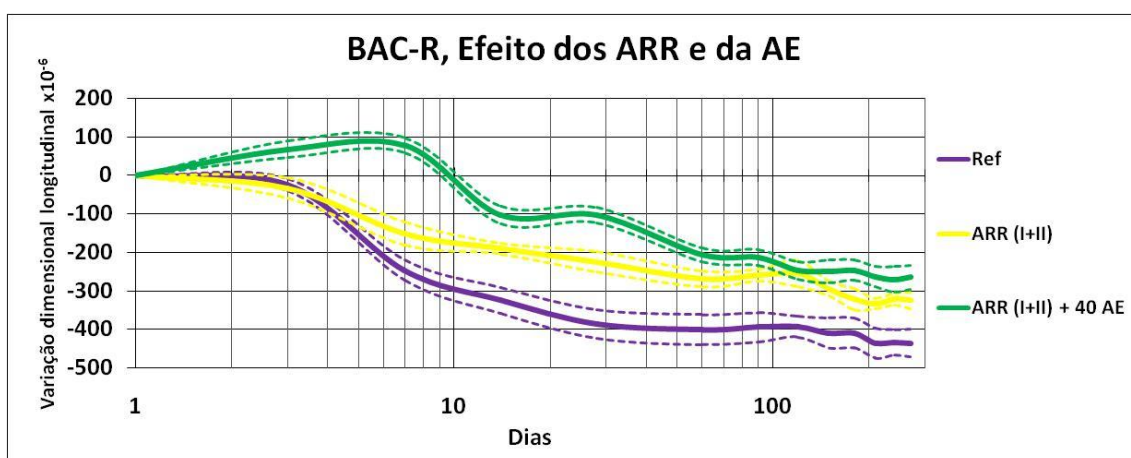


Figura 103 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE na retracção total dos provetes sem cura

No que respeita ao efeito da cura na retracção total, os gráficos das várias figuras apresentadas anteriormente em 5.2.1.2.1, mostram nitidamente que o efeito de cura de 3 e principalmente de 7 dias aumenta a retracção total. Este efeito é perceptível em todas as amassaduras realizadas (compare-se a Figura 101 com a Figura 104) e traduz-se na maior parte dos casos estudados numa diferença na retracção total superior a 100×10^{-6} ao fim de 9 meses de idade. Na secção 5.2.1.5, é analisada a estrutura porosa de provetes sujeitos a diferentes períodos de cura.

Em relação aos provetes submetidos a uma cura de 7 dias, verifica-se através do gráfico da Figura 104, referente à acção dos ARR na retracção total, que a acção individual de cada ARR é reduzida. No entanto, a acção conjunta dos dois ARR é significativa.

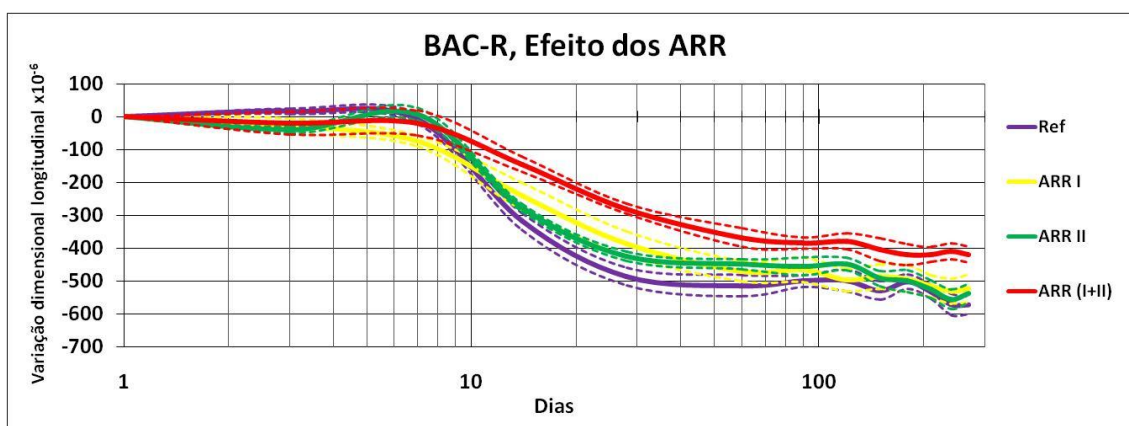


Figura 104 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR na retracção total dos provetes com cura de 7 dias

No que respeita à acção das diferentes dosagens de AE na redução da retracção total (Figura 105), observa-se um efeito semelhante a partir dos 120 dias, sendo distinto o efeito das duas dosagens usadas nas primeiras idades.

Comparando a Figura 105 (cura 7 dias) com a Figura 102 (sem cura), nota-se um comportamento ondulante, aparentemente irregular, nas curvas relativas às misturas com 40 kg/m^3 de AE, no entanto o padrão de comportamento dessas misturas é semelhante para as duas curvas. Nos primeiros dias, a expansão é superior com a cura de 7 dias, certamente devido à maior disponibilidade de água. No entanto, com a exposição ao ar, o incremento da retracção entre os 7 e os 14 dias foi maior, o que concorda com uma estrutura porosa mais refinada. Posteriormente, a curva correspondente à cura de 7 dias sugere ser uma ampliação da curva correspondente aos provetes sem cura, o que é coerente com os resultados obtidos.

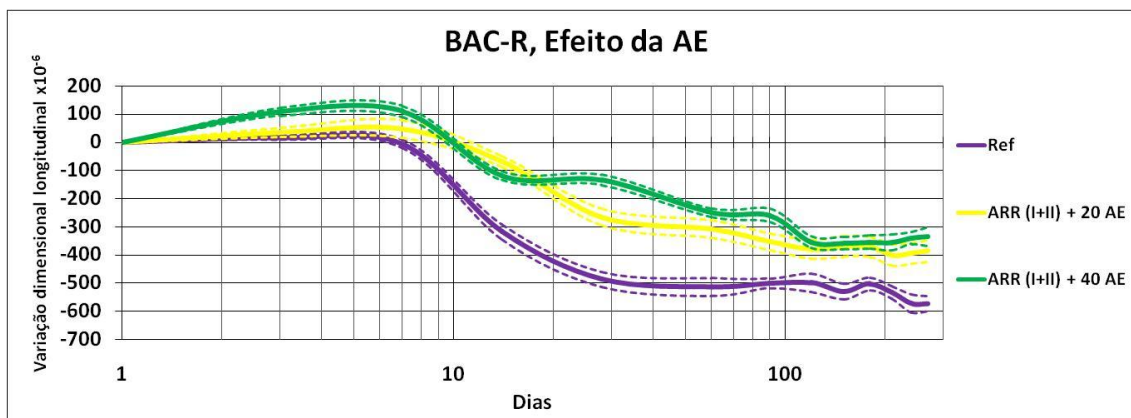


Figura 105 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito da AE na retracção total dos provetes com cura de 7 dias

Quando comparada a acção dos ARR e dos ARR juntamente com a AE na redução da retracção total nos provetes submetidos a uma cura de 7 dias (Figura 106), observa-se um ligeiro ganho relativo à utilização da AE a longo prazo. Inicialmente, a AE provoca uma expansão elevada, superior a 100×10^{-6} .

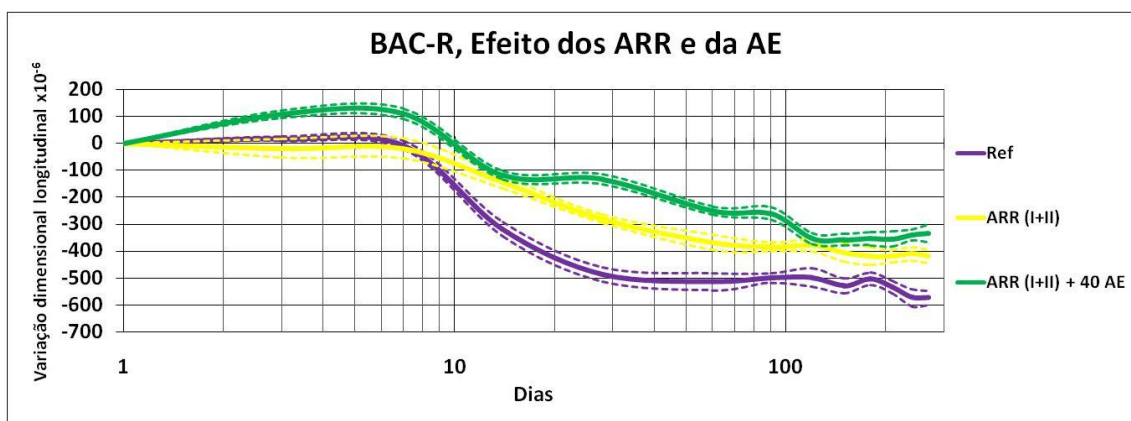


Figura 106 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC-R, efeito dos ARR e da AE na retracção total dos provetes com cura de 7 dias

5.2.1.3 Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco

Para a classe BAC-R foram, executados ensaios de determinação da variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as variantes BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II). Nesta série de ensaios, o material foi crivado no peneiro 4, sendo portanto ensaios relativos a argamassas.

Os gráficos da Figura 107 e Figura 108 apresentam as variações dimensionais longitudinais iniciais.

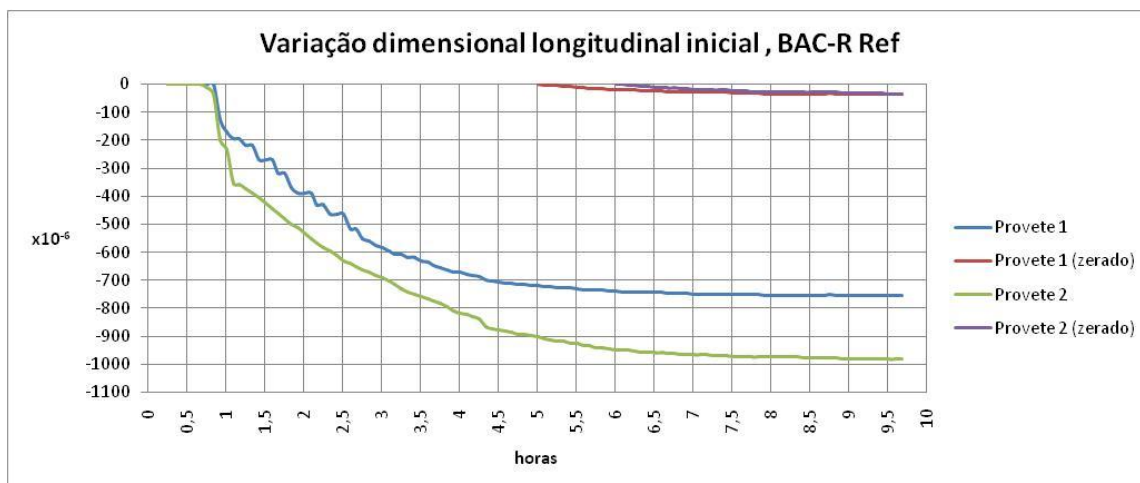


Figura 107 - Varição dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC-R Ref

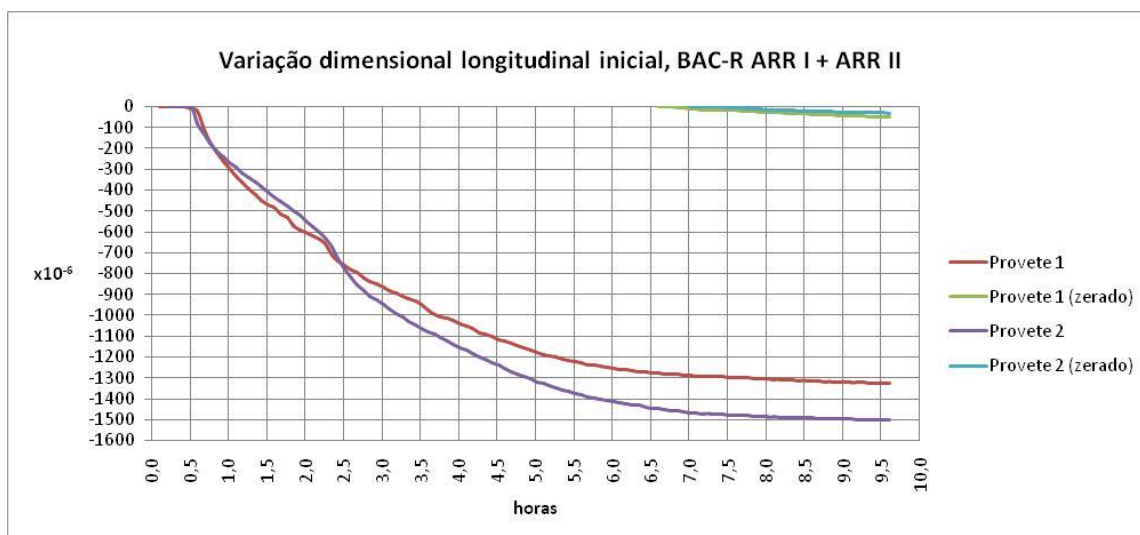


Figura 108 - Varição dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC-R ARR (I+II)

Com base nos gráficos das figuras anteriores foi possível determinar o tempo zero de cada composição. O procedimento adoptado constou em ajustar o tempo inicial de cada provete de modo a que a sobreposição dos novos valores da retracção autogénea, zerados nesses tempos, apresentem comportamentos idênticos. Os valores determinados são presentes na Tabela 23 e evidenciam o efeito retardador dos ARR.

Tabela 23 - Tempo zero das composições BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II)

Composição	T0 (horas)
BAC-R Ref	5,6
BAC-R ARR (I+II)	6,9

No gráfico da Figura 109 seguinte, apresenta-se a variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as composições BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II), zerados em T0 e 24 h.

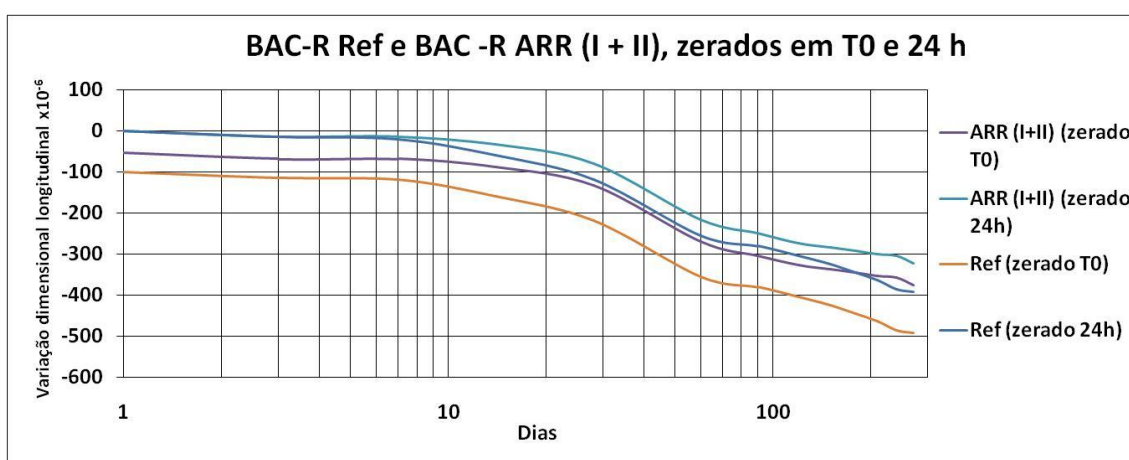


Figura 109 - Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as composições BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II), zerados em T0 e 24 h

Nas medições efectuadas com provetes convencionais, em que se efectuaram os primeiros registos ao fim de 24 horas, existem para as amassaduras em causa erros por omissão na avaliação da deformação longitudinal de aproximadamente 100×10^{-6} para a composição BAC-R Ref e 50×10^{-6} para a composição BAC-R ARR (I+II). De referir que não leva em conta a influencia do agregado grosso.

No gráfico da Figura 110, observa-se a influência da presença do agregado grosso na retracção autogénea nas composições BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II), registada a partir das 24 horas.

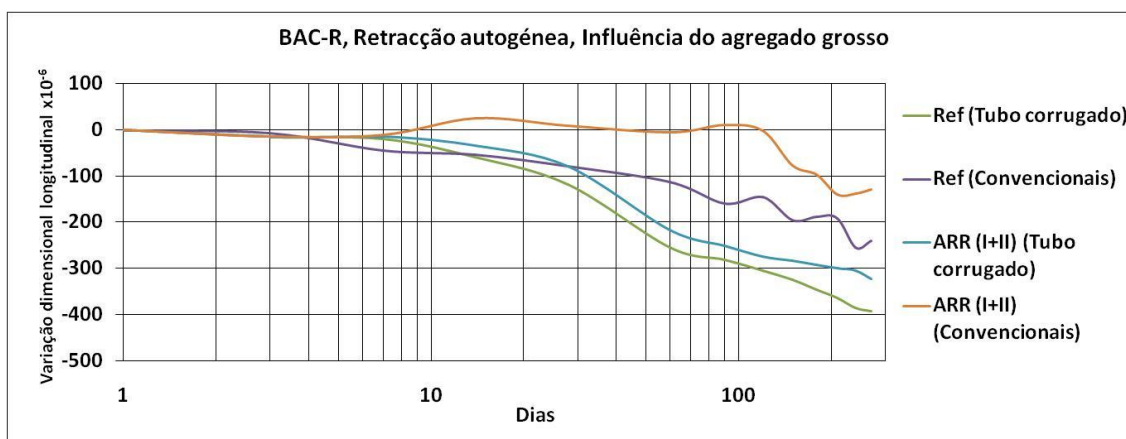


Figura 110 - Variação dimensional longitudinal para as composições BAC-R Ref e BAC-R ARR (I+II), zerados às 24 h (Método convencional e Tubos corrugados) – Influência do agregado grosso

5.2.1.4 Resistência à compressão

O gráfico da Figura 111 apresenta a resistência para as composições: Ref; ARR I; ARR II; ARR (I+II); ARR (I+II) + 20AE e ARR (I+II) + 40AE, obtidas a partir de prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm, até aos 9 meses de idade. Estes gráficos traduzem a média do conjunto de provetes. Os valores individuais respeitaram o critério de aceitação de resultados presente na NP EN 196-1:2006 [199].

Trata-se de provetes não sujeitos a cura após desmoldagem.

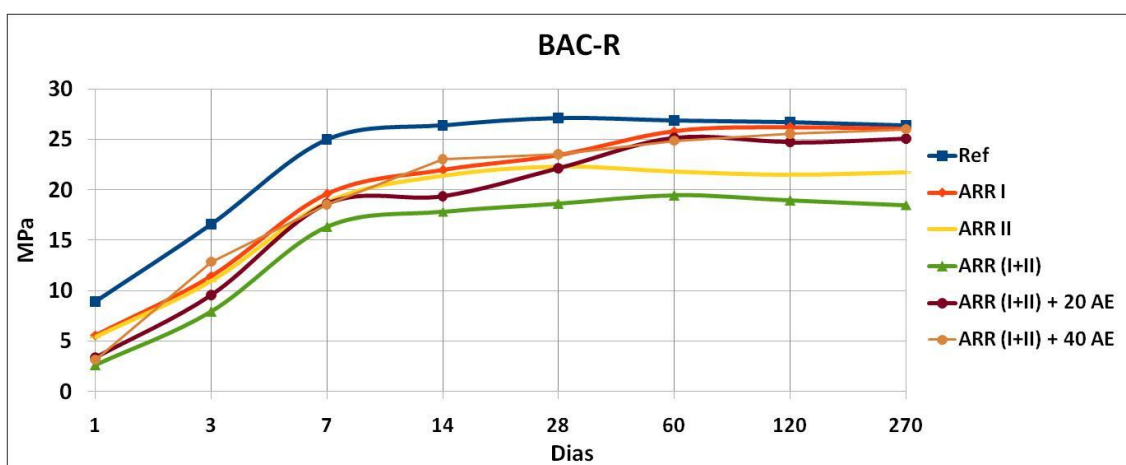


Figura 111 - Resistência à compressão das composições BAC-R

Todas as composições que contêm ARR apresentam menores resistências nas primeiras idades. As que não contêm AE e utilizaram o ARR II mantêm a mesma tendência.

As composições que utilizam as AE e o ARR I apresentam valores da resistência à compressão, ao fim de 9 meses de idade, idênticos aos observados na composição de referência.

Estes resultados evidenciam o efeito retardador dos ARR, indicando os valores a longo prazo que pode existir também efeito negativo dos ARR não associado à velocidade de hidratação.

5.2.1.5 Porosidade

Anteriormente (Secção 5.2.1.2) foi observado que os provetes com cura de 3 e 7 dias apresentaram retracção mais elevada do que os provetes sem cura. Como os resultados apontam no sentido contrário do que se recomenda como boas práticas de construção, considerou-se importante avaliar se este incremento da retracção com o tempo de cura estaria relacionado com o refinamento da porosidade.

Os gráficos da Figura 112 e Figura 113 apresentam a dimensão dos poros dos provetes 527 e 543 numa determinada secção, através da técnica de intrusão de mercúrio. Foram ensaiadas 9 secções de cada provete. A totalidade dos resultados pode ser consultada no Anexo II.

Ambos os provetes pertencem à amassadura BAC-R ARR II. O provete 527 não esteve sujeito a um período de cura adicional além do inerente até à desmoldagem, enquanto o provete 543 esteve sujeito a um período de cura adicional de 7 dias.

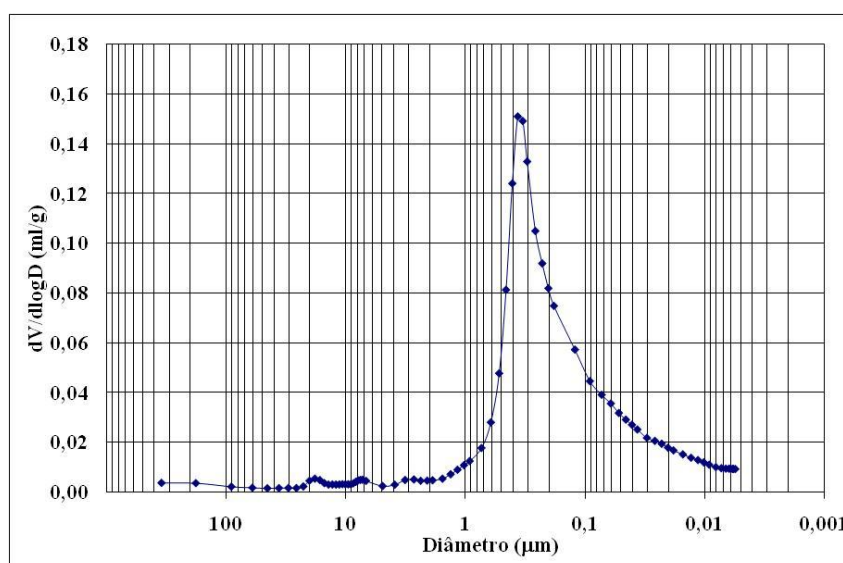


Figura 112 - Diâmetro dos poros do provete 527, secção 1. (BAC-R ARR II)

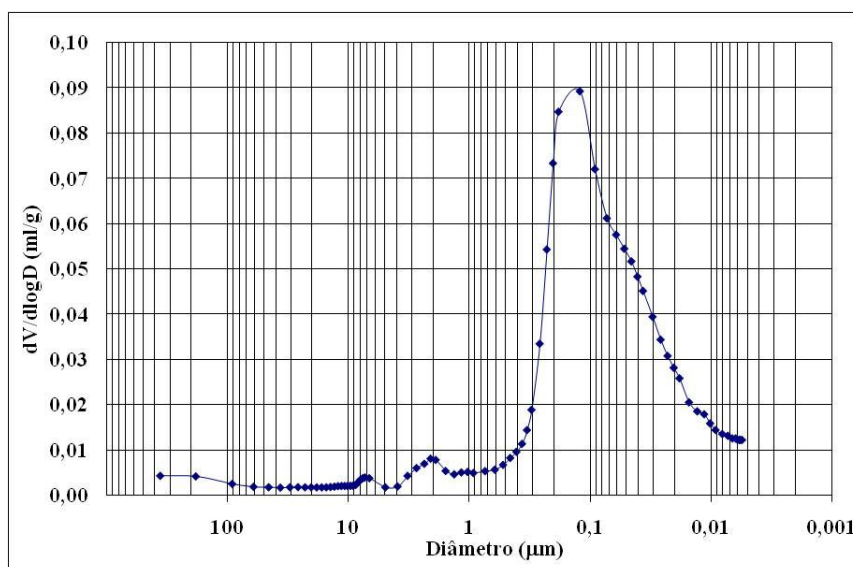


Figura 113 - Diâmetro dos poros do provete 543, secção 5. (BAC-R ARR II)

Analisando as figuras anteriores, observa-se que o diâmetro médio dos poros do provete submetido à cura adicional de 7 dias é inferior, situando-se entre 0,1 e 0,2 μm . O gráfico revela a existência de poros de menores dimensões, o que é concordante com a ocorrência de uma maior retracção. A título de exemplo, aplique-se a Eq. 3.17 e veja-se a diferença na tensão capilar (considerando poro cilindro ideal) para os dois raios médios, considerando molhagem perfeita ($\theta=0^\circ$) e uma tensão superficial do líquido intersticial de $60 \times 10^{-3} \text{ N/m}$:

$$dP_{527} = \frac{2\gamma\cos\theta}{r} = \frac{2 \times 60}{0,35 \times 10^{-6}} = 0,34 \text{ MPa}$$

$$dP_{543} = \frac{2\gamma\cos\theta}{r} = \frac{2 \times 60}{0,15 \times 10^{-6}} = 0,80 \text{ MPa}$$

A diferença de pressão mais que duplica de um caso para o outro.

5.2.2 Apresentação e análise de resultados referentes à composição BAC±R

5.2.2.1 Variação de massa

5.2.2.1.1 Apresentação de resultados

Os gráficos das figuras seguintes (Figura 114 à Figura 119) apresentam a variação de massa para as composições: Ref; ARR I; ARR II; ARR (I+II); ARR (I+II) + 20AE e ARR

(I+II) + 30AE, registada até aos 9 meses de idade. Traduzem a média do conjunto dos provetes.

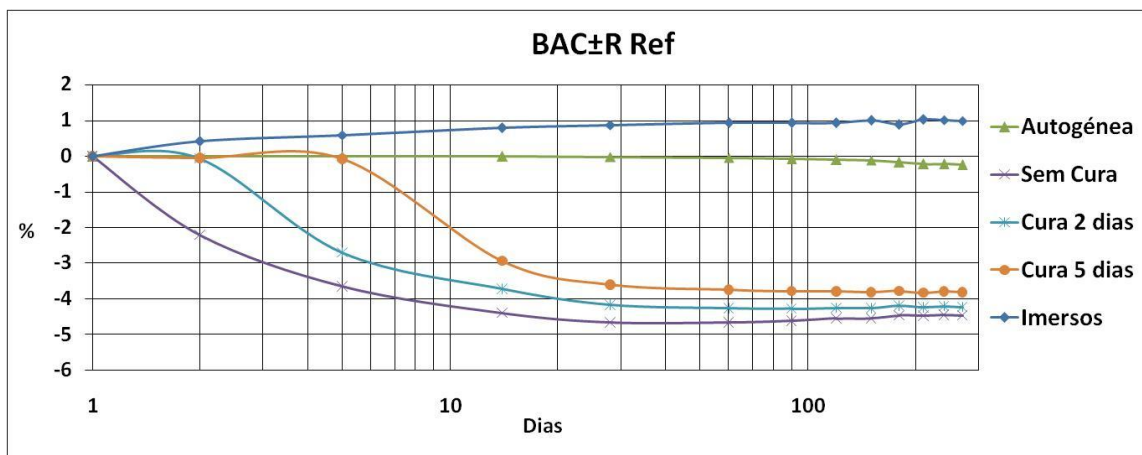


Figura 114 - Variação de massa da composição BAC±R Ref

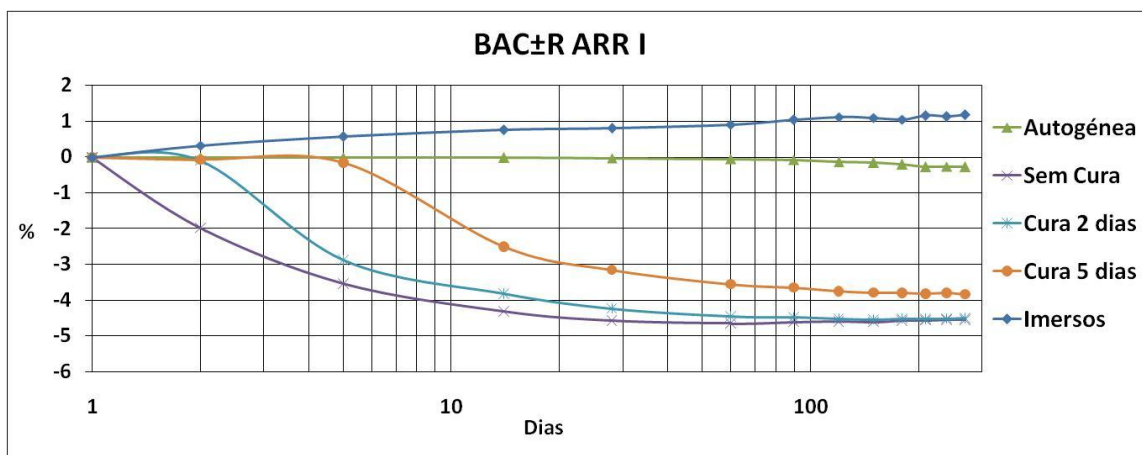


Figura 115 - Variação de massa da composição BAC±R ARR I

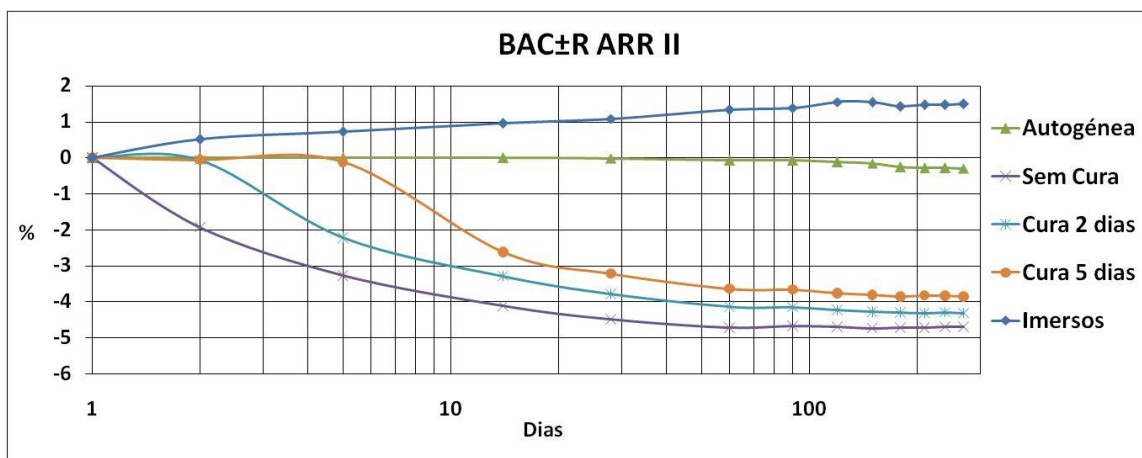


Figura 116 - Variação de massa da composição BAC±R ARR II

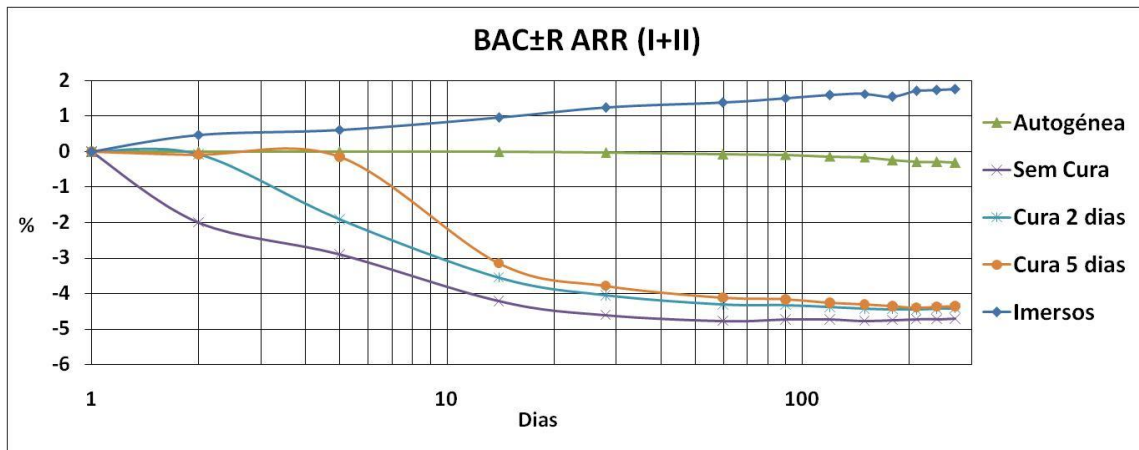


Figura 117 - Variação de massa da composição BAC±R ARR (I+II)

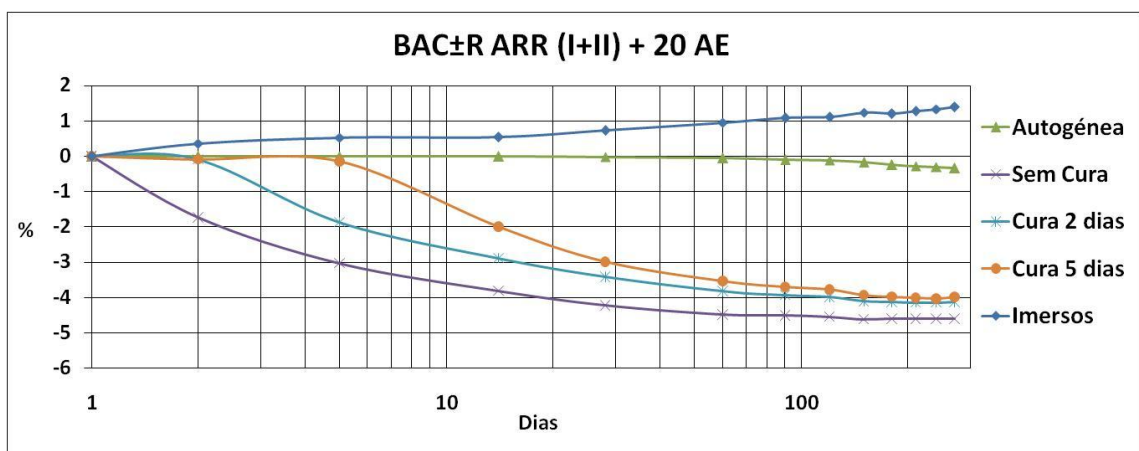


Figura 118 - Variação de massa da composição BAC±R ARR (I+II) + 20 AE

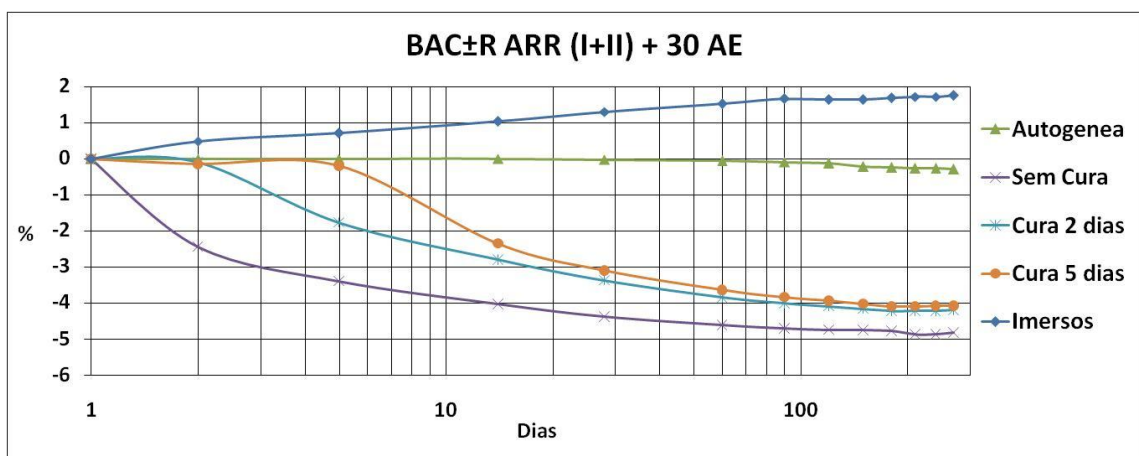


Figura 119 - Variação de massa da composição BAC±R ARR (I+II) + 30 AE

5.2.2.1.2 Análise de resultados

Os ensaios de determinação da variação de massa registaram um valor de desvio padrão médio, considerando todas as amassaduras, de 0,10%. Assim, nos gráficos relativos à variação de massa das várias amassaduras são apresentados os valores médios sendo considerada desprezável a dispersão de resultados.

Os provetes selados, utilizados para medição da retracção autógena, registaram uma perda de massa média, ao fim de 9 meses, de 0,29%. Este valor é considerado baixo, e garante que a parcela correspondente à variação dimensional apresentada para os provetes selados no item 5.2.2.2 corresponde essencialmente à retracção autógena. Globalmente, verifica-se que o processo de cura limita a perda de massa por secagem.

Analisando em pormenor o ganho de massa dos provetes imersos das várias amassaduras (Figura 120), observa-se que os ARR e a AE incrementam a respectiva massa. Os resultados afiguram-se concordantes com os apresentados para a classe BAC-R, não se notando diferenças significativas.

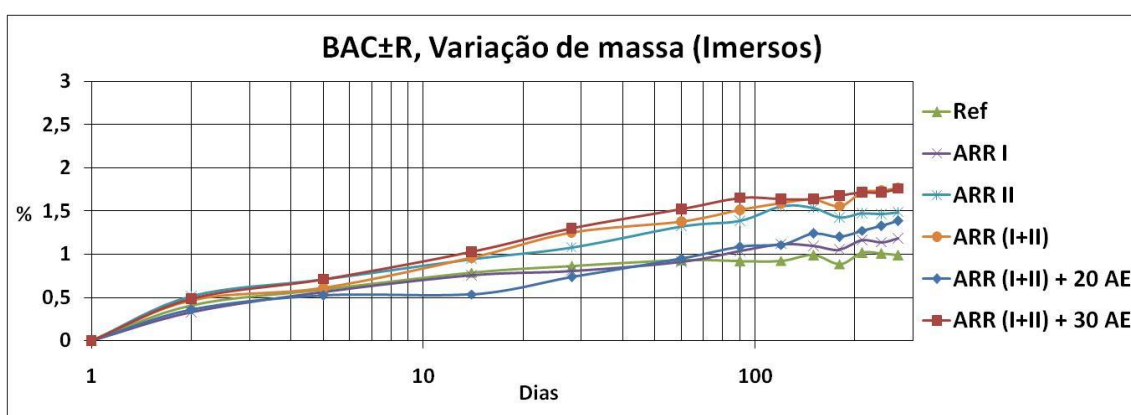


Figura 120 - Variação de massa dos vários provetes imersos da classe BAC±R

No que respeita à análise concreta dos provetes não submetidos a um período de cura, apresenta-se na Figura 121 a influência dos ARR. Não se observa diferenciação devido ao uso dos produtos.

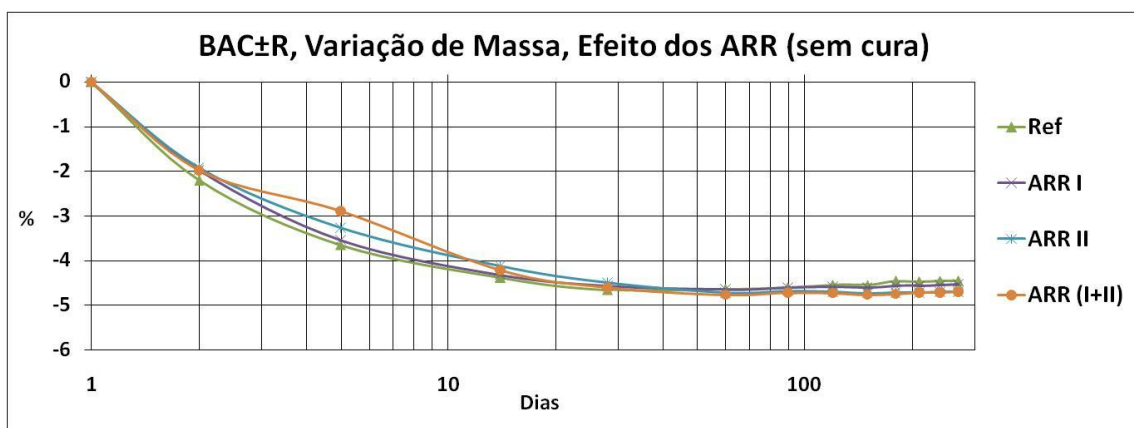


Figura 121 - Variação de massa, influência dos ARR nos provetes não submetidos à cura

Já no que respeita ao uso da AE (Figura 122), as diferenças são insignificantes, denotando-se apenas nas composições com AE uma maior hidratação nas primeiras idades, associada à presença do agente expansivo.

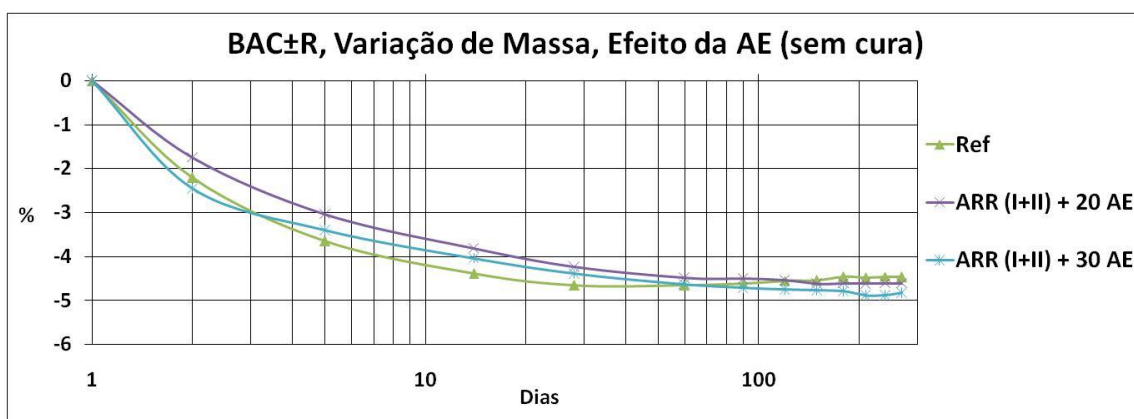


Figura 122 - Variação de massa, influência da AE nos provetes não submetidos à cura

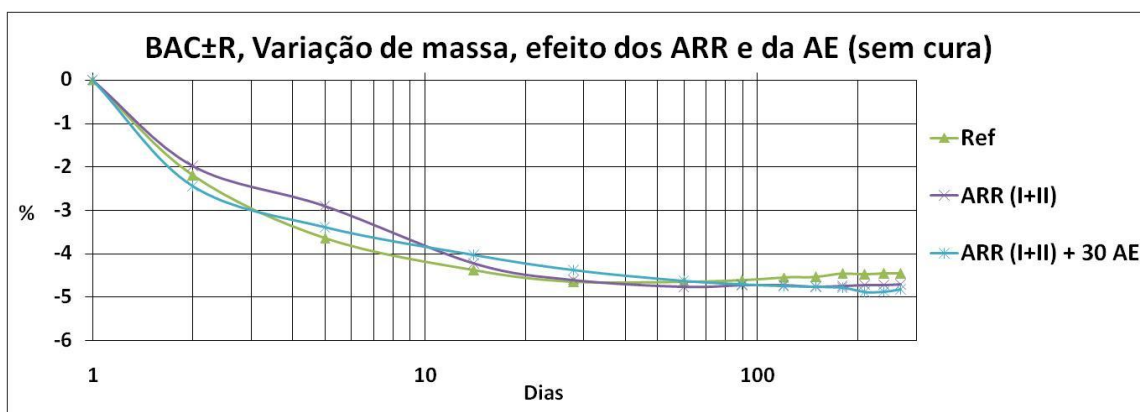


Figura 123 - Variação de massa, influência dos ARR e da AE nos provetes não submetidos à cura

Comparando o efeito dos ARR e da AE nos provetes sem cura (Figura 123), observa-se um comportamento idêntico.

Em relação à análise concreta dos provetes submetidos a um período de cura de 5 dias apresenta-se a influência dos ARR e da AE na Figura 124 e Figura 125, respectivamente.

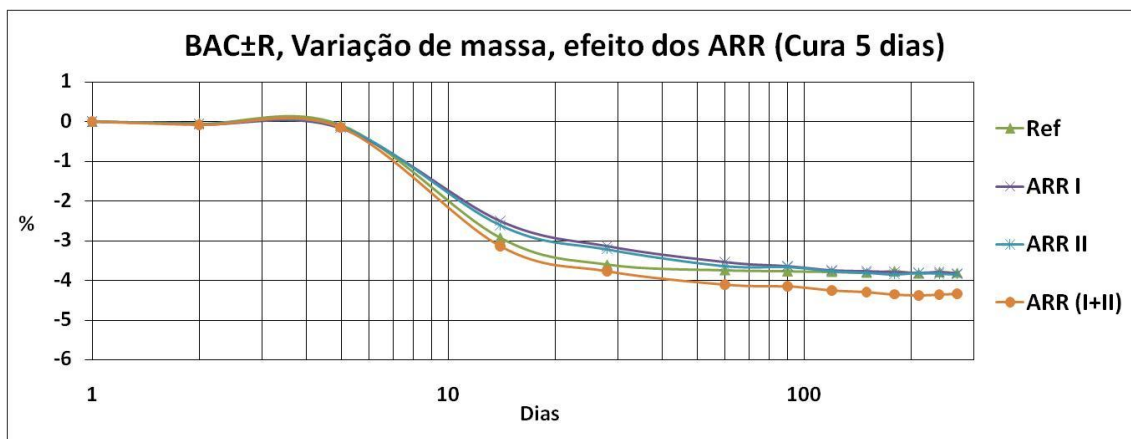


Figura 124 - Variação de massa, influência dos ARR nos provetes submetidos a uma cura de 5 dias

Observa-se que os ARR, quando utilizados individualmente, retardam a perda de massa até cerca dos 60 dias, apresentando posteriormente um comportamento idêntico à composição de referência. Quando utilizados em simultâneo, os ARR aumentam a perda de massa.

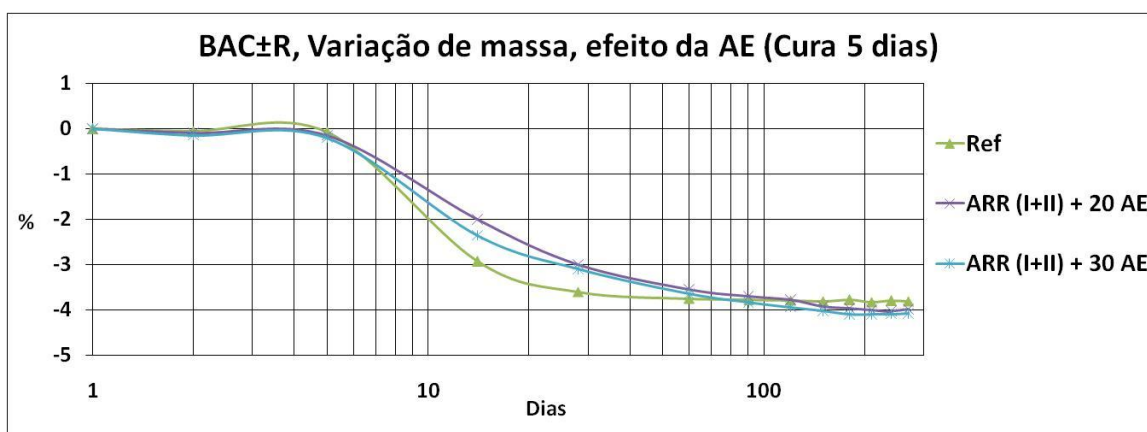


Figura 125 - Variação de massa, influência da AE nos provetes submetidos a uma cura de 5 dias

Analisando a Figura 125, observa-se que a utilização dos ARR e da AE provoca um retardamento na perda de massa até cerca dos 60 dias. Para idades superiores verifica-se um comportamento quase idêntico à composição de referência.

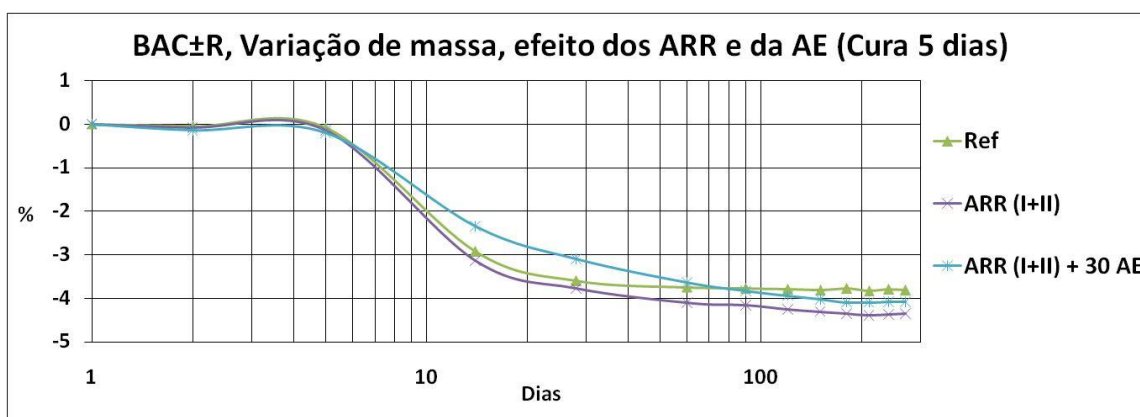


Figura 126 - Variação de massa, influência dos ARR e da AE nos provetes submetidos a uma cura de 5 dias

Quando comparada a acção dos ARR com os ARR e AE, Figura 126, observa-se que a utilização dos dois ARR aumentam a perda de massa.

Globalmente, conclui-se que os resultados obtidos seguem a mesma tendência do verificado na secção 5.2.1.1 (BAC-R).

5.2.2.2 Variação da dimensão longitudinal

5.2.2.2.1 *Apresentação de resultados*

Os gráficos das figuras seguintes (Figura 127 à Figura 132) apresentam a variação da dimensão longitudinal dos provetes das composições: Ref; ARR I; ARR II; ARR (I+II); ARR (I+II) + 20AE e ARR (I+II) + 30AE, registada até aos 9 meses de idade. Traduzem a média do conjunto dos provetes. De modo análogo ao apresentado na classe BAC-R, considerou-se oportuno figurar a média do conjunto (traço contínuo) e a média do conjunto acrescida e diminuída de um desvio padrão (traço interrompido).

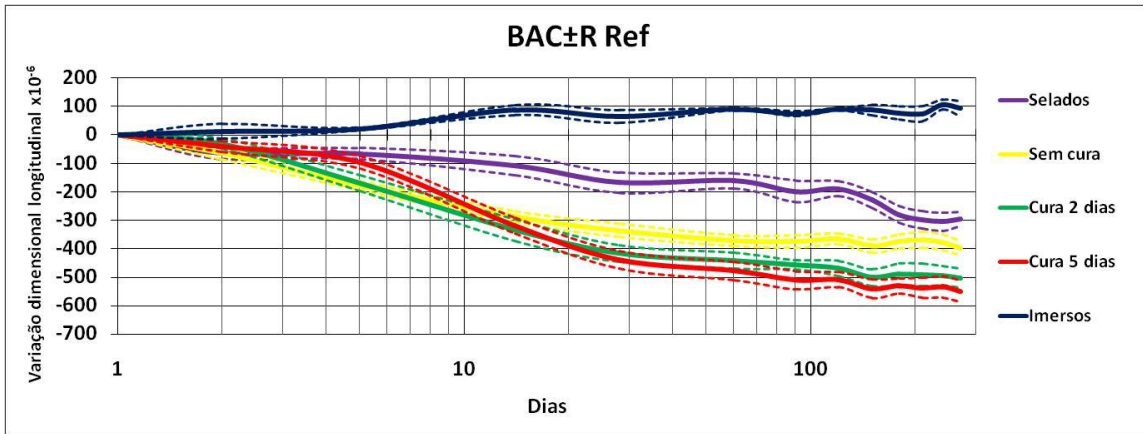


Figura 127 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R Ref

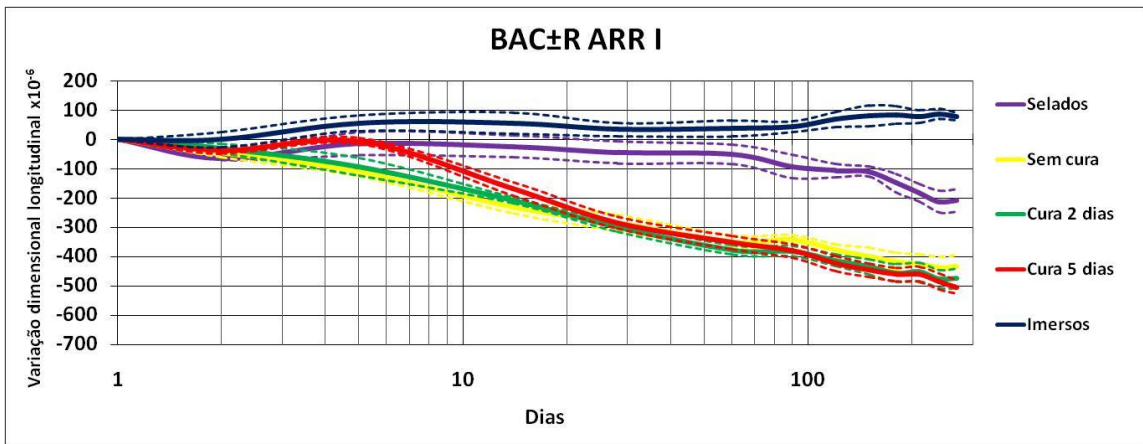


Figura 128 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR I

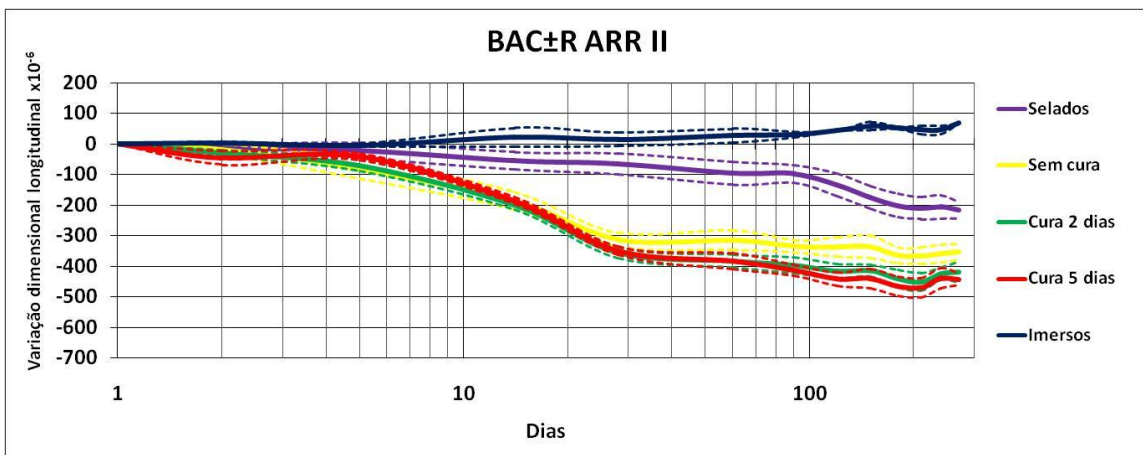


Figura 129 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR II

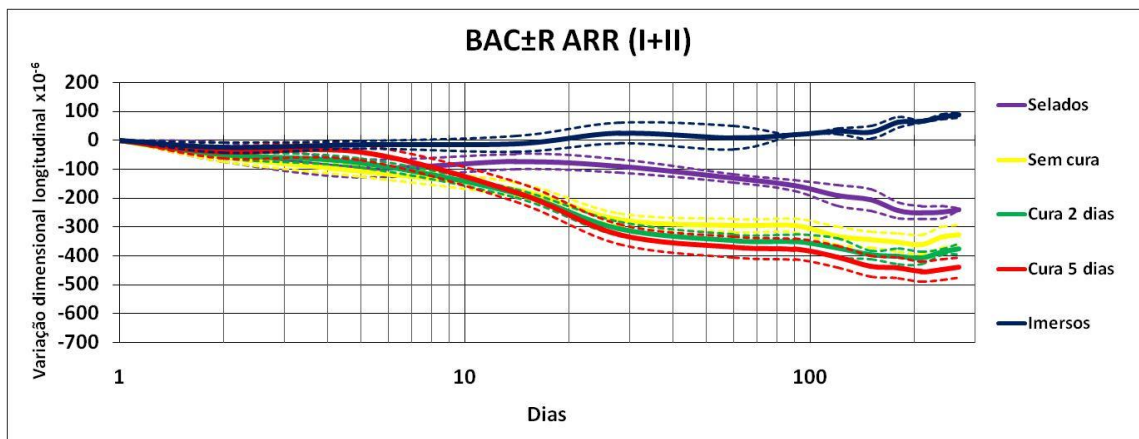


Figura 130 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR (I+II)

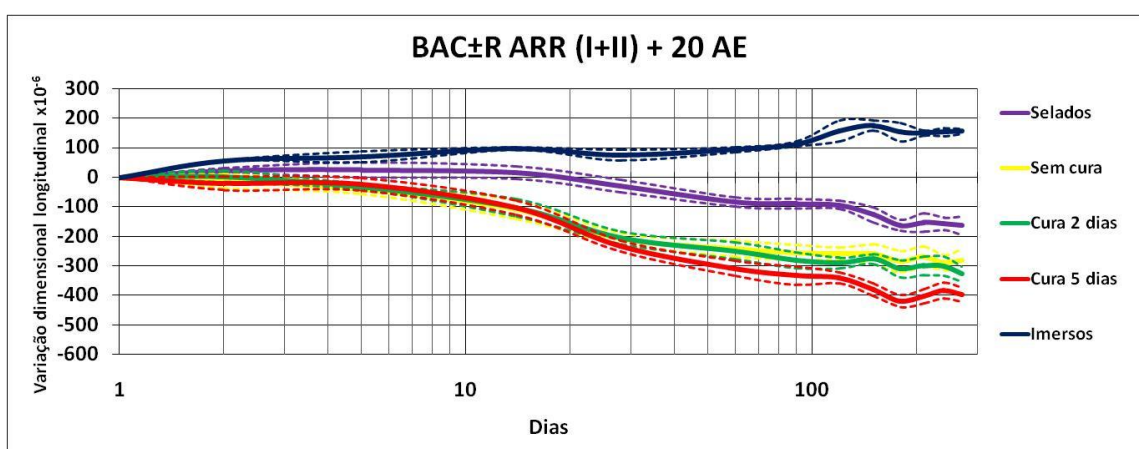


Figura 131 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR (I+II) + 20 AE

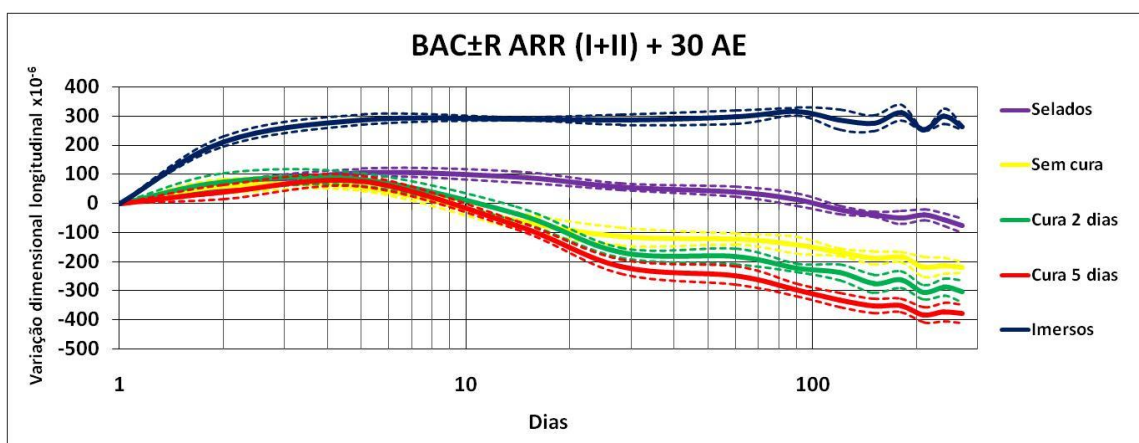


Figura 132 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R ARR (I+II) + 30 AE

5.2.2.2.2 Análise de resultados

Conforme esperado, registaram-se expansões para todos os provetes submetidos à imersão em água.

Em particular, a Figura 133 apresenta a expansão registada nos provetes imersos contendo ARR. Verifica-se uma ligeira tendência de redução da expansão para as composições que contêm os ARR.

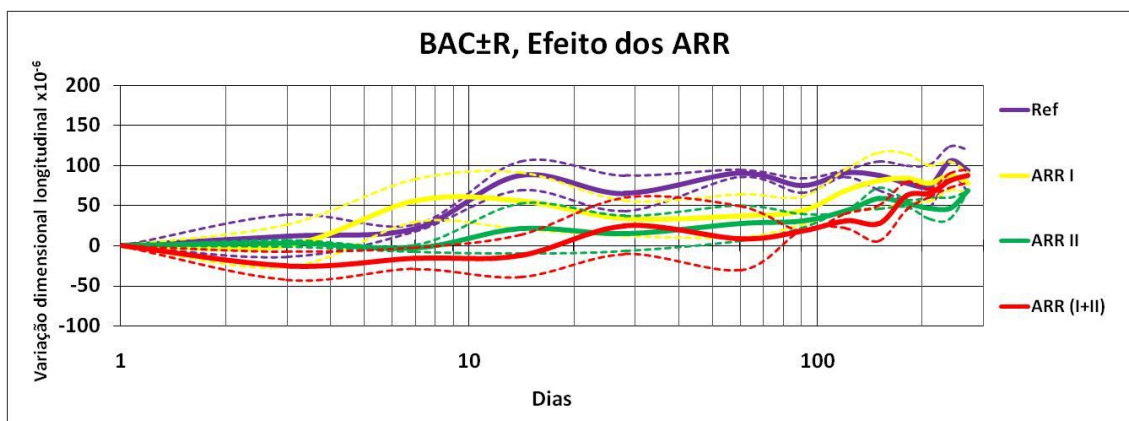


Figura 133 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR nos provetes imersos

Na Figura 134, apresenta-se o efeito da utilização dos ARR juntamente com a AE. A utilização de 20 kg/m³ da AE provoca uma expansão a longo prazo ligeiramente superior à verificada na composição de referência. Já a utilização de 30 kg/m³ apresenta uma expansão nas primeiras idades de aproximadamente 300x10⁻⁶ susceptível de poder provocar efeitos nocivos em estruturas em contacto com ambientes com humidade elevada.

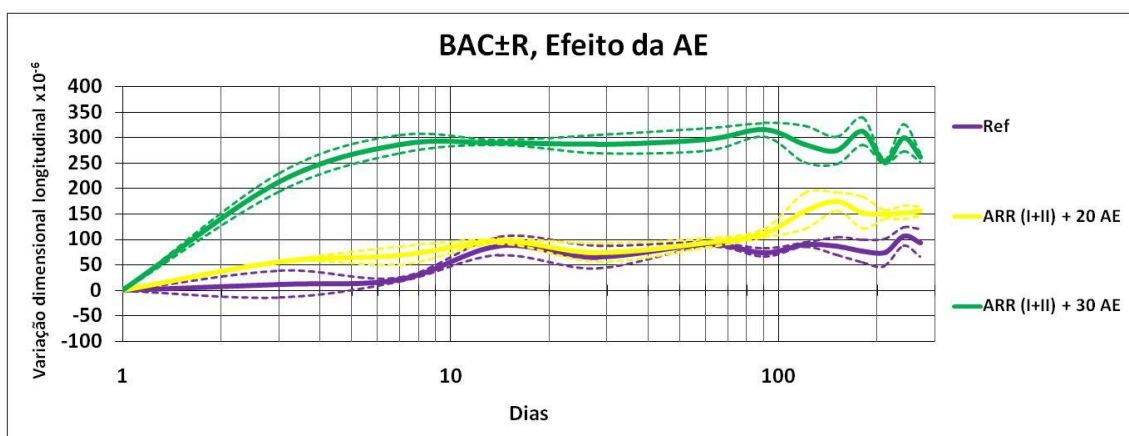


Figura 134 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR e da AE nos provetes imersos

Na Figura 135, compara-se o efeito dos ARR e dos ARR com AE nos provetes imersos. De modo idêntico ao verificado na comparação análoga feita para a classe BAC-R, é bem visível o efeito da AE nas primeiras idades. No entanto, a partir dessa data, o comportamento das diferentes misturas não se diferencia significativamente.

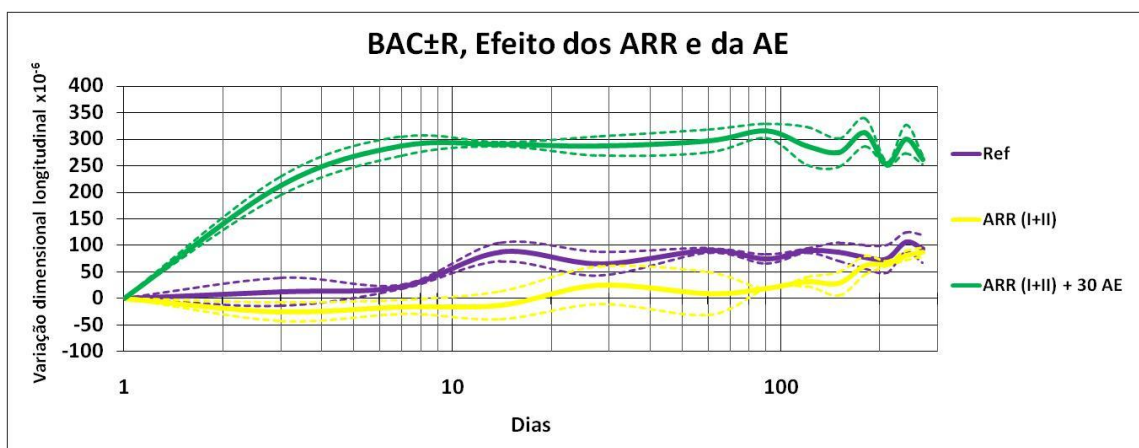


Figura 135 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, comparação do efeito dos ARR e dos ARR com AE nos provetes imersos

Analisando o efeito dos ARR na retracção autogénea (Figura 136), verifica-se que a utilização dos ARR provoca uma tendência genérica para redução na retracção autogénea. Nesta classe de BAC também é o uso do ARR I que manifestou uma melhor eficiência na redução desta retracção. Contrariamente ao esperado, não se observou um efeito cumulativo devido ao uso simultâneo dos dois ARR.

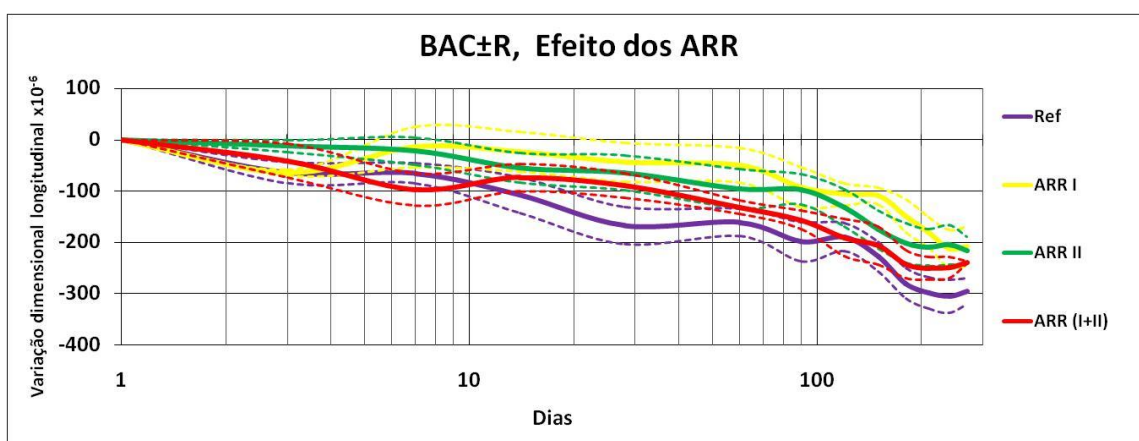


Figura 136 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR na retracção autogénea

Na Figura 137, apresenta-se o efeito dos ARR juntamente com a AE na retracção autogénea. Distingue-se a diferença de comportamento nas primeiras idades devido

ao uso de diferentes dosagens da AE. No entanto, após a expansão inicial, as 3 curvas representadas (Ref, ARR (I+II)+20AE e ARR (I+II)+30AE) apresentam uma evolução idêntica.

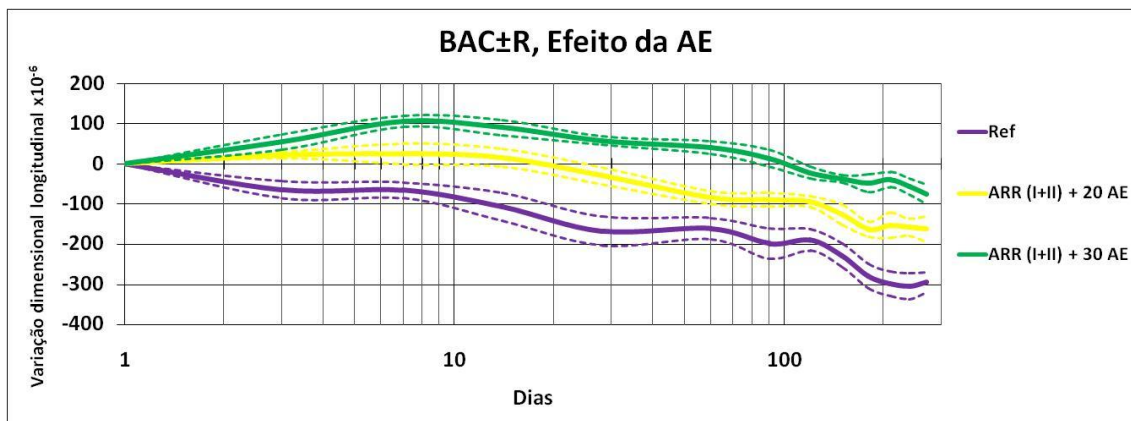


Figura 137 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR juntamente com a AE na retracção autógena

Na Figura 138 é comparado o efeito dos ARR e dos ARR juntamente com a AE na retracção autógena. Realça-se a eficiência do uso combinado ARR e AE.

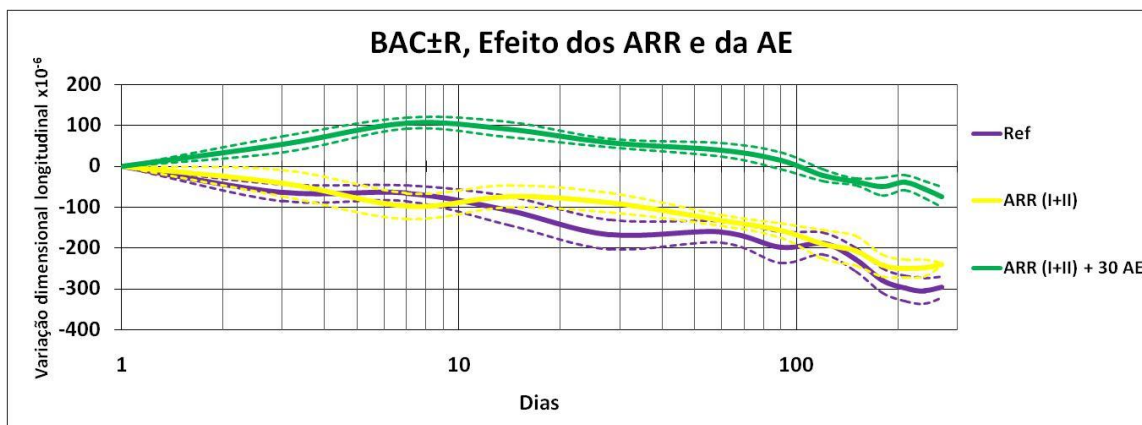


Figura 138 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR e dos ARR juntamente com a AE na retracção autógena

Já no que respeita aos provetes não submetidos à cura, a Figura 139 apresenta o efeito dos ARR na redução da retracção total. Nesta figura, é visível uma redução nas primeiras idades. A longo prazo a redução é insignificante. Globalmente, e comparando a eficiência dos ARR nas classes BAC-R e BAC±R observa-se, para os provetes sem cura, um melhor desempenho na classe de menor resistência.

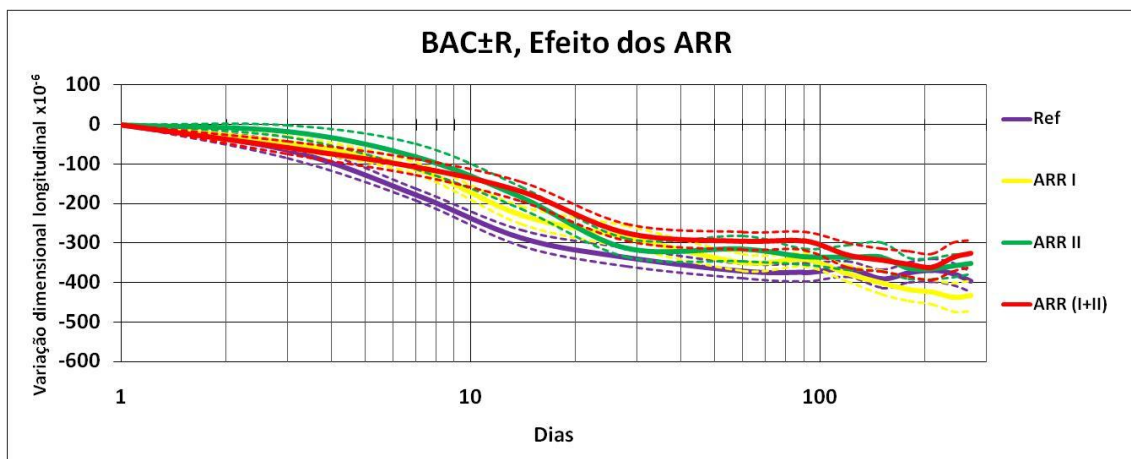


Figura 139 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR na retracção total dos provetes sem cura

Na Figura 140, apresenta-se o efeito de diferentes dosagens da AE na retracção total dos provetes sem cura. Observa-se uma redução substancial em todas as idades. A composição que utiliza 30 kg/m^3 da AE apresenta uma expansão inicial relevante. A utilização de dosagens superiores da AE, nos provetes sem cura, apresenta melhoramentos em todas as idades.

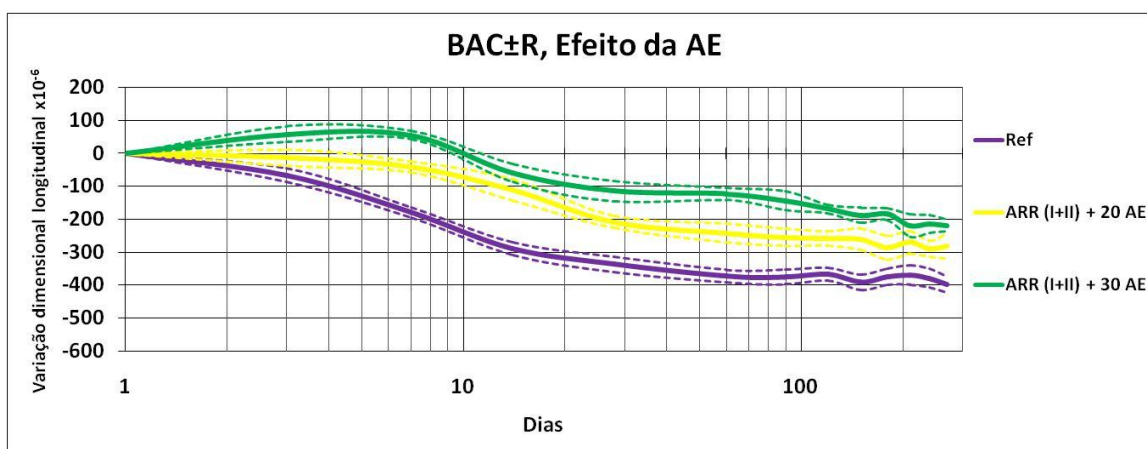


Figura 140 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR juntamente com a AE na retracção total dos provetes sem cura

Apresenta-se, na Figura 141, a comparação do efeito do uso dos ARR com o uso dos ARR juntamente com a AE, nos provetes sem cura. Também nesta situação, salienta-se a eficiência do uso combinado ARR e AE.

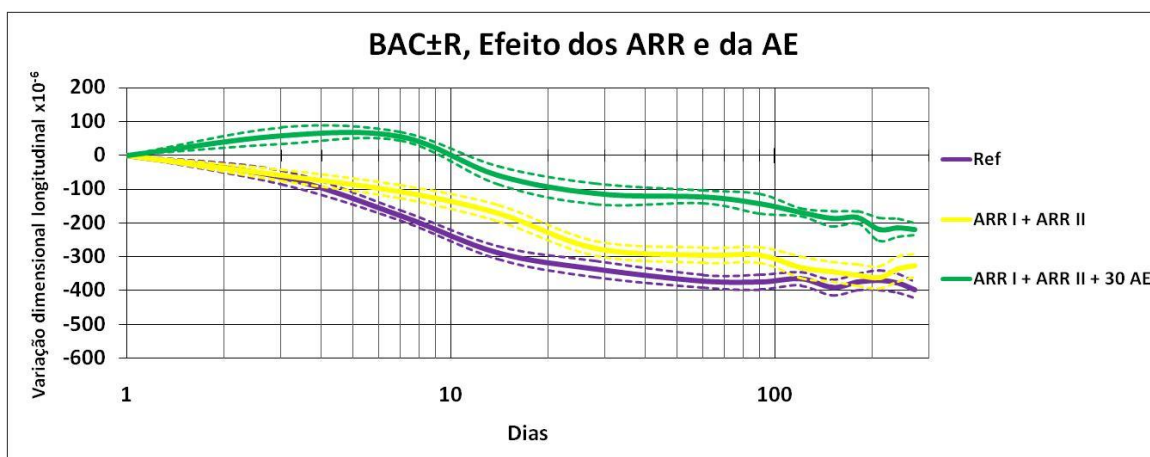


Figura 141 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR e dos ARR e AE na retracção total dos provetes sem cura

No que respeita ao efeito da cura na retracção total, e à semelhança do anteriormente apresentado para a classe BAC-R, verifica-se que os gráficos das várias figuras apresentadas anteriormente em 5.2.2.2.1 mostram nitidamente que o efeito de cura de 2 e, principalmente, de 5 dias, aumenta a retracção total (Figura 127 à Figura 132). Este efeito é perceptível em todas as amassaduras realizadas e traduz-se, na maior parte dos casos estudados, numa diferença na retracção total superior a 100×10^{-6} ao fim de 9 meses de idade.

Especificamente, o efeito dos ARR nos provetes submetidos a um período de cura de 5 dias é apresentado na Figura 142. Verifica-se uma redução significativa na retracção total para ambos ARR. A utilização conjunta dos dois ARR não apresentou benefícios, quando comparada com o uso individual.

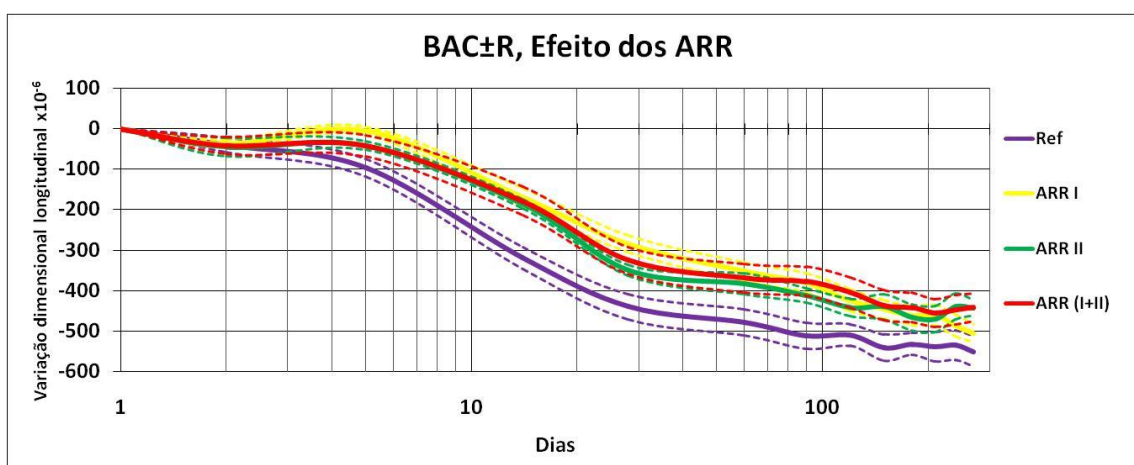


Figura 142 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR na retracção total dos provetes com cura de 5 dias

A Figura 143, apresenta o efeito da utilização conjunta dos ARR e da AE na retracção total dos provetes com cura de 5 dias. A utilização das dosagens de 20 ou 30 kg/m^3 de

AE apresentaram comportamentos pouco diferenciados. Salienta-se a expansão inicial da composição que contém os 30Kg/m³.

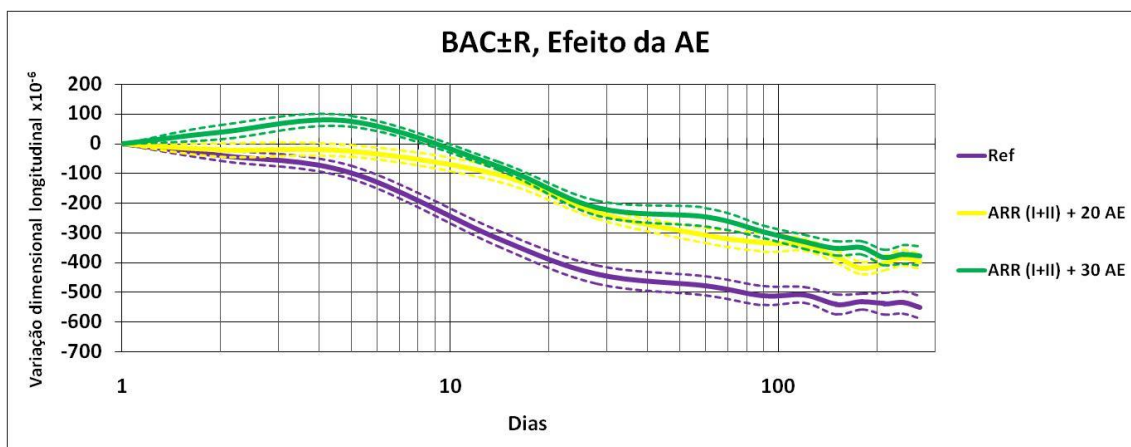


Figura 143 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR juntamente com a AE na retração total dos provetes com cura de 5 dias

Na Figura 144 é comparada a acção dos ARR e dos ARR e a AE na retração total dos provetes com cura de 5 dias. Quer nas primeiras idades quer a longo prazo constituem dois patamares de eficiência (nível 1 - apenas ARR e nível 2 - ARR juntamente com a AE).

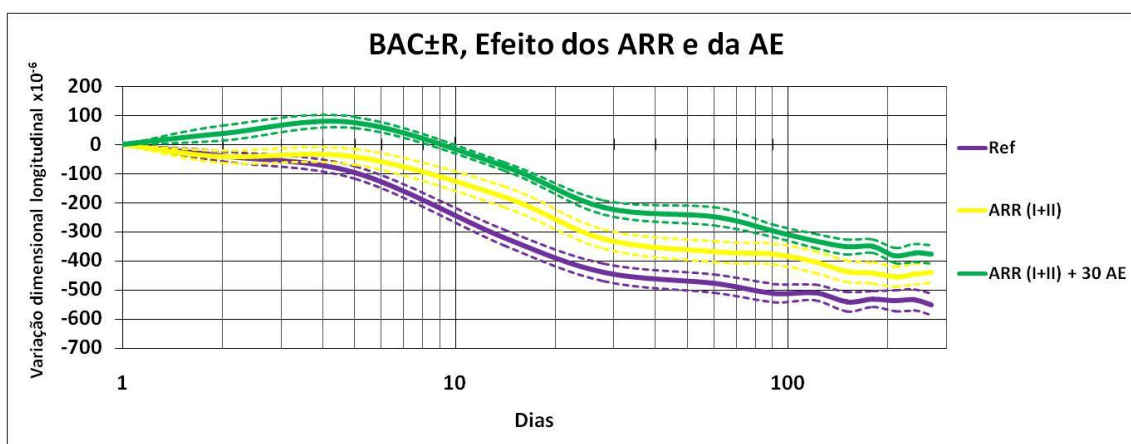


Figura 144 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC±R, efeito dos ARR e dos ARR e AE na retração total dos provetes com cura de 5 dias

5.2.2.3 Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco

Para a classe BAC±R foram executados ensaios de determinação da variação dimensional longitudinal em argamassas, desde o estado fresco para as variantes BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II), por crivagem do betão.

Os gráficos das Figura 145 e Figura 146 apresentam as variações dimensionais longitudinais iniciais.

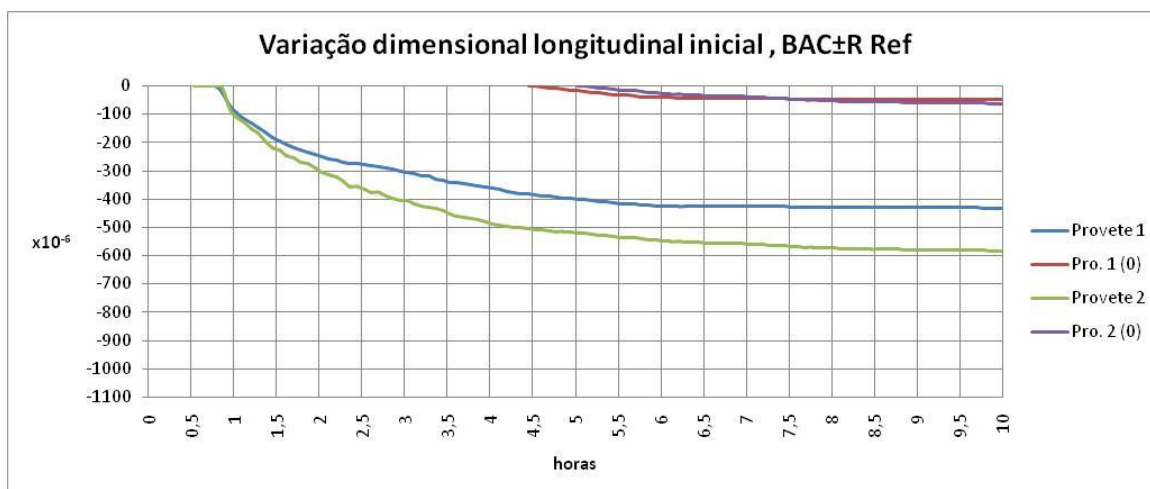


Figura 145 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC±R Ref

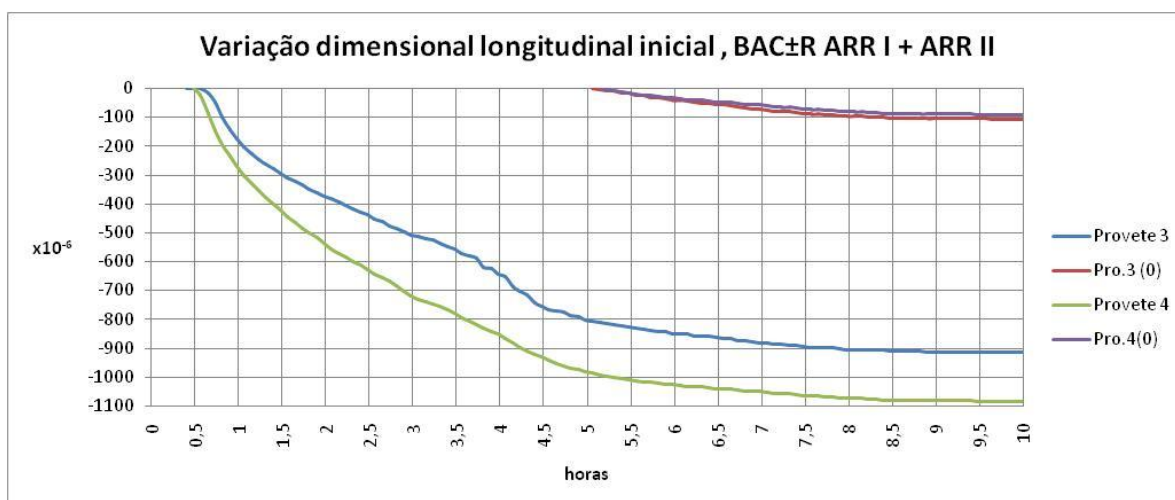


Figura 146 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC±R ARR (I+II)

Com base nos gráficos da Figura 145 e Figura 146, apresenta-se na Tabela 24 o tempo zero de cada composição, observa-se de novo o efeito retardador dos ARR.

Tabela 24 - Tempo zero das composições BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II)

Composição	T0 (horas)
BAC±R Ref	4,7
BAC±R ARR I + ARR II	5,1

No gráfico da Figura 147 apresenta-se a variação dimensional longitudinal, desde o estado fresco para as composições BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II), zerados em T0 e 18 h.

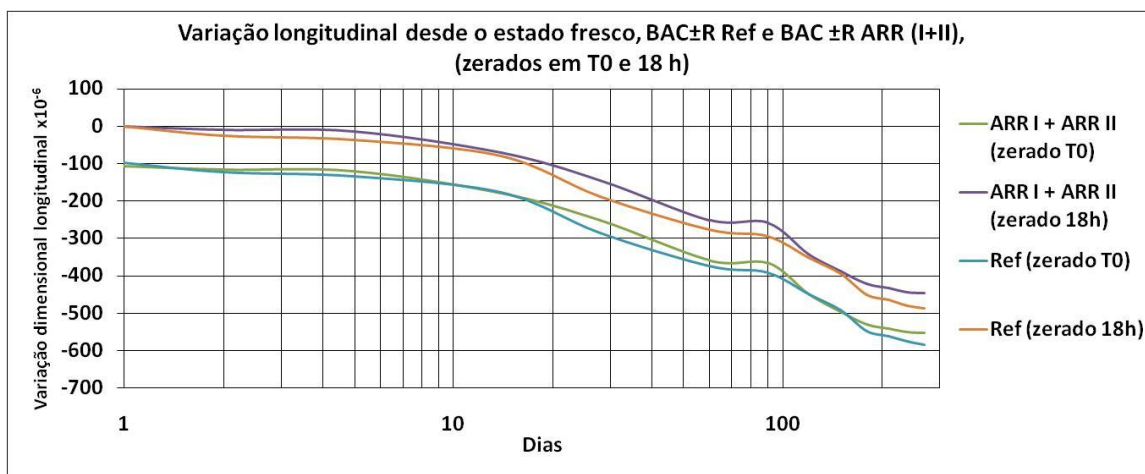


Figura 147 - Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as composições BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II), zerados em T0 e 18 h

Nas medições efectuadas com provetes convencionais, em que se efectuaram os primeiros registos ao fim de aproximadamente 18 horas, registaram-se para as amassaduras em causa erros por omissão, na avaliação da deformação longitudinal, de 97×10^{-6} para a composição BAC±R Ref e 107×10^{-6} para a composição BAC±R ARR (I+II). A avaliação deste erro não levou em conta o efeito do agregado grosso.

No gráfico da Figura 148, observa-se a influência da presença do agregado grosso na retracção autogénea nas composições BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II), registada a partir das 18 horas.

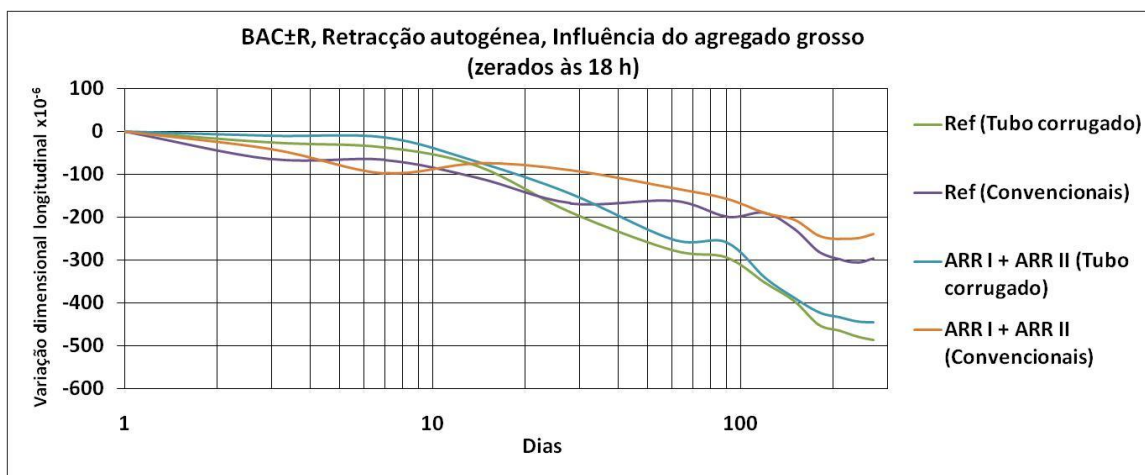


Figura 148 - Variação dimensional longitudinal para as composições BAC±R Ref e BAC±R ARR (I+II), zerados às 18 h (Método convencional e Tubos corrugados) – Influência do agregado grosso

5.2.2.4 Resistência à compressão

O gráfico da Figura 149 apresenta a resistência para as composições: Ref; ARR I; ARR II; ARR (I+II); ARR (I+II) + 20AE e ARR (I+II) + 30AE, obtidas a partir de prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm, até aos 9 meses de idade. Traduzem a média do conjunto de provetes. Os valores individuais respeitaram o critério de aceitação de resultados presente na NP EN 196-1:2006 [199].

Trata-se de provetes não sujeitos à cura após a desmoldagem.

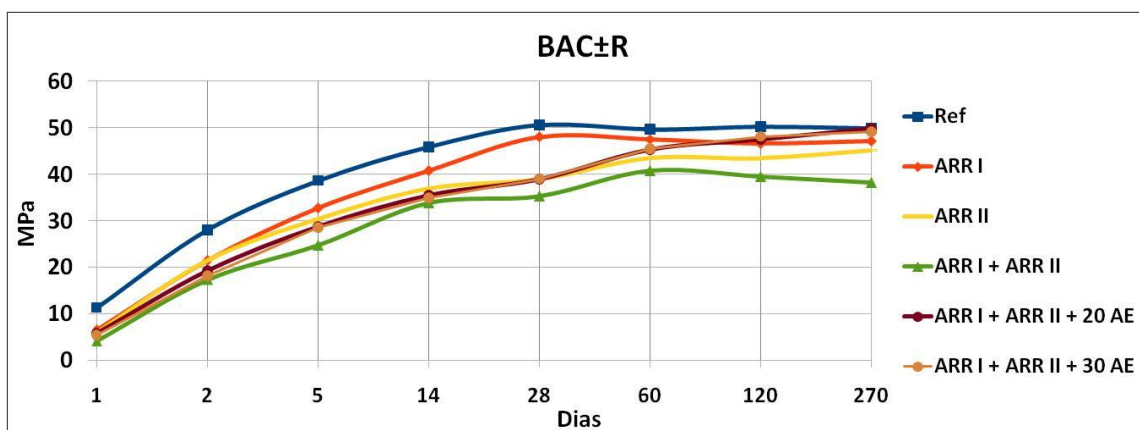


Figura 149 - Resistência à compressão das composições BAC±R

Os resultados evidenciam o efeito retardador dos ARR, mostrando também que, a longo prazo, existe um efeito negativo relativo ao uso dos ARR não associados à velocidade de hidratação. A longo prazo, a utilização de AE proporciona uma recuperação da resistência em comparação com a composição de referência (Ref). Estes resultados seguem a mesma tendência dos verificados para a classe BAC-R.

5.2.3 Apresentação e análise de resultados referentes à composição BAC+R

5.2.3.1 Resultados referentes à utilização da cinza volante de Sines (CVs)

5.2.3.1.1 Variação de massa

Apresenta-se nos gráficos das figuras seguintes (Figura 150 e Figura 151) a variação de massa das composições BAC+R CVs Ref e BAC+R CVs ARR I, registada até aos 9 meses de idade.

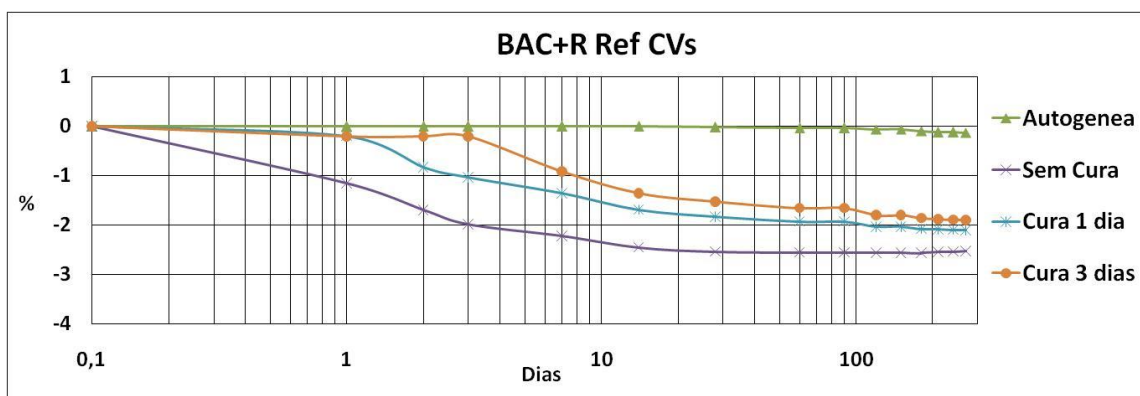


Figura 150 - Variação de massa da composição BAC+R CVs Ref

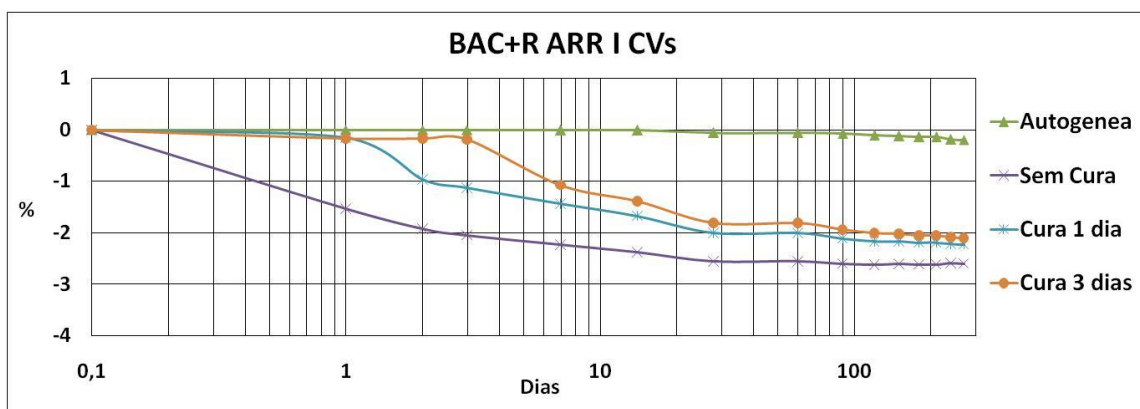


Figura 151 - Variação de massa da composição BAC+R CVs ARR I

Os ensaios de determinação da variação de massa registaram um valor de desvio padrão médio, considerando todas as amassaduras, de 0,04%. Assim, nos gráficos relativos à variação de massa das várias amassaduras são apresentados os valores médios sendo considerada desprezável a dispersão de resultados.

Os provetes selados, usados para medição da retracção autogénea, registaram uma perda de massa média de 0,13%, ao fim de 9 meses. Este valor é considerado baixo, e garante que a parcela correspondente à variação dimensional apresentada para os provetes selados no item 5.2.3.1.2 corresponde essencialmente à retracção autogénea.

Globalmente, verifica-se que o processo de cura limita a perda de massa por secagem.

Na Figura 152, observa-se o efeito resultante da utilização do ARR na variação de massa ao longo do tempo para os provetes não submetidos a um período de cura adicional. As variações de massa registadas são idênticas à composição de referência.

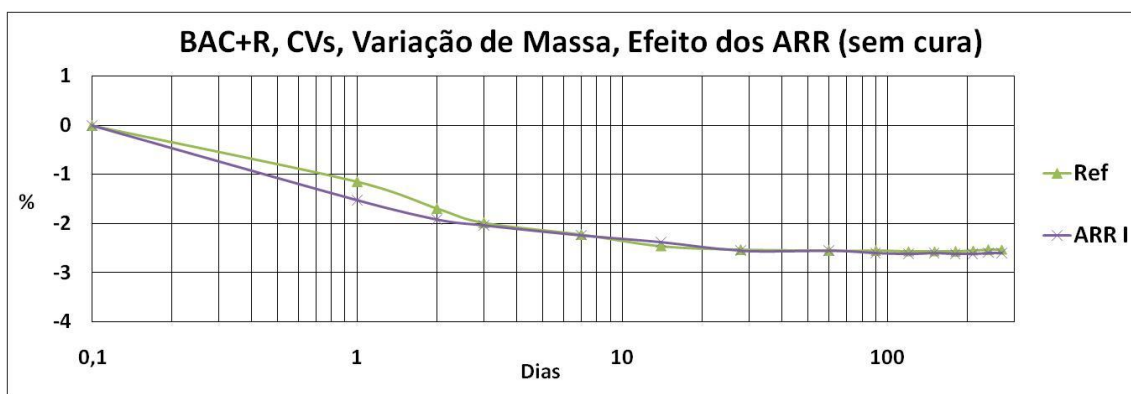


Figura 152 - Variação de massa das composições BAC+R CVs, efeito do ARR nos provetes sem cura

Na Figura 153, apresenta-se a variação de massa relativa aos provetes submetidos a uma cura de 3 dias, evidenciando-se o efeito da utilização do ARR. Observa-se que a utilização do ARR I origina um ligeiro incremento na percentagem de perda de massa, a partir dos 14 dias.

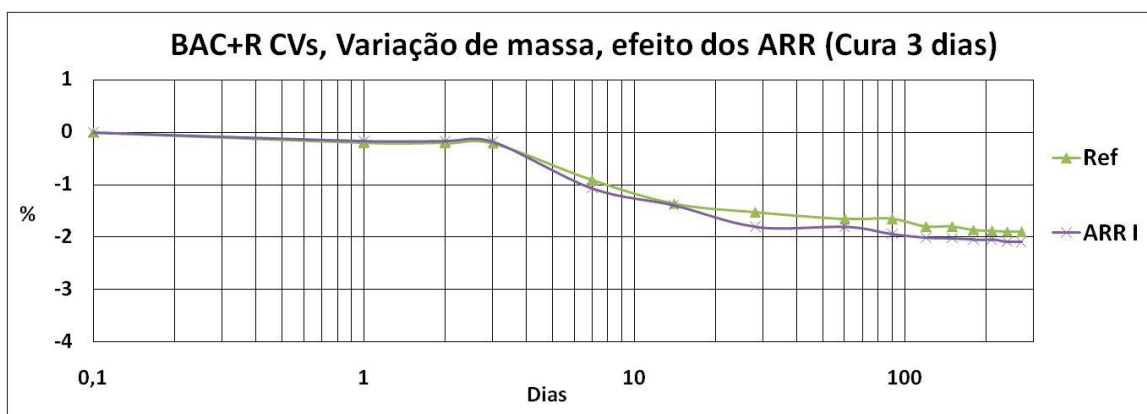


Figura 153 - Variação de massa das composições BAC+R CVs, efeito do ARR nos provetes submetidos a uma cura de 3 dias

5.2.3.1.2 Variação da dimensão longitudinal

Apresenta-se nos gráficos da Figura 154 e Figura 155 a variação da dimensão longitudinal das composições: BAC+R CVs Ref e BAC+R CVs ARR I. De modo semelhante ao apresentado nas classes de BAC anteriores, considerou-se oportuno figurar a média do conjunto (traço contínuo) e a média do conjunto acrescida e diminuída de um desvio padrão (traço interrompido).

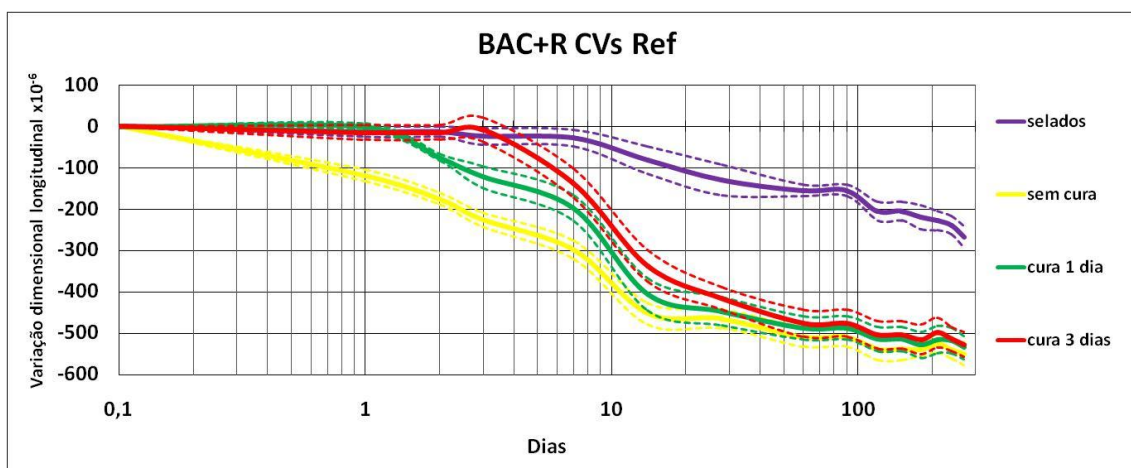


Figura 154 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVs Ref

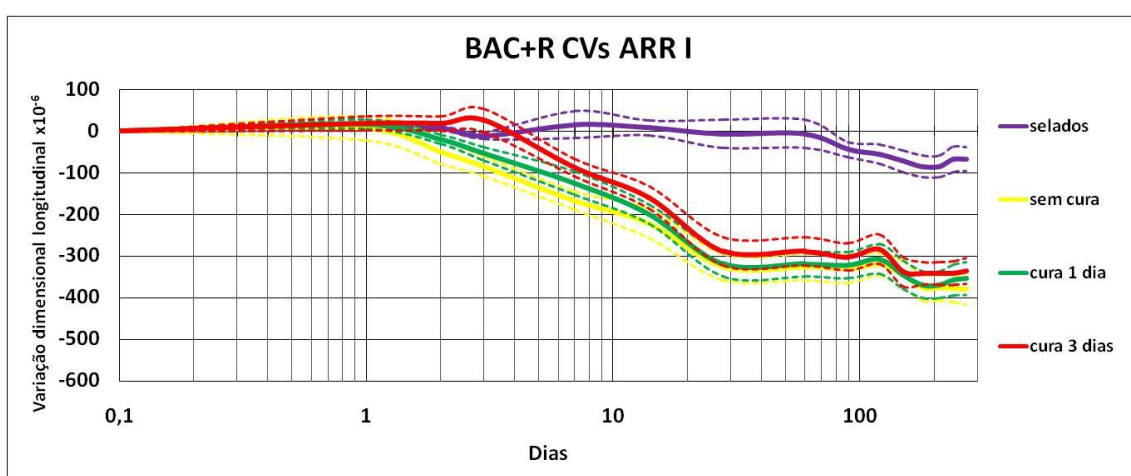


Figura 155 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVs ARR I

Analisando a influência da utilização dos ARR nos provetes selados (retracção autógena), apresenta-se na Figura 156 o respectivo comportamento verificado ao longo dos 9 meses. A eficiência do ARR foi nítida. O uso do ARR I proporcionou uma redução clara nas primeiras idades e também a longo prazo.

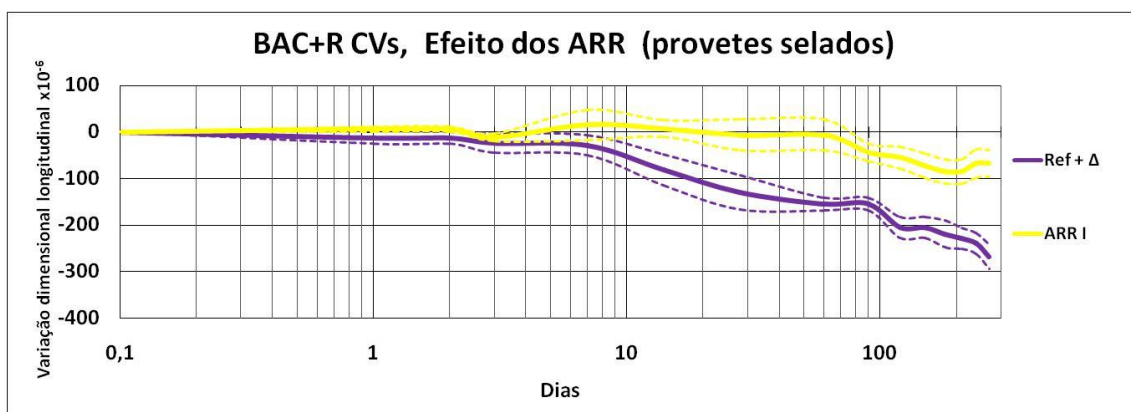


Figura 156 - Variação dimensional longitudinal, BAC+R CVs, efeito do ARR na retração autógena

Já no que respeita à influência da utilização do ARR nos provetes submetidos a um período de cura de 3 dias (Figura 157) observa-se que a utilização do ARR I, proporcionou uma redução na retracção total muito significativa.

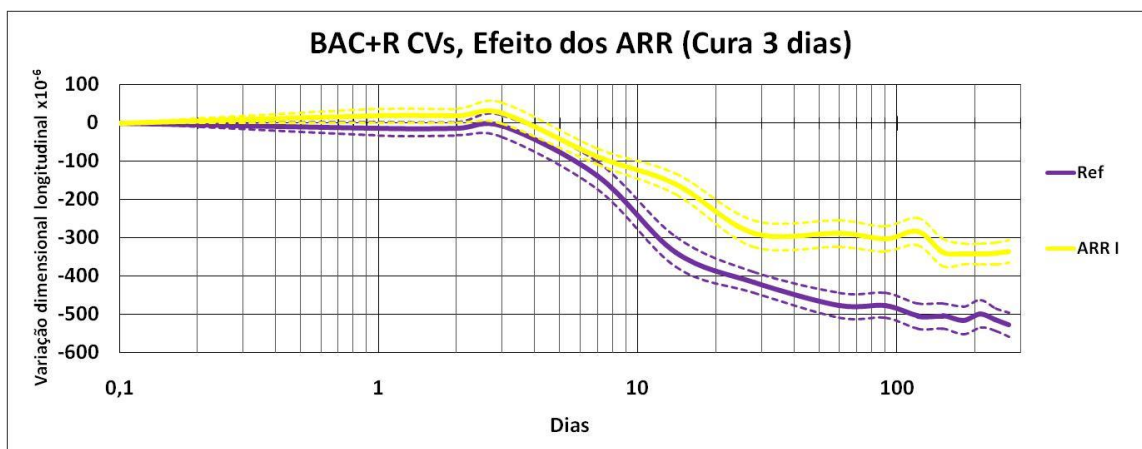


Figura 157 - Variação dimensional longitudinal, BAC+R CVs, efeito do ARR na retracção total dos provetes com cura de 3 dias

No que reporta à influência da utilização do ARR nos provetes não submetidos à cura (Figura 158), e à semelhança do comportamento verificado nas figuras anteriores (Figura 156 e Figura 157), observa-se que a utilização do ARR I proporcionou uma redução na retracção total muito significativa.

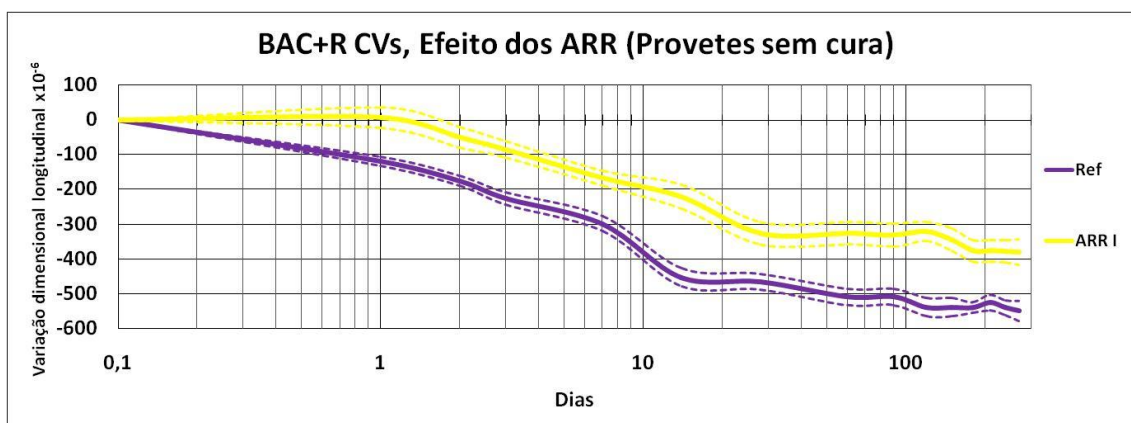


Figura 158 - Variação dimensional longitudinal, BAC+R CVs, efeito do ARR na retracção total dos provetes sem cura

5.2.3.1.3 Resistência à compressão

Apresenta-se na **Figura 159** a variação da resistência à compressão ao longo do período de ensaios para a composição BAC+R CVs Ref.

Dado ter ocorrido uma falha na preparação, os provetes relativos à composição BAC+R CVs ARR I não foram ensaiados.

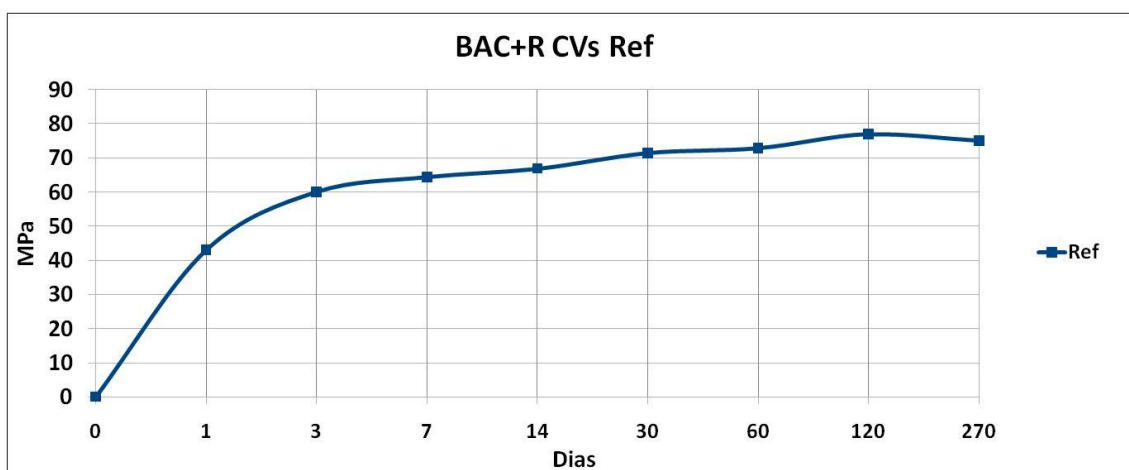


Figura 159 - Resistência à compressão da composição BAC+R CVs Ref

5.2.3.2 Resultados referentes à utilização da cinza volante de Compostilha (CVc)

5.2.3.2.1 Resultados obtidos a partir das amassaduras de 30 litros

5.2.3.2.1.1 Variação de massa

Apresenta-se nos gráficos da Figura 160 à Figura 162 a variação de massa das composições BAC+R CVc Ref; BAC+R CVc ARR (I+II) + ALS e BAC+R CVc 20 AE, registada até aos 9 meses de idade.

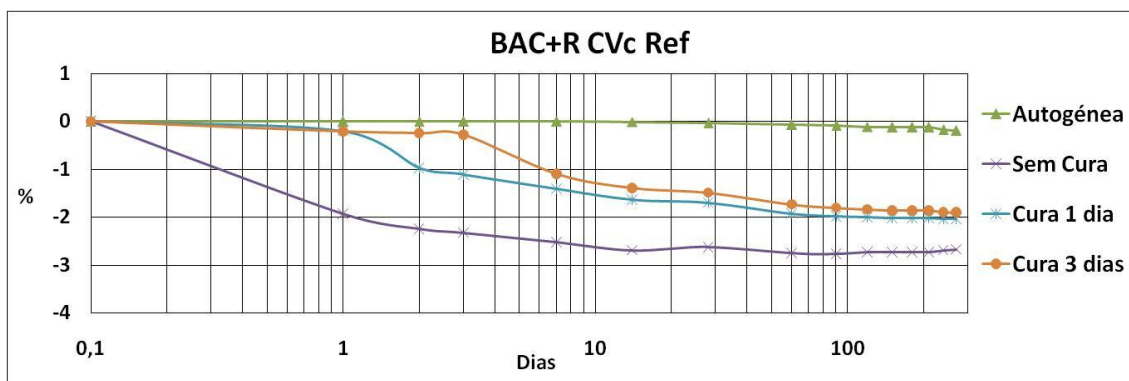


Figura 160 - Variação de massa da composição BAC+R Cvc Ref

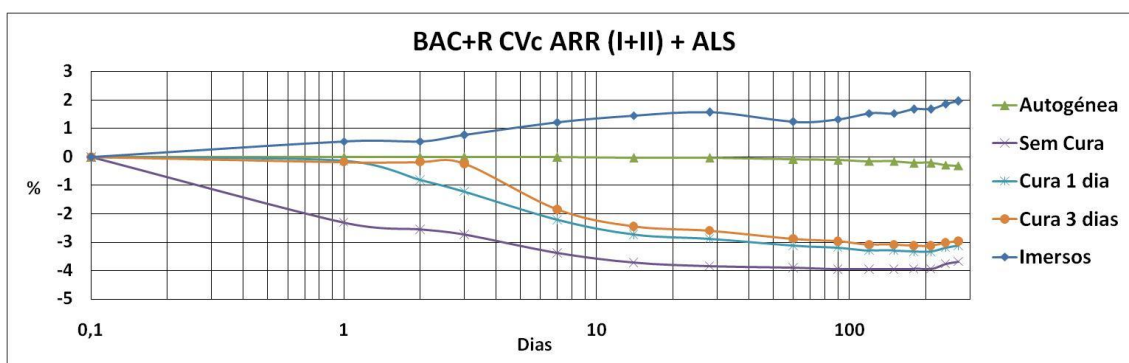


Figura 161 - Variação de massa da composição BAC+R Cvc ARR (I+II) + ALS

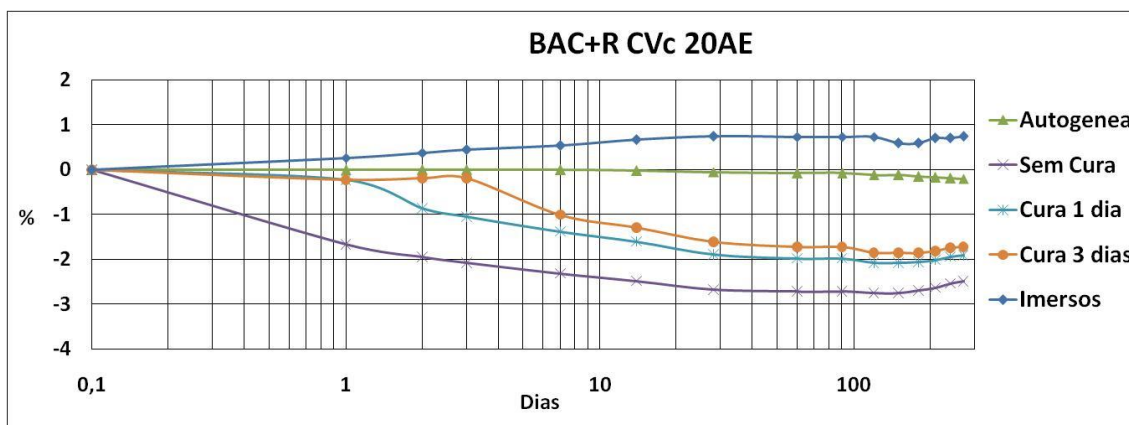


Figura 162 - Variação de massa da composição BAC+R Cvc 20AE

Os ensaios de determinação da variação de massa registaram um valor de desvio padrão médio, para todas as amassaduras, de 0,04%. Tal como apresentado nas classes de BAC anteriormente referidas, os gráficos relativos à variação de massa das várias amassaduras correspondem aos valores médios, sendo considerada desprezável a dispersão de resultados.

Os provetes selados, utilizados para medição da retracção autogénea, registaram uma perda de massa média, ao fim de 9 meses, de 0,20%. Este valor é considerado baixo e garante que a parcela correspondente à variação dimensional apresentada para os

provetes selados no item 5.2.3.2.1.2 corresponde essencialmente à retracção autogénea.

Globalmente, verifica-se que o processo de cura limita significativamente a perda de massa por secagem.

Nas duas figuras seguintes é possível visualizar a variação de massa das composições com ARR e ALS e AE. Respectivamente sem cura (Figura 163) e com um período de cura de 3 dias (Figura 164).

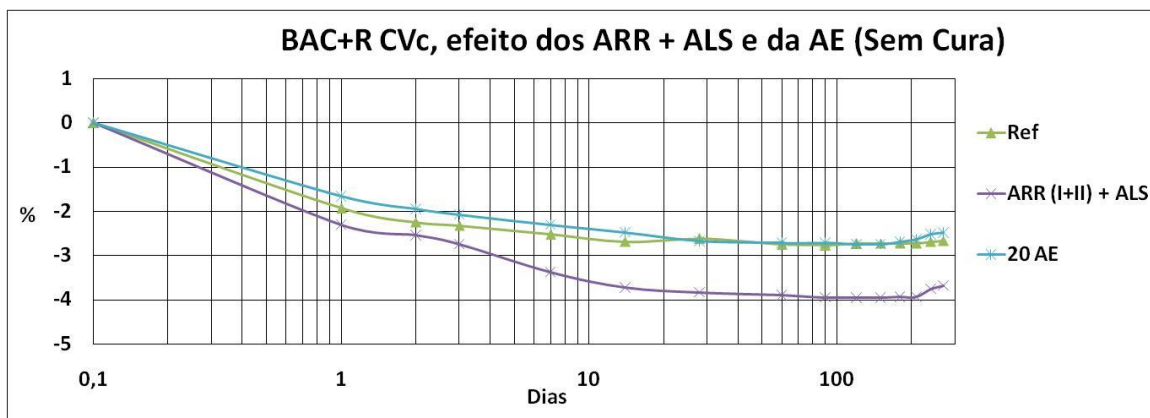


Figura 163 - Variação de massa das composições BAC+R CVc (Ref; ARR (I+II) + ALS e 20 AE), provetes sem cura

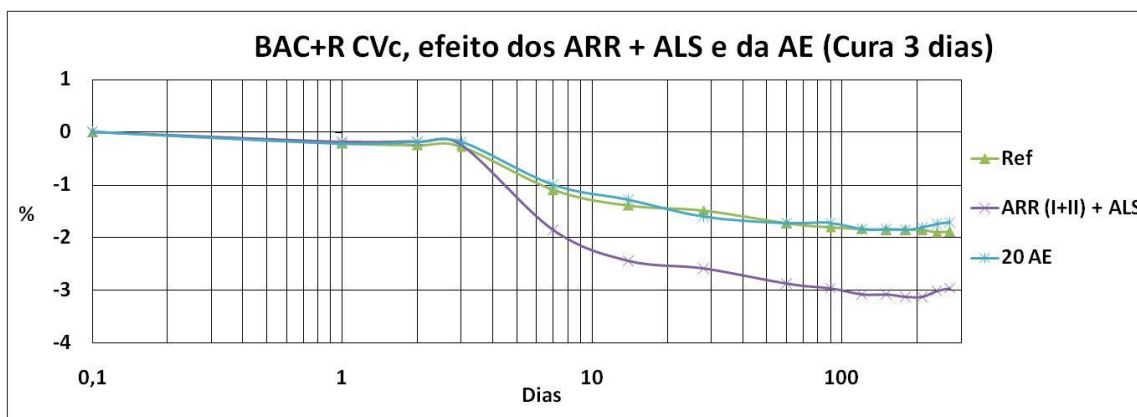


Figura 164 - Variação de massa das composições BAC+R CVc (Ref; ARR (I+II) + ALS e 20 AE), sujeitas a um período de cura adicional de 3 dias

Observa-se que a utilização da AE não altera a variação de massa. Já no que respeita à utilização dos ARR juntamente com o ALS, verificou-se um acréscimo substancial na perda de massa por secagem. Conclui-se ainda que a promoção da cura reduz substancialmente a perda de massa.

Apresenta-se na Figura 165 a variação de massa dos provetes imersos. Devido à superior porosidade aberta, a composição que incorpora os ALS apresenta um ganho de massa superior, em comparação com a composição que contém a AE.

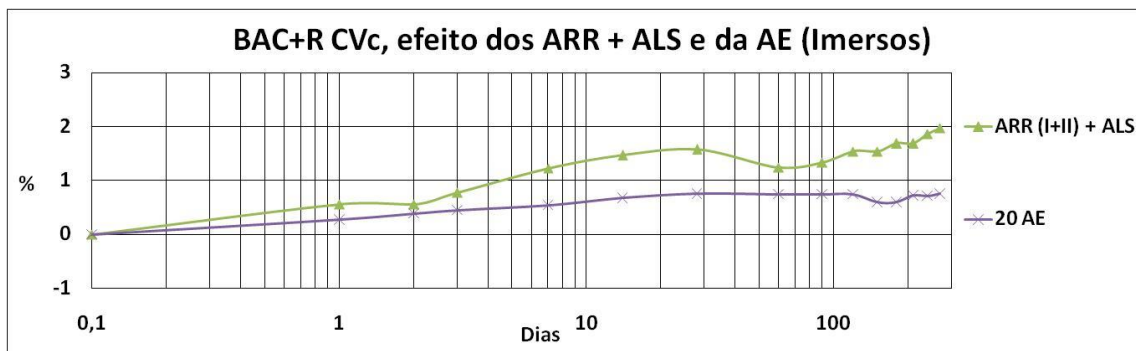


Figura 165 - Variação de massa das composições BAC+R CVc (Ref; ARR (I+II) + ALS e 20 AE), provetes imersos

5.2.3.2.1.2 Variação da dimensão longitudinal

Apresenta-se da Figura 166 à Figura 168, a variação da dimensão longitudinal das composições: BAC+R CVc Ref; BAC+R CVc ARR (I+II) + ALS e BAC+R 20 AE, registada até aos 9 meses de idade. Estas traduzem a média do conjunto de provetes. De modo semelhante ao apresentado anteriormente, considerou-se oportuno figurar a média do conjunto (traço contínuo) e a média do conjunto acrescida e diminuída de um desvio padrão (traço interrompido).

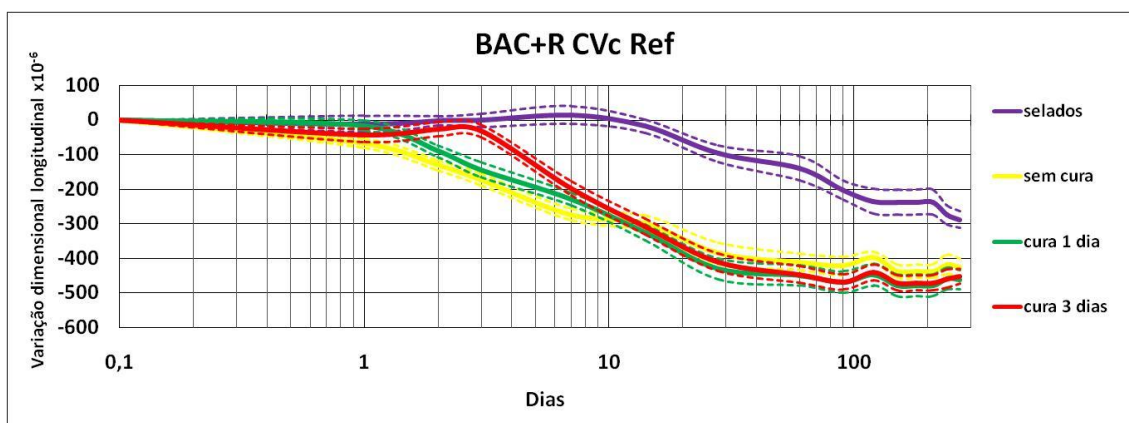


Figura 166 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc Ref

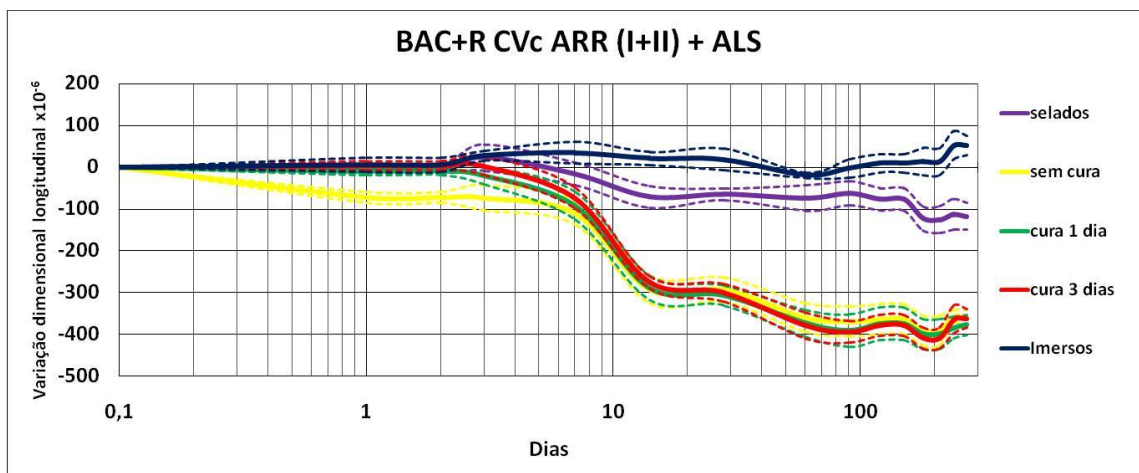


Figura 167 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + ALS

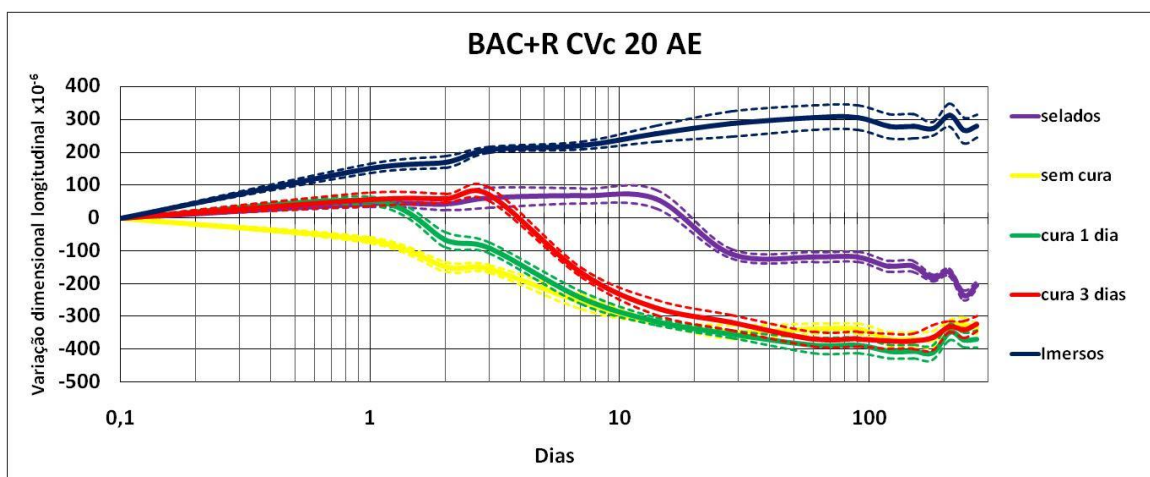


Figura 168 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc 20 AE

Analisando o efeito de cura nas várias composições apresentadas, verifica-se que não existe diferenciação significativa nos resultados obtidos.

Na Figura 169 representa-se o efeito dos ARR com o ALS e o efeito da AE na retracção autogénea. Ambas as soluções conduzem a uma redução da retracção autogénea. Nas primeiras idades, a AE apresenta uma expansão inicial, no entanto, para idades superiores a um mês, a presença dos ARR e o ALS revela-se mais eficiente.

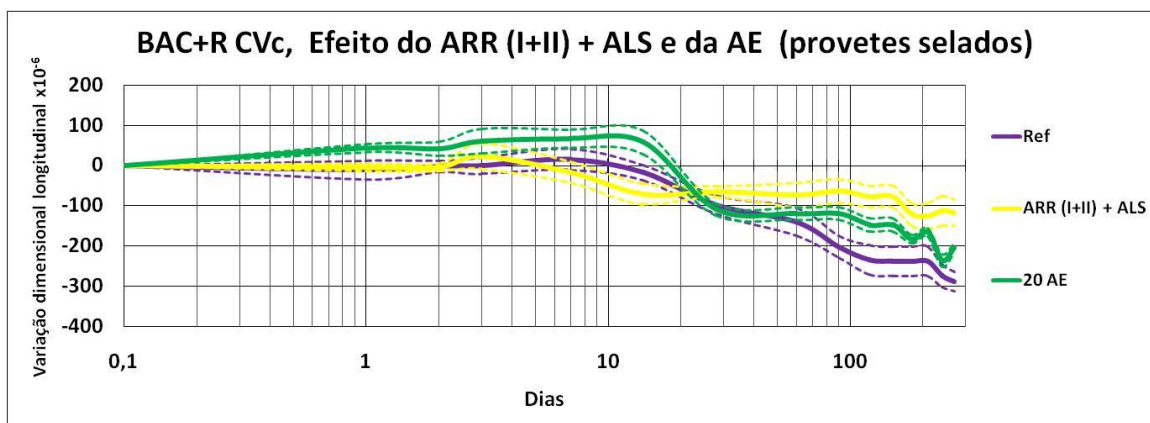


Figura 169 - Variação dimensional longitudinal, efeito dos ARR com o ALS e AE na retracção autógena

No que respeita aos provetes submetidos a uma cura de 3 dias, observa-se que ambas soluções (utilização dos ARR com o ALS e a AE) têm um comportamento semelhante, traduzindo-se num ligeiro decréscimo da retracção total (Figura 170).

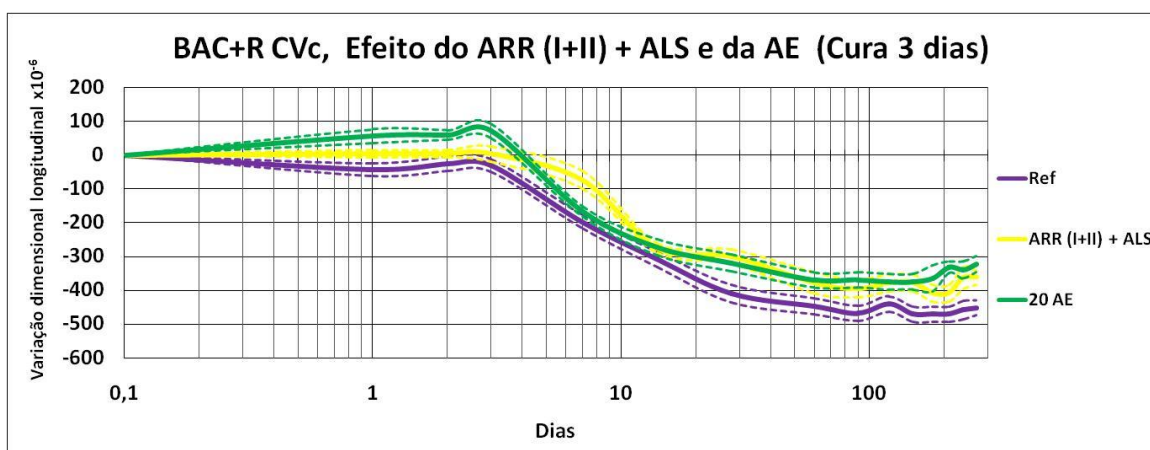


Figura 170 - Variação dimensional longitudinal, efeito dos ARR com o ALS e da AE na retracção total. Provetes submetidos a uma cura de 3 dias

No que respeita ao efeito dos ARR com o ALS e da AE nos provetes sem cura, Figura 171, observa-se que ambas soluções têm, a longo prazo, um comportamento semelhante, traduzindo-se num ligeiro decréscimo da retracção total. Nas primeiras idades, destaca-se a eficiência da composição ARR (I+II) + ALS.

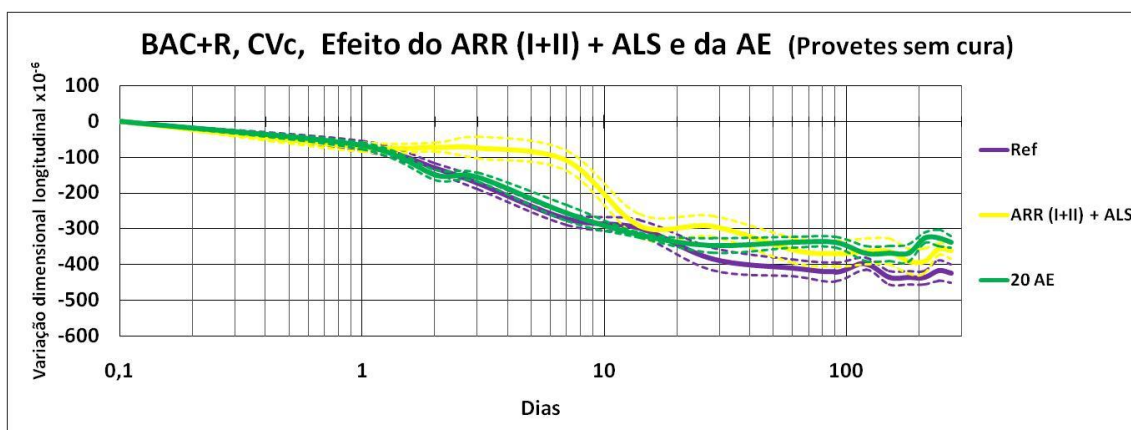


Figura 171 - Variação dimensional longitudinal, efeito dos ARR com o ALS e da AE na retração total. Provetes não submetidos à cura

Na Figura 172, apresenta-se o comportamento dos provetes imersos referente às composições BAC+R CVc ARR (I+II) + ALS e BAC+R CVc. A utilização da AE origina expansões elevadas. Já a composição que incorpora o ALS apresenta uma estabilidade dimensional elevada.

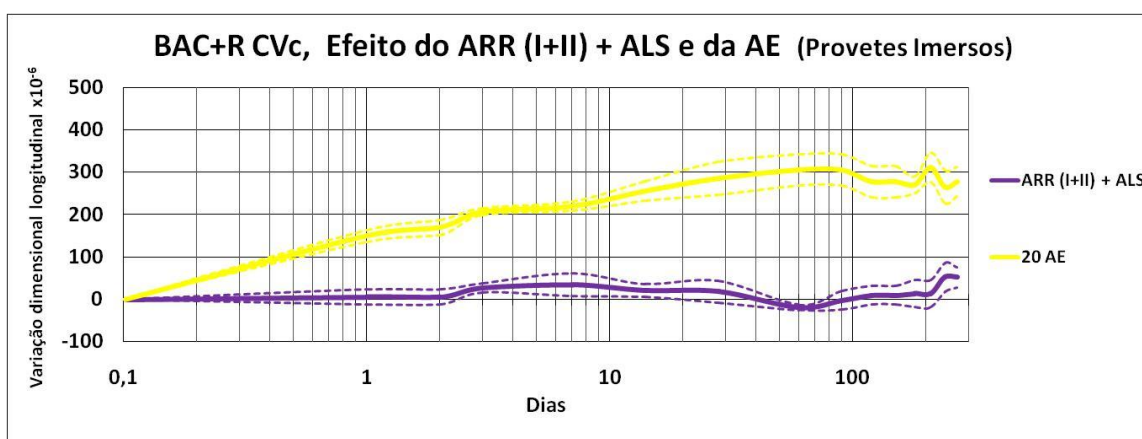


Figura 172 - Variação dimensional longitudinal, efeito dos ARR com o ALS e da AE na retração total. Provetes imersos

5.2.3.2.2 Resultados obtidos a partir das amassaduras de 1,4 litros

5.2.3.2.2.1 Variação de massa

Nas figuras seguintes (Figura 173 à Figura 177) são apresentados os gráficos correspondentes à variação de massa das composições: BAC+R CVc ARR (I+II) + 10 AE; BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE, BAC+R CVc ARR (I+II) + 30 AE; BAC+R CVc ARR (I+II) + 40 AE e BAC+R CVc ALS.

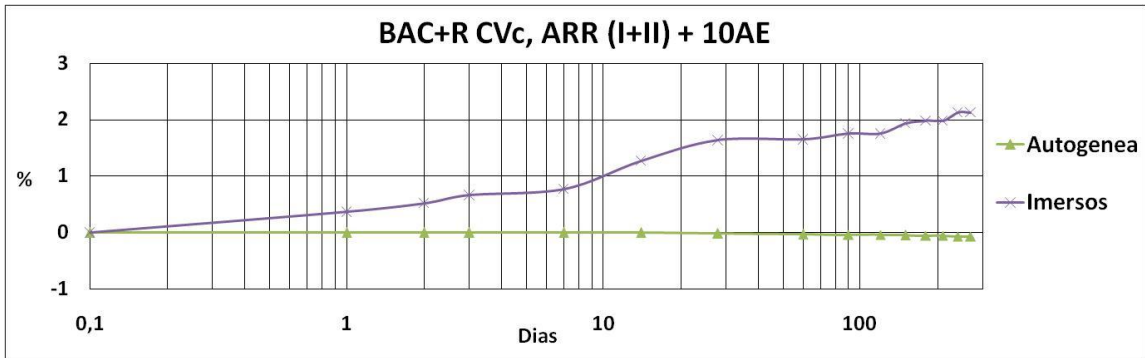


Figura 173 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 10 AE

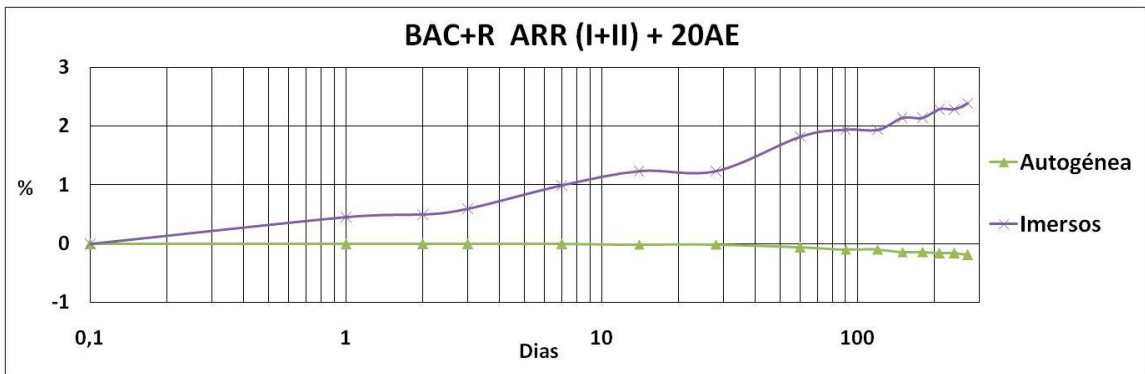


Figura 174 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE

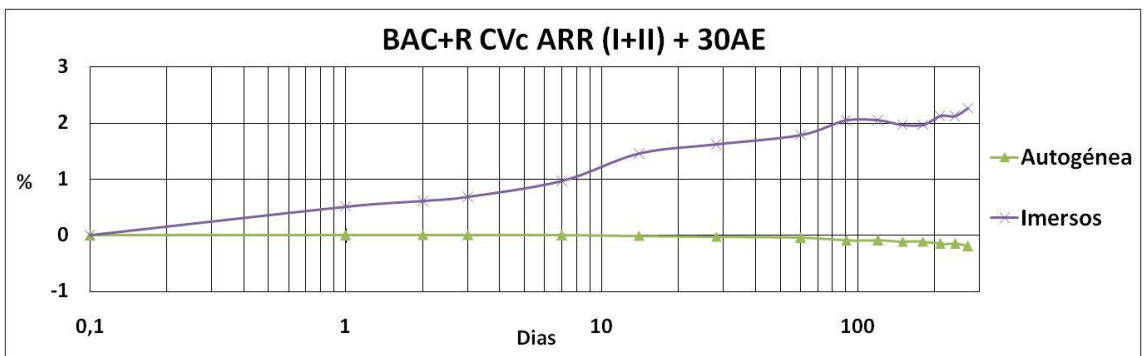


Figura 175 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 30 AE

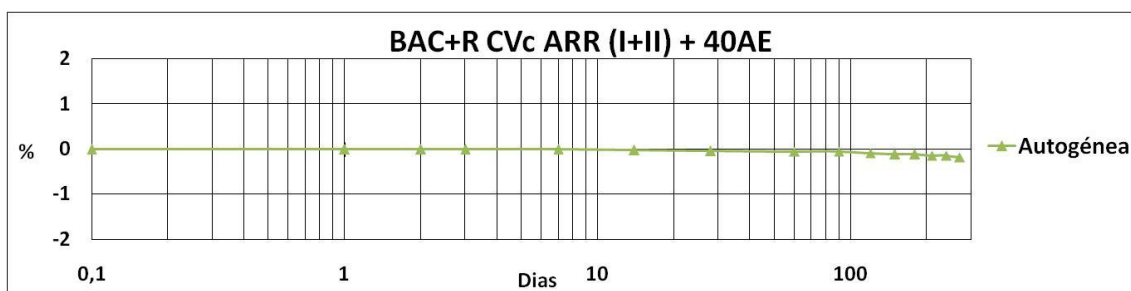


Figura 176 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 40 AE

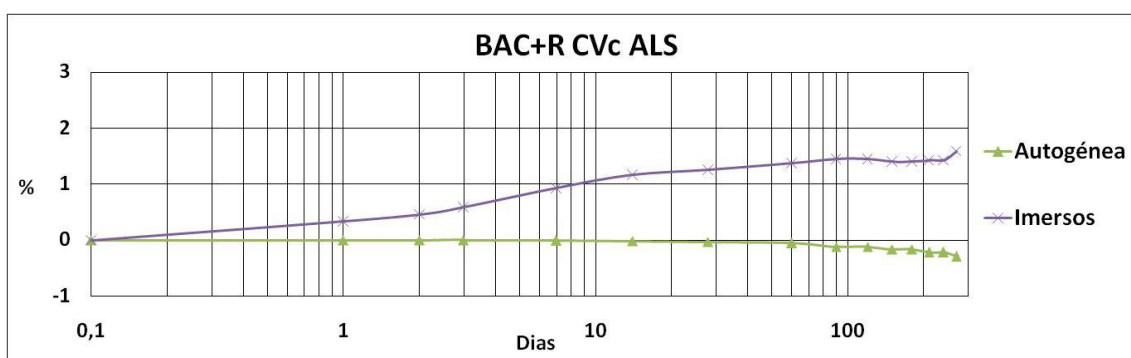


Figura 177 - Variação de massa da composição BAC+R CVc ALS

Os provetes selados registaram uma média de perda de massa, ao final dos 9 meses de idade, de 0,18%. Dado esse valor ser bastante reduzido, considerou-se desprezável a retracção de secagem e assumiu-se que a parcela medida corresponde essencialmente à retracção autogénea.

No que respeita ao ganho de massa dos provetes imersos, é apresentado na Figura 178 o ganho de massa comparativo entre as diferentes composições.

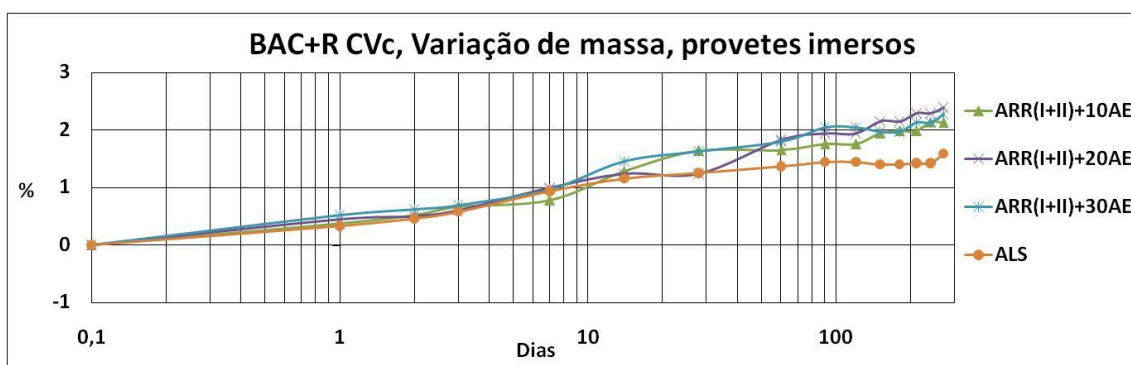


Figura 178 - Variação de massa dos provetes imersos das composições BAC+R CVc ARR (I+II) + 10 AE; BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE, BAC+R CVc ARR (I+II) + 30 AE e BAC+R CVc ALS

Verifica-se que a incorporação dos ARR combinados com a AE incrementa o ganho de massa dos provetes imersos em comparação com os provetes da composição que contém ALS. Esse facto pode ser relacionado com o efeito de retardamento que os ARR provocam na hidratação inicial. Esse efeito já retratado em 3.6.4 origina uma estrutura porosa mais aberta nas primeiras idades o que facilita o ingresso da água. Observa-se ainda que o ganho de massa é registado também ao longo do tempo, o que indica que existe um progresso prolongado na hidratação.

5.2.3.2.2 Variação da dimensão longitudinal (uso dos ARR)

O efeito do uso simultâneo dos dois ARR foi avaliado em amassaduras de 1,4 litros.

Os resultados referentes à retracção autogénea ilustram-se na Figura 179.

De modo análogo ao apresentado anteriormente, representa-se a média do conjunto dos provetes (traço contínuo) e a média do conjunto acrescida e diminuída de um desvio padrão (traço interrompido).

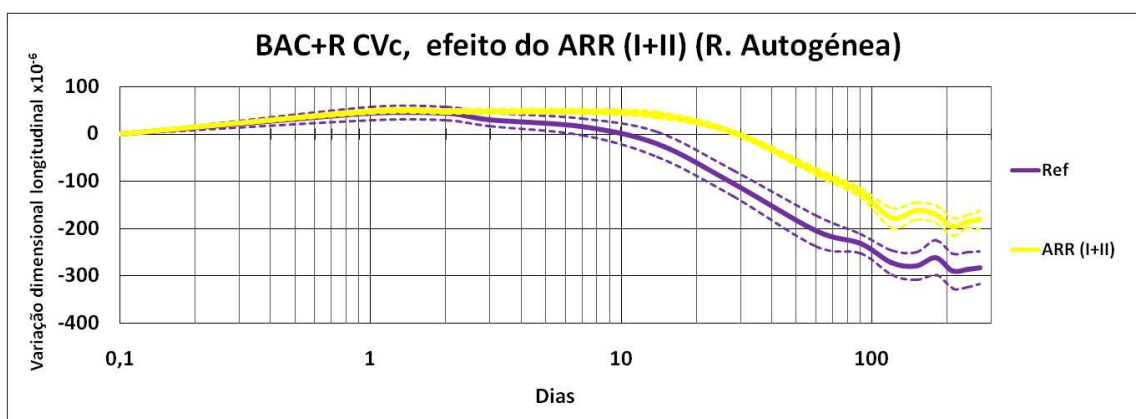


Figura 179 - Variação dimensional longitudinal das composições BAC+R CVC Ref e BAC+R CVC ARR (I+II) nos provetes selados

Na Figura 180 apresentam-se os resultados obtidos para a retracção total em provetes não submetidos a cura, referentes ao uso simultâneo dos dois ARR.

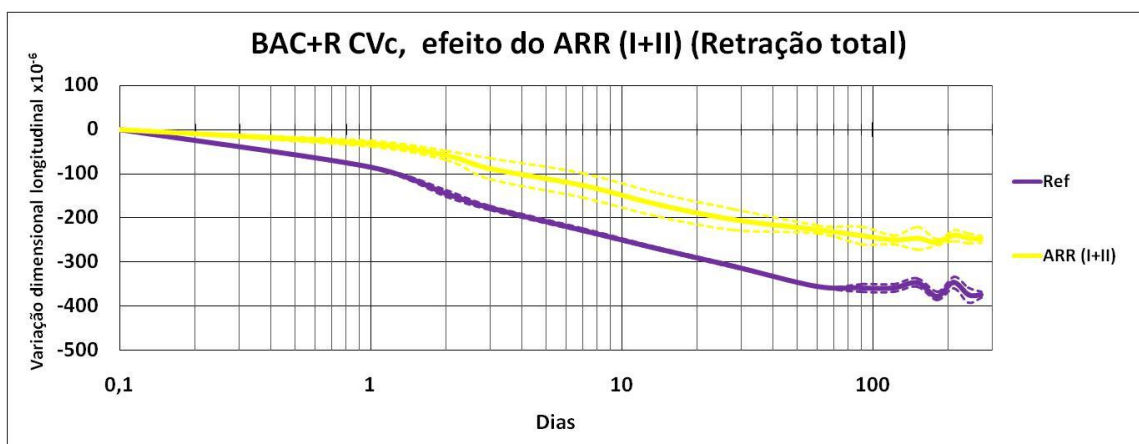


Figura 180 - Variação dimensional longitudinal das composições BAC+R CVc Ref e BAC+R CVc ARR (I+II) na retração total dos provetes sem cura

Em ambos casos (retração autogénea e retração total) os resultados obtidos confirmam o descrito na bibliografia examinada na secção 3.6.3..

5.2.3.2.2.3 Variação da dimensão longitudinal (uso combinado da AE com os ARR e ALS)

Nos gráficos das figuras seguintes (Figura 181 à Figura 185) é exibida a variação da dimensão longitudinal das composições: BAC+R CVc ARR (I+II) + 10 AE; BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE, BAC+R CVc ARR (I+II) + 30 AE; BAC+R CVc ARR (I+II) + 40 AE e BAC+R CVc ALS.

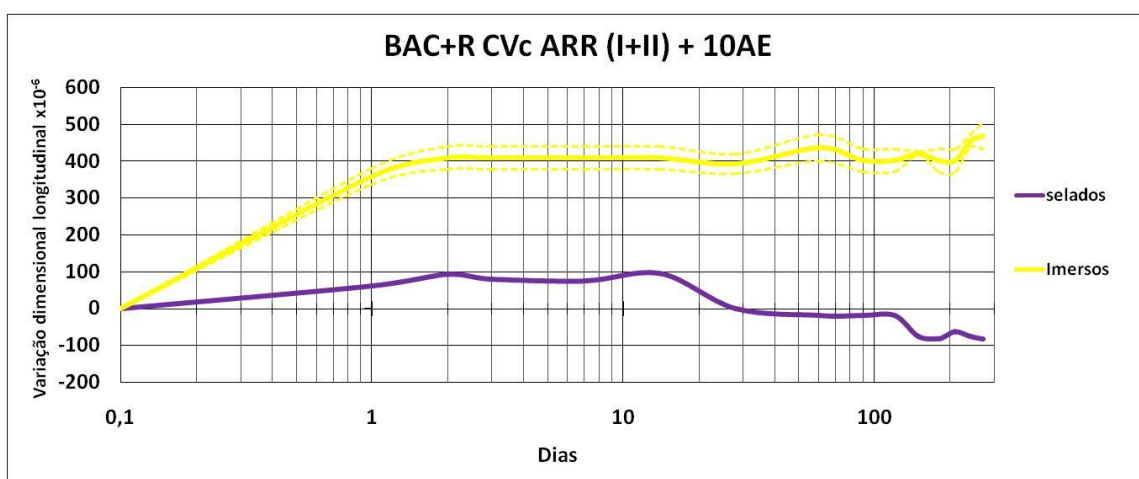


Figura 181 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 10 AE

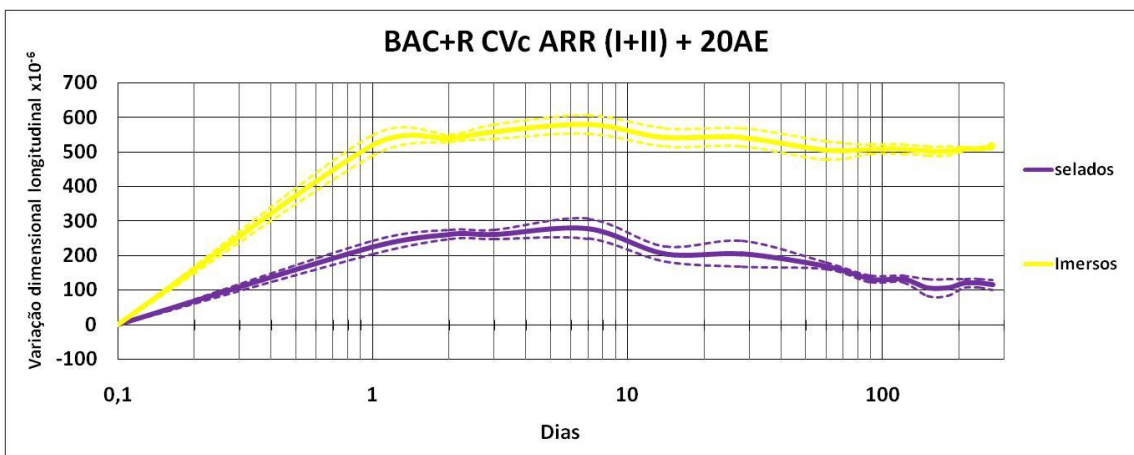


Figura 182 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE

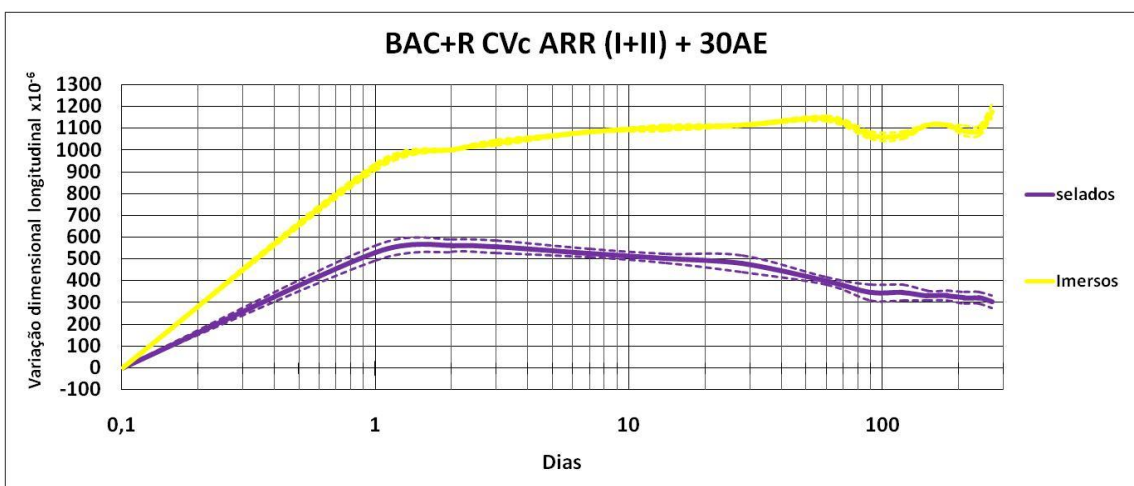


Figura 183 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 30 AE

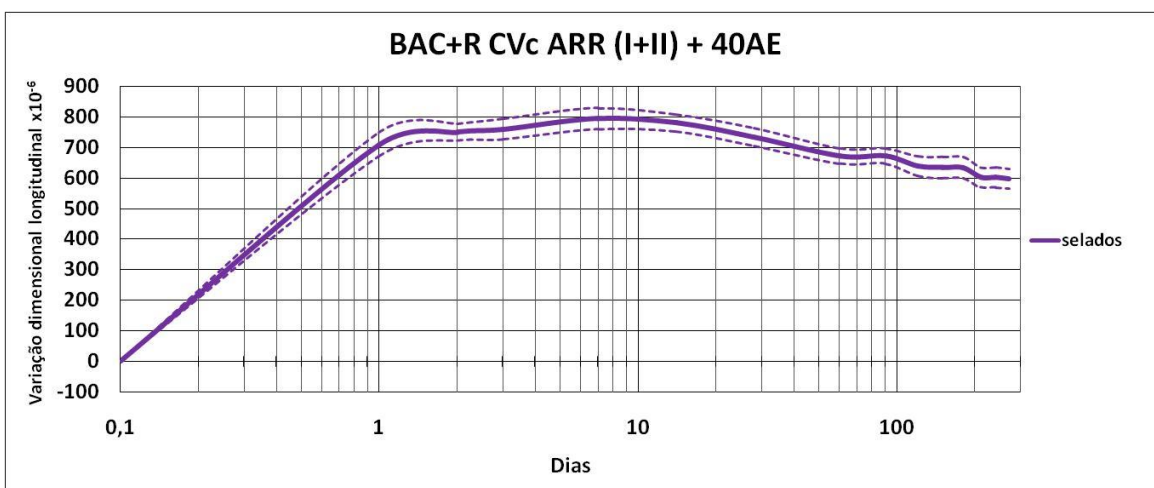


Figura 184 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ARR (I+II) + 40 AE

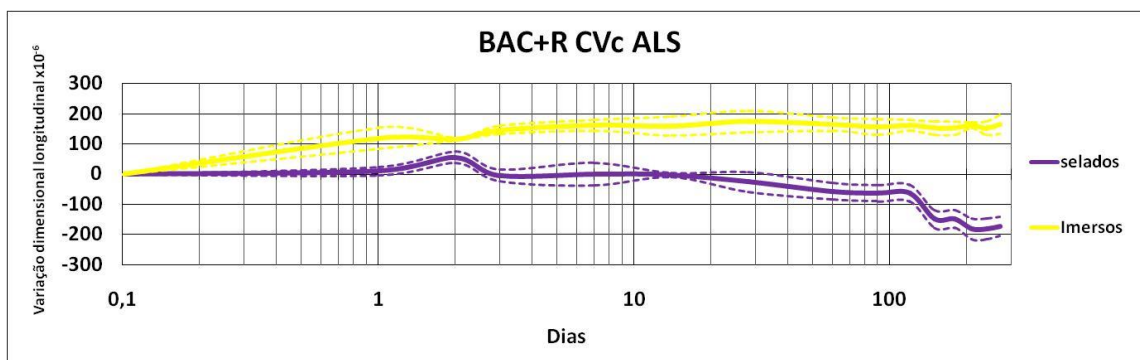


Figura 185 - Variação dimensional longitudinal da composição BAC+R CVc ALS

Analisando em pormenor o efeito da utilização combinada dos ARR (I + II) e da AE, apresenta-se na figura seguinte a evolução da retracção autogénea para as composições BAC+R CVc 20 AE e BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE.

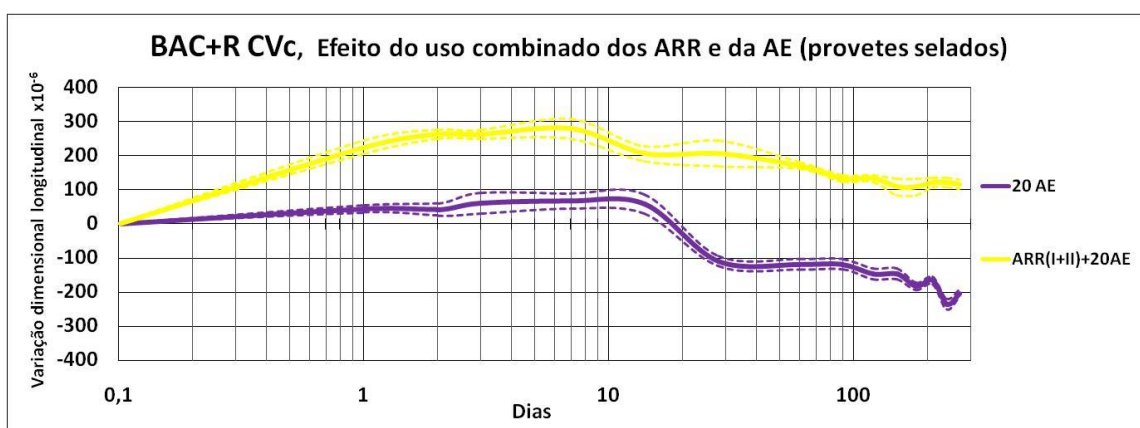


Figura 186 - Variação dimensional longitudinal das composições BAC+R CVc 20 AE e BAC+R CVc ARR (I+II) + 20 AE

Verifica-se que a utilização isolada da AE produz um efeito limitado na redução da retração autogénea. A utilização combinada apresenta um efeito amplificado. O facto de os ARR proporcionarem uma estrutura mais fraca nas primeiras idades possibilita uma maior expansão, induzindo um efeito sinérgico.

A utilização de diferentes dosagens de AE produz um efeito diferenciado nas primeiras idades. A longo prazo o efeito é idêntico (ver Figura 187) o que explica a existência do efeito sinérgico. De facto, o incremento na dosagem da AE de 10 kg/m^3 para 40 kg/m^3 , em patamares de 10 kg/m^3 , provoca um grande acréscimo na expansão inicial de 80×10^{-6} para 795×10^{-6} (expansões de 81, 281, 525 e 795×10^{-6} , respectivamente para as dosagens de 10, 20, 30 e 40 kg/m^3).

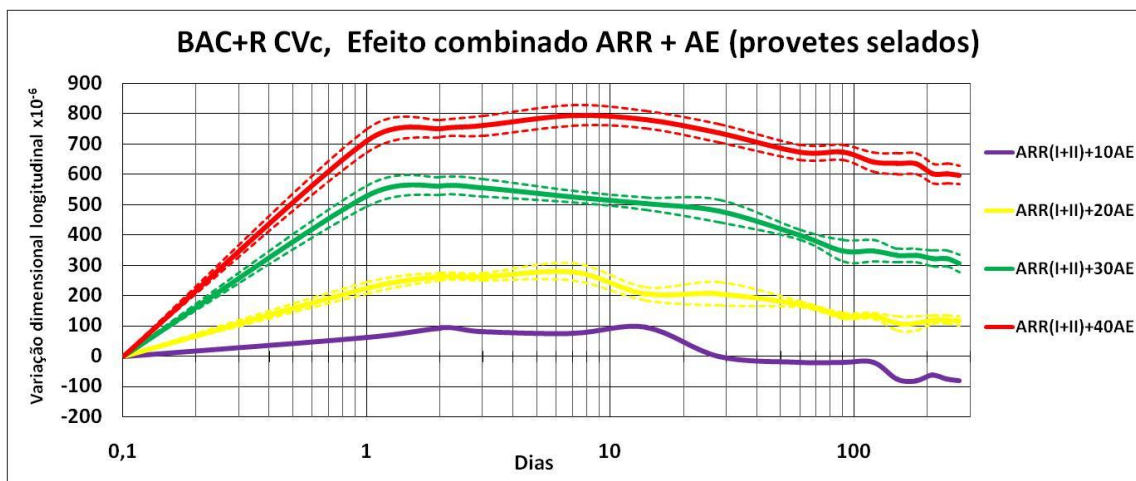


Figura 187 - Variação dimensional longitudinal, efeito da utilização conjunta dos ARR e AE na retracção autogénea

Após 7 dias, a retracção autogénea apresenta-se semelhante para todas as misturas, expressando uma evolução aproximada de $0,70 \times 10^{-6}$ /dia (Figura 188).

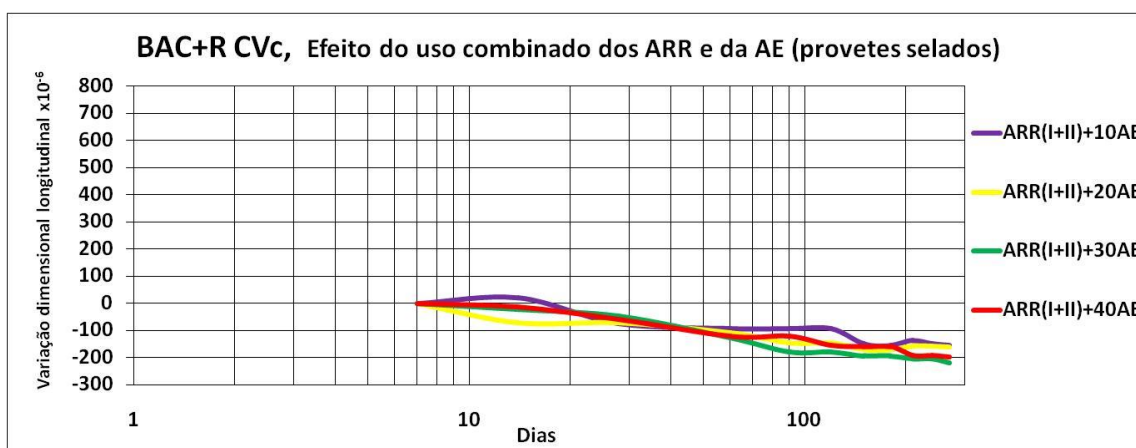


Figura 188 - Variação dimensional longitudinal, efeito da utilização conjunta dos ARR e AE na retracção autogénea, registada entre os 7 e os 270 dias

A utilização de ALS contribuiu para a redução da retracção autogénea, mas o efeito foi significativamente menor quando comparado com o uso da AE (Figura 189).

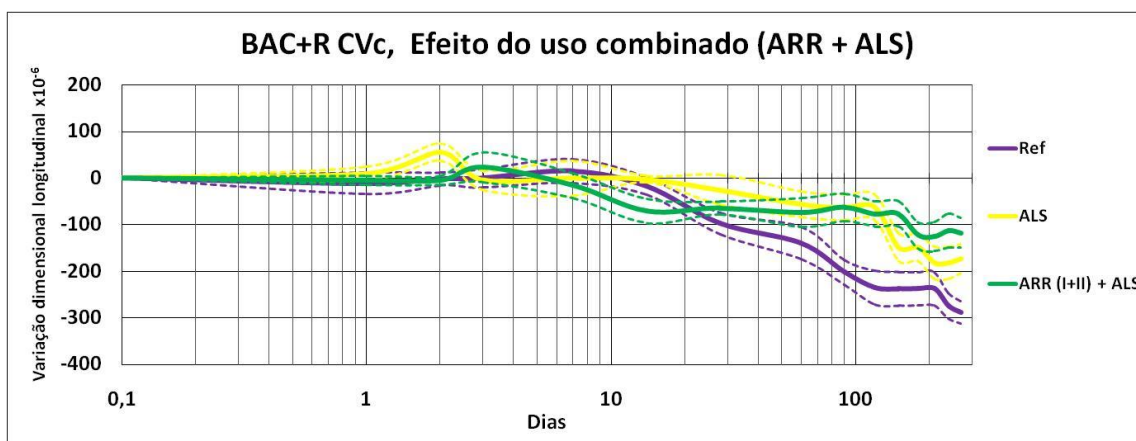


Figura 189 - Variação dimensional longitudinal, efeito da utilização individual do ALS e conjunta com os ARR na retracção autogénea

Conforme esperado, os provetes imersos exibiram expansão devido à penetração da água (Figura 190). A ausência de tensões capilares verificada nos provetes saturados e a pressão interna devida à acção da AE justificam os resultados obtidos.

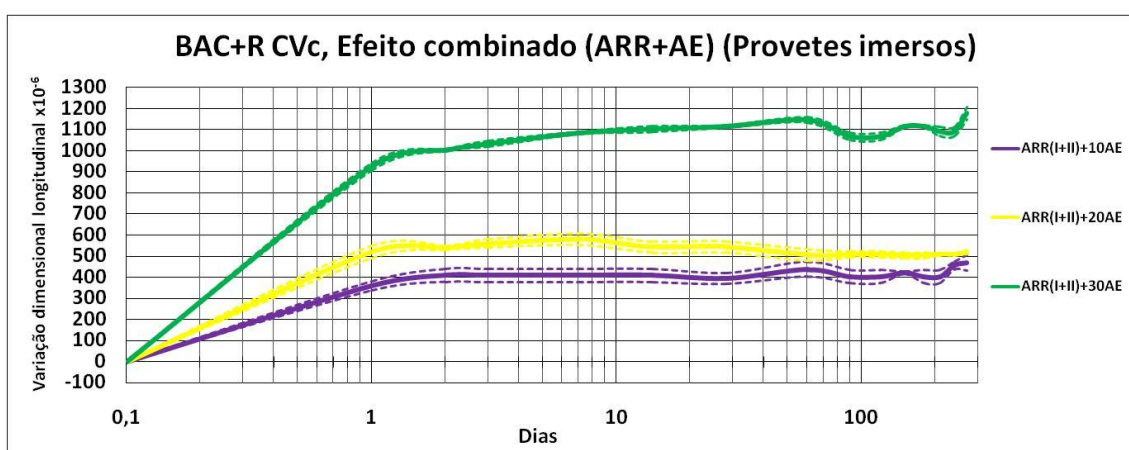


Figura 190 - Variação dimensional longitudinal, efeito da utilização conjunta dos ARR com a AE nos provetes imersos

Quando se observa o comportamento dos provetes imersos das composições BAC+R CVc 20 AE e BAC+R CVc ARR (I+II) 20 AE (Figura 191) verifica-se que as diferenças existentes na expansão inicial não podem ser justificadas pela variação da tensão superficial. A maior expansão verificada na composição BAC+R CVc ARR (I+II) 20 AE é justificada pela existência de uma estrutura sólida mais fraca, tendo em conta que as tensões capilares deverão ser consideradas desprezáveis no caso de provetes imersos.

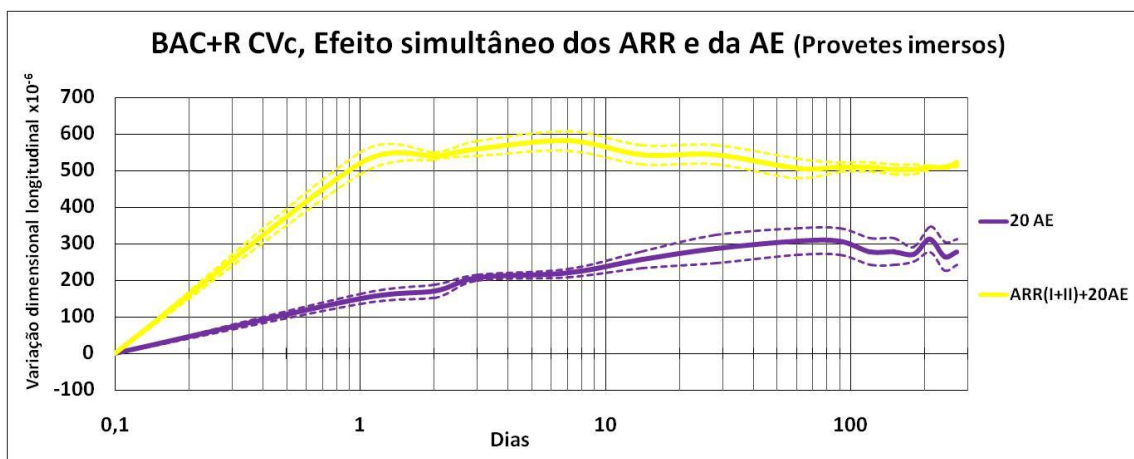


Figura 191 - Variação dimensional longitudinal das composições BAC+R CVc 20 AE e BAC+R CVc ARR (I+II) 20 AE nos provetes imersos

A influência da dosagem de AE para valores inferiores a 20kg/m^3 apresenta-se circunscrita. No entanto, a utilização de 30kg/m^3 revela uma grande influência, evidenciando o risco nocivo presente quando se utilizam AE em quantidades inapropriadas (Figura 190).

5.2.3.2.3 Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco

Para a classe BAC±R foram executados ensaios em argamassas de determinação da variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as variantes BAC+R CVc Ref e BAC+R CVc ARR (I+II) após crivagem no peneiro de malha quadrada de 4 mm de abertura.

Os gráficos da Figura 192 e Figura 193 apresentam as variações dimensionais longitudinais iniciais.

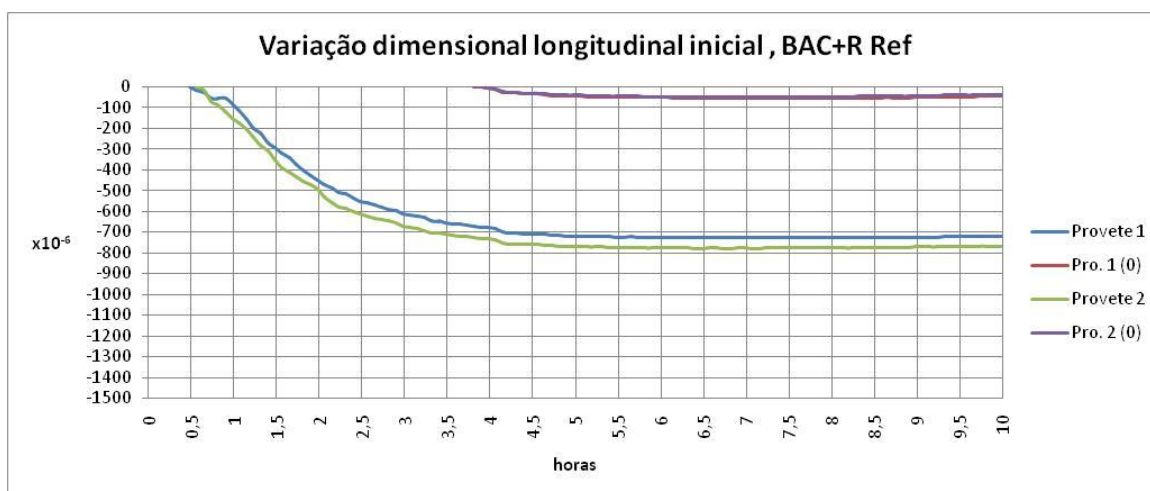


Figura 192 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC+R CVc Ref

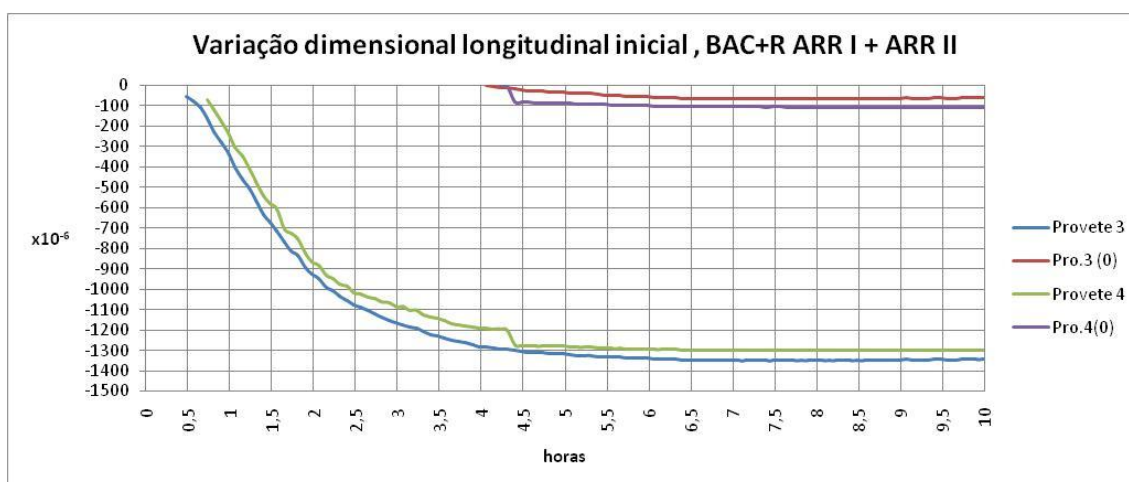


Figura 193 - Variação dimensional longitudinal nas primeiras horas para a composição BAC+R CVc ARR (I+II)

Com base nos gráficos da Figura 192 e Figura 193, foi possível determinar o tempo zero de cada composição, sendo os valores determinados presentes na Tabela 25.

Tabela 25 - Tempo zero das composições BAC+R CVc Ref e BAC+R CVc ARR (I+II)

Composição	T0 (horas)
BAC+R CVc Ref	3,8
BAC+R CVc ARR (I+II)	4,1

No gráfico da Figura 194 apresenta-se a variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as composições BAC+R Ref e BAC+R ARR (I+II), zerados em T0 e 8 h.

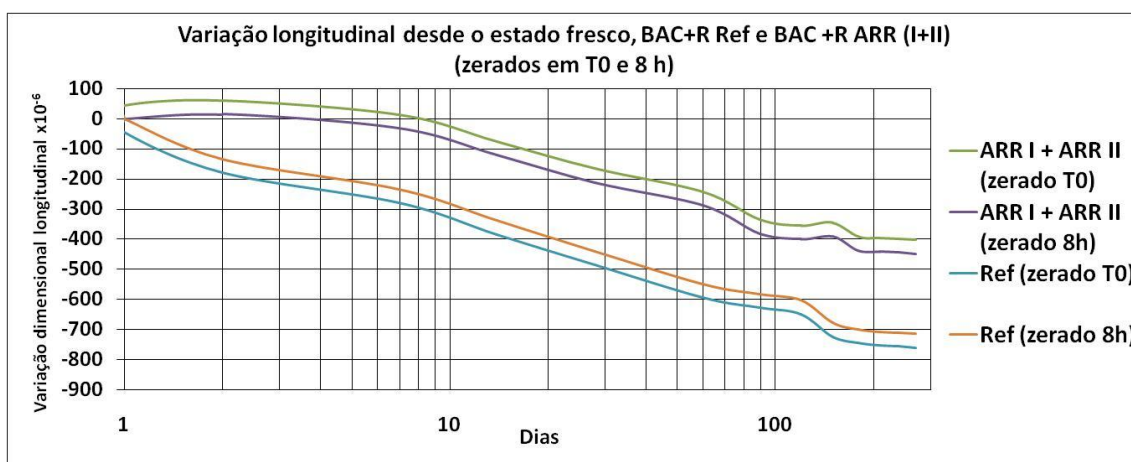


Figura 194 - Variação dimensional longitudinal desde o estado fresco para as composições BAC+R Ref e BAC+R ARR (I+II), zerados em T0 e 8 h

Nas medições efectuadas com provetes convencionais, em que se efectuaram os primeiros registos ao fim de aproximadamente 8 horas obtiveram-se, para as amassaduras em causa, erros por omissão na avaliação da deformação longitudinal de 46×10^{-6} para a composição BAC+R Ref e por excesso de 45×10^{-6} para a composição BAC+R ARR (I+II). Estes resultados não têm em conta o efeito do agregado grosso.

5.2.3.2.4 Resistência à compressão

O gráfico da Figura 195 apresenta a resistência para as composições: Ref; ARR (I+II); 20AE e ARR (I+II) + ALS, obtidas a partir de prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm, até aos 28 dias (Ref e ARR (I+II)) e 9 meses de idade (20AE e ARR (I+II) + ALS). Os resultados apresentados traduzem a média do conjunto de provetes. Os valores individuais respeitaram o critério de aceitação de resultados presente na NP EN 196-1: 2006 [199].

Os provetes utilizados neste ensaio não foram sujeitos à cura após a desmoldagem.

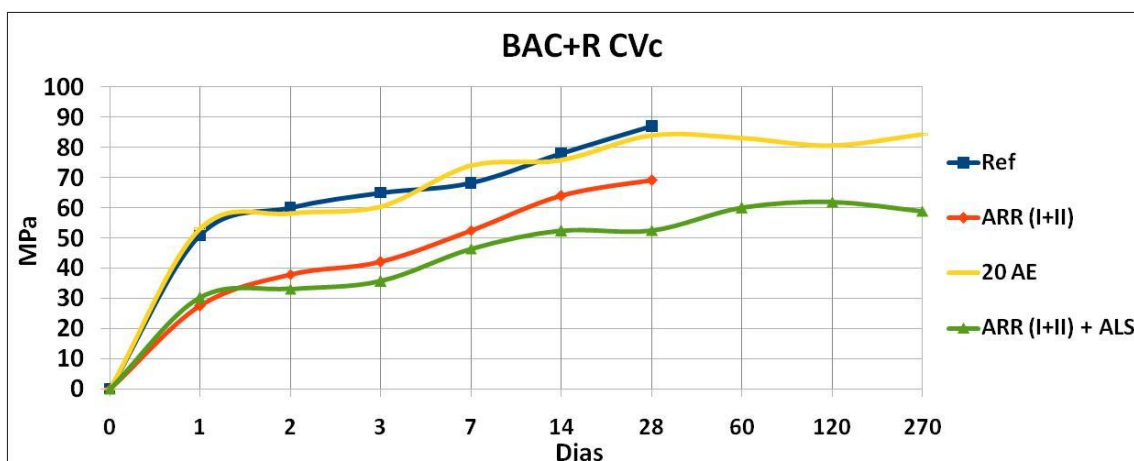


Figura 195 - Resistência à compressão das composições BAC+R CVc

Os resultados evidenciam o efeito retardador dos ARR, indicando também a existência, a longo prazo, de um efeito negativo relativo ao uso dos ARR não associados à velocidade de hidratação. A utilização da AE (sem ARR) proporciona um ligeiro ganho de resistência em comparação com a composição de referência (Ref). Estes resultados seguem a mesma tendência dos verificados para a classe BAC±R. Conforme esperado, a utilização do ALS reduz significativamente a resistência à compressão.

5.2.4 Análise comparativa dos BAC Ref

5.2.4.1 Análise comparativa da variação de massa

Na Tabela 26 é apresentada uma comparação da variação de massa das composições de referência (Ref) nos provetes sem cura. Conforme esperado, verifica-se que a perda de massa diminui substancialmente para as classes de BAC mais resistentes.

Tabela 26 - Variação de massa das composições de referência (Ref) nos provetes sem cura

Composição	Perda de massa (%)					Variação média
	Idade (dias)					
	14	28	90	180	270	%
BAC-R Ref	-5,30	-5,45	-5,39	-5,13	-5,06	-----
BAC±R Ref	-4,38 (-17%)	-4,65 (-15%)	-4,61 (-14%)	-4,45 (-13%)	-4,46 (-12%)	-14
BAC+R Ref CVs	-2,45 (-54%)	-2,53 (-54%)	-2,55 (-53%)	-2,56 (-50%)	-2,52 (-50%)	-52
BAC+R Ref CVc	-2,68 (-49%)	-2,62 (-52%)	-2,76 (-49%)	-2,72 (-47%)	-2,66 (-47%)	-49

Na Tabela 27 é apresentada a comparação da variação de massa das composições de referência (Ref) nos provetes submetidos ao nível máximo de cura. Também neste caso pode observar-se que a perda de massa diminui substancialmente para as classes de BAC mais resistentes.

Tabela 27 - variação de massa das composições de referência (Ref) nos provetes submetidos ao nível de cura máximo

Composição	Perda de massa (%)					Variação média
	Idade (dias)					
	14	28	90	180	270	%
BAC-R Ref	-3,99	-4,57	-4,79	-4,65	-4,61	-----
BAC±R Ref	-2,93 (-26%)	-3,60 (-21%)	-3,78 (-21%)	-3,77 (-19%)	-3,81 (-17%)	-21
BAC+R Ref CVs	-1,36 (-66%)	-1,52 (-67%)	-1,65 (-66%)	-1,86 (-60%)	-1,90 (-59%)	-64
BAC+R Ref CVc	-1,39 (-65%)	-1,48 (-68%)	-1,80 (-62%)	-1,85 (-60%)	-1,89 (-59%)	-63

5.2.4.2 Análise comparativa da variação dimensional longitudinal

O trabalho experimental baseou-se em desenvolvimentos efectuados em três composições base diferenciadas por níveis de resistência. Além da resistência à compressão, existem outras características, nomeadamente a relação água/pó que as qualificam. De acordo com a informação presente na Tabela 21 as composições BAC-R Ref, BAC±R Ref e BAC+R Ref apresentaram as seguintes relações água/pó: 0,458; 0,426 e 0,306 respectivamente.

No gráfico da Figura 196 é retratada a retracção autogénea dos três BAC de referência obtida no ensaio de deformação desde o estado fresco, zeradas em T0.

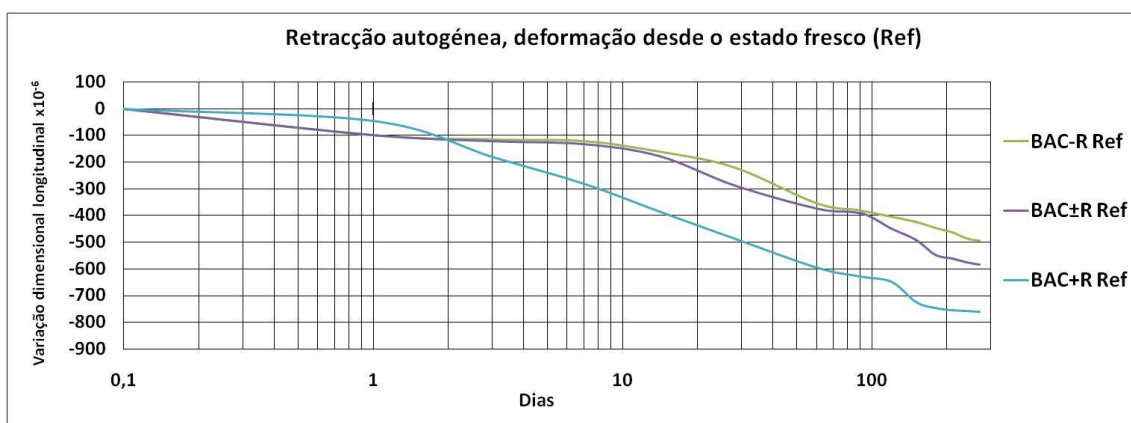


Figura 196 - Retracção autogénea dos três BAC de referência obtidas no ensaio de deformação desde o estado fresco, zerados em T0

De acordo com o revisto na secção 3.2.1.2.3, confirma-se que a variação da relação água/finos produz um efeito nítido na deformação autogénea. Baixas relações água/finos conduzem a maiores retracções autogéneas.

A partir do ensaio de deformação desde o estado fresco, apresentam-se na Tabela 28 os tempos zero obtidos para os diferentes BAC Ref.

Tabela 28 - T0 das composições Ref

Composição	T0 (horas)
BAC-R Ref	5,6
BAC±R Ref	4,7
BAC+R CVc Ref	3,8

Os resultados obtidos confirmam o apresentado na secção 3.4, mais concretamente o expresso por Boivin [146].

No que respeita à retracção total, apresentam-se nas figuras seguintes as comparações para os provetes não submetidos à cura (Figura 197) e submetidos ao período máximo (Figura 198).

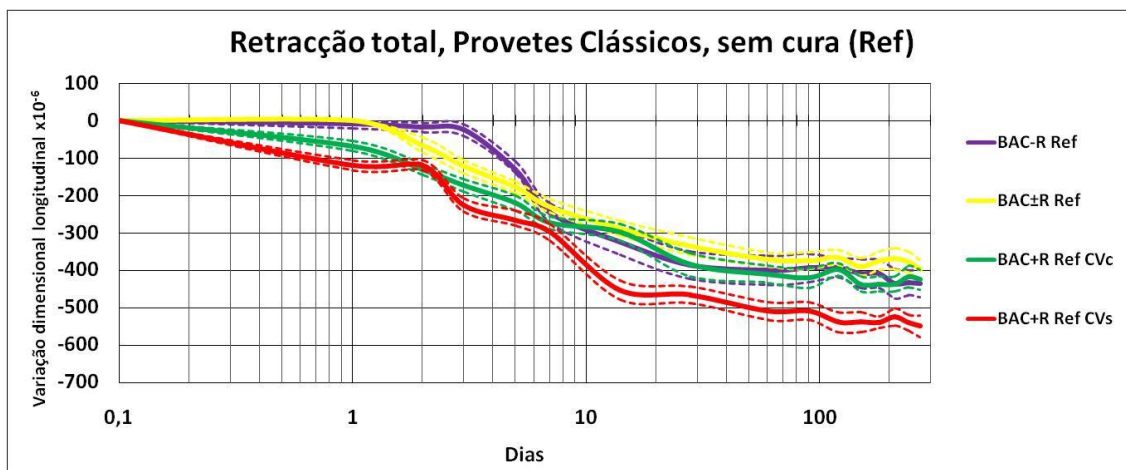


Figura 197 - Retracção total das composições Ref, provetes sem cura

Reportando à retracção total dos provetes sem cura, constata-se que as composições Ref que incorporaram as cinzas volantes de compostilha, independentemente do nível de resistência, apresentam valores idênticos. A composição BAC+R Ref CVs apresenta uma retracção total superior.

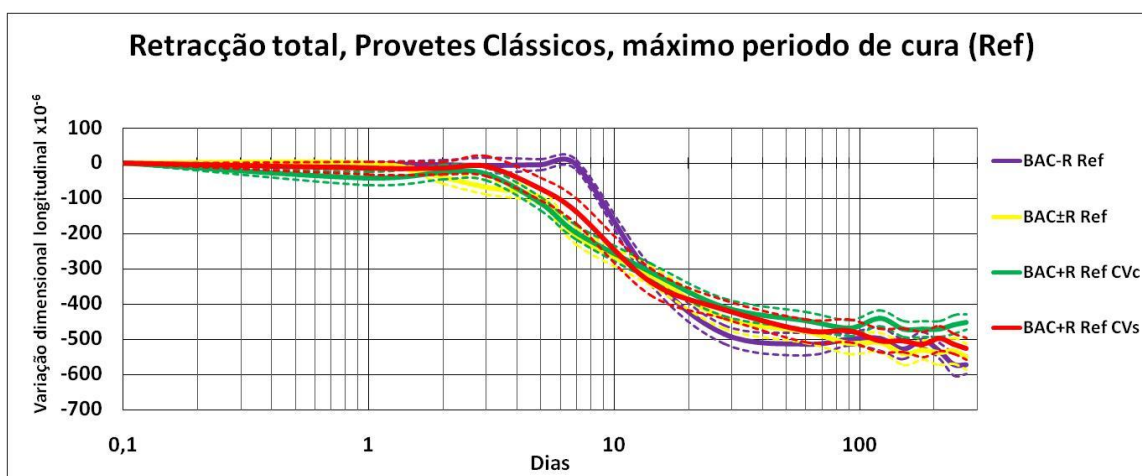


Figura 198 - Retracção total das composições Ref, provetes submetidos ao nível de cura máximo

No que respeita à retracção total dos provetes submetidos ao nível de cura máximo, constata-se que as composições Ref, independentemente do nível de resistência e proveniência das cinzas volantes utilizadas, apresentam valores quase idênticos.

5.2.4.3 Análise comparativa com os valores preconizados no EC2

Nas três secções seguintes, faz-se a comparação dos valores registados nas três composições de referência (Ref) das várias classes de BAC com os valores indicados no Euro Código 2 (EC2) [209]. Compara-se a retracção autogénea e a retracção total, sendo esta última analisada para a situação de provetes sem cura e submetidos ao nível máximo de cura.

5.2.4.3.1 *BAC-R Ref*

Na Figura 199 apresenta-se a retracção autogénea da composição BAC-R Ref em comparação com os valores indicados em [209]. Constatam-se que os valores determinados experimentalmente são muito superiores aos preconizados no EC2.

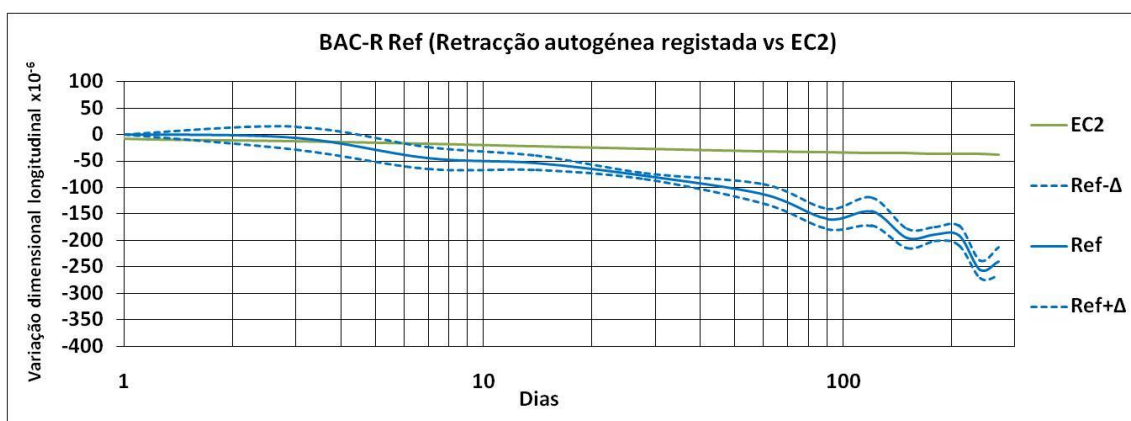


Figura 199 - BAC-R Ref, retracção autogénea, comparação com o EC2

Na Figura 200 apresenta-se a retracção total dos provetes sem cura da composição BAC-R Ref em comparação com os valores indicados no EC2. Nesta análise, observa-se que os valores preconizados no EC2 são sempre superiores aos registados experimentalmente.

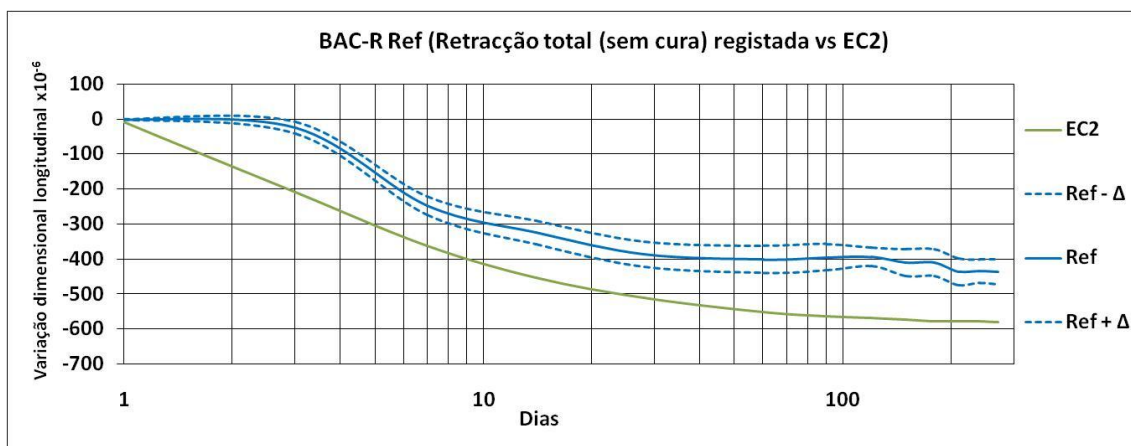


Figura 200 - BAC-R Ref, retracção total sem cura, comparação com o EC2

Na Figura 201 apresenta-se a retracção total dos provetes submetidos ao nível máximo de cura da composição BAC-R Ref, em comparação com os valores indicados no EC2. Os resultados experimentais obtidos revelam-se semelhantes aos valores preconizados no EC2.

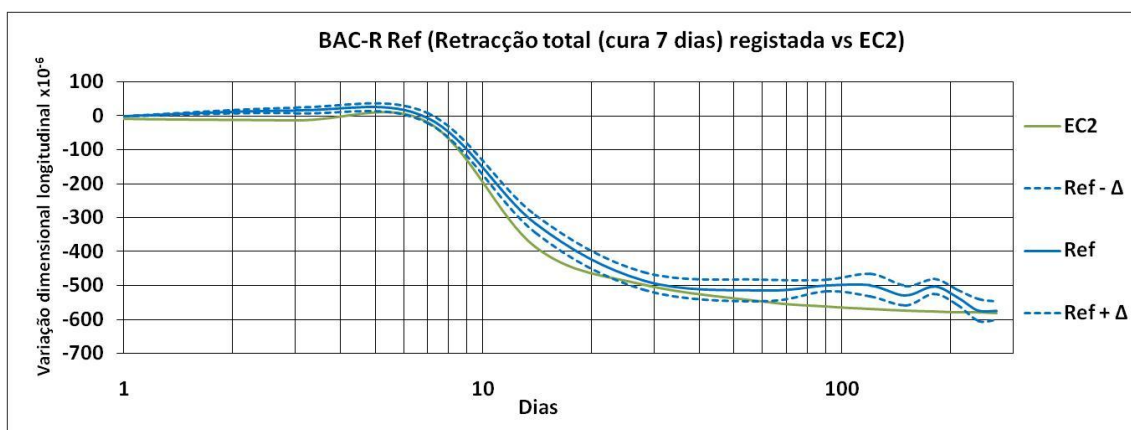


Figura 201 - BAC-R Ref, retracção total, com cura, comparação com o EC2

5.2.4.3.2 BAC±R Ref

Na Figura 202, apresenta-se a retracção autógena da composição BAC±R Ref em comparação com os valores indicados em [209]. Também nesta classe de BAC se pode constatar que os valores determinados experimentalmente são muito superiores aos preconizados no EC2.

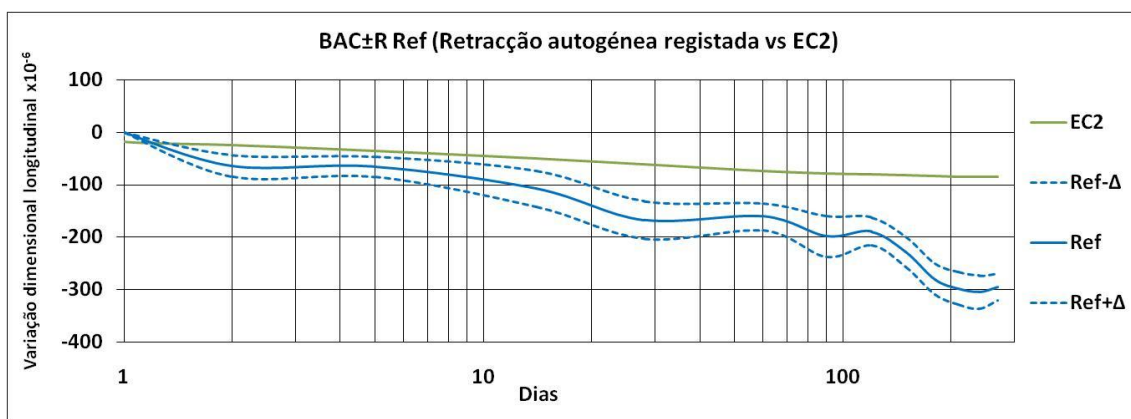


Figura 202 - BAC±R Ref, retração autógena, comparação com o EC2

Na Figura 203 apresenta-se a retração total dos provetes sem cura da composição BAC±R Ref, em comparação com os valores indicados no EC2. De modo idêntico ao observado na classe BAC-R, também nesta série os valores preconizados no EC2 são superiores aos registados experimentalmente.

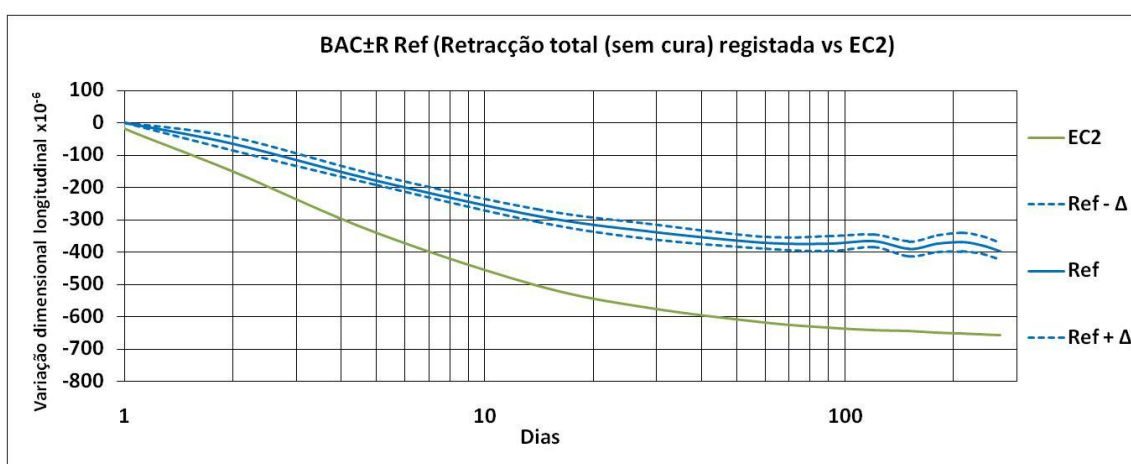


Figura 203 - BAC±R Ref, retração total sem cura, comparação com o EC2

Na Figura 204 apresenta-se a retração total dos provetes submetidos ao nível máximo de cura da composição BAC±R Ref, em comparação com os valores indicados no EC2. Constata-se que os valores obtidos experimentalmente são inferiores aos preconizados no EC2.

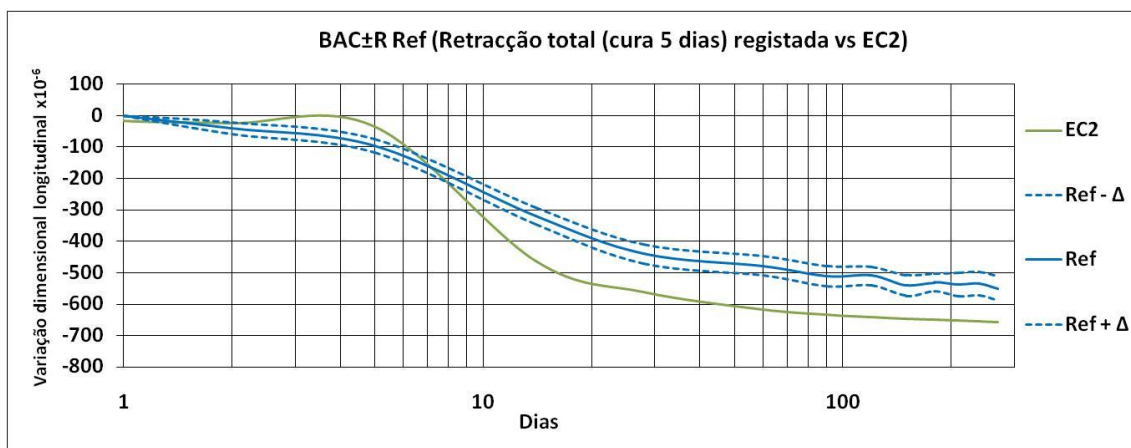


Figura 204 - BAC±R Ref, retracção total, com cura, comparação com o EC2

5.2.4.3.3 BAC+R

A Figura 205 ilustra a retração autogénea observada na composição BAC+R Ref, sendo os valores comparados com os valores indicados em [209]. Também nesta classe de BAC verifica-se, a longo prazo, que os valores determinados experimentalmente são superiores aos preconizados no EC2.

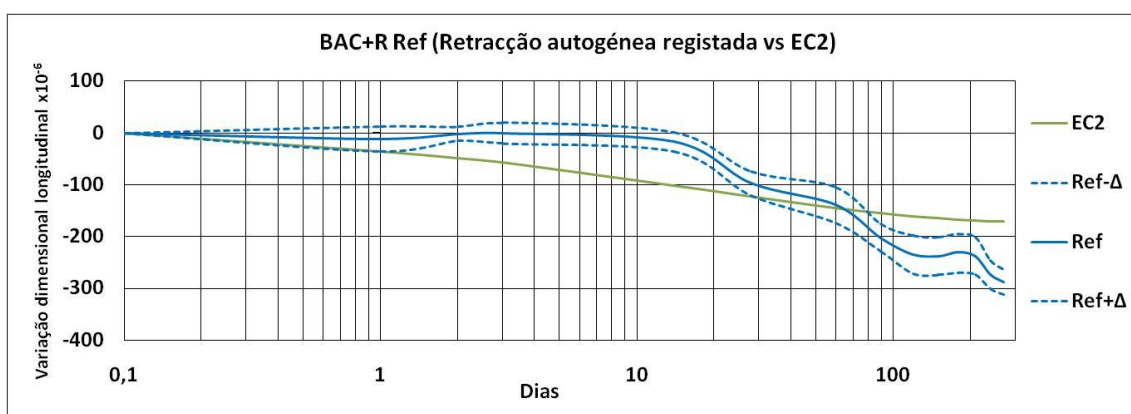


Figura 205 – BAC+R Ref, retracção autogénea, comparação com o EC2

Na Figura 206 apresenta-se a retração total dos provetes sem cura da composição BAC+R Ref em comparação com os valores indicados no EC2. De modo semelhante ao observado nas classes apresentadas anteriormente, também nesta se verifica que os valores preconizados no EC2 são superiores aos registados experimentalmente.

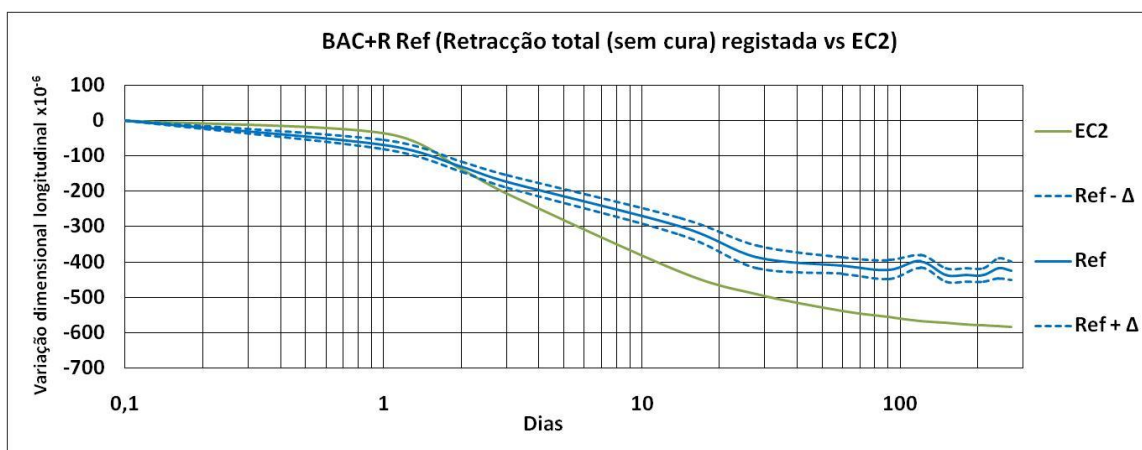


Figura 206 – BAC+R Ref, retracção total sem cura, comparação com o EC2

A Figura 207 apresenta a retracção total dos provetes submetidos ao nível máximo de cura da composição BAC+R Ref, sendo estes resultados comparados com o indicado no EC2. Os valores preconizados pelo EC2 são sempre superiores aos apurados experimentalmente.

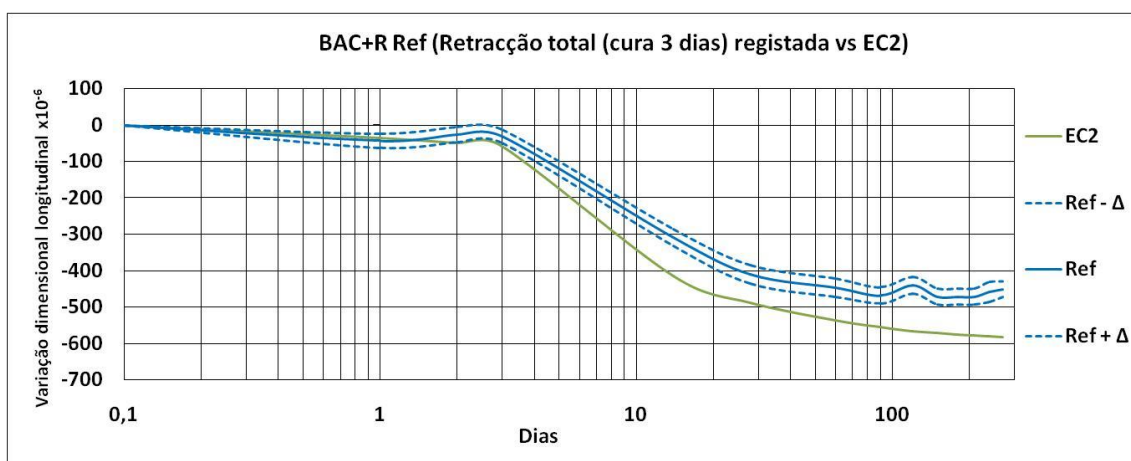


Figura 207 - BAC±R Ref, retracção total, com cura, comparação com o EC2

5.2.5 Análise do efeito da cura

Na secção 5.2.1.5, inserida na análise de dados referente à classe BAC-R, ficou demonstrado que o efeito de cura promoveu a existência de poros de menores dimensões. De facto, o prolongamento do tempo de cura originou um acréscimo significativo na retracção total.

Na Tabela 29, apresentam-se os resultados correspondentes à retracção total obtidos em várias composições, para as idades de 1, 3, 6 e 9 meses de idade, sem cura e submetidos ao nível máximo de cura.

Tabela 29 - Efeito da cura a longo prazo na retracção total

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)								Variação média
		Sem cura				Com cura (nível máximo)				
		Idade (Meses)				Idade (Meses)				
		1	3	6	9	1	3	6	9	
BAC-R	Ref	-386	-394	-409	-435	-486 (+26%)	-500 (+27%)	-502 (+23%)	-573 (+32%)	+27
	ARR I	-313	-320	-343	-359	-387 (+24%)	-465 (+45%)	-493 (+44%)	-522 (+45%)	+40
	ARR II	-336	-336	-353	-374	-424 (+26%)	-455 (+35%)	-500 (+42%)	-536 (+43%)	+37
	ARR (I+II)	-224	-258	-321	-324	-280 (+25%)	-384 (+49%)	-419 (+31%)	-419 (+29%)	+34
	ARR (I+II) + 20 AE	-170	-238	-244	-260	-265 (+56%)	-353 (+48%)	-371 (+52%)	-385 (+48%)	+51
	ARR (I+II) + 30 AE	-213	-273	-304	-330	-246 (+15%)	-344 (+26%)	-391 (+29%)	-427 (+29%)	+25
	ARR (I+II) + 40 AE	-103	-213	-246	-265	-133 (+29%)	-260 (+22%)	-354 (+44%)	-334 (+26%)	+30
BAC±R	Ref	-288	-374	-374	-397	-439 (+52%)	-511 (+37%)	-531 (+42%)	-550 (+39%)	+45
	ARR I	-285	-342	-417	-434	-284 (0%)	-380 (+11%)	-461 (+11%)	-504 (+16%)	+10
	ARR II	-313	-334	-364	-353	-349 (+12%)	-412 (+23%)	-465 (+28%)	-442 (+25%)	+22
	ARR (I+II)	-274	-295	-354	-327	-325 (+19%)	-377 (+28%)	-441 (+25%)	-440 (+35%)	+27
	ARR (I+II) + 20 AE	-207	-254	-285	-281	-233 (+13%)	-332 (+31%)	-419 (+47%)	-397 (+41%)	+33
	ARR (I+II) + 30 AE	-113	-143	-183	-218	-216 (+91%)	-296 (+107%)	-350 (+91%)	-378 (+73%)	+91
BAC+R CVs	Ref	-465	-509	-539	-549	-415 (-11%)	-476 (-6%)	-515 (-4%)	-527 (-4%)	-7
	ARR I	-326	-331	-376	-380	-289 (-11%)	-302 (-9%)	-342 (-9%)	-335 (-12%)	-10
BAC+R CVc	Ref	-385	-421	-437	-425	-410 (+6%)	-468 (+11%)	-471 (+8%)	-451 (+6%)	+8
	ARR(I+II) + ALS	-293	-369	-391	-361	-300 (+2%)	-394 (+7%)	-408 (+4%)	-361 (-)	+3
	20 AE	-347	-338	-369	-336	-319 (-8%)	-369 (+9%)	-365 (-1%)	-322 (-4%)	-1

Verifica-se que as composições das classes BAC-R e BAC±R apresentam uma retracção total a longo prazo mais elevada, quando sujeitas à cura. A influência da cura nas composições ensaiadas da classe BAC+R (CVs e CVc) é reduzida. O rápido desenvolvimento da resistência desta classe reduz a perda de água por secagem logo nas primeiras idades, limitando a acção do efeito da cura.

Além da comparação do efeito da cura a longo prazo, interessa também analisar esse efeito nas primeiras idades (Tabela 30 para o BAC-R; Tabela 31 para o BAC±R e Tabela 32 para o BAC+R).

A análise aos resultados demonstra que a realização da cura produz, nas primeiras idades, reduções importantes na retracção total.

Tabela 30 - Efeito da cura nas primeiras idades na retracção total da classe BAC-R

Composição		Retracção total ($\times 10^{-6}$)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		3	7	14	3	7	14	
BAC-R	Ref	-24	-246	-324	+17 (-170%)	-5 (-98%)	-318 (-2%)	-90
	ARR I	-42	-138	-274	-26 (-38%)	-74 (-46%)	-241 (-12%)	-32
	ARR II	-40	-137	-304	-39 (-3%)	+8 (-106%)	-277 (-9%)	-39
	ARR (I+II)	-32	-151	-189	-19 (-41%)	-19 (-87%)	-145 (-23%)	-50
	ARR (I+II) + 20 AE	+28	-68	-123	+35 (-25%)	+47 (-169%)	-69 (-43%)	-79
	ARR (I+II) + 30 AE	-11	-64	-150	+23 (-309%)	+15 (-123%)	-111 (-26%)	-152
	ARR (I+II) + 40 AE	+68	+79	-102	+108 (-59%)	+111 (-41%)	-118 (+16%)	-28

Tabela 31 - Efeito da cura nas primeiras idades na retracção total da classe BAC±R

Composição		Retracção total ($\times 10^{-6}$)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		2	5	14	2	5	14	
BAC±R	Ref	-65	-178	-288	-40 (-38%)	-96 (-46%)	-319 (+11%)	-24
	ARR I	-46	-112	-230	-38 (-17%)	-5 (-96%)	-169 (-27%)	-47
	ARR II	-17	-81	-186	-45 (+164%)	-41 (-49%)	-185 (-)	+38
	ARR (I+II)	-59	-107	-170	-41 (-31%)	-42 (-61%)	-179 (+5%)	-29
	ARR (I+II) + 20 AE	-13	-40	-110	-21 (+61%)	-24 (-40%)	-104 (-5%)	+5
	ARR (I+II) + 30 AE	+59	+56	-59	+39 (+38%)	+76 (-36%)	-74 (-25%)	-8

Tabela 32 - Efeito da cura nas primeiras idades na retracção total da classe BAC+R

Composição		Retracção total ($\times 10^{-6}$)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		1	2	3	1	2	3	
BAC+R CVs	Ref	-119	-119	-225	-14 (-88%)	-14 (-88%)	-8 (-96%)	-91
	ARR I	+7	+7	-84	+19 (-171%)	+19 (-171%)	+26 (-131%)	-158
BAC+R CVc	Ref	-68	-130	-172	-43 (-37%)	-26 (-80%)	-31 (-82%)	-66
	ARR (I+II) +ALS	-72	-72	-73	+4 (-106%)	+4 (-106%)	+3 (-104%)	-105
	20 AE	-68	-149	-155	+56 (-182%)	+59 (-140%)	+72 (-146%)	-156

5.2.6 Análise do efeito dos adjuvantes redutores de retracção

Na Tabela 33 apresentam-se os resultados correspondentes à retracção total obtidos em várias composições para as idades de 1, 3, 6 e 9 meses de idade, com e sem adjuvantes redutores de retracção. Observa-se que a utilização dos ARR provoca uma diminuição relevante na retracção total, confirmando a revisão apresentada na secção 3.6.3.

Em relação à utilização simultânea dos dois ARR, verifica-se um efeito cumulativo na redução da retracção total. Estes resultados confirmam o referido na secção 3.6.5, nomeadamente em [1].

Refira-se ainda que os ARR apresentaram efeitos semelhantes tanto nos provetes sujeitos à cura como nos que não foram sujeitos a este procedimento.

Tabela 33 - Efeito dos ARR a longo prazo na retracção total

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)								Variação média
		Sem cura				Com cura (nível máximo)				
		Idade (Meses)				Idade (Meses)				
		1	3	6	9	1	3	6	9	
BAC-R	Ref	-386	-394	-409	-435	-486	-500	-502	-573	-----
	ARR I	-313 (-19%)	-320 (-19%)	-343 (-16%)	-359 (-17%)	-387 (-20%)	-465 (-7%)	-493 (-2%)	-522 (-9%)	-14 (-18/-10)
	ARR II	-336 (-13%)	-336 (-15%)	-353 (-14%)	-374 (-14%)	-424 (-13%)	-455 (-9%)	-500 (0%)	-536 (-6%)	-11 (-14/-7)
	ARR (I+II)	-224 (-42%)	-258 (-35%)	-321 (-22%)	-324 (-26%)	-280 (-42%)	-384 (-23%)	-419 (-17%)	-419 (-27%)	-29 (-31/-37)
BAC±R	Ref	-288	-374	-374	-397	-439	-511	-531	-550	-----
	ARR I	-285 (-1%)	-342 (-9%)	-417 (-11%)	-434 (-9%)	-284 (-35%)	-380 (-26%)	-461 (-13%)	-504 (-8%)	-9 (-3/-21)
	ARR II	-313 (-9%)	-334 (-11%)	-364 (-3%)	-353 (-11%)	-349 (-21%)	-412 (-19%)	-465 (-12%)	-442 (-20%)	-11 (-4/-18)
	ARR (I+II)	-274 (-5%)	-295 (-21%)	-354 (-5%)	-327 (-18%)	-325 (-26%)	-377 (-26%)	-441 (-17%)	-440 (-20%)	-17 (-12/-22)
BAC+R CVc	Ref	-311	-359	-378	-375	--	--	--	--	-----
	ARR (I+II)	-204 (-34%)	-240 (-33%)	-255 (-33%)	-249 (-34%)	--	--	--	--	-34 (-34/---)
BAC+R CVs	Ref	-465	-509	-539	-549	-415	-476	-515	-527	-----
	ARR I	-326 (-30%)	-331 (-35%)	-376 (-30%)	-380 (-31%)	-289 (-30%)	-302 (-37%)	-342 (-34%)	-335 (-36%)	-33 (-31/-34)

Na Tabela 34 apresenta-se a análise à eficiência dos ARR nas primeiras idades na retracção total da classe BAC-R. Para os provetes não submetidos à cura observa-se que a utilização dos ARR reduz significativamente a retracção total. Já para os provetes submetidos à cura durante 7 dias, a utilização dos ARR só manifesta vantagem a partir dessa data.

Tabela 34 - Efeito dos ARR a curto prazo na retracção total da classe BAC-R

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		3	7	14	3	7	14	
BAC-R	Ref	-24	-246	-324	+17	-5	-318	----
	ARR I	-42 (+75%)	-138 (-44%)	-274 (-15%)	-26 (+253%)	-74 (+1380%)	-241 (-24%)	+271 (+5/+536)
	ARR II	-40 (+66%)	-137 (-44%)	-304 (-6%)	-39 (+329%)	+8 (-260%)	-277 (-13%)	+12 (+5/+19)
	ARR (I+II)	-32 (+33%)	-151 (-39%)	-189 (-42%)	-19 (+212%)	-19 (+280%)	-145 (-54%)	-29 (-16/+246)

Na Tabela 35, apresenta-se a análise à eficiência dos ARR nas primeiras idades na retracção total da classe BAC±R. Para os provetes não submetidos à cura e submetidos ao nível máximo observa-se que a utilização dos ARR reduz significativamente a retracção total. Não se verifica, nas primeiras idades o efeito cumulativo verificado na classe anterior.

Tabela 35 - Efeito dos ARR a curto prazo na retracção total da classe BAC±R

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		2	5	14	2	5	14	
BAC±R	Ref	-65	-178	-288	-40	-96	-319	----
	ARR I	-46 (-29%)	-112 (-37%)	-230 (-20%)	-38 (-5%)	-5 (-94%)	-169 (-47%)	-39 (-29/-49)
	ARR II	-17 (-74%)	-81 (-54%)	-186 (-35%)	-45 (+13%)	-41 (-57%)	-185 (-42%)	-42 (-54/-29)
	ARR (I+II)	-59 (-9%)	-107 (-40%)	-170 (-41%)	-41 (+3%)	-42 (-56%)	-179 (-44%)	-29 (-30/-32)

Na Tabela 36 apresenta-se a análise à eficiência dos ARR nas primeiras idades na retracção total da classe BAC+R. Observa-se que a utilização dos ARR reduz significativamente a retracção total.

Tabela 36 - Efeito dos ARR a curto prazo na retracção total da classe BAC+R

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		1	2	3	1	2	3	
BAC+R CVc	Ref	-86	-145	-178	--	--	--	--
	ARR (I+II)	-33 (-62%)	-58 (-60%)	-88 (-51%)	--	--	--	-58 (-58/-)
BAC+R CVs	Ref	-119	-119	-225	-14	-14	-8	--
	ARR I	+7 (-106%)	+7 (-106%)	-84 (-63%)	+19 (-236%)	+19 (-236%)	+26 (-425%)	-29 (-92/-299)

Na Tabela 37 analisa-se o efeito dos ARR a longo prazo na retracção autógena. Observa-se que o uso dos ARR reduz substancialmente a retracção autógena. A utilização em simultâneo dos dois ARR não favoreceu a redução da retracção autógena.

Tabela 37 - Efeito dos ARR a longo prazo na retracção autógena

Composição		Retracção autógena ($\times 10^{-6}$)				Variação média %
		Idade (Meses)				
		1	3	6	9	
BAC-R	Ref	-78	-159	-188	-241	-----
	ARR I	+9 (-112%)	-12 (-92%)	-30 (-84%)	-127 (-47%)	-84
	ARR II	-56 (-28%)	-89 (-44%)	-130 (-31%)	-236 (-2%)	-26
	ARR (I+II)	+9 (-112%)	+11 (-107%)	-97 (-48%)	-128 (-47%)	-78
BAC±R	Ref	-167	-198	-280	-295	-----
	ARR I	-44 (-74%)	-92 (-54%)	-148 (-47%)	-208 (-29%)	-51
	ARR II	-64 (-62%)	-97 (-51%)	-202 (-28%)	-216 (-27%)	-42
	ARR (I+II)	-89 (-47%)	-156 (-21%)	-242 (-14%)	-239 (-19%)	-25
BAC+R CVc	Ref	-105	-232	-261	-282	-----
	ARR (I+II)	+4 (-104%)	-123 (-47%)	-170 (-35%)	-180 (-36%)	-55
BAC+R CVs	Ref	-130	-155	-219	-267	-----
	ARR I	-6 (-95%)	-44 (-72%)	-84 (-62%)	-67 (-75%)	-76

Nas tabelas seguintes (Tabela 38 para a classe BAC-R, Tabela 39 para a classe BAC±R e Tabela 40 para a classe BAC+R) analisa-se o efeito dos ARR nas primeiras idades.

Tabela 38 - Efeito dos ARR nas primeiras idades na retracção autógena da classe BAC-R

Composição		Retracção autógena ($\times 10^{-6}$)			Variação média %
		Idade (Meses)			
		3	7	14	
BAC-R	Ref	-6	-44	-53	-----
	ARR I	+22 (-466%)	+27 (-161%)	+6 (-111%)	-246
	ARR II	-52 (+766%)	-42 (-5%)	-50 (-6%)	+251
	ARR (I+II)	-14 (+133%)	-11 (-75%)	+25 (-147%)	-89

Tabela 39 - Efeito dos ARR nas primeiras idades na retracção autogénea da classe BAC±R

Composição		Retracção autogénea (x10 ⁻⁶)			Variação média
		Idade (Meses)			
		2	5	14	%
BAC±R	Ref	-64	-66	-108	-----
	ARR I	-64 (-100%)	-14 (-21%)	-23 (-21%)	-53
	ARR II	-13 (-20%)	-22 (-33%)	-55 (-51%)	-26
	ARR (I+II)	-41 (-64%)	-97 (-146%)	-73 (-67%)	-7

Tabela 40 - Efeito dos ARR nas primeiras idades na retracção autogénea da classe BAC+R

Composição		Retracção autogénea (x10 ⁻⁶)			Variação média
		Idade (Meses)			
		1	2	3	%
BAC+R CVc	Ref	+44	+44	+31	-----
	ARR (I+II)	+48 (+11%)	+48 (+11%)	+48 (+15%)	-18
BAC+R CVs	Ref	-13	-12	-23	-----
	ARR I	+6 (+46%)	+6 (+50%)	-11 (-48%)	-148

Globalmente, observa-se que o uso dos ARR provoca uma diminuição na retracção autogénea nas primeiras idades.

Em relação ao efeito dos ARR, a longo prazo, na retracção total dos provetes imersos é apresentada a respectiva comparação na Tabela 41. Os resultados obtidos nestas condições não são conclusivos.

Tabela 41 - Efeito dos ARR a longo prazo na retracção total dos provetes imersos

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)				Variação média
		Idade (Meses)				
		1	3	6	9	%
BAC-R	Ref	+66	+75	+128	+125	-----
	ARR I	+50 (-24%)	+72 (-4%)	+69 (-46%)	+78 (-38%)	-28
	ARR II	+91 (+38%)	+119 (+59%)	+134 (+5%)	+181 (+45%)	+37
	ARR (I+II)	+109 (+65%)	+122 (+63%)	+169 (+32%)	+194 (+55%)	+54
BAC±R	Ref	+66	+75	+78	+94	-----
	ARR I	+34 (-48%)	+44 (-41%)	+84 (+8%)	+78 (-17%)	-25
	ARR II	+16 (-76%)	+31 (-59%)	+53 (-32%)	+69 (-27%)	-48
	ARR (I+II)	+25 (-62%)	+19 (-75%)	+62 (-21%)	+87 (-7%)	-41

5.2.7 Análise do efeito combinado dos adjuvantes redutores de retracção com a adição expansiva

Na Tabela 42, apresenta-se o efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total a longo prazo. Observam-se reduções significativas em todas as classes de BAC, quer nos provetes não submetidos à cura como nos submetidos, evidenciando um efeito semelhante em ambos casos.

Tabela 42 - Efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total a longo prazo

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)								Variação média
		Sem cura				Com cura (nível máximo)				
		Idade (Meses)				Idade (Meses)				
		1	3	6	9	1	3	6	9	
BAC-R	Ref	-386	-394	-409	-435	-486	-500	-502	-573	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	-170 (-56%)	-238 (-40%)	-244 (-40%)	-260 (-40%)	-265 (-45%)	-353 (-29%)	-371 (-26%)	-385 (-33%)	-39 (-44/-33)
	ARR (I+II) + 30 AE	-213 (-45%)	-273 (-31%)	-304 (-26%)	-330 (-24%)	-246 (-49%)	-344 (-31%)	-391 (-22%)	-427 (-25%)	-32 (-31/-32)
	ARR (I+II) + 40AE	-103 (-73%)	-213 (-46%)	-246 (-40%)	-265 (-39%)	-133 (-73%)	-260 (-48%)	-354 (-29%)	-334 (-42%)	-49 (-50/-48)
BAC±R	Ref	-288	-374	-374	-397	-439	-511	-531	-550	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	-207 (-28%)	-254 (-32%)	-285 (-24%)	-281 (-29%)	-233 (-47%)	-332 (-35%)	-419 (-21%)	-397 (-28%)	-31 (-28/-33)
	ARR (I+II) + 30 AE	-113 (-61%)	-145 (-61%)	-183 (-51%)	-218 (-45%)	-216 (-45%)	-296 (-42%)	-350 (-34%)	-378 (-31%)	-47 (-55/-40)
	Ref	-385	-421	-437	-425	-410	-468	-471	-451	-----
BAC+R CVc	20 AE	-346 (-10%)	-338 (-20%)	-369 (-16%)	-336 (-21%)	-319 (-22%)	-369 (-21%)	-365 (-23%)	-322 (-29%)	-20 (-17/-24)

No que respeita ao efeito nas primeiras idades, na Tabela 43 apresenta-se o efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total da classe BAC-R. Observam-se reduções significativas em todas as composições. Os provetes submetidos à cura evidenciaram uma maior eficiência na redução da retracção total.

Tabela 43 - Efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total nas primeiras idades nas composições da classe BAC-R

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		3	7	14	3	7	14	
BAC-R	Ref	-24	-246	-324	+17	-5	-318	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	+28 (-216%)	-68 (-72%)	-123 (-62%)	+35 (-106%)	+47 (-1040%)	-69 (-78%)	-262 (-116/-408)
	ARR (I+II) + 30 AE	-11 (-54%)	-64 (-74%)	-150 (-54%)	+23 (-35%)	+15 (-400%)	-111 (-65%)	-114 (-61/-167)
	ARR (I+II) + 40AE	+68 (-383%)	+79 (-132%)	-102 (-69%)	+108 (-535%)	+111 (-2320%)	-118 (-63%)	-49 (-195/-972)

Na Tabela 44 apresenta-se o efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total da classe BAC±R a curto prazo. Observam-se reduções significativas nas duas composições estudadas assim como nos provetes sujeitos ou não à cura.

Tabela 44 - Efeito combinado da utilização dos ARR e da AE na retracção total nas primeiras idades nas composições da classe BAC±R

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		2	5	14	2	5	14	
BAC±R	Ref	-65	-178	-288	-40	-96	-319	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	-13 (-80%)	-40 (-78%)	-110 (-62%)	-21 (-48%)	-24 (-75%)	-104 (-67%)	-68 (-73/-63)
	ARR (I+II) + 30 AE	+59 (-190%)	+56 (-131%)	-59 (-80%)	+39 (-198%)	+76 (-179%)	-74 (-77%)	-114 (-134/-151)

Na Tabela 45 apresenta-se o efeito da AE na retracção total nas primeiras idades na composição BAC±R CVc 20AE. Observa-se que, nas primeiras idades, a AE produz efeito apenas quando sujeita à cura.

Tabela 45 - Efeito da AE na retracção total nas primeiras idades na composição BAC±R CVc 20AE

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)						Variação média
		Sem cura			Com cura (nível máximo)			
		Idade (Dias)			Idade (Dias)			
		1	2	3	1	2	3	
BAC+R CVc	Ref	-68	-130	-172	-43	-26	-31	-----
	20 AE	-68 (--)	-149 (+15%)	-155 (-10%)	+56 (-230%)	+56 (-315%)	+72 (-332%)	-20 (+2/-292)

No que respeita à retracção autogénea, apresenta-se na Tabela 46 o efeito relativo ao uso combinado dos ARR e da AE a longo prazo. Além das considerações já apresentadas na secção 5.2.3.2.2.3, observa-se que a AE manifesta uma eficácia superior (expansão) na classe BAC+R.

Tabela 46 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a longo prazo na retracção autogénea

Composição		Retracção autogénea (x10 ⁻⁶)				Variação média
		Idade (Meses)				
		1	3	6	9	%
BAC-R	Ref	-78	-159	-188	-241	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	+0 (-100%)	-56 (-65%)	-91 (-52%)	-141 (-41%)	-64
	ARR (I+II) + 30 AE	+48 (-162%)	-25 (-84%)	-108 (-43%)	-131 (-46%)	-84
	ARR (I+II) + 40 AE	+73 (-194%)	-37 (-77%)	-138 (-27%)	-98 (-59%)	-89
BAC±R	Ref	-167	-198	-280	-295	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	-30 (-82%)	-89 (-55%)	-163 (-42%)	-163 (-45%)	-56
	ARR (I+II) + 30 AE	+58 (-135%)	+14 (-107%)	-48 (-83%)	-75 (-75%)	-100
BAC+R CVc	Ref	-105	-232	-261	-282	-----
	20 AE	-109 (+4%)	-119 (-49%)	-183 (-30%)	-205 (-27%)	-26
	ARR (I+II) + 10 AE	0 (-100%)	-19 (-92%)	-81 (-69%)	-81 (-71%)	-83
	ARR (I+II) + 20 AE	+206 (-296%)	+133 (-157%)	+108 (-141%)	+117 (-141%)	-184
	ARR (I+II) + 30 AE	+479 (-556%)	+348 (-250%)	+333 (-228%)	+306 (-209%)	-311
	ARR (I+II) + 40 AE	+736 (-801%)	+673 (-390%)	+636 (-344%)	+598 (-312%)	-462

Apresenta-se nas Tabelas seguintes (Tabela 47 para a classe BAC-R, Tabela 48 para a classe BAC±R e Tabela 49 para a classe BAC+R) o efeito do uso combinado dos ARR e da AE na retracção autogénea nas primeiras idades. O efeito registado nas primeiras idades é significativo. Aplicam-se os comentários referidos na análise a longo prazo.

Tabela 47 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a curto prazo na retracção autogénea das composições da classe BAC-R

Composição		Retracção autogénea (x10 ⁻⁶)			Variação média
		Idade (Dias)			
		3	7	14	%
BAC-R	Ref	-6	-44	-53	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	-8 (+33%)	+59 (-234%)	+12 (-123%)	-108
	ARR (I+II) + 30 AE	-22 (-266%)	+78 (-277%)	+66 (-225%)	-256
	ARR (I+II) + 40 AE	+100 (-1766%)	+67 (-252%)	+80 (-251%)	-756

Tabela 48 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a curto prazo na retracção autogénea das composições da classe BAC±R

Composição		Retracção autogénea (x10 ⁻⁶)			Variação média
		Idade (Dias)			
		2	5	14	%
BAC±R	Ref	-64	-66	-108	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	+22 (-134%)	+25 (-138%)	+16 (-115%)	-129
	ARR (I+II) + 30 AE	+55 (-186%)	+106 (-261%)	+91 (-184%)	-210

Tabela 49 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a curto prazo na retracção autogénea das composições da classe BAC+R

Composição		Retracção autogénea (x10 ⁻⁶)		
		Idade (Dias)		
		1	2	3
BAC+R CVc	Ref	-11	-2	-0
	20 AE	+44	+42	+61
	ARR (I+II) + 10 AE	+63	+94	+81
	ARR (I+II) + 20 AE	+225	+263	+263
	ARR (I+II) 30 AE	+529	+562	+556
	ARR (I+II) + 40 AE	+711	+752	+761

Na Tabela 50 é analisado o efeito do uso combinado dos ARR com a AE, a longo prazo, na retracção total dos provetes imersos das composições das classes BAC-R e BAC±R. Conforme esperado, todos os provetes que incorporam os ARR e a AE apresentam expansões superiores à composição de referência. As expansões são superiores, para as maiores dosagens da AE.

Tabela 50 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE a longo prazo na retracção total dos provetes imersos das composições das classes BAC-R e BAC±R

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)				Variação média
		Idade (Meses)				
		1	3	6	9	%
BAC-R	Ref	+66	+75	+128	+125	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	+131 (-98%)	+169 (-125%)	+234 (-83%)	+255 (-104%)	-103
	ARR (I+II) + 40 AE	+403 (-511%)	+453 (-504%)	+450 (-252%)	+409 (-227%)	-374
BAC±R	Ref	+66	+75	+78	+94	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	+75 (-14%)	+113 (-51%)	+153 (-42%)	+156 (-45%)	-56
	ARR (I+II) + 30 AE	+288 (-336%)	+316 (-321%)	+313 (-301%)	+263 (-180%)	-285

Na Tabela 51 e na Tabela 52 é analisado o efeito do uso combinado dos ARR com a AE, nas primeiras idades, na retracção total dos provetes imersos das composições das classes BAC-R e BAC±R.

Tabela 51 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE nas primeiras idades na retracção total dos provetes imersos das composições da classe BAC-R

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)			Variação média
		Idade (Meses)			
		3	7	14	%
BAC-R	Ref	+25	+88	+56	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	+125 (-400%)	+122 (-39%)	+113 (-102%)	-180
	ARR (I+II) + 40 AE	+378 (-1412%)	+394 (-347%)	+400 (-614%)	-791

Tabela 52 - Efeito do uso combinado dos ARR e da AE nas primeiras idades na retracção total dos provetes imersos das composições da classe BAC±R

Composição		Retracção total (x10 ⁻⁶)			Variação média
		Idade (Meses)			
		2	5	14	%
BAC±R	Ref	-25	-16	-13	-----
	ARR (I+II) + 20 AE	+56 (-324%)	+69 (-531%)	+97 (-846%)	-567
	ARR (I+II) + 30 AE	+213 (-952%)	+288 (-1900%)	+291 (-2338%)	-1730

Tal como nas situações de secagem ao ar ou sujeitos à cura, observa-se também que nos provetes imersos a expansão ocorre nas primeiras idades.

No que respeita à análise do efeito combinado (ARR+AE) nos provetes imersos da classe BAC+R, aplicam-se os comentários já referidos na secção 5.2.3.2.2.3.

5.2.8 Viabilidade económica das composições desenvolvidas

Nas secções 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 foram utilizados vários produtos compensadores da retracção. Além da eficiência já analisada nas secções anteriores, interessa também avaliar a viabilidade económica dessas composições.

Com base no trabalho anteriormente desenvolvido e respectivos resultados definem-se três níveis de actuação:

- 1 – Uso de um ARR.
- 2 – Uso simultâneo de dois ARR.
- 3 – Uso combinado de dois ARR e uma AE.

Na Tabela 53 apresentam-se os custos dos materiais indicados pelos fornecedores.

Tabela 53 - Custo dos materiais

Material	Custo (*)
Agregado Fino	10,00 €/t
Agregado Grosso	6,75 €/t
CEM I 52,5 R	98,00 €/t
CEM II A/L 42,5 R	87,50 €/t
CEM II B/L 32,5 N	79,00 €/t
CVs	25,00 €/t
CVc	21,00 €/t
SP BAC+R	1,10 €/l
SP BAC±R	1,27 €/l
SP BAC-R	0,98 €/l
ARR I	3,35 €/l
ARR II	6,85 €/l
AE	0,66 €/kg
Água	0,71 €/m ³

(*) não incluindo o custo de transporte e IVA.

Com base nos valores anteriores e nas composições das misturas ensaiadas (Anexo VV) apresentam-se na Tabela 54 o custo de algumas composições em função do nível de compensação da retracção.

Tabela 54 - Custos de várias composições em função do nível de compensação da retracção

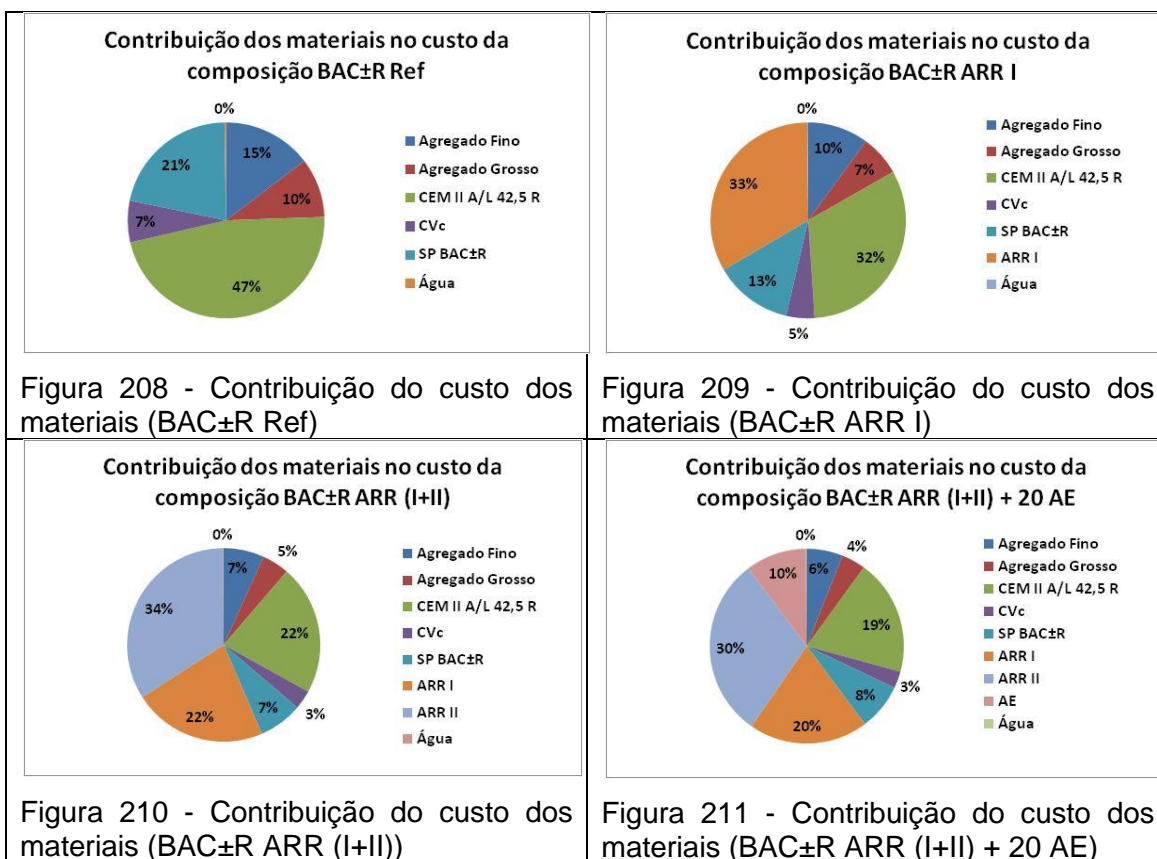
Classe de BAC	Ref	Nível 1 (*)	Nível 2(**)	Nível 3 (***)
BAC-R	40,86 €/m ³	65,29 €/m ³ (+60%)	100,77 €/m ³ (+147%)	113,06 €/m ³ (+177%)
BAC±R	52,75 €/m ³	76,40 €/m ³ (+45%)	112,75 €/m ³ (+114%)	126,34 €/m ³ (+140%)
BAC+R	55,66 €/m ³	78,89 €/m ³ (+42%)	120,72 €/m ³ (+117%)	132,80 €/m ³ (+139%)

(*) – ARR I na dosagem de 7,5 l/m³ de betão.

(**) – ARR I na dosagem de 7,5 l/m³ de betão e ARR II na dosagem de 2% da massa do cimento.

(***) - ARR I na dosagem de 7,5 l/m³, ARR II na dosagem de 2% da massa do cimento e 20kg/m³ da AE.

Constatam-se acréscimos significativos nos custos dos materiais. Na Figura 208 à Figura 211 apresenta-se a contribuição de cada material no custo das composições. Sobressaem as percentagens de contribuição dos ARR que nas composições BAC±R ARR (I+II) e BAC±R (I+II) + 20 AE assumem valores maiores ou iguais a 50% do custo total dos materiais. Verifica-se também para a composição estudada (BAC±R (I+II) + 20 AE) que a AE apenas representam um acréscimo de custo no total dos materiais de 10%.



6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estas considerações finais reflectem os aspectos mais relevantes que foram apresentados nos estudos efectuados, visando o controlo da retracção, às três classes de BAC. Considerando que este trabalho não se encontra encerrado nesta tese, recomendam-se, na secção 6.2, algumas propostas de áreas a desenvolver no futuro em continuidade deste trabalho. Encerra-se o capítulo com uma conclusão sucinta relativamente ao alcance deste trabalho.

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO EXPERIMENTAL

Procurando seguir a ordem de apresentação deste documento, enunciam-se as principais conclusões resultantes do trabalho experimental desenvolvido:

- Foi possível unicamente com a utilização de materiais compensadores da retracção disponíveis no mercado português, obter bons resultados no controle da retracção, mantendo simultaneamente a resistência à compressão e autocompactibilidade das composições.
- A utilização de polímeros super absorventes ficou condicionada devido ao facto de este material ainda não se encontrar disponível comercialmente no mercado português.
- A utilização específica dos ALS na mitigação da retracção dos BAC mostrou-se, para as composições estudadas, compatível com as exigências deste tipo de betões no estado fresco.
- A realização de três níveis de cura permitiu avaliar a importância desta técnica no controlo da retracção. Conforme esperado, foi na classe BAC de menor resistência que os resultados obtidos mais evidenciaram a influência desta técnica na perda de massa por secagem e evolução da retracção total. A realização da cura, principalmente nas classes BAC de menor e média resistência, proporcionou a longo prazo um aumento da retracção total. Esse facto foi atribuído ao refinamento da estrutura porosa. Não obstante o anteriormente referido, na análise do efeito da cura nas primeiras idades, foi evidenciada a importância desta técnica no controle da retracção e risco de fissuração nas primeiras idades devido ao efeito de adiamento da retracção por secagem, permitindo o normal desenvolvimento da resistência à tracção das composições.

- A análise comparativa dos tempos zero e contribuição da retracção autogénea para a retracção total das composições de referência confirmou o revisto na bibliografia, em relação a betões normais. Verificaram-se tempos zero menores e valores da retracção autogénea mais elevados para as composições mais resistentes.

- A comparação efectuada dos valores experimentais obtidos das composições de referência com o publicado no EC2 revela que a retracção autogénea é subestimada, por parte desse documento, nas três classes de BAC estudadas. Por outro lado, e no que respeita à retracção total, para as situações de provetes sem cura e submetidos ao nível máximo de cura, observa-se uma sobre elevação dos valores preconizados no EC2.

- Globalmente, comprovou-se a eficácia do uso dos ARR na redução da retracção autogénea e retracção total, nas primeiras idades e a longo prazo. O ARR I (componente principal à base de Poliglicol) mostrou-se globalmente mais eficaz. Na maior parte das situações estudadas, foi registado um efeito cumulativo, na redução da retracção autogénea e total, referente ao uso simultâneo dos dois ARR. O uso dos ARR provocou uma redução na resistência à compressão.

Genericamente, o comportamento dos ARR, verificado neste trabalho, corrobora o descrito na bibliografia revista.

- A utilização de AE em conjunto com ARR (efeito combinado) constitui uma técnica de mitigação da retracção bastante recente e promissora. Os resultados obtidos confirmam a existência de um efeito sinérgico, tornando o efeito negativo de retardamento provocado pelo ARR numa vantagem para a eficácia da AE. Quando usada em dosagens apropriadas, o risco de expansão excessiva em condições de saturação é marginal.

- Especificamente, o uso de ALS mostrou-se eficaz na redução da retracção autogénea, no entanto obtiveram-se reduções da resistência à compressão elevadas.

- O acréscimo no custo dos materiais das composições é elevado quando se incorporam os ARR. No entanto, a utilização da AE apresenta um custo adicional baixo.

6.2 PROPOSTA DE ÁREAS A DESENVOLVER

Reconhecendo o papel primordial que o controle da retracção desempenha no controle da fissuração e por conseguinte na durabilidade das estruturas de betão armado, e tendo por base a extensa revisão bibliográfica apresentada neste trabalho associada aos contínuos desenvolvimentos verificados ao nível dos materiais e consequente desempenho das composições, existem inúmeras áreas de estudo

necessárias ao total conhecimento destas matérias. No entanto, e pretendendo apenas dar continuidade ao trabalho realizado nesta tese, propõem-se os seguintes temas:

- Optimização do custo de composições em BAC com retracção controlada através do uso combinado, ARR + AE. Envolve o estudo da actuação da AE em termos de tempos de acção e condições para um desempenho eficiente e estudo do efeito sinérgico também com outros adjuvantes de acção retardadora.
- Estabelecimento de correlações entre os resultados obtidos em laboratório com os desempenhos registados em aplicações reais.
- Desenvolvimento de uma metodologia, semelhante à tecnologia descrita no relatório ACI 223 [147] actualmente existente e aplicável ao controle da retracção por secagem dos betões convencionais, aplicável ao controle da retracção autogénea e total nos BAC.

6.3 CONCLUSÃO

Recorde-se o objectivo deste trabalho: estudo da influência dos métodos de cura (externa e interna) e estudo da influência do uso individual ou em simultâneo de materiais compensadores da retracção de modo a aperfeiçoar o desempenho do BAC através do controle da retracção.

Tendo em conta os resultados obtidos considera-se que o objectivo proposto foi alcançado. Foi avaliada a eficiência referente à execução da cura ou ao uso de outros produtos compensadores da retracção, aplicados nos BAC.

Com base no trabalho experimental desenvolvido, sugerem-se três níveis de actuação na mitigação da retracção dos BAC: 1 – uso de um ARR; 2 – uso simultâneo de dois ARR e 3 – uso combinado, ARR+AE.

A combinação do efeito da AE com os ARR provou ser a tecnologia mais eficaz no controle da retracção deste tipo de betões. Efectivamente, os resultados indicam que é teoricamente possível formular composições de modo a que seja obtida uma retracção desejada em determinada idade. Nesse sentido pode-se afirmar que os resultados obtidos excederam o esperado e abriram novas perspectivas para a continuação da investigação. É agora possível pensar a retracção dos BAC em termos de “retracção programada”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ribeiro, A.B., Carrajola, A., Gonçalves, A. e Branco, F. `Effect of the synergy of two shrinkage reducing admixtures`, in `International RILEM Conferences on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation`, 20-23 August 2006, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 223-230.
- [2] Hori, A., Morioka, M., Sakai, E. e Daimon, M., `Influence of expansive additives on autogenous shrinkage` in `Autogenous Shrinkage of Concrete` Proceedings of the International Workshop, JCI, Hiroshima, June 13-14, 1998, 187-194.
- [3] Kovler, K., `Effect of internal curing on autogenous deformation` in `Internal Curing of Concrete` State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 196-ICC, June 2007, 71-104.
- [4] Persson B., A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and corresponding properties of normal concrete, *Cement & Concrete Research* 31 (2001) pp. 193-198.
- [5] República Portuguesa, Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, Decreto-Lei n.º 301/2007, de 23 de Agosto
- [6] Mehta, K., `Reducing the environment impact of concrete – Concrete can be durable and environmentally friendly`, *Concrete International*, 2001, 61-66.
- [7] Swamy, R. N., `Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction`, in `Sustainable Construction into the next Millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials`, Proceedings of the International Conference, João Pessoa, Brazil, Nov 2000, 15-43.
- [8] Oliveira, M., `Desenvolvimento de um betão auto-compactável sem fíler e económico`, Tese de Mestrado, FCTUC, Coimbra, Portugal, 2003.
- [9] Okamura, H., “Ferguson Lecture for 1996: Self-compacting high-performance concrete”, *Concrete International*, ACI, Vol. 19, nº7, 1997, pp. 50-54.
- [10] Skarendahl, A., “Self-Compacting Concrete”, State-of-the Art – Report 23, RILEM Technical Committee 174 – SCC, 2001, pp. 1-3.
- [11] David, J., “Betão Auto-Compactável: Um material novo para a pré-fabricação”, 3ªs *Jornadas de Estruturas de Betão*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999, pp. 97-110.
- [12] Yammine, J., et al., “From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions”, in *Cement and Concrete Research*, Vol.38, N.7, 2008, pp.890-896.

- [13] Yahia, A., et al., "Effect of rheological parameters on self-compactability of concrete containing various mineral admixtures", *Proceedings of the First International Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, Estocolmo, Suécia, 1999, pp.523-535.
- [14] Vieira, M., "Betões Autocompctáveis, Reologia do betão no estado fresco", Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa, Portugal, 2008.
- [15] Domone, P., "Self-Compacting Concrete", *State-of-the Art – Report 23, RILEM Technical Committee 174 – SCC*, pp. 47-66, 2001.
- [16] Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi, M., "Self-compacting concrete", in *Structural Concrete*, Vol.1, N.1, pp.3-17, 2000.
- [17] Bui, V.K., Montgomery, D. "Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume", *Proceedings of the First International Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, Estocolmo, Suécia, pp.373-384, 1999.
- [18] Roshavelov, T.T., "Concrete mixture proportioning with optimal dry packing", *Proceedings of the First International Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, Estocolmo, Suécia, pp.385-396, 1999
- [19] Nawa, T., Izumi, T. & Edamatsu, Y., "State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete", *Proceedings of International Workshop on Self-compacting Concrete*, pp. 160-190, Japan, 1998.
- [20] EFNARC, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, production and use", EFNARC, www.efnarc.org, 2005.
- [21] Domone, P.L., "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies", in *Cement and Concrete Composites*, Vol.28, N.2, pp.197-208, 2006.
- [22] CEN/TC104, "Concrete - Part 9: Additional Rules for Self-compacting concrete", *EN 206-9*, CEN, 2010
- [23] CEN/TC104/SC1, "Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete – Slumpflow test", *EN 12350-8 Slump-flow*, CEN, 2007
- [24] CEN/TC104/SC1, "Testing fresh concrete - Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test", *EN 12350-9 V-funnel*, CEN, 2007
- [25] CEN/TC104/SC1, "Testing fresh concrete - Part 10: Self-compacting concrete – L-box test", *EN 12350-10 L-box*, CEN, 2007
- [26] CEN/TC104/SC1, "Testing fresh concrete - Part 12: Self-compacting concrete – J-ring test", *EN 12350-12 J-ring*, CEN, 2007
- [27] CEN/TC104/SC1, "Testing fresh concrete - Part 11: Self-compacting concrete – Sieve segregation test", *EN 12350-11 Sieve segregation*, CEN, 2007
- [28] Walraven, J., "Structural applications of self compacting concrete", *Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, PRO 33, Ed. O.Wallevik and I. Nielson, RILEM Publications, Reykjavik, Islândia, pp.15-22, 2003

- [29] Lecrux, S., et al., "French specifications for SCC acceptance on site: the outcome of the french national SCC project (PN B@P)", Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete with the Fourth International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, RILEM Publications, Chicago, EUA, 2005
- [30] ACI Committee 207, "Effect of Restraint, volume changes and reinforcement on cracking of massive concrete", ACI Std. No. 207.2R-90, 1990
- [31] ACI Committee 224, "Control of cracking in concrete structures" ACI Std. No. 224, 1990
- [32] Bentur, A., "Overview of early age cracking" in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181-EAS – Final Report, pp. 1-11, July 2002
- [33] Lange, D., "Overview of driving forces" in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181-EAS – Final Report, pp. 19-20, July 2002
- [34] Clavaud, B., Saucier, F., Barcelo, L., "Le béton, matériau moderne", Pour la Science, Février (224), pp. 32-39, 1998
- [35] Tazawa, E. , "Autogenous Shrinkage of Concrete", Proceedings of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute),pp. 3-8, Hiroshima, June 13-14, 1998
- [36] Hua, C., "Analyses et modélisation du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment et mortiers a tres jeune age", Ph. D thesis of Ecole Nationale des Ponts Chaussées: 159, Paris (1995)
- [37] Bisschop, J., "Evolution of Solid Behaviour", in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181-EAS, pp.27-34, July 2002
- [38] Boumiz, A., "Etude compare des evolutions mecaniques et chimiques de pâte de ciment et mortiers a très jeune age". PhD-thesis of Université Paris, 7 (1995)
- [39] Persson, B., "Chemical shrinkage and internal relative humidity tests", in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181-EAS, pp.225-239, July 2002
- [40] Penttala, V. et al, "Early floor covering of concrete slabs and adhesion between concrete and floor covers", in Proc. 5th Nordic Concrete Research Meeting:Helsinki, Ed: Norsk Betongforening, Oslo, pp. 107-108, 1996
- [41] Persson, B., "Quasi-instantaneous and long-term deformations of high-performance concrete with some related properties", TVBM-1016, Div. Building Materials. Lund Institute of Technology. Lund University, 500 pp, 1998
- [42] Tazawa, E., Miyazawa, S., "Autogenous shrinkage caused by self desiccation in cementitious material, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, pp 712-718, 1992
- [43] Japan Concrete Institute, "Report of the Technical Committee on Superworkable Concrete", Part 2, 1994
- [44] Persson, B., "Early basic creep of HPC", in 4th International Symposium on the Utilisation of HPC, F. de Larrard and R. Lacroix, pp 405-414, 1996

- [45] Persson, B., "On the under-pressure in the pore water of sealed high performance concrete", Concrete Science and Engineering, 2, 213-221, 2000
- [46] Tazawa, E., Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceedings of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute), pp. 13-23, Hiroshima, June 13-14, 1998
- [47] Powers, T.C., Brownyard, T. L., "Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste", Bulletin 22, Portland Cement Association, Chicago, 1948
- [48] Powers, T.C., "A Discussion of cemen hydration in relation to the curing of concrete", Bulletin 25, Portland Cement Association, Chicago, 1948
- [49] Powers, T.C., "Physical properties of cement paste", Chemistry of cement. Proceedings of the fourth international symposium, Washington DC, 1960
- [50] Tazawa, E., Miyazawa, S., Miura, T., e Tani, S., "The autogeneous shrinkage of cement paste prepared with various cement", 21st Seminar of Cement and Concrete, Vol.1, pp69-74, 1994
- [51] Takahashi, T., Nakata, H., Yoshida, K., e Goto, S., "Influence of hydration on autogenous shrinkage of cement paste", Concrete Research and Technology, Japan Concrete Institute, Vol 7, No 2, pp 137-142, 1996
- [52] Tazawa, E., Miyazawa, S. e Sato, T., "Influence of Cement Composition on Autogenous Shrinkage", JCA Proceedings of Cement & Concrete, No47, pp 528-533, 1993
- [53] Tazawa, E., Miyazawa, "Effect of cementitious materials and mix proportion on the autogenous shrinkage of cement based materials", Jornal of materials, concrete structures and pavement, Japan Society of Civil Engineers, No 502, V-25, pp 43-52, 1994
- [54] Tazawa, E., Miyazawa, S. e Sato, T., Hashimoto, S., "Autogenous shrinkage of cement paste by use of blast furnace slag fine powder", Proceedings of 19th Cement and Concrete Research Convention, No47, pp 23-28, 1992
- [55] Chikamatu, R., Takeda, N., Kamata, F., Sogo, S. "Effect of admixtures on autogenous shrinkage of concrete", Proccedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 15, No 1, pp. 543-548, 1993
- [56] Tazawa, E., "Autogenous shrinkage of cement paste caused by hydration", Cement & Concrete, No 565, pp 35-44, 1994
- [57] Tazawa, E., Miyazawa, S. e Kasai, T., "Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of cement paste", Cement & Concrete Research, Vol 25, No 2, pp 288-292, 1995
- [58] Tazawa, E., Miyazawa, S., "Influence of constituent and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials", magazine of Concrete Research, Vol 49, No 178, pp 15-22, 1997

- [59] Justness, H. et al, "The influence of cement characteristics on chemical shrinkage" in "Autogenous Shrinkage of Concrete", Proceedings of the International Workshop organized by JCI, Hiroshima, pp 71-80, 1998
- [60] Baroghel-Bouny, V. "Texture and moist properties of ordinary and high-performance cementitious materials", in Proceedings of Séminaire RILEM "Betón: du Matériel à la Structure", Arles, France, 1996
- [61] Toma G., Pigeon, M., Marchand, J., Bissonnette, B. e Barcelo L., "Early age restrained shrinkage: Stress build up and relaxation", in International research seminar: "Self-desiccation and its importance in Concrete Technology", Lund, Sweden, pp 61-71, 1999
- [62] Bjontegaard, O. e Sellevold, E. J., "Autogenous and thermal deformation", in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181-EAS, pp.65-88, July 2002
- [63] Kovler, K., Jensen, O.M., "General Concept and Terminology" in "Internal Curing of Concrete" State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 196-ICC, 5-13, June 2007
- [64] Tazawa, E., Miyazawa, S., Shigekawa, K., "Macroscopic shrinkage of hardening cement paste due to hydration", JCA Proceedings of Cement & Concrete, No 45, pp 122-127, 1991
- [65] Hobbs, D. W., "Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete", Journal of ACI, Vol 71, No 9, pp 445-450, 1974
- [66] Tazawa, E., Matsuoaka, Y., Miyazawa, S. e Okamoto, S., "Effect of autogenous shrinkage on self stress in hardening concrete", Proceedings of Int'l Symp. On "Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Munchen, pp 221-228, 1994
- [67] Tazawa, E., Miyazawa, S., "Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 28, No.8, pp 1633-1638, 1995
- [68] Hansen, W., "Drying shrinkage mechanism in Portland cement paste", J. Am. Ceram. Soc. 70 (5), pp 323-328, 1987
- [69] Helmuth, R. A. e Turk, D. H., "The reversible and irreversible drying shrinkage of hardened Portland cement and tricalcium silicate paste", J. PCA Res. Dev. Lab. 9 (2), pp 8-21, 1967
- [70] Pickett, G., "Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage", J. Am. Con. Inst. 52 (5), pp 581-590, 1956
- [71] Grasley, Z., "Internal relative humidity, drying stress gradients, and hygrothermal dilation of concrete", Thesis for the degree of Master, University of Illinois, 2003
- [72] Scherer, G.W., "Theory of drying", J. Am. Ceram. Soc. 73, pp 3-14, 1990
- [73] Bentz, D.P., Garboczi, E.J., Quenard, D.A., "Modelling Drying Shrinkage in Reconstructed Porous Materials: Application to Porous Vycor Glass", Modelling Simul Mater Sci Eng 6, pp 211-236, 1998

- [74] American Concrete Institute (ACI), "ACI 224R-01, Control of Cracking in Concrete Structures", Report by ACI Committee 224, 2001
- [75] Cement Concrete & Aggregates Australia, "Drying Shrinkage of Cement and Concrete", Datasheet, July 2002
- [76] Troxell, G. E.; Raphael, J. M.; e Davis, R. E., "Long-Time Creep and Shrinkage Tests of Plain and Reinforced Concrete," Proceedings, ASTM, V. 58, pp. 1101-1120, 1958
- [77] Lorman, W. R., "The Theory of Concrete Creep," Proceedings ASTM, V. 40, pp. 1082-1102, 1940
- [78] Carlson, R. W., "Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many Factors," Proceedings, ASTM, V. 38, Part II, pp. 419-437, 1938
- [79] Bryant, A. H., e Vadhanavikkit, C., "Creep Shrinkage, Size, and Age at Loading Effects," ACI Materials Journal, V. 84, No. 2, Mar.-Apr., pp. 119-123, 1987
- [80] Persson, B., "Shrinkage of concrete", in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181 – EAS, pp 89-98, 2002
- [81] Deshpande, S., "Evaluating free shrinkage of concrete for control of cracking in bridge decks", Master's of Science in Civil Engineering, University of Kansas, 2007
- [82] Verbeck, G. J., "Carbonation of Hydrated Portland Cement," *Cement and Concrete*, STP-205, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Penn., pp. 17-36, 1958
- [83] Jensen, O.M. e Hansen P.F., "Autogenous relative humidity change in silica-fume-modified cement paste", *Advances in Cement Research*, 7 (25), pp. 33-38, 1995
- [84] Baroghel-bouny V., "Experimental Investigation of Self-desiccation in High-Performance Materials – Comparison with drying behavior", Proceedings of the International Research Seminar "Self-desiccation and its importance in Concrete Technology", Lund, Sweden, pp. 72-87, 1997
- [85] Buil, M., "Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante", LCPC Report 92, 1979
- [86] Persson B., "Hydration and strength of high performance concrete", *Advanced Cement Based Materials Journal*, 3, pp. 107-123, 1996
- [87] Buil, M., "Comportement physico-chimique du système ciment-fs", *Annales de l'ITBTP*, 483 (271), pp. 19-29, 1990
- [88] Sellevold E.J. and Justnes H., "High strength concrete binders. Part B: non evaporable water, self-desiccation and porosity of cement pastes with and without condensed silica fume", Proceedings of the 4th ACI/CANMET International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Istanbul, Turkey, ACI SP 132-52, vol 2, pp.887-902, 1992
- [89] Loukili, A., Khelidj, A. e Richard P., "Hydration Kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete", *Cement and Concrete Research*, 29, pp. 578-584, 1999

- [90] Baroghel-Bouny, V., "Hydration and moisture distribution", in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181-EAS, pp.39-45, July 2002
- [91] Baroghel-Bouny, V., Mainguy, M. e Coussy, O., "Isothermal drying process in weakly permeable cementitious materials – Assessment of water permeability", in "Materials Science of Concrete special volume: Transport in Cement-Based Materials", Proceedings of International Conference, University of Toronto, 2000
- [92] Baroghel-Bouny, V., Mainguy, M., Lassabatère, T. e Coussy, O., "Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials", Cement and Concrete Research, 29, pp. 1225-1238, 1999
- [93] D'Aloia, L., "Early age kinetics: activation energy, maturity and equivalent age", in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181-EAS, pp.127-148, July 2002
- [94] Neville, A., "Properties of concrete", 4 edition, John Wiley & Sons, New York, 1996
- [95] Parsons, W. e Johnson, W., "Factors affecting the thermal expansion of concrete aggregate minerals", Journal of the ACI, 15 (5), pp. 589-592, 1944
- [96] Brown, R., "Thermal movement of concrete", Concrete – the journal of the Concrete Society, 6 (11), 1972
- [97] Springenschmid, R., "Prevention of thermal cracking in concrete at early ages" RILEM report 15, prepared by RILEM technical Committee 119, 1998
- [98] Byfors, "Plain concrete at early ages", Swedish Cement and Concrete Institute, Stockholm, 1980
- [99] ACI Committee 517, "Accelerated curing of concrete at atmospheric pressure-state of the art" ACI Journal, No 77, pp. 429-448, 1980
- [100] Miao, B., Chaallal, O., Perraton, D., e Aitcin, P., "On-site early age monitoring of high performance concrete columns", ACI Materials Journal, N°90, pp. 415-420, 1993
- [101] ACI Commission 42-CEA, "Properties of set concrete at early ages", Mater. Construct., 14, pp.399-450, 1981
- [102] Laplante, P., "Propriétés mécaniques des bétons durcissats: analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances", Doctoral de L'Ecole National des Ponts et Chaussées, 1993
- [103] De Schutter, G., "Fundamental and practical study of early thermal cracking in hardening massive concrete elements", Doctoral thesis, Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University, 1996
- [104] Kovler, K., Jensen, O. M., "Internal Curing of Concrete", RILEM TC 196-ICC State-of-the-Art-Report, pp. 1-3, 2007
- [105] Aitcin, P.C., "High-Performance Concrete", E&FN SPON, 1998

- [106] Zhutovsky, S., Kovler, K. and Bentur, A., "Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage", *Materials & Structures* 35, pp.97-101, 2002
- [107] Hammer, T.A., Bjontegaard, O. and Sellevold, E.J., "Internal Curing – Role of Absorbed Water in Aggregates", "High-Performance Structural Lightweight Concrete", Ries, J.P. and Holm, T.A. (eds.), American Concrete Institute, Special Publication 218, pp.131-142, 2004
- [108] Weber, S. and Reinhardt, H.W., "A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous Curing", *Advanced Cement Based Materials* 6(2), pp. 59-68, 1997
- [109] Jensen, O.M. and Hansen, P.F., "Water-Entrained Cement-Based Materials: I. Principle and Theoretical Background", *Cement & Concrete Research* 31 (4), pp.647-654, 2001
- [110] Dhir, R.K., Hewlett, P.C., Lota, J.S. and Dyer, T.D., "An Investigation into the Feasibility of Formulating Self-Cure Concrete", *Materials & Structures* 27(174), pp.606-615, 1994
- [111] Jensen, O.M., "Mechanisms of Internal Water Curing", in "Internal Curing of Concrete", RILEM TC 196-ICC State-of-the-Art-Report, pp. 15-27, 2007
- [112] Jensen, O.M., Hansen, P.F., Lachowski, E.E. and Glasser, F.P., "Clinker mineral hydration at reduced relative humidities", *Cement and Concrete Research* 29 (9), pp. 1505-1512, 1999
- [113] RILEM TC-37-DRC, "Demolition and recycling of concrete, Recycled aggregates and recycled aggregate concrete", Second State-of-the-art Report, 1985
- [114] Jensen, O.M., Lura, P., "Materials and Methods for Internal Curing", in "Internal Curing of Concrete", RILEM TC 196-ICC State-of-the-Art-Report, pp. 45-55, 2007
- [115] Buchholz, F.L. and Graham, A.T. (eds.), "Modern superabsorbent polymer technology", WILEY-VCH, New York, 1998
- [116] Jensen, O.M. and Hansen, P.F., "Water-Entrained Cement-Based Materials: II. Implementation and experimental results", *Cement & Concrete Research* 32 (6), pp.973-978, 2002
- [117] Weber, S. and Reinhardt, H.W., "A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete", *Proc. Of International Symposium on Structural Lightweight Concrete*, Eds. I. Holand, T.A. Hammer and F. Fluge, Sandefjord, Norway, pp.662-671, 1996
- [118] Kovler, K., "Effect of Internal Curing on Autogenous Deformation", in "Internal Curing of Concrete", RILEM TC 196-ICC State-of-the-Art-Report, pp. 71-104, 2007
- [119] Takada, K., Breugel, K., Koenders, E.A.B and Kaptijn, N., "Experimental Evaluation of Autogenous Shrinkage of Lightweight Aggregate Concrete", *Proc. of Intern. Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, JCI, Ed. E. Tazawa, Hiroshima, Japan, pp.221-230, 1998

- [120] Bentur, A., Igarashi, S. and Kovler, K., "Prevention of Autogenous Shrinkage in High Strength Concrete by Internal Curing using Wet Lightweight Aggregates", *Cement & Concrete Research* 31, pp. 1587-1591, 2001
- [121] Kohno, K., Okamoto, T., Isikawa, Y., Sibata, T. and Mori, H., "Effects of Artificial Lightweight Aggregate on Autogenous Shrinkage of Concrete", *Cement & Concrete Research* 29, pp.611-614, 1999
- [122] Van Breugel, K., Outwerk, H. and Vries, J., "Effect of Mixture Composition and Size Effect on Shrinkage of High Strength Concrete", *RILEM Proc. PRO 17, Shrinkage of Concrete – Shrinkage 2000*, Eds. V. Baroghel-Bouny and P.C. Aitcin, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, France, pp.161-177, 2000
- [123] Schwesinger, P. and Sickert, G., "Reducing Shrinkage in HPC by Internal Curing by Using Pre-Soaked LWA", *Proc. Of International Workshop "Control of Cracking in Early-Age Concrete"*, Eds. H. Mihashi and F. Wittmann, Swets & Zeitlinger B.V. Publ., Lisse, The Netherlands, pp. 333-338, 2002
- [124] Lura, P. and van Breugel, K., "Moisture Exchange as a Basic Phenomenon to Understand Volume Changes of Lightweight Aggregate Concrete at Early Age", *RILEM Proc. PRO 17, Shrinkage of Concrete – Shrinkage 2000*, Eds. V. Baroghel-Bouny and P.C. Aitcin, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, France, pp.533-546, 2000
- [125] Cusson, D. and Hoogeveen, T., "Preventing Autogenous Shrinkage of High-Performance Concrete Structures by Internal Curing", *Proc. Of the S.P. Shah Symposium "Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties"*, Edited by M.S. Konsta-gdoutos, Dordrecht, The Netherlands, pp.83-89, 2006
- [126] Bentz, D.P. and Snyder, K.A., "Protected Paste Volume in Concrete: Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate", *Cement & Concrete Research* 29, pp.1863-1867, 1999
- [127] Lura, P., Bentz, D.P., Lange, D.A., Kovler, K. and Bentur, A., "Pumice Aggregates for Internal Water Curing", *PRO 36: Proc. Int. RILEM Symp. on Concrete Science & Engineering – A Tribute to Arnon Bentur*, Eds. K. Kovler, J. Marchand, S. Mindess and J. Weiss, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, France, pp.137-151, 2004
- [128] Lura, P., Van Breugel, K. and De Vries, H., "Experimental Research About Early-Age Creep of B65 and B85 Concretes Mixes", *Proc. of International Workshop "Control of Cracking in Early-Age Concrete"*, Eds. H. Mihashi and F. Wittmann, Swets & Zeitlinger B.V. Publ., Lisse, The Netherlands, pp.275-286, 2002
- [129] Boucher, E.A., "Vapour pressure over free and capillary-condensed curved surfaces of aqueous salt solutions and of non-electrolyte solutions", *Colloids and Surfaces* 46 (2), pp. 271-281, 1990
- [130] Bentz, D.P., Geiker, M. and Jensen, O.M., "On the mitigation of early-age cracking", *Proc. 3rd Int. Sem. On Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology*, Lund, Sweden, pp. 195-204, 2002
- [131] Grasley, Z.C., Lange, D.A., "A new system for measuring the internal relative humidity in concrete", *Cementing the Future, Center for Advanced Cement Based Materials*, 2004

- [132] Fagerlund, G., "Determination of pore-size distribution from freezing-point depression", *Materiaux et Constructions* 6 (33), pp. 215-225, 1973
- [133] Nestle, N., Dakkouri, M., Zimmermann, C., Geier, O., Friedemann, K., Dehn, F., Krumbach, R., Freude, D., Karger, J. and Koning, G., "NMR studies on hardening kinetics, water balance and water transport in cement matrices for high-performance concrete", *Proc. 15th European Experimental NMR Conference (EENC 2000)*, Leipzig, Germany, 2000
- [134] Hammer, T.A., Bjontegaard, O. and Sellevold, E.J., "Internal curing – Role of Absorbed Water in Aggregates", Presented at ACI Fall 2002 Convention, Session High-Performance Structural Lightweight Concrete, Phoenix, AZ, 2002
- [135] Powers, T.C. and Brownard, T.L., "Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste", *Res. Lab. Portland Cem. Assoc. Bull.* 22, 1948
- [136] Weber, S. and Reinhardt, H.W., "A New Generation of High Performance Concrete with Autogenous Curing", *Adv. Cem. Based Mater.* 6 (2), pp. 59-68, 1997
- [137] Lura, P., "Autogenous deformation and internal curing of concrete", Ph.D. thesis, Delf University of Technology, Delft, 2003
- [138] Mechtcherine, V., Dudziak, L., Schulze, L. and Staehr, H., "Internal curing by super absorbent polymers (SAP) – effect on material properties on self-compacting fibre-reinforced high performance concrete", *Proc. RILEM Conf. on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, pp.87-96, 2006
- [139] De Schutter, G., "Effect of IC on Other Concrete Properties", in "Internal Curing of Concrete", RILEM TC 196-ICC State-of-the-Art-Report, pp. 105-126, 2007
- [140] Barcelo, L., et al, "Early-age shrinkage of concrete: back to the physical mechanisms, UEF conference in "Advances in Concrete and Cement", Mt-Tremblant, Canada, 2000
- [141] Weiss, J., "Experimental Determination of the – Time Zero t_0 (Maturity-Zero M_0)" in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM TC 181-EAS, pp.195-206, July 2002
- [142] Aitcin, P., "Autogenous shrinkage measurement", in "AUTOSHRINK'98", Proc. Int. Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, E. Tazawa, editor, Japan Concrete Institute, pp.245-256, 1998
- [143] CEN, "NP EN 196-3:2006 – Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade", Versão portuguesa da norma europeia EN 196- 3:2005, IPQ, 2006
- [144] JCI – Committee Report of the Japan Concrete Institute, "Technical Committee on autogenous shrinkage of concrete", in "AUTOSHRINK'98", Proc. Int. Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, E. Tazawa, editor, Japan Concrete Institute, pp.13-14, 1998
- [145] Olken, P. And Rostasy, S., "A practical planning tool for the simulation of thermal stresses and for the prediction of early thermal cracks in massive concrete structures", in "Thermal Cracking in Concrete At Early-Ages", R. Springenschmid, editor, Proc. RILEM Symp., E&FN Spon London, pp.289-296, 1994

- [146] Boivin, S., "Retrait au jeune âge du béton: Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène", PhD-thesis of Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999
- [147] ACI Committee 223, "ACI 223R-10 -Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete", ACI, 2010
- [148] Höglund, L. O., Some notes of ettringite formation in cementitious materials; influence of hydration and thermodynamic constraints for durability, *Cement and Concrete Research* 22(2-3): 217–228, 1992
- [149] Mehta, P. K., Scanning electron micrographic studies of ettringite formation, *Cement and Concrete Research* 6(2): 169–182, 1976
- [150] Mehta, P. K. and Wang, S., Expansion of ettringite by water adsorption, *Cement and Concrete Research* 12(1): 121–122, 1982
- [151] W. Chen, H.J.H. Brouwers, Z.H.Shui , Hydration of Shrinkage-compensating Cement for Concrete Pavement: Experiments and Computer Modeling, First International Conference on Transport Infrastructure, Beijing, 2008
- [152] Moffat, B.S., "Shrinkage-Compensating Concrete: An investigative Study," *Metropolis & beyond proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium*, 2005, New York, NY, pp. 1033-1043, 2005
- [153] ASTM, "ASTM C 878 Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete", C878/C878M – 09, ASTM, 2009
- [154] Goto, T., Sato, T., Sakai, M., Cement shrinkage reducing agent and cement composition, US Patent #4547223, United States Patent and Trademark Office, www.uspto.gov, 1985
- [155] Weiss, J., Berke, N. S., " Shrinkage reducing admixtures", in *Early Age Cracking in Cementitious System*, RILEM State of the Art Report, 2002
- [156] Rongbing, B., Jian, S., "Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixture for cementitious materials", *Cement and Concrete Research* 35, pp. 445-448, 2005
- [157] M. Shoya, S. Sugita, T. Sugawara, "Improvement of drying shrinkage and shrinkage cracking of concrete by special surfactants", in: E. Vazquez (Ed.), *Admixtures for Concrete*, Chapman and Hall, London, pp. 484–495 , 1990
- [158] S.P. Shah, M.E. Karaguler, M. Sarigaphuti, "Effect of shrinkage reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete", *ACI Materials Journal* 89 (3), pp. 289–295, 1992
- [159] A. Balogh, "New admixture combats concrete shrinkage" , *Concrete Construction* 546–551, July 1996
- [160] K.J. Folliard, N.S. Berke, "Properties of high performance concrete containing shrinkage reducing admixture", *Cement and Concrete Research* 27 (9), 1357–1364, 1997

- [161] N.S. Berke, M.P. Dallaire, M.C. Hicks, A. Kerkar, "New developments in shrinkage reducing admixtures", in: V.M. Malhotra (Ed.), Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI SP-173, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp. 971–998, 1997
- [162] C. Nmai, R. Tomita, F. Hondo, J. Buffenbarger, "Shrinkage reducing admixtures", Concrete International, pp.31–37, April 1998
- [163] E. Tazawa, S. Miyazawa, "Influence of cement and admixtures on autogenous shrinkage of cement paste", Cement and Concrete Research 25 (2), pp.281–287, 1995
- [164] J. Weiss, B.B. Borichevsky, S.P. Shah, "The influence of a shrinkage reducing admixture on the early age shrinkage behavior of high performance concrete", Proceedings of International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Sandefjord, Norway, vol. 2, pp. 1339–1350, 1999
- [165] D.P. Bentz, M.R. Geiker, K.K. Hansen, "Shrinkage reducing admixtures and early age desiccation in cement pastes and mortars", Cement and Concrete Research 31 (7) pp. 1075–1085, 2001
- [166] D.P. Bentz, O.M. Jensen, "Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking", Cement and Concrete Composites 26 (6), 677–685, 2004
- [167] D'Ambrosia, M.D., "Early age tensile creep and shrinkage of concrete with shrinkage reducing admixtures", M.S. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002
- [168] J. Mora, A. Aguado, R. Gettu, "The influence of shrinkage reducing admixtures on plastic shrinkage", Materiales De Construcción 53 (271–272), pp. 71–80, 2003
- [169] P. Lura, B. Pease, G.B. Mazzotta, F. Rajabipour, J. Weiss, "Influence of shrinkage reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks", ACI Materials Journal 104 (2), pp. 187–194, 2007
- [170] J. Weiss, N.S. Berke, "Shrinkage reducing admixtures, in: A. Bentur (Ed.), Early Age Cracking in Cementitious Systems", RILEM State of the Art Report, 2002
- [171] B.L. Cope, G.E. Ramey, "Reducing drying shrinkage of bridge deck concrete", Concrete International 23 (8), 76–82, 2001
- [172] J. Roncero, R. Gettu, M.A. Martin, "Evaluation of the influence of a shrinkage reducing admixture on the microstructure and long-term behavior of concrete", Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete (Supplementary Papers), Berlin, Germany, pp. 207–226, 2003
- [173] G. Sant, F. Rajabipour, P. Lura, J. Weiss, "Examining time-zero and early age expansion in pastes containing shrinkage reducing admixtures", Advances in Concrete Through Science and Engineering, Proceedings of the RILEM International Symposium, Quebec, Canada, 2006
- [174] Z. He, Z.J. Li, M.Z. Chen, W.Q. Liang, "Properties of shrinkage reducing admixture-modified pastes and mortars", Materials and Structures 39 (4), pp. 413–421, 2006

- [175] D.P. Bentz, "Influence of shrinkage reducing admixtures on early-age properties of cement pastes", *Journal of Advanced Concrete Technology* 4 (3), pp. 423–429, 2006
- [176] J.J. Brooks, X. Jiang, "The influence of chemical admixtures on restrained drying shrinkage of concrete", in: V.M. Malhotra (Ed.), *Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, ACI SP-173, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp. 249–265, 1997
- [177] J.J. Brooks, M.A. Megat Johari, M. Mazloom, Effect of admixtures on the setting times of high strength concrete, *Cement and Concrete Composites* 22 (4), pp. 293–301, 2000
- [178] Collepardi, M., "New Concrete", 3rd Ed., Tintoretto, Villorba, Italy, 2003
- [179] Collepardi, M., Borsoi, A., Collepardi, S., Ogoumah, J.J., Troli, R., "Effects of Shrinkage Reducing Admixture in Shrinkage Compensating Concrete", *Cement and Concrete Composites*, Volume 27, issue 6, pp. 704-708, 2005
- [180] Maltese, C., Pistolesi, C., Lolli, A., Bravo, A., Cerulli, T., Salvioni, D., "Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars", *Cement and Concrete Research* 35, pp. 2244-2251, 2005
- [181] Meddah, M. S., Szuki, M., Sato, R., "Combined effect of shrinkage reducing and expansive agents on autogenous deformations of high-performance concrete", *The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA*, pp. 339-346, 2008
- [182] Pistolesi, C., Maltese, C., Bovassi, M., "Low shrinking self-compacting concrete for concrete repair", *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, Alexander et al (eds), pp. 871-876, 2009
- [183] Meddah, M. S., Szuki, M., Sato, R., "Influence of a combination of expansive and shrinkage-reducing admixture on autogenous deformation and self-stress of silica fume high-performance concrete", *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 1, pp. 239-250, 2011
- [184] Bentur, A., "Early age cracking test", in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", *RILEM TC 181 – EAS*, pp. 241-255, 2002
- [185] Hammer, T., "Measurement methods for testing of early age autogenous strain", in "Early Age Cracking in Cementitious Systems", *RILEM TC 181 – EAS*, pp. 207-216, 2002
- [186] Bjontegaard, O., "Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete", *Dr. Ing. Theses 1*, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, pp. 121, 1999
- [187] Takada, K., Breugel, K., Koenders, A., Kaptjin, N., "Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete", in *Autogenous Shrinkage of Concrete*, *Proceedings Int. Workshop*, Ei-ichi Tazawa, editor, E & FN Spon, London, pp. 221-232, 1998

- [188] Jensen, O. M., Christensen, S.L., Dela, B.F., Hansen, J.H., Hansen, P.F. and Nielsen, A., "HETEK- control of early age cracking in concrete – Phase 2: Shrinkage of mortar and concrete", Report No. 110, Road Directorate, Denmark Ministry of Transport, 1997
- [189] Yokoyama, K., Hiraishi, S., Kasai, Y., Kishitani, K., "Shrinkage and cracking of high strength concrete and flowing concrete at early ages", in Proc. 4th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete, V. M. Malhotra, editor, ACI SP-148, pp. 243-258, 1994
- [190] Berke, N.S. and Dallaire, M.P., "The effect of low addition rates of Polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking and mechanical properties of concrete", in "Fiber Reinforced Concrete: Developments and Innovations", J.I. Danile and S.P. Shah, editors, ACI – 142, pp.19-42, 1994
- [191] RILEM TC 119 – TCE, "Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages - recommendations", Materials and Structures, 30, pp. 451-461, 1997
- [192] JCI Committee Report: Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, "AUTOSHRINK'98", Proc. Int. Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, E. Tazawa, editor, Japan Concrete Institute, pp.5-66, 1998
- [193] Bentur, A., Berke, N.S., Dallaire, M.P. and Durning, T., "Crack mitigation effects of shrinkage reducing admixtures", in "Design and Construction Practices to Mitigate Crackings", E.G. Nawy, F.G. Barth and R.J. Frosch, editors, ACI SP – 204, pp. 155-170, 2001
- [194] CEN, "NP EN 196-2:2006 – Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos", Versão portuguesa da norma europeia EN 196-2:2005, IPQ, 2006
- [195] ASTM, "ASTM C114 - 11b: Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement", ASTM C114 – 11b, ASTM, 2011
- [196] LNEC, "E-64 – Cimentos. Determinação da massa volúmica", LNEC, Lisboa, 1979
- [197] CEN, "NP EN 196-6:1990 – Métodos de ensaio de cimentos. Parte 6: Determinação da finura", Versão portuguesa da norma europeia EN 196-6:1989, IPQ, 1990
- [198] CEN, "NP EN 196-3:2006 – Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade", Versão portuguesa da norma europeia EN 196- 3:2005, IPQ, 2006
- [199] CEN, "NP EN 196-1:2006 – Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas", Versão portuguesa da norma europeia EN 196-1:2005, IPQ, 2006
- [200] CEN, "NP EN 450-1:2008 – Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade", Versão portuguesa da norma europeia EN 450-1:2005 + A1:2007, IPQ, 2008

- [201] CEN, “NP EN 1097-6:2003 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”, Versão portuguesa da norma europeia EN 1097-6:2000, IPQ, 2003
- [202] CEN, “NP EN 933-1:2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”, Versão portuguesa da norma europeia EN 933-1:1997, IPQ, 2000
- [203] CEN, “NP EN 12620:2004 – Agregados para betão”, Versão portuguesa da norma europeia EN 12620:2002, IPQ, 2004
- [204] CEN, “NP EN 1008:2003 – Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão”, Versão portuguesa da norma europeia EN 1008:2002, IPQ, 2003
- [205] CEN, “NP EN 12390-3:2003 – Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”, Versão portuguesa da norma europeia EN 12390-3:2001, IPQ, 2003
- [206] LNEC, “E 398:1993 – Betão Endurecido. Determinação da retracção e expansão”, LNEC, Lisboa, 1993.
- [207] ASTM, “ASTM C 1698-09 Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar”, ASTM C 1698-09, ASTM, 2009
- [208] ISO, “ISO 15901-1 - Evaluation of pore size distribution and porosimetry of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption — Part 1: Mercury porosimetry”, ISO 15901-1, ISO, 2005
- [209] CEN, “Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.”, EN 1992-1-1:2004 (Ed. 1), CEN, 2004

ANEXOS:

ANEXO I – Composições dos betões

ANEXO II - Resultados da porosimetria de mercúrio

ANEXO I – Composições dos betões

BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL COM RETRACÇÃO CONTROLADA

BAC-R (Amassaduras de 30 l)

Composições	BAC-R Ref	BAC-R ARR I	BAC-R ARR II	BAC-R ARR (I+II)	BAC-R ARR (I+II) + 20 AE	BAC-R ARR (I+II) +40 AE
Materiais	kg/m ³					
Agregado Fino	779,87	774,32	776,19	770,33	765,23	759,92
Agregado Grosso	768,16	762,70	764,53	758,76	753,74	748,51
CEM II B/L 32,5 N	264,53	262,65	263,28	261,29	259,56	257,76
CVc	172,85	171,62	172,03	170,73	169,60	168,43
SP BAC-R	3,50	2,65	2,66	2,31	2,29	2,67
ARR I	0,00	7,45	0,00	7,41	7,37	7,31
ARR II	0,00	0,00	5,31	5,27	5,24	5,20
AE	0,00	0,00	0,00	0,00	19,64	39,01
Água	200,37	198,95	199,43	197,92	196,61	195,25

BAC±R (Amassaduras de 30 l)

Composições	BAC±R Ref	BAC±R ARR I	BAC±R ARR II	BAC±R ARR (I+II)	BAC±R ARR (I+II) + 20 AE	BAC±R ARR (I+II) +30 AE
Materiais	kg/m ³					
Agregado Fino	773,80	768,58	770,16	765,10	759,09	755,87
Agregado Grosso	763,83	758,67	760,23	755,25	749,31	746,13
CEM II A/L 42,5 R	283,00	281,09	281,66	279,82	277,61	276,44
CVc	171,81	170,65	171,00	169,88	168,54	167,83
SP BAC±R	9,47	8,25	8,27	6,90	8,15	9,09
ARR I	0,00	7,43	0,00	7,39	7,34	7,31
ARR II	0,00	0,00	5,62	5,59	5,54	5,52
AE	0,00	0,00	0,00	0,00	19,56	29,22
Água	193,95	192,64	193,04	191,77	190,26	189,46

BAC+R CVs (Amassaduras de 30 l)

Composições	BAC+R CVs Ref	BAC+R CVs ARR I
Materiais	kg/m ³	
Agregado Fino	823,48	818,27
Agregado Grosso	808,90	803,78
CEM I 52,5 R	317,54	315,53
SP BAC+R	10,07	8,34
ARR I	0,00	7,51
Água	152,26	151,29

BAC+R Cvc (Amassaduras de 30 l)

Composições	BAC+R Cvc Ref	BAC+R Cvc ARR (I+II) + ALS	BAC+R Cvc 20 AE
Materiais	kg/m ³		
Agregado Fino	818,83	731,16	813,45
Agregado Grosso	804,34	718,22	799,05
CEM I 52,5 R	315,75	281,94	313,68
CVc	178,71	159,58	177,54
ALS	0,00	127,79	0,00
SP BAC+R	6,98	3,22	6,80
ARR I	0,00	6,71	0,00
ARR II	0,00	5,67	0,00
AE	0,00	0,00	19,90
Água	151,40	135,19	150,40

BAC+R Cvc (Amassaduras de 1.5 l)

Composições	BAC+R Cvc ARR (I+II)	BAC+R Cvc ARR (I+II) + 10 AE	BAC+R Cvc ARR (I+II) + 20 AE	BAC+R Cvc ARR (I+II) + 30 AE	BAC+R Cvc ARR (I+II) + 40 AE	BAC+R Cvc ALS
Materiais	kg/m ³					
Agregado Fino	809,13	805,99	803,32	800,67	798,04	740,24
Agregado Grosso	794,81	791,90	789,28	786,68	784,09	727,30
CEM I 52,5 R	312,01	310,91	309,88	308,86	307,85	285,55
CVc	176,60	175,99	175,41	174,83	174,26	161,64
ALS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	129,41
SP BAC+R	4,29	4,23	4,21	4,20	4,19	3,88
ARR I	7,42	7,75	7,72	7,70	7,67	0,00
ARR II	6,27	6,34	6,32	6,30	6,28	0,00
AE	0,00	9,86	19,66	29,40	39,07	0,00
Água	149,60	149,01	148,52	148,03	147,54	136,85

ANEXO II – Resultados da porosimetria de mercúrio

BAC-R ARR II
Provetes 527 (sem cura)

Secção	D _M (µm)
1	0,35
2	0,30
3	0,32
4	0,30
5	0,37
6	0,30
7	0,30
8	0,38
9	0,32

BAC-R ARR II
Provetes 543 (cura de 7 dias)

Secção	D _M (µm)
1	0,14
2	0,09
3	0,15
4	0,19
5	0,14
6	0,16
7	0,17
8	XXX
9	0,12