

Estudo de betão de retração controlada

Study on shrinkage compensating concrete

A. Bettencourt Ribeiro

Guida Faria

Vitor Vermelhudo

Resumo

Este estudo foi desenvolvido na sequência de dificuldades da indústria em cumprir limites especificados em projeto relativos a betões de retração controlada, com base em tecnologia corrente. Foram definidos limites de retração de 150 e 200 $\mu\text{m/m}$, respetivamente para os 28 e para os 90 dias de idade, em betões C35/45 e C40/50. Neste trabalho apresenta-se o método utilizado para desenvolver formulações com capacidade de cumprir o especificado. O trabalho englobou a caracterização da retração de pastas, de argamassas e de betões, e ainda da rigidez da rocha de onde foram provenientes os agregados grossos. Analisa-se a influência de cada uma destas fases na retração e conclui-se sobre a capacidade do método como ferramenta para atingir objetivos relacionados com o controlo da retração.

Abstract

This study was developed to overcome the difficulties of concrete producers in obtaining shrinkage-compensating concrete capable of meeting the limits specified in a structural design.

Shrinkage limits of 150 and 200 $\mu\text{m/m}$ were defined, respectively for 28 and 90 days, for C35/45 and C40/50 concrete. This work presents the method used to develop formulations capable of fulfilling the specified. The work included the characterization of the shrinkage of pastes, mortars and concrete, as well as the rigidity of the rock used to produce the coarse aggregates. The influence of each of these phases on shrinkage is analyzed, concluding on the ability of the method as a tool to achieve the objectives related to shrinkage control.

Palavras-chave: Pastas de cimento / Betões / Retração autogénea / Retração total

Keywords: Cement pastes / Concrete / Autogenous shrinkage / Total shrinkage

A. Bettencourt Ribeiro

Investigador Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
bribeiro@lnec.pt

Guida Faria

Diretora Técnica da Qualidade
Ibera – Indústria de Betão, S.A.
Évora, Portugal
gfaria@cimpor.com

Vítor Vermelhudo

Coordenador Técnico
Unibetão – Indústrias de Betão Preparado S.A.
Lisboa, Portugal
Vitor.vermelhudo@secil.pt

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

1 Introdução

A progressão no conhecimento sobre o comportamento dos betões e os desenvolvimentos no âmbito dos seus constituintes tem levado a que se especifiquem em projeto betões com características especiais. O betão, sendo um material poroso, sofre variações de volume devidas à influência da água. A variação da quantidade de água presente no betão, quer no estado líquido quer no estado vapor, e da forma como esta se encontra distribuída nos poros, faz variar o volume do betão. A esta variação de volume estão associadas tensões, mesmo quando o betão se encontra aplicado em elemento sem restrições a rotações ou a deslocamentos relativos. Efetivamente, variações no estado de humidade interna nos poros do betão provocam alterações no estado de tensão interna, na fase sólida e na fase líquida do material. Apesar da resultante de tensões no elemento ser nula, para condições de equilíbrio externo isostáticas, a sua distribuição, em processo para atingir o equilíbrio interno, pode implicar a fissuração do material. Deste modo, a retração do betão deve ser considerada, não só por envolver uma variação volumétrica macroscópica do elemento estrutural, mas também porque implica a existência de um estado de tensão interno.

Como a existência de retração no betão implica sempre um estado de tensão no sólido, ela deve ser tomada em consideração em projeto quando assume influência relevante no comportamento da estrutura. A retração pode ter influência na capacidade de uma estrutura de betão cumprir requisitos de segurança no que respeita aos estados limites de serviço e aos estados limites últimos. No dimensionamento estrutural, a quantificação da retração é feita normalmente por caracterização de deformação unidimensional, usando expressões matemáticas de previsão ou a partir de resultados de ensaios laboratoriais. O presente estudo foi motivado pela necessidade de cumprir limites de retração especificados em projeto usando técnicas tradicionais de controlo da retração. No projeto foi definido que betões de duas classes de resistência diferentes, C35/45 e C40/50, não deveriam apresentar uma retração linear superior a 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ e a 200 $\mu\text{m}/\text{m}$, respetivamente aos 28 e aos 90 dias de idade, em ensaio normalizado.

Partindo de composições de betão desenvolvidas em central de betão, cumprindo as exigências de resistência, mas com valores de retração superiores ao exigido, foi feito um estudo envolvendo ensaios em pastas, argamassas e betões, de modo a compreender a influência relativa dos parâmetros específicos da composição relevantes para a retração, de modo a poder atuar ao nível da deformação e obter valores compatíveis com os limites especificados. Os resultados apresentados neste trabalho permitem verificar que é possível formular betões que cumpram as exigências de projeto, com produtos presentes no mercado. A produção dos betões em central requiere, porém, a adaptação das instalações de fabrico, face à necessidade de utilização de um expansivo e de vários adjuvantes.

2. Materiais e métodos de ensaio

2.1 Materiais

Os constituintes utilizados no fabrico dos betões estão indicados no Quadro 1. Com estas matérias-primas foram fabricadas as pastas (Quadro 2), as argamassas (Quadro 3) e os betões (Quadro 4), utilizados no estudo. Para caracterização da rigidez da rocha a usar no fabrico dos agregados grossos, foram usados pequenos blocos de rocha, provenientes de três pedreiras, identificados da seguinte forma: Granito da Pedreira do Monte das Flores (Évora), Tecnovia; Calcário do Centro de Produção do Cano, Pragosa; e Granito de Bripealtos. Os traços das pastas e das argamassas foram definidos para corresponderem aproximadamente às dosagens relativas de betões alvo, os quais seriam posteriormente objeto de estudo. Pretendeu-se produzir argamassas equivalentes às que existiriam em betões alvo, e que fisicamente poderiam também ser obtidas se os betões alvo fossem submetidos a crivagem de modo a retirar todos os agregados grossos. O mesmo se aplica para as pastas, mas fazendo a crivagem de modo a retirar todos os agregados do betão.

Note-se que as amostras de material usadas para o fabrico das pastas e das argamassas foram provenientes de um primeiro fornecimento de matérias-primas e as amostras de material usadas posteriormente no fabrico dos betões foi de um segundo fornecimento. Espera-se, no entanto, que o comportamento seja equivalente entre os dois fornecimentos, com exceção do Expansivo Cebex 650, dado que este expansivo foi amostrado em produto para fornecimento a saco e em produto para fornecimento a granel, que, segundo o fornecedor, poderiam apresentar desempenhos distintos. Assim, em pastas usou-se apenas uma amostra do produto para fornecimento a saco, em argamassas usaram-se amostras para os dois tipos de fornecimento e em betões apenas a amostra para fornecimento a granel.

Os traços das pastas e das argamassas foram definidos para corresponderem aproximadamente às dosagens relativas de betões alvo, os quais seriam posteriormente objeto de estudo. Pretendeu-se produzir argamassas equivalentes às que existiriam em betões alvo, e que fisicamente poderiam também ser obtidas se os betões alvo fossem submetidos a crivagem de modo a retirar todos os agregados grossos. O mesmo se aplica para as pastas, mas fazendo a crivagem de modo a retirar todos os agregados do betão.

Note-se que as amostras de material usadas para o fabrico das pastas e das argamassas foram provenientes de um primeiro fornecimento e as amostras de material usadas posteriormente no fabrico dos betões foi de um segundo fornecimento. Espera-se, no entanto, que o comportamento seja equivalente entre os dois fornecimentos, com exceção do Expansivo Cebex 650, dado que este expansivo foi amostrado em produto para fornecimento a saco e em produto para fornecimento a granel, que, segundo o fornecedor, poderiam apresentar desempenhos distintos. Assim, em pastas usou-se apenas uma amostra do produto Cebex 650 para fornecimento a saco, em argamassas usaram-se amostras para os dois tipos de fornecimento e em betões apenas a amostra para fornecimento a granel.

Esta equivalência teórica entre as pastas e as argamassas produzidas separadamente e as pastas e as argamassas que se encontrariam nos betões a produzir (designados inicialmente por betões alvo) não foi

inteiramente cumprida nos betões estudados, devido a alterações de ordem logística e associadas a exigências de trabalhabilidade, mas as respetivas diferenças são assinaladas neste documento. Nos três Quadros de doseamento, Quadro 2, Quadro 3, e Quadro 4, porém, reproduz-se fielmente os constituintes e as dosagens realmente utilizadas, respetivamente, nas pastas, argamassas e betões produzidos e ensaiados.

No Quadro 5 apresenta-se uma relação entre pastas, argamassas e betões, considerando que pode corresponder a comportamentos relacionáveis, por similitude das respetivas fases. Note-se, porém, que existem diferenças no comportamento das respetivas fases, quando analisadas separadamente ou em conjunto, não só inerentes ao facto de serem ou não único constituinte do material em causa, mas também associadas a correções nas dosagens efetuadas nos betões produzidos, relativamente aos betões alvo considerados inicialmente.

2.2 Métodos de ensaio

Os ensaios realizados sobre as rochas, as pastas, as argamassas e os betões estão indicados no Quadro 6.

As argamassas para os ensaios de retração e de resistência à compressão foram preparadas numa misturadora com 5 litros de capacidade, colocando previamente no respetivo recipiente os materiais sólidos. O processo de mistura seguiu os seguintes passos: ao adicionar $\frac{3}{4}$ do total de água prevista foi iniciada a contagem de tempo, para um período inicial de mistura de dois minutos, com velocidade de mistura lenta; ao fim dos dois minutos foi interrompida a mistura por período de 1 minuto, para remoção da massa aderente às paredes do recipiente; ao minuto 3 foi retomada a mistura a velocidade lenta, durante 30 segundos; ao minuto 3,5 foi colocada a água remanescente e todos os adjuvantes líquidos durante 1,5 minutos; ao minuto 5, com todos os constituintes colocados, a mistura continuou passando de velocidade lenta para velocidade rápida, permanecendo nesta última durante 1,5 minutos, para um total de tempo de mistura de 6,5 minutos. As medições para a obtenção das variações dimensionais das argamassas foram iniciadas 24 horas após a amassadura. Os provetes de argamassa usados para os ensaios de retração foram conservados a 20 ± 2 °C, nas 2 condições de humidade indicadas no Quadro 6, seladas para evitar trocas de humidade, e a um ambiente com 50 ± 5 % HR.

As amassaduras de betão foram fabricadas numa misturadora de eixo vertical, em volumes de 135 litros. O procedimento consistiu em colocar todos os constituintes sólidos no tambor da misturadora, usando agregados previamente secos, iniciando seguidamente o movimento rotativo das pás. Após cerca de 20 segundos foi colocada 75 % da água total prevista. Após cerca de 3 minutos de mistura, foram colocados os adjuvantes líquidos, primeiro com os redutores de água e depois o hidrófugo, colocando parte dos 25 % de água total remanescente, a qual foi previamente colocada nos recipientes já praticamente vazios dos adjuvantes, para aproveitamento da pequena quantidade remanescente de adjuvante. Nos casos em que a massa de betão aparentava ter trabalhabilidade suficiente antes da colocação de toda a restante parcela de 25 % da água prevista, o doseamento de água foi interrompido, para medição da trabalhabilidade. Esta interrupção

Quadro 1 Constituintes utilizados nos betões

Tipo de material	Identificação	Origem	Massa volúmica* (kg/m³)	Absorção* (%)
Areia	Areia crivada AS-40	Sífucel	2630	0,4
	Areia lavada AS-30/40	Sífucel	2620	0,3
Brita	Brita 1 (4-14)	Granito da Pedreira do Monte das Flores (Évora)	2610	0,8
	Brita 1 lavada (6,3-12,5)	Calcário, Centro de Produção do Cano	2760	1,0
	Brita 2 (12-20)	Granito da Pedreira do Monte das Flores (Évora)	2630	1,2
	Brita 2 lavada (12,5-20)	Calcário, Centro de Produção Cano	270	1,1
Cimento	CEM II/A-L 42,5 R	Alhandra	3050	–
Água	Água potável rede pública	Lisboa	1000	–
Fíler	Fíler comerc. 466 carb. cálcio	VAC Minerals, S.A.	2650	–
Plastificante	Auramix 230	FOSROC	1070	–
Superplastificante	Auramix 322	FOSROC	1050	–
Hidrofugo	Conplast X400	FOSROC	1020	–
Redutor de retração	Conplast controller	FOSROC	950	–
	MasterLife SRA2	Masterbuilders	1000	–
Expansivo	MasterLife SRA100	Masterbuilders	3000	–
	Cebex 650 (granel)	FOSROC	3050	–

* Valores estimados com base em informação documental.

Quadro 2 Traços em peso das pastas de cimento

Identificação da pasta	T0	T1	T2	T3	T5
Identificação do betão alvo correspondente	B0	B1	B2	B3	B5
Cimento II/A-L 42,5 R	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fíler	–	–	–	–	0,17
Água	0,362	0,362	0,327	0,293	0,314
Auramix 230 (% de cimento)	0,80	0,80	0,95	0,95	1,11
Auramix 322 (% de cimento)	0,60	0,60	0,57	0,86	1,00
Master life SRA2 - Masterbuilders	0,020	0,028	0,024	0,024	0,029
Masterlife SRA100 - Masterbuilders	0,135	0,068	0,061	0,061	0,000
Conplast controller - FOSROC	–	0,027	0,024	0,024	0,029
Conplast X400 - FOSROC	–	–	0,005	0,005	0,006
Cebex 650 FOSROC (saco)	–	–	–	–	0,071

Quadro 3 Traços em peso das argamassas

Identificação da pasta	ArgT0	ArgT1	ArgT2	ArgT3	ArgT4	ArgT5	ArgT6
Pasta correspondente	T0*	T1*	T2	T3	-	T5	-
Areia crivada AS-40	1,23	1,23	1,08	1,10	1,10	1,29	1,10
Areia Lavada AS-30/40	0,71	0,71	0,66	0,67	0,67	0,79	0,67
Cimento II/A-L 42,5 R	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fíler	-	-	-	-	0,00	0,17	0,00
Água	0,344	0,344	0,327	0,293	0,293	0,314	0,293
Auramix 230 (% de cimento)	0,76	0,76	0,95	0,95	0,95	1,11	0,95
Auramix 322 (% de cimento)	0,57	0,57	0,57	0,86	0,86	1,00	0,86
Masterlife SRA2 – Masterbuilders	0,020	0,026	0,024	0,024	0,024	0,029	0,024
Masterlife SRA100 - Masterbuilders	0,128	0,064	0,061	0,061	0,000	0,000	0,000
Conplast controller – FOSROC	-	0,026	0,024	0,024	0,024	0,029	0,024
Conplast X400 – FOSROC	-	-	0,005	0,005	0,005	0,006	0,005
Cebex 650 FOSROC (saco)	-	-	-	-	0,061	0,071	-
Cebex 650 FOSROC (granel)	-	-	-	-	-	-	0,061

* As pastas T0 e T1 apresentadas no Quadro 2 são ligeiramente diferentes das pastas da argamassa porque correspondem a betões alvo com menos 20 kg/m³ de cimento.

Quadro 4 Composição dos betões

Constituinte	Betão B1	Betão B2	Betão B3	Betão B4	Betão B5	Betão B6	Betão B7
Areia crivada AS-40	449,6	475,1	460,5	476,3	466,6	469,9	460,7
Areia Lavada AS-30/40	269,8	283,0	276,3	283,7	280,0	279,9	276,4
Brita 1 granito (Tecnovia)	0,0	0,0	0,0	532,0	0,0	0,0	0,0
Brita 2 granito (Tecnovia)	0,0	0,0	0,0	554,3	0,0	0,0	0,0
Brita 1 Calcário (Pragosa)	579,5	545,8	581,2	0,0	570,3	569,8	563,0
Brita 2 granito (Pragosa)	589,5	596,4	587,4	0,0	573,4	584,8	566,1
Cimento II/A-L 42,5 R (Alhandra)	409,6	394,2	419,6	395,2	394,0	389,9	368,5
Fíler 466 carb. de cálcio	0,0	0,0	0,0	0,0	41,5	0,0	61,4
Água	119,9	119,4	109,1	118,3	145,2	130,0	143,3
Plast. Auramix 230 (FOSROC)	3,90	3,94	3,99	3,95	4,04	3,90	4,40
Superp. Auramix 322 (FOSROC)	3,51	3,55	3,59	3,56	3,11	3,51	3,07
Redutor de retração SRA2 (Masterb.)	9,99	10,11	10,23	10,13	10,37	0,00	10,24
Expansivo SRA100 (Masterb.)	0,00	0,00	25,58	0,00	0,00	0,00	25,59
Redut. de retração Conplast.Control. (FOSROC)	9,99	10,11	10,23	10,13	10,37	10,00	10,24
Hidrófugo Conplast X400 (FOSROC)	1,95	1,97	2,00	1,98	2,02	1,95	2,00
Expansivo Cebex 650 (FOSROC)	24,98	25,27	0,00	25,33	25,92	24,99	0,00

Quadro 5 Relação entre pastas, argamassas e betões*

Constituinte do betão	–	Betão B1	Betão B2	Betão B3	Betão B4	Betão B5	Betão B6	Betão B7
Argamassa	ArgT0	ArgT1	ArgT2	ArgT3	ArgT4	ArgT5	ArgT6	–
Pasta	T0**	T1**	T2	T3	–	T5	–	–

- * As razões água/cimento e os teores de cimento nas pastas e nas argamassas são ligeiramente diferentes das pastas e argamassas dos respetivos betões, por necessidade de acerto da dosagem de água para atingir a trabalhabilidade requerida para os betões (S4).
 ** As razões água/cimento e os teores de cimento nas pastas T0 e T1 são também diferentes da pasta das argamassas T0 e T1, respetivamente, e do betão B1, porque estas pastas foram definidas como sendo parte de betões alvo com menos 20 kg/m³ de cimento.

Quadro 6 Métodos de ensaio

Material	Ensaio	Provete	Método	Número de ensaios
Rocha	Módulo de elasticidade	Prisma* 5 × 5 × 15 cm	Com base no proposto pelo International Society for Rock Mechanics [1]**	3
Pasta	Retração autogénea	Preenchimento de tubo corrugado	Especificação LNEC E 476 [2]	5
Argamassa	Retração selada	Prisma 4 × 4 × 16 cm	Método interno descrito no texto	7
	Retração a 50% HR	Prisma 4 × 4 × 16 cm		7
	Resistência à compressão a 2 idades	Cubo de 5 cm	NP EN 196-1 [3]	7
Betão	Consistência	Cone de Abrams	NP EN 12350-2 [4]	7
	Resistência à compressão a 5 idades	Cubo de 15 cm	NP EN 12390-3 [5]	7
	Retração a 50% HR	Prisma 20 × 20 × 60 cm	Especificação LNEC E 398 [6]	7

- * Obtido por corte de pequeno bloco de rocha.
 ** Aplicação de ciclos de carga com medição da deformação em prismas.
 *** Utilização de prensa e de velocidade de carga indicadas nesta norma.

ocorreu cerca de 5 minutos após a amassadura. Com a paragem da misturadora foi retirada uma amostra de betão para ensaio de abaixamento. Nos casos em que o abaixamento excedeu os 210 mm, ou foi inferior a 170 mm, o betão da amostra foi colocado de novo na misturadora e recomeçada a mistura por mais 5 a 10 minutos antes de nova medição do abaixamento, com colocação de água remanescente no caso da mistura estar muito seca. Em todos os betões, o abaixamento pretendido foi obtido na primeira ou a segunda medição de abaixamento, num período de até 20 minutos após o início da mistura. Nas composições, Quadro 4, considerou-se que os agregados absorveram a água equivalente ao estado saturado com a superfície seca, pelo que a dosagem de água corresponde à água efetiva e não à água total introduzida na misturadora. As medições para obtenção das variações dimensionais dos betões foram iniciadas 24 horas após a amassadura. Os provetes de betão usados para os ensaios de retração foram conservados a 20 ± 2 °C e a uma humidade relativa de $50 \pm 5\%$.

3 Resultados

3.1 Retração autogénea de pastas

Os resultados dos ensaios de retração autogénea em pastas estão apresentados na Figura 1. De cada pasta preparam-se dois provetes, sendo cada curva o resultado individual de um provete (enchimento de tubo corrugado com cerca de 38 cm de comprimento). As leituras foram iniciadas cerca de 30 minutos após a amassadura, pelo que as leituras nas primeiras horas correspondem a deformação de líquido viscoso, traduzindo variação de volume por retração química. O instante em que ocorre a transição de deformação de líquido viscoso para deformação de sólido viscoso, que corresponde ao tempo zero da retração autogénea, não é objeto de discussão neste trabalho. A descontinuidade nas curvas corresponde a intervalos de tempo sem registo. O eixo das abcissas, que corresponde ao tempo decorrido após o instante de mistura do cimento com a água, está apresentado em escala logarítmica para facilidade de leitura dos resultados às primeiras horas.

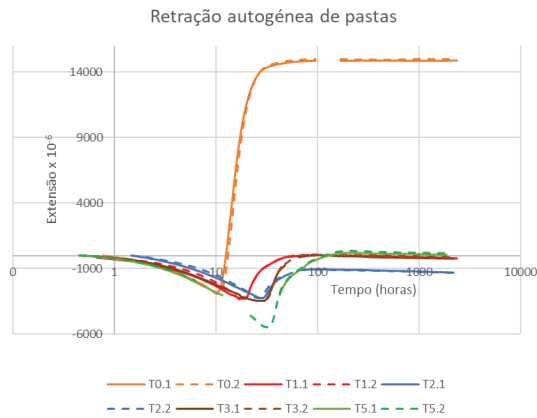


Figura 1 Resultados do ensaio de retração autogénea de pastas

3.2 Ensaios em argamassas

Os resultados dos ensaios de retração em argamassas estão apresentados nas duas figuras seguintes, na Figura 2 a retração em provetes selados, para obter a retração autogénea, e na Figura 3 a retração em provetes livres, expostos a um ambiente com humidade relativa de $50 \pm 5\%$, para obter a retração total com secagem. De cada argamassa preparam-se dois provetes, sendo cada curva o resultado individual de um provete ($4 \times 4 \times 16$ cm). As leituras foram iniciadas 24 horas após a amassadura. O eixo das abcissas, que corresponde à idade da argamassa, está apresentado em escala logarítmica para facilidade de leitura dos resultados nos primeiros dias.

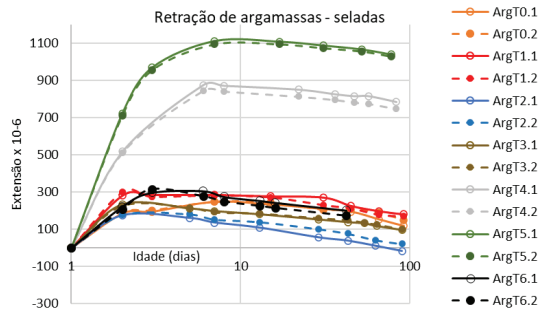


Figura 2 Resultados do ensaio de retração autogénea de argamassas

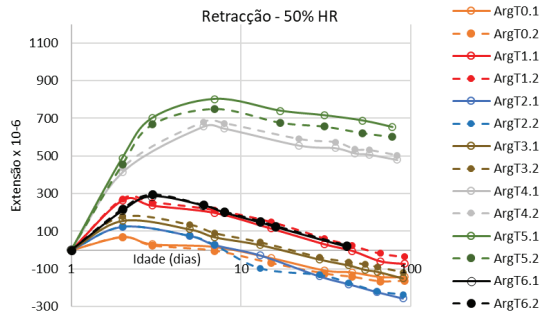


Figura 3 Resultados do ensaio de retração de argamassas expostas a 50 % HR

No Quadro 7 apresenta-se a resistência à compressão nas primeiras idades das argamassas, medida em provetes cúbicos com 5 cm de aresta. Com base na massa de cada cubo e no volume aparente, apresenta-se também a respetiva massa volúmica.

Quadro 7 Massa volúmica e resistência à compressão de argamassas

Idade (dias)	Massa (gramas)	Massa volúmica kg/m ³	Tensão rotura (MPa)
Argamassa ArgT0			
3	295,16	2315	56,0
7	295,21	2315	62,7
Argamassa ArgT1			
3	294,16	2307	39,1
7	296,48	2325	51,4
Argamassa ArgT2			
3	293,89	2351	41,8
7	301,64	2366	58,0
Argamassa ArgT3			
3	300,09	2401	44,3
7	301,64	2366	53,4
Argamassa ArgT4			
2	300,94	2360	25,2
8	302,04	2369	59,1
Argamassa ArgT5			
3	301,15	2362	26,6
7	298,07	2338	40,0
Argamassa ArgT6			
2	298,54	2341	31,8
8	301,69	2366	65,5

3.3 Ensaios em betões

Os resultados dos ensaios de retração em betões estão apresentados na Figura 4. De cada betão preparam-se dois provetes, sendo cada curva o resultado da média dos dois provetes ($20 \times 20 \times 60$ cm). As leituras foram iniciadas 24 horas após a amassadura. O eixo das abcissas, que corresponde à idade do betão, está apresentado em escala logarítmica para facilidade de leitura dos resultados nos primeiros dias.

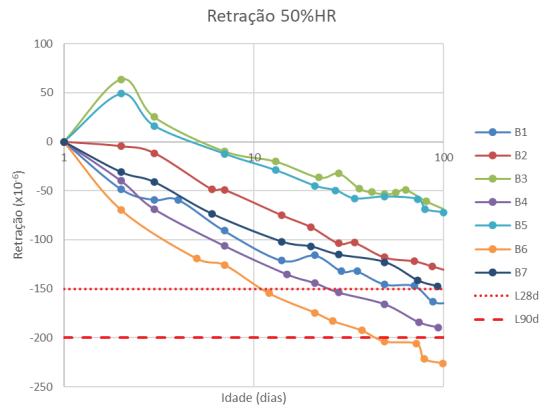


Figura 4 Resultados do ensaio de retração de betões expostos a 50 % HR

Quadro 8 Temperatura e abaixamento dos betões

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Temperatura (°C)	–	27,4	26,9	26,4	25,4	25,4	27,3
8 min.	–	245	208	225	198	110	230
Abaix. (mm)							
15 min.	175	210	–	189	–	206	228
20 min.	–	–	–	–	–	–	220
35 min.	94	169	212	120	39	119	209

No Quadro 8 estão indicadas as medições efetuadas no estado fresco aos betões, temperatura e abaixamento pelo cone de Abrams, e no Quadro 9 são indicadas as resistências à compressão do betão endurecido até aos 28 dias de idade. A medição do abaixamento foi efetuada a diferentes intervalos de tempo após o início da amassadura.

Quadro 9 Resistência à compressão dos betões (MPa)

Idade (dias)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	28,1	17,1	8,9	20,9	13,6	39,6	13,1
3	53,2	50,9	47,0	55,3	54,7	51,2	49,4
7	63,0	60,7	54,8	65,1	61,3	61,4	57,0
28	68,7	69,2	75,6	69,4	70,2	69,8	67,9

3.4 Ensaio em rochas

Os resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade das rochas estão apresentados no Quadro 10. De cada rocha foram preparados 3 provetes prismáticos, nos quais se aplicou uma variação de tensão de 14 MPa, entre 1 MPa e 15 MPa, tendo-se medida a variação de deformação numa base de medida com 50 mm de comprimento, colocada no centro do provete. Após a determinação do módulo de elasticidade os provetes foram levados à rotura para determinar a resistência à compressão, Quadro 10.

Quadro 10 Módulo de elasticidade (GPa) e resistência à compressão das rochas (MPa)

Rocha	Granito Bripealtos				Granito Tecnovia				Calcário Pragosa			
Proвете	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
Módulo	58,3	53,8	58,3	56,8	53,8	50,0	53,8	52,6	58,3	58,3	53,8	56,8
Resistência	196,5	171,9	178,6	182,4	186,5	160,1	174,6	173,7	40,8	52,0	42,4	45,1

4 Análise dos resultados

Os resultados dos ensaios de retração autogénea em pastas, Figura 1, mostram que a deformação segue um perfil padrão traduzido por uma primeira fase de retração, à qual se segue uma inflexão para uma segunda fase de expansão, que se inicia a taxa elevada, diminuindo progressivamente até se anular, terminando com uma terceira fase de retração a uma taxa muito reduzida. Os principais fenómenos envolvidos em cada uma destas fases são os seguintes: na primeira fase de retração a variação volumétrica associada à reação do ligante pela transformação dos reagentes em produtos de hidratação; na segunda fase, de expansão, associada à pressão exercida pela formação de produtos de hidratação da adição expansiva; na terceira fase a tensão capilar associada à dessecação na estrutura porosa por consumo de água na hidratação. Na segunda fase destaca-se

a pasta T0, por ser a que contém a maior dosagem de expansivo, Quadro 2, cerca do dobro da usada nas restantes pastas. Entre as pastas que contiveram dosagem semelhante de expansivo, salienta-se a pasta T5, correspondente à pasta onde se utilizou o expansivo Cebex 650 para fornecimento a saco, que na fase de expansão foi a que, entre estas, exibiu maior amplitude de expansão. A terceira fase caracteriza-se por deformações muito pequenas em todas as pastas, indicando que a parcela da retração correspondente à dessecação, nesta fase mais tardia, já é muito pequena. Estes resultados em pastas evidenciam que, para a componente autogénea da retração, o efeito da adição expansiva é condicionante, quer pelo instante em que ocorre o ponto de inflexão, correlacionável com o estado de formação da estrutura porosa, quer pela amplitude da expansão. Estes parâmetros têm implicações na deformação final e nas tensões inerentes à variação de volume.

Dado que nos ensaios de caracterização da expansão, segundo métodos laboratoriais normalizados, o início da medição ocorre em geral após a desmoldagem, usualmente efetuada às 24 horas, para efeitos deste estudo considerou-se como tempo zero da retração autogénea esta mesma idade, ou seja, 24 horas após a amassadura, atendendo que foi esse também o tempo zero considerado para efeitos de cumprimento dos limites de retração especificados. Neste estudo não se fazem considerações sobre a influência desta opção, mas tendo em consideração o uso de expansivos, se as medições em argamassas e betões tivessem sido iniciadas antes das 24 horas, o valor da retração final teria sido, muito provavelmente, inferior ao medido.

Analisando os resultados dos ensaios de retração de argamassas, apresentados na Figura 2 e na Figura 3, constata-se que todas as argamassas apresentam, em geral, uma fase de expansão seguida de uma fase de retração. As linhas de variação da deformação não se apresentam com curvaturas tão suaves como as observadas nas pastas, dado que nas argamassas as leituras são manuais, envolvendo uma maior incerteza nos valores. As medições em pastas foram efetuadas de forma automática no período inicial em que ocorre maior variação da deformação. Note-se, também, que a escala do eixo das extensões nos gráficos das argamassas, relativamente ao eixo no gráfico das pastas, favorece a observação de pequenas variações entre medições.

A transição entre a fase de expansão e a fase de retração não é tão óbvia nos gráficos das argamassas, dada a menor frequência de leituras e a maior incerteza a elas associada, no entanto, pode encontrar-se um intervalo de tempo para o instante em que esta ocorrerá. Deste modo, de forma relativa, é possível identificar diferenças no comportamento das argamassas, quer na taxa de expansão como no instante em que ocorre a transição entre expansão e a retração, bem como na taxa de retração subsequente.

Desde logo se observa que o perfil de deformações é idêntico entre os provetes selados e os provetes livres, mostrando que o efeito da secagem não é predominante no tipo de comportamento. No entanto, a exposição à secagem tem os seguintes efeitos: reduz a amplitude da expansão; antecipa o instante em que ocorre a transição entre a expansão e a retração; aumenta a taxa de retração após essa transição. Estes efeitos são facilmente compreensíveis atendendo à conhecida influência da água no interior da estrutura porosa. Em provetes sujeitos à secagem ocorrem fenómenos semelhantes aos que se desenrolam nos provetes selados, mas com predominância dos associados a redução do teor de água, que têm um efeito de contração no sólido associado a tensões de compressão na fase sólida. Esta maior predominância da componente relativa à redução de volume, face à componente de expansão (associada à ação do expansivo), traduz-se nas variações observadas entre os provetes selados e os provetes livres.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados de retração autogénea, obtidos em pastas e em argamassas, considerando 24 horas como tempo zero, ou seja, deformação nula a 1 dia de idade. As linhas interrompidas correspondem a pastas e as linhas contínuas a argamassas. Observa-se claramente que a retração em argamassas é muito inferior à retração das pastas, devido à influência da areia na restrição à deformação da pasta.

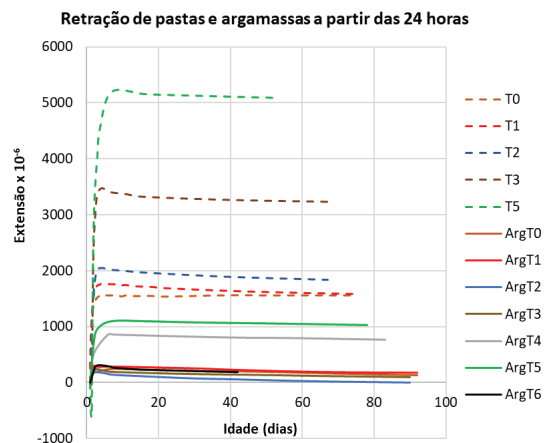


Figura 5 Resultados do ensaio de retração autogénea em pastas e em argamassas

Na Figura 6 agrupam-se as pastas e as argamassas com o mesmo número, em gráficos com escalas logarítmicas, de modo a observar a influência relativa da presença de areia. Cada curva representa o valor médio dos dois provetes usados em cada caso. Constatase que a partir dos dois dias de idade, correspondente à segunda leitura e que permite obter a primeira variação de dimensões nas argamassas, a areia faz diminuir a retração em valores próximos de uma ordem de grandeza, mantendo-se o comportamento relativo semelhante nos vários casos. Excetua-se o caso da pasta T2 e da argamassa ArgT2, em que se observa um declive acentuado nas idades próximas dos 90 dias na argamassa, o que não ocorre na pasta. No entanto, este caso particular deve-se principalmente a redução dos valores abaixo de 100 µm na argamassa e ao efeito de escala do gráfico, e não a um comportamento particular, como se pode verificar na Figura 5.

Esta comparação entre pastas e argamassas permite evidenciar que quando se inicia as leituras às 24 horas e se prossegue com uma frequência de medição de 1 dia, se perde informação importante sobre a evolução da retração autogénea nos primeiros dois dias de idade.

Analisando agora a retração dos betões, Figura 4, constata-se que o perfil de deformações não é semelhante ao observado nas pastas ou nas argamassas.

Na Figura 7 apresentam-se os resultados de retração de argamassas e de betões conservados a 50% HR, considerando 24 horas como tempo zero, ou seja, deformação nula a 1 dia de idade. As linhas interrompidas correspondem a argamassas e as linhas contínuas a betões. Observa-se também que a retração em betões é inferior à das argamassas, devido à influência dos agregados grossos na restrição à deformação da argamassa, e à menor velocidade de evaporação da água, dado que a relação superfície/volume é muito inferior nos provetes de betão. Para condições de ausência de trocas de humidade, a diferença entre a deformação de betões e a deformação de argamassas não é tão marcada como a respetiva diferença entre argamassas e pastas, dado que, para além de considerações de volume relativo, a argamassa tem maior rigidez do que a pasta. Dado que em ambos os materiais, argamassas e

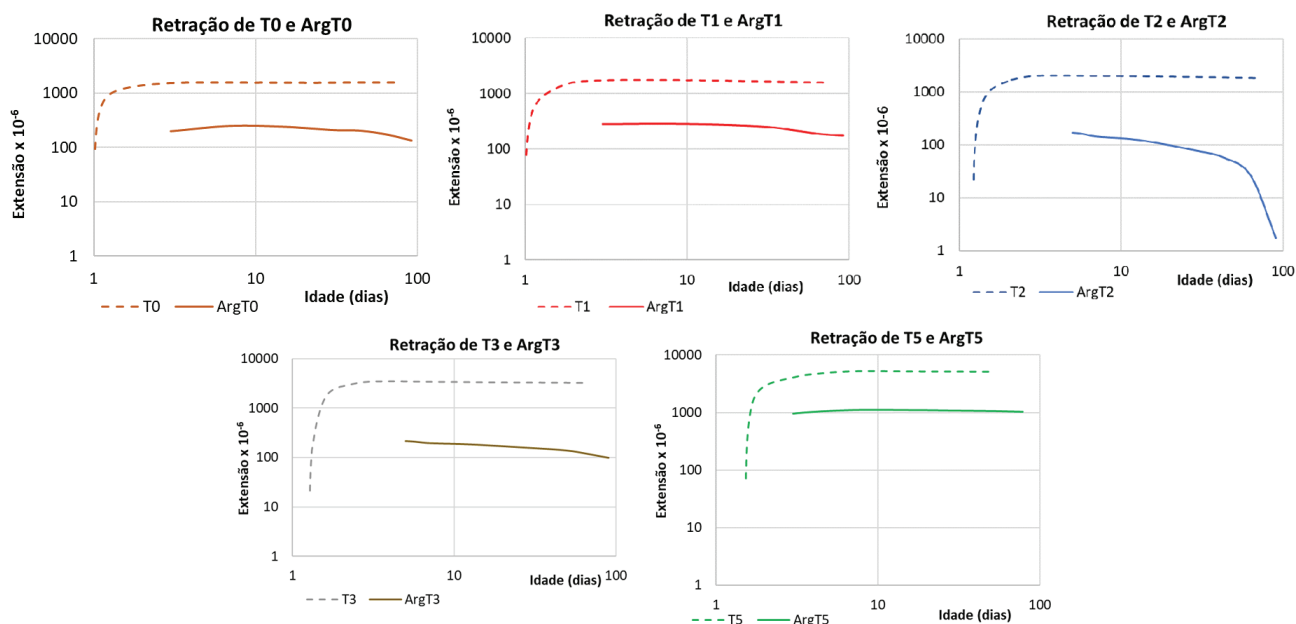


Figura 6 Comparação entre a retração autogénea de pastas e argamassas

betões, se iniciaram as leituras à mesma idade, e que o intervalo entre medições foi semelhante, a análise da presença de agregados grossos e do efeito da secagem pode ser feita individualmente para materiais com o mesmo número.

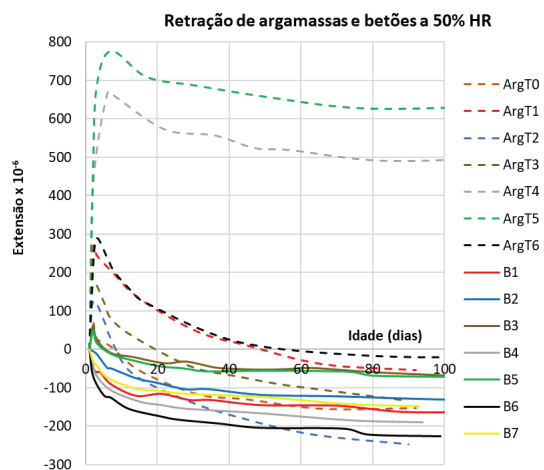


Figura 7 Resultados do ensaio de retração de argamassas e de betões conservados a 50% HR

Na Figura 8 pode observar-se que nas primeiras idades todas as argamassas apresentam uma fase inicial de expansão, fenómeno que só ocorre em dois betões, os betões B3 e B5, e com uma amplitude de expansão inferior. Os restantes cinco betões, incluindo o B7 mostrado apenas na Figura 7, não apresentam essa fase de expansão, apresentando apenas uma única fase de retração. Nesta fase de retração, incluindo agora os betões B3 e B5, o comportamento relativo entre os 7 betões apresenta semelhanças, com amplitudes

de deformação bem inferiores às das argamassas. Destacam-se, porém, dois betões, o betão B4 e o betão B6, que apresentam uma taxa de variação da retração com a idade mais acentuada.

Analisa-se, seguidamente, uma interpretação para cada um destes fenómenos.

A redução da amplitude da deformação dos vários betões relativamente à deformação das argamassas, na fase de expansão e na fase de retração, deve-se essencialmente à maior rigidez do corpo sólido, uma vez que, os módulos de elasticidade das rochas, de onde foram provenientes os agregados grossos, são superiores aos módulos de elasticidade das pastas.

A anulação, ou redução da amplitude, da fase de expansão nos betões, relativamente às argamassas, pode estar relacionada com a competição entre dois eventos que estão a ocorrer simultaneamente no betão, de efeito contrário no que respeita à deformação: a retração por evaporação e consumo de água na hidratação; e a expansão por hidratação do expansivo. Se ambos os eventos tivessem igual peso nas argamassas e nos betões, o perfil de variação da deformação nos betões deveria seguir o das argamassas, a menos de um fator de escala por efeito da maior rigidez. Os resultados vão, porém, no sentido de que o evento expansivo perde relevância para o evento de retração. Para tal podem estar a contribuir pelo menos dois fenómenos: a competição pela água livre entre as superfícies sólidas das partículas de agregado grosso e o expansivo, reduzindo no betão a água disponível para a hidratação do expansivo; o incremento da rigidez da estrutura porosa na argamassa do betão, para igual grau de hidratação, pelo efeito de confinamento e de fronteira associados à presença de agregados grossos. Neste enquadramento, na fase inicial de expansão, o efeito do expansivo vem reduzido por menor volume de produtos de hidratação e maior rigidez a limitar o seu efeito na deformação. No que respeita ao evento retração nesta

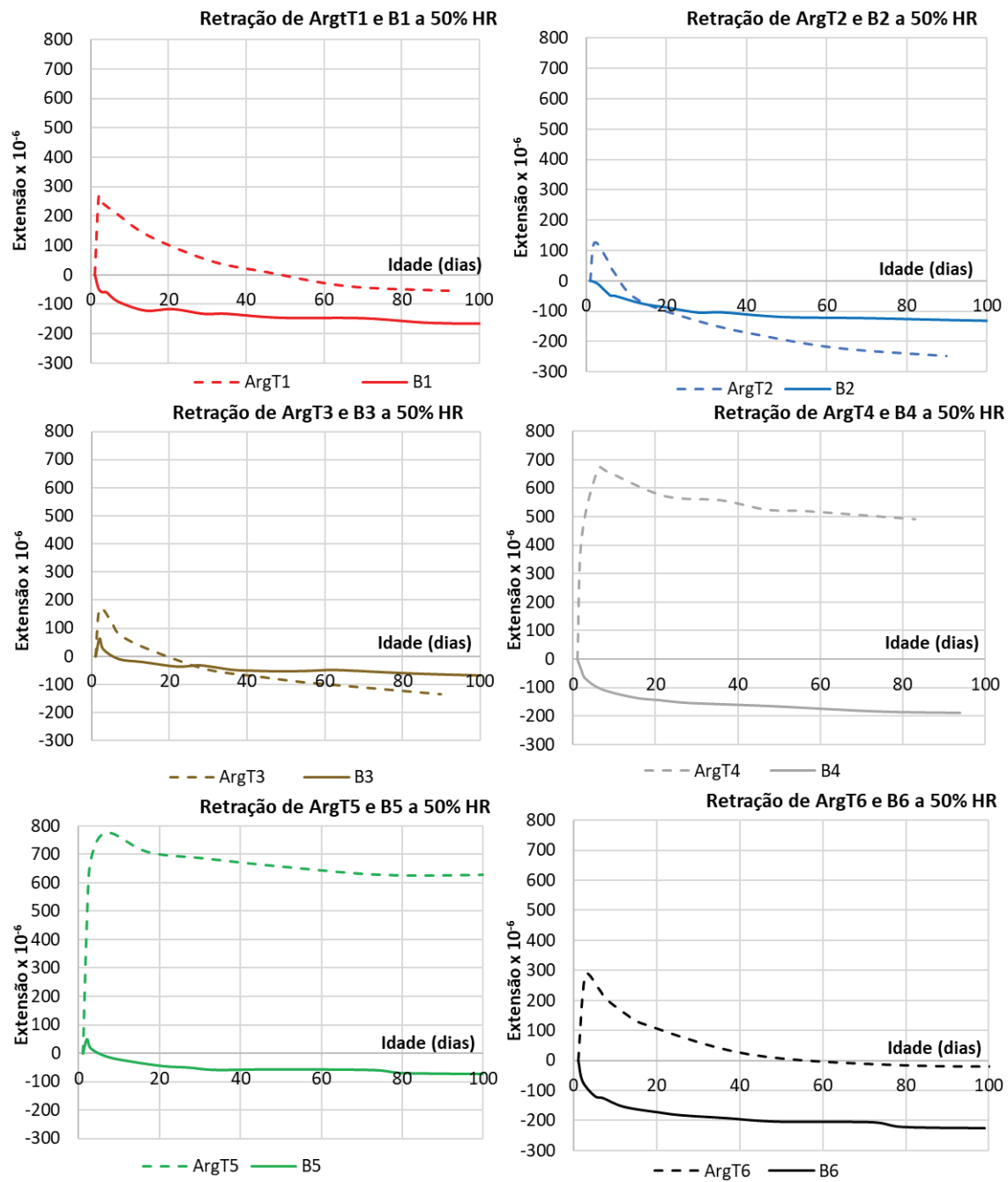


Figura 8 Comparação entre a retração de argamassas e betões conservados a 50% HR

fase inicial, ao incremento da rigidez pode estar associada uma componente de refinamento da estrutura porosa, por migração da água para locais de adsorção nos agregados grossos, implicando um aumento de tensões de compressão na estrutura porosa traduzindo-se, portanto, numa componente de retração mais elevada. Estas são, porém, hipóteses que não são passíveis de validação apenas com os elementos disponíveis.

A somar aos eventuais dois eventos atrás indicados deve ainda considerar-se o efeito da variação de temperatura do betão que ocorre entre o instante a medição efetuada às 24 horas e o instante da medição às 48 horas. A temperatura dos provetes de argamassa no estado fresco era próxima de 20 °C e o efeito da hidratação na variação de temperatura é desprezável, devido à pequena dimensão dos provetes, com secção transversal de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, que permite rápida dissipação do calor. Nos betões, a temperatura no estado fresco foi superior, Quadro 8, e a inércia térmica é muito mais elevada, nomeadamente devido à dimensão da secção transversal, $20 \times 20 \text{ cm}^2$, correspondente a uma razão perímetro/área cinco vezes inferior. Deste modo, nas primeiras idades dos betões, ao efeito da retração soma-se a contração térmica associada à estabilização para os 20 °C ambiente, anulando parte do efeito do expansivo. Esta interpretação sobre o diferente comportamento dos betões relativamente às argamassas, na fase inicial, é coerente com a evolução da resistência à compressão nas primeiras idades, Quadro 9, onde se observa que, entre os betões B1 e B6, os que apresentam resistência mais baixa a 1 dia de idade, e inerentemente um menor grau de hidratação, são precisamente os betões B3 e B5, aqueles que exibiram expansão inicial. Nos restantes, o efeito cumulativo da retração com a contração térmica permitiu anular a componente expansiva.

No que respeita à fase de retração que todos os betões exibem, onde o efeito de secagem assume preponderância, observa-se uma maior amplitude e um declive mais acentuado nas curvas dos betões B4 e B6, relativamente aos restantes. No betão B6 destaca-se um fator importante para a maior retração, que é a utilização de apenas um adjuvante redutor de retração, relativamente ao que ocorre nos outros seis betões, onde se utilizaram dois produtos deste tipo. O possível benefício de dois adjuvantes redutores de retração foi já evidenciado noutro estudo [7], o qual foi associado ao efeito adicional na redução da tensão superficial do líquido dos poros capilares na estrutura porosa. Esta redução na tensão capilar diminui a compressão no sólido e assim a amplitude da deformação. Pelo contrário, com menor redução da tensão capilar, aumenta a deformação, estando esse efeito a ser evidenciado no betão B6. Já no betão B4 a maior deformação estará relacionada com o tipo de agregados grossos utilizados, produzidos a partir de rocha menos densa e mais deformável que os agregados grossos usados nos outros betões. Apesar de não terem sido efetuadas medições sobre a superfície dos agregados grossos, como os agregados graníticos, em geral, apresentam uma superfície mais irregular que os agregados calcários, a sua eventual maior área superficial pode também favorecer o aumento da retração, por efeito da adsorção de água. Assim, os resultados sugerem que para a influência do tipo de rocha na retração contribuirá não só a sua rigidez, mas também o tipo de partículas que a sua britagem produz.

Observando os valores de todos os betões, na sua globalidade, Figura 4, constata-se que, à exceção do B6, estes apresentam uma retração inferior a 150 μm aos 28 dias, cumprindo o limite especificado para esta idade. Aos 90 dias constata-se também que o limite de 200 μm só não é satisfeito pelo betão B6. No entanto, quer aos 28 dias como aos 90 dias, o betão B4 apresenta retrações na fronteira dos respetivos limites. Os betões B3 e B5 apresentam retrações muito inferiores a 150 e a 200 μm , respetivamente para os 28 e os 90 dias, e que os betões B2 e B7 cumprem também esses limites de retração, embora com menores margens, providenciando assim 4 soluções para atingir o especificado em projeto.

5 Conclusões

Neste estudo foi analisada a influência de constituintes do betão na sua retração, com o objetivo de formular misturas com retração controlada. O estudo realizado evidenciou a importância da utilização de expansivos e de redutores da retração na composição do betão, bem como do conhecimento dos parâmetros que podem intervir na sua ação. O método utilizado para controlo da retração, com avaliação da influência relativa das diferentes fases, permitiu atingir formulações que simultaneamente permitem cumprir os requisitos de resistência e de retração, que no presente caso foram de 150 μm e 200 μm , respetivamente para os 28 e os 90 dias de idade, em betões das classes de resistência C35/45 e C40/50. No entanto, o uso de elevado número de adjuvantes é suscetível de exigir alterações na central de betão.

Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas Ibero – Indústria de Betão, S.A. e Unibetão Indústrias de Betão Preparado S.A a permissão para utilização dos dados e dos resultados apresentados para a elaboração do presente trabalho.

Referências

- [1] ISRM-1979 – Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, International Society for Rock Mechanics
- [2] E 476-2007 – Pastas de cimento, Determinação da retracção autógena, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2007,
- [3] NP EN 196-1:2017 – Métodos de ensaios de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, Instituto Português da Qualidade, 2017
- [4] NP EN 12350-2:2009 – Ensaios do betão fresco – Parte 2: Ensaio de abaixamento, Instituto Português da Qualidade, 2009,
- [5] NP EN 12390-3:2021 – Ensaios do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão de provetes, Instituto Português da Qualidade, 2021
- [6] E 398-1993 – Betões – determinação da retração e da expansão, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993,
- [7] Bettencourt Ribeiro, A.; Carrajola, A.; Gonçalves, A.; Branco, F. – Effect of the synergy of two shrinkage reducing admixtures. International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Proceedings PRO 52, Lyngby, 20-23 August 2006, 223-230.