



EFEITO DO AGREGADO NA DIMINUIÇÃO DA RETRACÇÃO DE ARGAMASSAS

Júlia Jiménez de Oliveira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil



Orientador: Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

Outubro de 2010



EFEITO DO AGREGADO NA DIMINUIÇÃO DA RETRACÇÃO DE ARGAMASSAS



Autora: Júlia Jiménez de Oliveira

174 686

Orientador: Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

AGRADECIMENTOS

A autora deseja agradecer a todos os que de alguma forma colaboraram e auxiliaram na elaboração da presente dissertação, em particular:

- ✦ Ao Engenheiro António Bettencourt Ribeiro pelos conhecimentos transmitidos e pela disponibilidade e atenção que sempre demonstrou, tornando possível a concretização desta dissertação;
 - ✦ À instituição LNEC por ter facultado as instalações e materiais indispensáveis à elaboração dos ensaios;
 - ✦ Ao Sr. João Balsinha, Pedro Amaral, Gil Rosa e Sr. Ferreira por todo o auxílio, voluntariedade e simpatia que demonstraram ao longo deste trabalho;
 - ✦ À empresa Barrabrita e António Pedro Pestana da empresa Ibera por terem fornecido material para a realização deste trabalho;
 - ✦ À minha Madrinha Delfina Oliveira pela sua amizade e por me ter acolhido em sua casa com carinho;
 - ✦ À Sandra Freixa e Paulo Alves pela sua compreensão e disponibilidade que sempre me ofereceram e por estarem a ajudar-me a crescer profissionalmente;
 - ✦ À Mafalda Vinagre, pela sua enorme ajuda durante a realização deste trabalho, revelando ser uma verdadeira amiga;
 - ✦ À Maria Costa pela sua força e motivação;
 - ✦ À minha irmã e Lola, que apesar de estarem longe estiveram sempre presentes ao longo destes meses, transmitindo sempre força e alento. Obrigado Laura pelo teu apoio absoluto;
 - ✦ Ao meu namorado Nuno Marcelo pela sua força, paciência, ânimo e sobretudo pelo apoio incondicional que me transmitiu não só nesta fase mas sim durante todo o percurso universitário;
 - ✦ O maior agradecimento vai para as pessoas a quem devo tudo e que tudo fazem pela minha formação pessoal e académica, aos meus Pais Zé Quim e Narcis;
 - ✦ Por último a todos aqueles a quem não dediquei o tempo e atenção devidas e que apesar disso continuam a apoiar-me e a demonstrar a sua amizade.
-

RESUMO

EFEITO DO AGREGADO NA DIMINUIÇÃO DA RETRACÇÃO DE ARGAMASSAS

Na actualidade, face ao desenvolvimento de betões de alto desempenho caracterizados por apresentarem muito baixa razão água cimento (A/C), tornou-se pertinente o estudo da retracção autogénea, por motivos relacionados com a resistência, durabilidade e estética destes materiais.

Nesta dissertação foi elaborado um estudo prático com o intuito de avaliar o impacto da adição de agregado na redução da retracção autogénea, em seis misturas cimentícias. Através de ensaios foram obtidos valores reais de retracção autogénea, sendo estes posteriormente comparados com os valores obtidos teoricamente com recurso ao modelo proposto por Hobbs na década de 70.

Tendo em consideração os valores teóricos e sua comparação com os valores reais obtidos nos ensaios é proposta uma alteração ao modelo teórico, que tem em conta a maior resistência à compressão dos betões actuais. Esta modificação permitiu estimar com maior exactidão os valores de retracção autogénea nas diferentes misturas.

Palavras-chave: Retracção autogénea; Controlo de retracção; Influência do agregado; Rigidez do agregado.

ABSTRACT

EFFECT OF AGGREGATE ON SHRINKAGE REDUCTION OF MORTAR

Nowadays the development of high performance concretes characterized by a low water-to-cement ratio (W / C), it became relevant to study the autogenous shrinkage, for reasons relating to the strength, durability and aesthetics of these materials.

In this study the effect of adding aggregate in six cementitious mixtures was evaluated. The results obtained in the experimental test were compared with theoretical values from a model propose by Hobbs in the 70's for autogenous shrinkage.

Given the theoretical values and its comparison with the actual values obtained in the tests an amendment is proposed to the theoretical model that takes into account the higher compressive strength of actual concrete. This modification allowed us to estimate accurately the values of autogenous shrinkage in the different mixtures.

Keywords: Autogenous shrinkage; Shrinkage control; Influence of aggregate; Stiffness of the aggregate.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objectivos da dissertação	2
1.3 Organização da dissertação.....	3
2. SELECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	4
2.1. Agregado	4
2.1.1. Granulometria	5
2.1.2. Absorção.....	9
2.1.3. Módulo de elasticidade da rocha do agregado britado	12
2.2. Cimento.....	14
2.3. Adjuvante	15
2.4. Água.....	16
2.5. Dosagens.....	16
3. MÉTODOS DE ENSAIO.....	20
3.1. Preparação dos provetes	20
3.1.1. Processo de amassadura.....	20
3.1.2. Ensaio de espalhamento	22
3.1.3. Moldagem dos provetes	22
3.1.4. Desmoldagem e conservação dos provetes.....	25
3.2. Resistências mecânicas.....	25
3.2.1. Resistência à flexão	26
3.2.1.1. <i>Equipamento de ensaio na determinação da resistência à flexão.</i>	26
3.2.1.2. <i>Procedimento de ensaio.</i>	26
3.2.2. Resistência à compressão	28
3.2.2.1. <i>Equipamento de ensaio na determinação da resistência à compressão.</i> ..	28
3.2.2.2. <i>Procedimento de ensaio.</i>	28
3.3. Módulo de elasticidade.....	29
3.3.1. Equipamento	30
3.3.2. Procedimento de ensaio.....	31
3.4. Retracção autogénea.....	32
3.4.1. Equipamento.....	32
3.4.2. Procedimento de ensaio.....	33
4. RESULTADOS OBTIDOS	35
4.1. Espalhamento	36

4.2.	Resultados obtidos na pasta de referência (REF)	38
4.3.	Resultados obtidos na argamassa com agregado britado (BRI).....	40
4.4.	Resultados obtidos na argamassa com agregado natural (NAT).....	45
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	51
5.1.	Calculo dos valores teóricos de retracção autogénea das misturas cimentícias....	59
5.3.1.	Pasta de referência (REF) e misturas com agregado britado (BRI)	60
5.3.2.	Pasta de referência (REF) e argamassas com agregado natural (NAT).....	69
6.	CONCLUSÃO.....	76
7.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	77
	BIBLIOGRAFIA	77
	ANEXOS	79
	ANEXO I – Análise granulométrica do agregado britado.....	80
	ANEXO II – Análise granulométrica do agregado natural.....	81
	ANEXO III – Determinação da absorção e massa volúmica do agregado britado.	82
	ANEXO IV – Determinação da absorção e massa volúmica do agregado natural.....	83
	ANEXO V – Resultados obtidos do ensaio de resistência mecânica à flexão.	84
	ANEXO VI – Resultados obtidos do ensaio de resistência mecânica à compressão.....	87
	ANEXO VII – Resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade.....	90
	ANEXO VIII – Medição da massa e da retracção autogénea dos provetes.....	92
	ANEXO IX – Média final de retracção autogénea das misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2, BRI 3, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.....	113
	ANEXO X – Variação da massa dos provetes.	116
	ANEXO XI – Dados relativos ao cálculo dos valores teóricos da retracção autogénea da pasta de referência e das argamassas com agregado britado.	117
	ANEXO XII – Valores teóricos da retracção autogénea da pasta de referência e das misturas com agregado britado, através do modelo de cálculo proposto por Hobbs (Eq. 5, 6 e 7).	119
	ANEXO XIII – Valores teóricos de retracção autogénea da pasta de referência e das misturas com agregado britado através da introdução do factor correctivo no modelo de cálculo proposto por Hobbs (Eq. 11).....	120
	ANEXO XIV – Dados relativos ao cálculo dos valores teóricos da retracção autogénea da pasta de referência e das argamassas com agregado natural.	121
	ANEXO XV – Valores teóricos da retracção autogénea da pasta de referência e das misturas com agregado natural, através do modelo de cálculo proposto por Hobbs (Eq. 7).	123
	ANEXO XVI – Valores teóricos de retracção autogénea da pasta de referência e das misturas com agregado britado através da introdução do factor correctivo no modelo de cálculo proposto por Hobbs (Eq. 11).....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamento utilizado no ensaio de “Los Angeles”	5
Figura 2 – Granulometria do agregado britado	6
Figura 3 – Granulometria do agregado natural	7
Figura 4 – Granulometria final dos agregados britado e natural.....	9
Figura 5 - Molde de aço troncocónico, sem fundo	10
Figura 6 – Moldagem obtida da areia natural.....	11
Figura 7 – Moldagem obtida da areia britada.....	11
Figura 8 - Provetes da rocha do agregado britado.....	12
Figura 9 - Realização do ensaio de módulo de elasticidade da rocha do agregado britado. 13	
Figura 10 - Misturador utilizado na preparação de argamassas.....	21
Figura 11 - Ensaio de espalhamento	22
Figura 12 - Molde para provetes da retracção autogénea.....	23
Figura 13 - Molde para provetes de ensaio de resistência.....	23
Figura 14 - Mesa de vibração	24
Figura 15 - Câmara húmida destinada à conservação dos provetes	24
Figura 16 - Início do ensaio de resistência à flexão	26
Figura 17 - Rotura do provete no ensaio de resistência à flexão	27
Figura 18 - Início do ensaio de resistência à compressão.....	28
Figura 19 - Rotura do provete no ensaio de resistência à flexão	29
Figura 20 - Máquina utilizada no ensaio do módulo de elasticidade	30
Figura 21 – Aparelho de medida para o ensaio de módulo de elasticidade	31
Figura 22 - Equipamento utilizado para medição da retracção autogénea.....	33
Figura 23 - Resultado do ensaio de espalhamento de uma argamassa líquida	37
Figura 24 - Resultado do ensaio de espalhamento de uma argamassa consistente.....	38
Figura 25 Resistência à compressão da pasta de referência (REF)	38
Figura 26 - Módulo de elasticidade médio da pasta de referência (REF).....	39
Figura 27 - Retracção autogénea dos provetes da pasta de referência (REF).....	39
Figura 28 - Resistência à compressão da argamassa BRI 1	40
Figura 29 - Módulo de elasticidade médio da argamassa BRI 1	41
Figura 30 – Retracção autogénea dos provetes da argamassa BRI 1.....	41
Figura 31 - Resistência à compressão da argamassa BRI 2	42
Figura 32 - Módulo de elasticidade médio da argamassa BRI 2	42
Figura 33 - Retracção autogénea dos provetes da argamassa BRI 2.....	43
Figura 34 - Resistência à compressão da argamassa BRI 3	43
Figura 35 - Módulo de elasticidade médio da argamassa BRI 3	44

Figura 36 - Retracção autógena dos provetes da argamassa BRI 3.....	44
Figura 37 - Resistência à compressão da argamassa NAT 1.....	45
Figura 38 - Módulo de elasticidade médio da argamassa NAT 1.....	46
Figura 39 - Retracção autógena dos provetes da argamassa NAT 1.....	46
Figura 40 - Resistência à compressão da argamassa NAT 2.....	47
Figura 41 - Módulo de elasticidade médio da argamassa NAT 2.....	47
Figura 42 - Retracção autógena da dos provetes da argamassa NAT 2.....	48
Figura 43 - Resistência à compressão da argamassa NAT 3.....	48
Figura 44 - Módulo de elasticidade médio da argamassa NAT 3.....	49
Figura 45 - Retracção autógena dos provetes da argamassa NAT 3.....	49
Figura 46 - Retracção autógena das misturas REF, BRI 1, BRI 2, BRI 3, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.....	51
Figura 47 - Comparação dos valores do ensaio de retracção autógena das misturas BRI 1, BRI 2 e BRI 3.....	52
Figura 48 - Comparação dos valores do ensaio de retracção autógena das misturas NAT 1, NAT 2 e NAT 3.....	53
Figura 49 - Comparação dos valores do ensaio de retracção autógena das misturas BRI 1, NAT 1.....	54
Figura 50 - Comparação dos valores do ensaio de retracção autógena das misturas BRI 2, NAT 2.....	54
Figura 51 - Comparação dos valores do ensaio de retracção autógena das misturas BRI 3, NAT 3.....	55
Figura 52 - Módulo de elasticidade das misturas REF, BRI 1, BRI 2, BRI 3, NAT 1, NAT 2 e NAT3.....	56
Figura 53 - Comparação dos valores do ensaio de módulo de elasticidade das misturas BRI 1, NAT 1.....	57
Figura 54 - Comparação dos valores do ensaio de módulo de elasticidade das misturas BRI 2, NAT 2.....	57
Figura 55 - Comparação dos valores do ensaio de módulo de elasticidade das misturas BRI 3, NAT 3.....	58
Figura 56 - Valores teóricos obtidos pelas equações 5, 6 e 7 e os valores reais, para 1 dia de idade.....	61
Figura 57 – Valores teóricos obtidos pelas equações 5, 6 e 7 e os valores reais, para 3 dia de idade.....	62
Figura 58 – Valores teóricos obtidos pelas equações 5, 6 e 7 e os valores reais, para 28 dia de idade.....	62

Figura 59 – Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 1.....	63
Figura 60 – Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 3.....	64
Figura 61 – Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 28.....	64
Figura 62 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e valores reais de retracção autogénea das misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 1 de idade.	66
Figura 63 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e valores reais de retracção autogénea das misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 3 de idade.	66
Figura 64 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e valores reais de retracção autogénea das misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 28 de idade.	67
Figura 65 - Relação entre os valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7 e valores reais, para as misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3.	68
Figura 66 – Relação entre os valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e valores reais, para as misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3.	68
Figura 67 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 1.	70
Figura 68 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 3.	70
Figura 69 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 28.	71
Figura 70 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 11 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 1.	72
Figura 71 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 11 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 3.	72
Figura 72 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 11 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 28.	73
Figura 73 – Relação entre os valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7 e reais das misturas cimentícias REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.	74
Figura 74 – Relação entre os valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e reais das misturas cimentícias REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.	74

ÍNDICE QUADROS

Quadro 1 - Quantidades de cada fracção do agregado britado.	7
Quadro 2 – Granulometria idêntica para areia britada e natural.	8
Quadro 3 - Módulo de elasticidade da rocha do agregado britado.	13
Quadro 4 - Propriedades químicas e físicas do cimento CEM II – A/L 42,5R.	15
Quadro 5 - Composições de cada mistura cimentícia (traço em massa).	17
Quadro 6 - Dosagens das misturas cimentícias, para 3,5 litros de argamassa.	17
Quadro 7 – Massas volúmicas reais.	18
Quadro 8 – Volume de cada amassadura (litros) do cimento, agregado britado, agregado natural, adjuvante e água.	18
Quadro 9 – Peso por m ³ dos constituintes de cada mistura.	19
Quadro 10 - Designação dos provetes usados nos ensaios realizados.	36
Quadro 11 - Resultado do ensaio de espalhamento efectuado na preparação das argamassas.	37
Quadro 12 – Granulometria do agregado britado.	80
Quadro 13 - Granulometria do agregado natural.	81
Quadro 14 - Resistência à flexão dos provetes da pasta de referência - REF.	84
Quadro 15 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado britado – BRI 1. .	84
Quadro 16 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado britado – BRI 2. .	84
Quadro 17 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado britado – BRI 3. .	85
Quadro 18 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado natural – NAT 1. .	85
Quadro 19 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado natural – NAT 2. .	85
Quadro 20 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado natural – NAT 3. .	86
Quadro 21 - Resistência à compressão dos provetes da pasta de referência REF.	87
Quadro 22 - Resistência à compressão dos provetes da mistura BRI 1.	87
Quadro 23 - Resistência à compressão dos provetes da mistura BRI 2.	87
Quadro 24 - Resistência à compressão dos provetes da mistura BRI 3.	88
Quadro 25 - Resistência à compressão dos provetes da mistura NAT 1.	88
Quadro 26 - Resistência à compressão dos provetes da mistura NAT 2.	88
Quadro 27 - Resistência à compressão dos provetes da mistura NAT 3.	89
Quadro 28 - Módulo de elasticidade dos provetes da pasta de referência REF.	90
Quadro 29 - Módulo de elasticidade dos provetes da mistura BRI 1.	90
Quadro 30 - Módulo de elasticidade dos provetes da mistura BRI 2.	90
Quadro 31 - Módulo de elasticidade dos provetes da mistura BRI 3.	91
Quadro 32 - Módulo de elasticidade dos provetes da mistura NAT 1.	91
Quadro 33 – Módulo de elasticidade dos provetes da mistura NAT 2.	91

Quadro 34 – Módulo de elasticidade dos provetes da mistura NAT 3.....	91
Quadro 35 – Leitura da massa e da retracção autogénea do provete REF 1.....	92
Quadro 36 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete REF 2.	93
Quadro 37 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete REF 3.	94
Quadro 38 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 1-1.	95
Quadro 39 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 1-2.	96
Quadro 40 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 1-3.	97
Quadro 41 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 2-1.	98
Quadro 42 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 2-2.	99
Quadro 43 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 2-3.	100
Quadro 44 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 3-1.	101
Quadro 45 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 3-2.	102
Quadro 46 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 3-3.	103
Quadro 47 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 1-1.	104
Quadro 48 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 1-2.	105
Quadro 49 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 1-3.	106
Quadro 50 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 2-1.	107
Quadro 51 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 2-2.	108
Quadro 52 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 2-3.	109
Quadro 53 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 3-1.	110
Quadro 54 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 3-2.	111
Quadro 55 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 3-3.	112
Quadro 56 - Média final de retracção autogénea da pasta de referência REF.....	113
Quadro 57 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia BRI 1.....	113
Quadro 58 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia BRI 2.....	113
Quadro 59 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia BRI 3.....	114
Quadro 60 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia NAT 1.....	114
Quadro 61 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia NAT 2.....	114
Quadro 62 – Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia NAT 3.....	115
Quadro 63 - Registo da variação de massa de cada provete entre os dias 1 e 28 de idade.	116
Quadro 64 – Massa volúmica em kg/m ³ dos constituintes das misturas cimentícias.	117
Quadro 65 – Concentração de volume em % dos constituintes das misturas cimentícias.	117
Quadro 66 – Módulo de elasticidade da pasta de referência e respectivo módulo volumétrico de elasticidade.	118
Quadro 67 – Módulo de elasticidade do agregado britado e respectivo módulo volumétrico de elasticidade.	118

Quadro 68 – Valores Reais da retracção autogénea obtidos através de ensaio, das misturas BRI 1, BRI 2 e BRI 3.....	118
Quadro 69 – Valores teóricos obtidos através da aplicação das equações 5, 6 e 7, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 1 de idade.	119
Quadro 70 – Valores teóricos obtidos através da aplicação das equações 5, 6 e 7, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 3 de idade.	119
Quadro 71 – Valores teóricos obtidos através da aplicação das equações 5, 6 e 7, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 28 de idade.	119
Quadro 72 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, BRI 1, BRI 2, BRI 3, para o dia 1 de idade.	120
Quadro 73 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 3 de idade.	120
Quadro 74 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 28 de idade.....	120
Quadro 75 – Massa volúmica em kg/m^3 dos constituintes das misturas cimentícias.	121
Quadro 76 – Concentração de volume em % dos constituintes das misturas cimentícias.	121
Quadro 77 - Módulo de elasticidade da pasta de referência e respectivo módulo volumétrico de elasticidade.	122
Quadro 78 - Módulo de elasticidade do agregado natural e respectivo módulo volumétrico de elasticidade.	122
Quadro 79 - Valores Reais da retracção autogénea obtidos através de ensaio, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.....	122
Quadro 80 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 1 de idade.	123
Quadro 81 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 3 de idade.	123
Quadro 82 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 28 de idade.	123
Quadro 83 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 1 de idade.	124
Quadro 84 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 3 de idade.	124
Quadro 85 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 28 de idade.	124

NOTAÇÃO

R_f – Resistência à flexão (MPa);

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

F_f – Carga aplicada ao centro do prisma na rotura (N);

l – Distância entre os apoios (mm);

R_c – Resistência à compressão (MPa);

F_c – Carga máxima na rotura (N);

σ_a – tensão máxima aplicada (MPa);

σ_b – tensão inicial (MPa);

ε_{an} – extensão para a tensão σ_a medida no n-ésimo ciclo de carga;

ε_{bn} – extensão para a tensão σ_b medida no n-ésimo ciclo de carga;

ε – Extensão de retracção ($\mu\text{m}/\text{m}$);

d_{f1} – distância, em mm , entre os pontos de referência do provete no fim do período especificado (dias 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28 de idade);

d_{i1} – distância, em mm , entre os pontos de referência do provete no início do ensaio (18 horas);

d_{f2} – distância, em mm , entre os pontos de referência da barra padrão no fim do período especificado (dias 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28 de idade);

d_{i2} – distância, em mm , entre os pontos de referência da barra padrão no início do ensaio (18 horas);

ε_c – Retracção autogénea do betão;

ε_p – Retracção autogénea da pasta de referência;

V_a – Volume de concentração de agregado;

E_a – Módulo de elasticidade do agregado (GPa);

E_p – Módulo de elasticidade da pasta de referência (GPa);

K_a – Módulo volumétrico de elasticidade do agregado (GPa);

K_p – Módulo volumétrico de elasticidade da pasta de referência (GPa);

μ - Coeficiente de Poisson;

V_c – Volume de concentração de cimento;

m_1 – Massa do provete com as partículas saturadas sem água superficial (g);

m_2 – Massa do balão com o provete e água (g);

m_3 – Massa do provete seco (g);

m_4 – Massa do balão com água (g).

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Com o desenvolvimento dos superplastificantes, os betões de alto desempenho são hoje em dia facilmente produzíveis. Estes betões são caracterizados por apresentarem baixa razão água/cimento (A/C), oferecendo melhores características relativamente aos betões mais antigos, tais como boa trabalhabilidade no estado fresco, melhores resistências mecânicas e maior durabilidade. Apesar deste facto surgiram problemas associados à sua aplicação, nomeadamente o aparecimento de fissuração. Este problema de fissuração tem origem muitas vezes no fenómeno designado por retracção. A fissuração constitui um sério problema em relação à resistência, durabilidade e aspectos estéticos do betão [1, 2 e 3].

O processo de retracção ocorre principalmente na pasta de cimento do betão. Pode-se considerar que o betão é constituído por duas fases, correspondendo uma à pasta de cimento e outra às partículas de agregado. Como a pasta de cimento é a principal responsável pela retracção do betão, a adição de agregados tenderá a reduzir este fenómeno e conseqüentemente a fissuração associada [4]. Esta redução obtida pela adição de agregado deve-se ao facto de a retracção da pasta de cimento ficar restringida, pois o agregado vai limitar as deformações associadas às tensões de compressão da pasta de cimento, que resultam da dessecação.

Existem já alguns estudos acerca da influência do agregado na redução da retracção de betões ou argamassas, no entanto trata-se de um tema ainda pouco aprofundado. Teoricamente, a restrição provocada pelo agregado na retracção está directamente relacionada com a concentração volumétrica, a rigidez, a natureza e a granulometria deste. De encontro a esta temática, foi realizado um trabalho experimental com o intuito de obter uma expressão que ilustre a dependência da retracção do betão em relação à influência do agregado.

Pretende-se nesta dissertação elaborar um estudo que permita avaliar o efeito de alguns dos parâmetros relativos ao agregado, anteriormente mencionados, na diminuição de retracção de misturas cimentícias. Após a realização do estudo experimental, os resultados obtidos são objecto de comparação com um modelo teórico, nomeadamente o modelo apresentado por Hobbs. Trata-se de um modelo de cálculo que permite determinar valores de retracção, tendo em conta o volume de agregado, o módulo de elasticidade do agregado e o módulo de elasticidade da pasta de cimento [4 e 5].

De forma a reduzir o número de variáveis em análise, para efeitos deste trabalho, é considerada apenas a retracção autogénea, uma vez que ao considerar a retracção total seria necessário ter em conta o efeito do agregado no processo de secagem. O modelo de cálculo apresentado por Hobbs é também relativo à retracção autogénea, pelo que é adequado para o fim em causa [4 e 5].

A retracção autogénea pode ser definida como a diminuição de volume macroscópica sem existirem trocas de humidade com o ambiente exterior. No processo de retracção autogénea não está incluída a variação de volume proveniente da perda ou ingresso de água, de variação de temperatura ou da aplicação de uma força externa [5]. Trata-se de um fenómeno que está descrito e registado desde há um século, mas apenas em anos recentes (anos 80) começou a ser objecto de uma maior atenção, devido à sua relação com a fissuração nos betões de alta resistência.

Então, conforme descrito pormenorizadamente nos pontos seguintes, este trabalho irá consistir em ensaios práticos de medição de retracção autogénea em argamassas com adição de dois tipos diferentes de agregado e posterior comparação dos resultados obtidos nestes ensaios com os dados pelo modelo de cálculo da retracção autogénea proposto por Hobbs.

1.2 Objectivos da dissertação

Enquadrada no mestrado de Engenharia Civil, ramo de construção, esta dissertação tem como objectivo avaliar o efeito do agregado na diminuição da retracção de argamassas.

De encontro ao objectivo proposto nesta dissertação, pretende-se efectuar um estudo prático no qual são elaboradas sete composições diferentes de argamassas e efectuados ensaios de retracção autogénea, de resistência mecânica à flexão e à compressão, e ensaio de módulo de elasticidade.

Após a realização do trabalho prático e com recurso ao modelo de cálculo proposto por Hobbs na década de 70 [4 e 5], esta dissertação tem como finalidade fazer uma análise comparativa entre resultados obtidos e os resultados teóricos, de modo a concluir sobre a aplicação deste modelo às misturas cimentícias actuais.

1.3 Organização da dissertação

Para dar cumprimento aos objectivos da dissertação, esta é organizada nos seguintes capítulos:

➤ *Capítulo I – Introdução*

No primeiro capítulo desta dissertação é efectuada uma abordagem inicial da problemática da retracção em misturas cimentícias, sendo apresentados também os objectivos deste trabalho.

➤ *Capítulo II – Selecção e caracterização dos materiais utilizados*

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na concepção de argamassas que foram estudadas. Para os materiais utilizados, designadamente os agregados britado e natural, o cimento, o adjuvante e a água, são apresentadas as suas características físicas e químicas, obtidas nalguns casos através de ensaios efectuados especificamente para este estudo, e noutros através de informações pela empresa que forneceu o material.

➤ *Capítulo III – Métodos de ensaio*

São apresentados neste capítulo os ensaios e os respectivos métodos que são utilizados neste trabalho experimental, tendo em conta as Normas e Especificações aplicáveis para cada ensaio.

➤ *Capítulo IV – Resultados obtidos*

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas argamassas em estudo, relativamente às propriedades indicadas no capítulo anterior

➤ *Capítulo V – Análise de resultados*

Após a apresentação dos resultados obtidos, é neste capítulo que é feita a análise dos mesmos. Neste capítulo também é apresentado o modelo de cálculo elaborado por Hobbs, sendo aplicado ao caso presente, com o intuito de determinar os valores teóricos da retracção autogénea para as argamassas em estudo. Posteriormente são comparados os resultados teóricos com os obtidos através de ensaio.

➤ *Capítulo VI – Conclusão*

➤ *Capítulo VII: Desenvolvimentos futuros*

2. SELECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

No âmbito desta dissertação e de encontro ao objectivo proposto, pretende-se neste capítulo efectuar uma análise dos materiais seleccionados para a composição das argamassas em estudo. Para tal, efectua-se uma caracterização, tendo em conta as propriedades físicas e químicas, dos seguintes materiais: agregado, cimento, adjuvante e água.

Após a caracterização dos materiais seleccionados, são determinados e apresentados no ponto 2.6 as respectivas dosagens para cada formulação de argamassa.

2.1. Agregado

No processo de avaliação do efeito do agregado na diminuição da retracção de argamassas foram utilizados dois tipos de agregado, designadamente agregado britado e agregado natural, com o objectivo de comparar o efeito que provocam a nível da retracção autogénea.

O agregado britado foi fornecido pela empresa Barrabrita. O material fornecido pela empresa foi pedra britada do tamanho bago de arroz, cuja origem é granítica.

Para se obter uma areia através da pedra britada fornecida, todo o material é britado através do equipamento usado no ensaio Los Angeles, tendo como base de referência a especificação: LNEC E 237-1970, Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles.

A máquina de Los Angeles é essencialmente constituída por um cilindro giratório de aço, oco e fechado em ambos os topos. A máquina dispõe de um motor que permite fazer girar o cilindro à velocidade de 30 a 33 r.p.m [10].

O equipamento utilizado para britar o material encontra-se ilustrado na figura 1.



Figura 1 – Equipamento utilizado no ensaio de “Los Angeles”.

No ensaio de Los Angeles a pedra britada sofre desgaste devido à acção de uma carga abrasiva. As cargas abrasivas utilizadas são esferas de ferro fundido, cada uma com uma massa entre 390 g e 445 g [10].

Na preparação da areia através do equipamento utilizado no ensaio de Los Angeles foram colocadas quantidades de 10 kg de pedra britada e de 30 kg em esferas de ferro fundido no tambor, durante 4 minutos aproximadamente. Depois de britar todo o material através do equipamento obtém-se uma areia com diferentes fracções.

O agregado natural utilizado foi proveniente de areia graduada existente no LNEC, de natureza siliciosa, que se encontrava dividida por fracções.

2.1.1. Granulometria

Para efectuar a análise granulométrica do agregado britado, obtido através do equipamento Los Angeles, e da areia natural, efectou-se o ensaio de análise granulométrica através de peneiração por via seca, segundo a norma NP EN 933-1: 2000 [11].

A dimensão das aberturas e o número de peneiros foram seleccionados de acordo com a natureza da amostra e a precisão exigida. As aberturas de malha dos peneiros utilizados para ensaio foram: 4,0; 2,8; 2,0; 1,6; 1,0; 0,5 e 0,150 mm.

Antes de proceder à análise granulométrica do agregado britado, toda a quantidade de agregado previamente moída foi homogeneizada, e depois esquetejada. Com este procedimento foi retirada uma amostra para efectuar a análise granulométrica.

Os resultados obtidos no ensaio de análise granulométrica do agregado britado encontram-se no Anexo I. Na figura 2, os resultados obtidos encontram-se ilustrados graficamente.

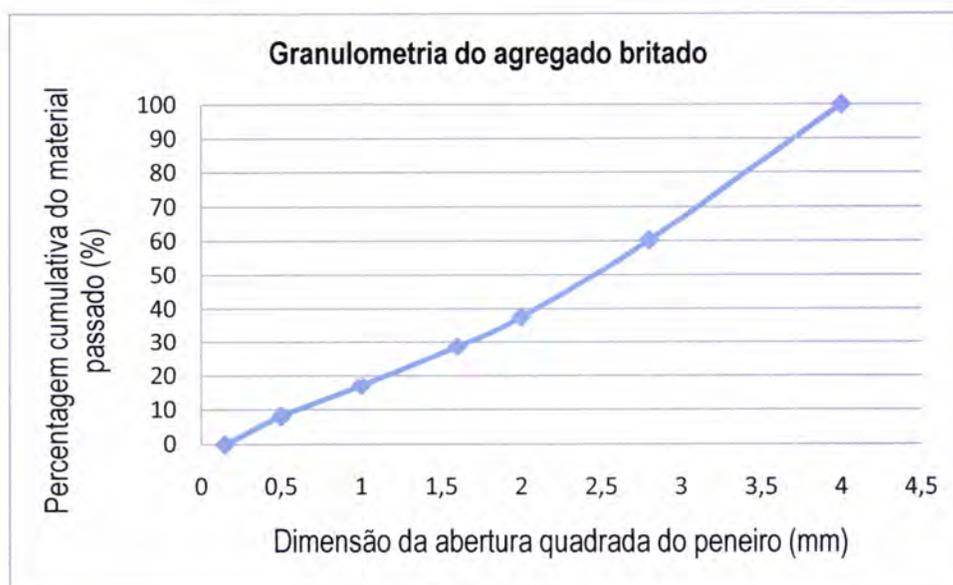


Figura 2 – Granulometria do agregado britado.

Por observação da figura, constatou-se que o agregado britado apresenta maior percentagem de agregado entre os peneiros 4,0 e 2,0 mm, do que abaixo de 2,0 mm. Com o objectivo de se obter uma areia com granulometria entre 2,8 e 0,15 mm, equivalente à que se dispunha em agregado natural, foi retirada toda a quantidade de areia que ficou retida no peneiro 4,0 mm e também todo o material que passa no peneiro 0,15 mm, através da peneiração por via húmida com recurso dos peneiros 4,0; 1,0 e 0,15 mm.

Após a britagem e separação, a quantidade de agregado britado existente em cada fracção foi determinada tendo em conta a sua análise granulométrica e a quantidade total de agregado, sendo esta última igual a 35 kg. As quantidades obtidas em cada fracção, que foram depois utilizadas no fabrico das argamassas, encontram-se esquematizadas no quadro 1.

Quadro 1 - Quantidades de cada fracção do agregado britado.

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Massa do material retido (kg)
2,80	13,89
2,00	7,95
1,60	3,11
1,00	4,05
0,50	3,17
0,15	2,84
Total	35,00

Relativamente ao agregado natural, existiam no LNEC fracções graduadas até uma dimensão de 2.0 mm. Como se pretendia ter material mais grosso, de forma a obter uma curva granulométrica idêntica à do agregado britado, utilizou-se ainda uma outra areia natural.

A caracterização granulométrica desta areia natural foi efectuada do mesmo modo que no agregado britado.

A análise granulométrica encontra-se no Anexo II. Na figura 3 os resultados obtidos encontram-se representados graficamente.

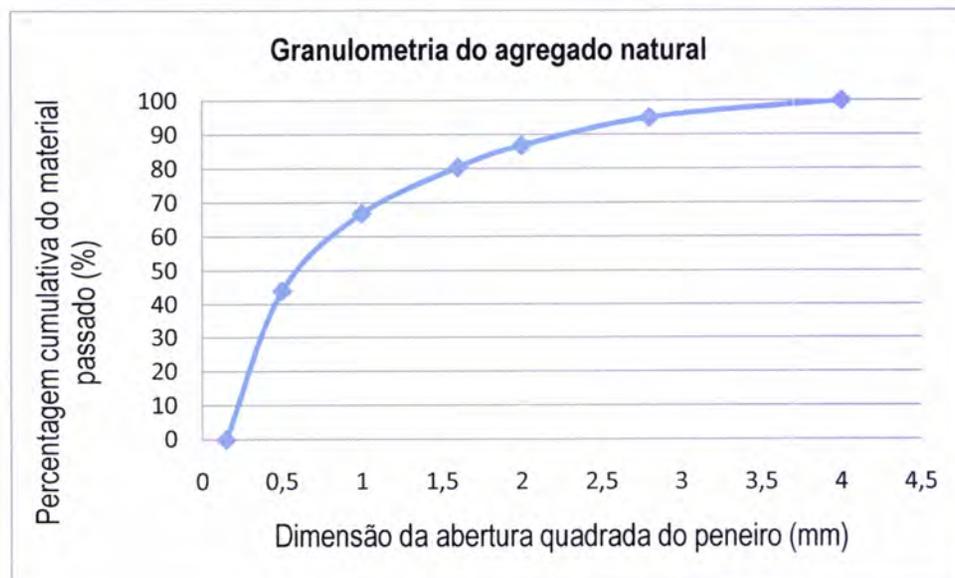


Figura 3 – Granulometria do agregado natural.

Através da análise dos resultados obtidos, verificou-se que esta areia continha pouca quantidade de material com dimensão superior a 2 mm. No entanto, por peneiração obteve-se uma certa quantidade deste material grosso.

No âmbito deste trabalho, o que se pretende é obter duas areias com a mesma granulometria de modo a comparar qual o efeito que provocam na diminuição da retracção de argamassas.

Tendo em conta que no agregado britado existia muita quantidade de material correspondente à fracção de areia que fica retida no peneiro 2,8 mm, aproximadamente 14 kg, e como não existia quantidade suficiente dessa fracção de areia natural disponível, no agregado britado retiram-se 7 kg da fracção que fica retida no peneiro 2,8 mm, de forma a obter quantidades idênticas de ambos os agregados em todas as fracções.

Deste modo no quadro 2 encontram-se as granulometrias finais do agregado britado e natural. Como se observa, as quantidades retidas, em cada peneiro são idênticas em ambos os agregados, o que permite assim diminuir a influência da granulometria nos resultados dos ensaios obtidos com os dois agregados.

Quadro 2 – Granulometria idêntica para areia britada e natural.

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Massa do material retido (kg)	
	Agregado britado	Agregado natural
2,80	6,89	6,89
2,00	7,95	7,95
1,60	3,11	3,11
1,00	4,05	4,05
0,50	3,17	3,17
0,15	2,84	2,84
Total	28,00 Kg	28,00 Kg

Na figura 4 encontra-se graficamente a granulometria final para ambos os agregados.

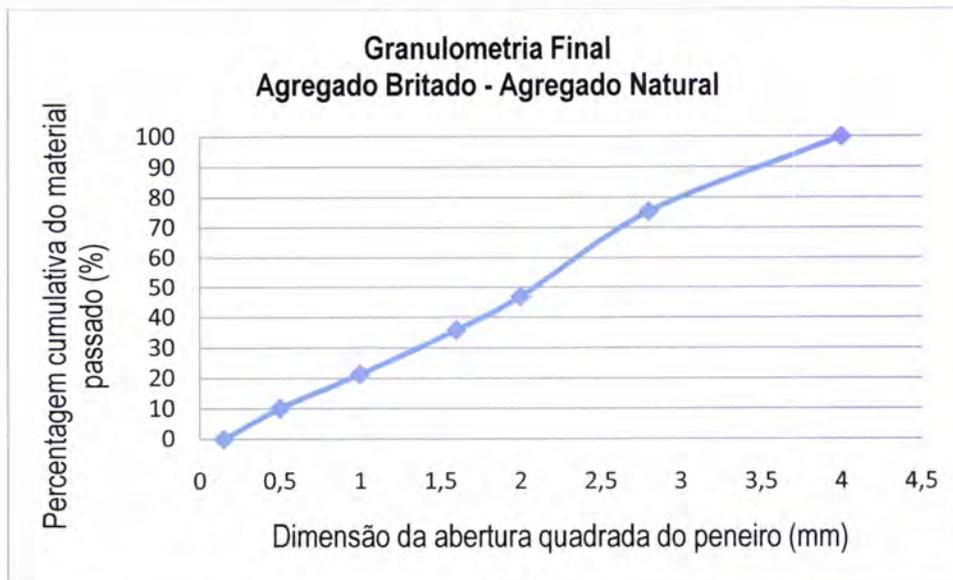


Figura 4 – Granulometria final dos agregados britado e natural.

2.1.2. Absorção

Pretende-se neste ponto determinar as massas volúmicas e absorção dos agregados britado e natural, com base na norma NP – 954 referente à determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias [12].

A absorção de água refere-se à massa de água que a areia seca é capaz de absorver em 24 horas de imersão, expressa em percentagem da massa da areia seca.

O material utilizado na determinação das massas volúmicas e absorção de água é [12].

- Balão graduado de 500 cm³;
- Balança;
- Estufa;
- Molde de aço, troncocónico, sem fundo, com as seguintes dimensões: diâmetro da base maior de 89 mm, diâmetro da base menor de 38 mm e altura de 74 mm;
- Pilão metálico.

O provete que foi submetido a ensaio é constituído por uma quantidade de cerca de 500 g de areia, obtida de uma amostra para ensaio. Na preparação da amostra para ensaio foi pesado cerca de 1,0 kg de areia e colocada num tabuleiro com água para ficar saturada. A amostra esteve imersa em água à temperatura ambiente durante aproximadamente

24 horas, vazando posteriormente a água com o cuidado de não arrastar as partículas mais finas. De seguida a amostra foi submetida a secagem, por aquecimento, com o objectivo de retirar às partículas saturadas a água superficial [12].

Para determinar o momento em que as partículas saturadas não possuem água superficial, recorreu-se ao molde de aço, troncocónico. Assentou-se a base maior do molde troncocónico numa superfície horizontal, não absorvente, e, quando no decurso da secagem a areia esteve apenas ligeiramente húmida, mas aparentemente ainda em condições de permitir uma moldagem firme, encheu-se completamente o molde com a areia. Em seguida compactou-se o material com 25 compressões do pilão metálico, uniformemente distribuídas, assentando-o suavemente e sem exercer pressão além da resultante do seu peso próprio [12].

Na figura 5 encontra-se ilustrado o molde de aço troncocónico, sem fundo.



Figura 5 - Molde de aço troncocónico, sem fundo.

Retirou-se o molde verticalmente, procurando não tocar com ele no material moldado. Quando se obtiver a primeira moldagem que se deforme obtendo um cone, considera-se que a areia tem as partículas saturadas sem água superficial [12]. Na figura 6 e 7 encontram-se as moldagens obtidas na areia natural e na areia britada.



Figura 6 – Moldagem obtida da areia natural.



Figura 7 – Moldagem obtida da areia britada.

Quando se obteve a moldagem pretendida, o processo de secagem foi interrompido e foi reunido todo o material no tabuleiro, retirando uma quantidade de cerca de 500 g, que constitui o provete, anotando o peso deste [12].

De seguida pesou-se o balão graduado cheio só com água, anotou-se esse valor e retirou-se a água do balão [12].

Depois foi introduzido no balão o provete, com o cuidado de não perder partículas e preencheu-se o balão com água até ao traço de referência. De seguida foi pesado o balão com provete e água até ao traço de referência, anotando esse valor [12].

Por último, vazou-se todo o material num tabuleiro, pesou-se o tabuleiro com e sem o provete, e introduziu-se todo o material na estufa para secagem até se obter massa constante [12].

Os valores e cálculos para a determinação das massas volúmicas e da absorção de água da areia britada e natural encontram-se no ANEXO III e IV, respectivamente.

Constatou-se que, após efectuados os cálculos, a areia britada tem uma percentagem de absorção de 0,89 %, sendo maior que a da areia natural, que é de 0,60 %. A massa volúmica das partículas saturadas do agregado britado e do agregado natural é de 2,74 g/m³ e de 2,59 g/m³, respectivamente.

2.1.3. Módulo de elasticidade da rocha do agregado britado

Para a determinação do módulo de elasticidade da rocha do agregado foi efectuado o ensaio de módulo de elasticidade com base na especificação: LNEC E 397-1993 [13]. Para tal, foram obtidos, por corte e rectificação, através de amostras de rocha fornecidas pela empresa Barrabrita, 3 provetes com a dimensão de 4 x 4 x 16 cm. Os provetes obtidos da rocha estão ilustrados na figura 8.



Figura 8 - Provetes da rocha do agregado britado.

O método de ensaio encontra-se descrito no ponto 4.3 deste trabalho.

Na figura 9 encontra-se ilustrado o equipamento utilizado na determinação módulo de elasticidade.



Figura 9 - Realização do ensaio de módulo de elasticidade da rocha do agregado britado.

Os provetes de ensaio são designados por 1, 2 e 3. Os resultados obtidos encontram-se no quadro 3 que se segue.

Quadro 3 - Módulo de elasticidade da rocha do agregado britado.

Provete	Módulo de elasticidade (GPa)
1	108,9
2	101,1
3	57,6

2.2. Cimento

O cimento é um dos principais materiais de construção utilizado como ligante. Através dos seus constituintes químicos que vão reagir com a água, o cimento inicia a sua presa dando origem a uma material com boa resistência mecânica, assegurando também a ligação dos agregados à pasta.

O cimento Portland é constituído por clínquer e outros componentes que vão distinguir os vários tipos de cimento.

O cimento utilizado para o fabrico das argamassas para a realização do trabalho experimental foi do tipo CEM II/A-L 42,5R, proveniente da empresa CIMPOR. O cimento foi fornecido pela empresa Ibera, Indústria de betão SA, sediada em Moura.

As características químicas e físicas do cimento do tipo CEM II/A-L 42,5R foram fornecidas pela empresa CIMPOR e encontram-se no quadro 4. Os valores obtidos dos ensaios mencionados no quadro são referentes à média dos ensaios que se efectuaram nos três dias mais próximos da data de entrega do cimento à empresa Ibera.

Quadro 4 - Propriedades químicas e físicas do cimento CEM II – A/L 42,5R.

Ensaio	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude
Massa volúmica (kg/m ³)	3080	3080	3070	10
Superfície específica de Blaine (m ² /kg)	387.7	392.0	381.0	11.0
Resíduo de peneiração 45 (%)	5,3	5,7	5,0	0,7
Resíduo de peneiração 90 (%)	0,4	0,5	0,3	0,2
Água na pasta normal (%)	28,5	28,8	28,2	0,6
Início de presa (min)	135	150	120	30
Fim de presa (min)	187	205	170	35
Expansibilidade (min)	0,5	1,0	0,0	1,0
Resistência à flexão aos 2 dias (MPa)	5,1	5,2	5,0	0,2
Resistência à flexão aos 7 dias (MPa)	6,5	6,7	6,4	0,3
Resistência à flexão aos 28 dias (MPa)	7,7	8,1	7,3	0,8
Resistência à compressão aos 2 dias (MPa)	30,3	31,8	29,3	2,5
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	42,5	44,8	40,7	4,1
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	51,8	52,3	50,9	1,4
Perda ao fogo (%)	7,79	7,97	7,51	0,46
Óxido de silício SiO ₂ (%)	17,06	17,30	16,69	0,61
Óxido de alumínio Al ₂ O ₃ (%)	4,82	4,89	4,77	0,12
Óxido de ferro Fe ₂ O ₃ (%)	3,01	3,19	2,92	0,27
Óxido de cálcio CaO (%)	61,95	62,35	61,62	0,73
Óxido de magnésio MgO (%)	1,52	1,60	1,44	0,16
Sulfatos (%)	2,74	2,82	2,63	0,19
Óxido de potássio K ₂ O (%)	0,99	1,01	0,97	0,04
Óxido de sódio Na ₂ O (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
Cloretos Cl (%)	0,03	0,03	0,03	0,00
Cal livre CaOI (%)	1,44	1,74	1,18	0,56
Resíduo insolúvel (%)	1,45	1,45	1,45	0,00
Clinquer (%)	82,80	83,50	82,40	1,10
Filler (%)	17,20	17,60	16,50	1,10

2.3. Adjuvante

Os adjuvantes são adicionados para melhorar o desempenho e durabilidade das misturas cimentícias. O adjuvante adicionado nas argamassas deste trabalho é GLENIUM 26 SCC, fornecido pela empresa BASF ao LNEC.

Este adjuvante apresenta uma massa volúmica de 1050 kg/m³ e um resíduo seco de 20 %. O adjuvante é um polímero à base de cadeias de éter carboxílico.

2.4. Água

Para a elaboração das argamassas foi utilizada água destilada, encontrando-se esta a uma temperatura de 20 °C.

2.5. Dosagens

Tendo esta dissertação como objectivo avaliar o efeito do agregado na diminuição da retracção de argamassas, foram elaboradas sete formulações diferentes. Uma das misturas corresponde à pasta de cimento de referência, e as restantes são argamassas onde é introduzido o agregado na sua composição. Em três argamassas tem-se agregado britado e nas outras três agregado natural.

O volume total de cada mistura vai depender do número total de provetes necessários para a realização dos ensaios.

Para o ensaio de resistência mecânica usaram-se seis provetes para cada mistura, dois provetes para cada idade de ensaio, designadamente 1, 3 e 28 dias.

No ensaio do módulo de elasticidade utilizaram-se dois provetes por mistura, tendo sido utilizados sempre os mesmos dois provetes na medição do módulo de elasticidade a 1, 3 e 28 dias.

Por último, para o ensaio de retracção autogénea usaram-se três provetes por mistura e são sempre os mesmos três provetes que são utilizados nas medições aos 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28 dias de idade.

No total, para cada mistura usaram-se onze provetes. Tendo em conta as dimensões de cada provete, 4 x 4 x 16 (cm), o volume de cada provete será de 256 cm³, o que corresponde a 0,256 litros. Então, para onze provetes tem-se um total de 2,816 litros para cada mistura.

O volume total de 2,816 litros é afectado por um coeficiente de majoração de 1,2 para ter em conta as perdas de material e garantir uma quantidade suficiente para os provetes, obtendo-se assim um total de 3,38 litros. Ao arredondar o volume, tem-se então um valor de 3,5 litros para cada mistura.

O traço em massa de cada mistura encontra-se no quadro 5.

Quadro 5 - Composições de cada mistura cimentícia (traço em massa).

Mistura cimentícia	Cimento	Agregado britado	Agregado natural	Água
REF	1,00	-	-	0,30
NAT 1	1,00	-	1,00	0,30
NAT 2	1,00	-	1,50	0,30
NAT 3	1,00	-	2,00	0,30
BRI 1	1,00	1,00	-	0,30
BRI 2	1,00	1,50	-	0,30
BRI 3	1,00	2,00	-	0,30

A quantidade de adjuvante para as misturas em estudo corresponde a 1,5 % da quantidade de cimento.

Para produzir o volume pretendido de cada mistura, consideraram-se as seguintes massas volúmicas para os constituintes: 3080 kg/m³ para o cimento; 2650 kg/m³ para o agregado; 1000 kg/m³ para a água; e 1050 kg/m³ para o superplastificante. Tendo em conta os traços das composições anteriormente referidos, obtêm-se as quantidades em gramas para cada constituinte. No quadro 6 encontram-se as quantidades correspondentes aos constituintes de cada mistura.

Quadro 6 - Dosagens das misturas cimentícias, para 3,5 litros de argamassa.

Mistura cimentícia	Cimento (g)	Agregado britado (g)	Agregado natural (g)	Adjuvante (g)	Água (g)
REF	5526,32	-	-	82,89	1657,89
NAT 1	3462,97	-	3462,97	51,94	1038,89
NAT 2	2918,20	-	4377,29	43,77	875,46
NAT 3	2521,52	-	5043,04	37,82	756,46
BRI 1	3462,97	3462,97	-	51,94	1038,89
BRI 2	2918,20	4377,29	-	43,77	875,46
BRI 3	2521,52	5043,04	-	37,82	756,46

A pasta de referência é designada por REF, as argamassas com agregado natural são designadas por NAT 1, NAT 2 e NAT 3, e por último, as argamassas com agregado britado são designadas por BRI 1, BRI 2 e BRI 3.

Tendo em conta as massas volúmicas reais dos constituintes das misturas, que no caso do cimento e do adjuvante foram fornecidas pelas empresas, e no caso do agregado britado e natural foram obtidas através de ensaio, são determinadas as dosagens dos constituintes por m^3 . No quadro 7 encontram-se as massas volúmicas reais do cimento, do agregado britado e natural, do adjuvante e da água.

Quadro 7 – Massas volúmicas reais.

Materiais	Massa volúmica (kg/m^3)
Cimento	3080
Agregado britado	2742
Agregado natural	2590
Adjuvante	1030
Água	1000

Através das quantidades e da massa volúmica, obtém-se o volume (m^3), dos constituintes das argamassas. No quadro 8 está o volume (m^3) de cada constituinte de cada mistura.

Quadro 8 – Volume de cada amassadura (litros) do cimento, agregado britado, agregado natural, adjuvante e água.

Mistura cimentícia	Cimento (l)	Agregado britado (l)	Agregado natural (l)	Adjuvante (l)	Água (l)	Total (l)
REF	1,8	-	-	0,1	1,7	3,5
NAT 1	1,1	-	1,3	0,1	1,0	3,6
NAT 2	0,9	-	1,7	0,0	0,9	3,6
NAT 3	0,8	-	1,9	0,0	0,8	3,6
BRI 1	1,1	1,3	-	0,1	1,0	3,5
BRI 2	0,9	1,6	-	0,0	0,9	3,5
BRI 3	0,8	1,8	-	0,0	0,8	3,5

O peso por m^3 de cada constituinte foi determinado tendo em conta o volume (m^3) e a massa volúmica real de cada constituinte, considerando 2% de volume de vazios. No quadro 9 encontra-se o peso por m^3 do cimento, do agregado britado, do agregado natural, do adjuvante e da água, para cada composição. Como se pode constatar, todas as misturas apresentam uma razão A/C igual a 0,30.

Quadro 9 – Peso por m³ dos constituintes de cada mistura

Mistura cimentícia	Cimento (kg/m ³)	Agregado britado (kg/m ³)	Agregado natural (kg/m ³)	Adjuvante (kg/m ³)	Água (kg/m ³)
REF	1533	-	-	23,0	460
NAT 1	956	-	956	14,3	287
NAT 2	804	-	1207	12,1	241
NAT 3	694	-	1389	10,4	208
BRI 1	976	976	-	14,6	293
BRI 2	826	1239	-	12,4	248
BRI 3	716	1432	-	10,7	215

3. MÉTODOS DE ENSAIO

Com o objectivo de determinar o efeito do agregado na diminuição da retracção de argamassas, foram efectuados ensaios de retracção autogénea, de resistência mecânica à flexão e à compressão, e de módulo de elasticidade. Estes ensaios permitem avaliar o efeito do agregado na diminuição da retracção de argamassas, tendo em conta as resistências mecânicas e módulo de elasticidade destas. Para tal, neste capítulo pretende-se descrever os métodos de ensaio anteriormente referidos.

A preparação dos provetes para ensaio e os métodos de ensaio encontram-se descritos nos pontos seguintes.

3.1. Preparação dos provetes

Para cada mistura prepararam-se onze provetes, dos quais três provetes para o ensaio de retracção, outros dois para o ensaio do módulo de elasticidade e por último seis para os ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão.

O processo de amassadura dos provetes foi idêntico para todas as misturas em estudo.

Nas secções que se seguem está descrito o processo de amassadura, moldagem, desmoldagem, e conservação dos provetes.

3.1.1. Processo de amassadura

O procedimento de amassadura para as sete formulações em estudo foi idêntico para todas elas.

Antes de iniciar o processo de amassadura, os constituintes de cada mistura foram preparados e pesados, designadamente o cimento, a água, o agregado e o adjuvante, tendo em conta as massas determinadas anteriormente e que se encontram indicadas no quadro 6.

Após a preparação das quantidades dos constituintes da mistura, iniciou-se o processo de amassadura.

O equipamento que foi utilizado para efectuar as misturas cimentícias encontra-se ilustrado na figura 10. O misturador consta essencialmente de um recipiente em aço inoxidável com uma capacidade de cerca de 5 litros e equipado de maneira a poder ser fixado firmemente à armação do misturador durante a amassadura. É também constituído por uma pá misturadora em aço inoxidável, accionada por um motor eléctrico, com velocidade regulável, num movimento de rotação em torno do seu eixo e um movimento de rotação planetário [14].



Figura 10 - Misturador utilizado na preparação de argamassas.

Numa primeira fase, juntou-se água e o cimento no misturador, tendo o cuidado de evitar perda de água ou de cimento. Foi anotada a hora da junção da água e do cimento para cada mistura em estudo, pois a idade do provete é contada desde esse instante até ao momento de ensaio. De seguida colocou-se o misturador em funcionamento à velocidade lenta durante 30 segundos. Após os 30 segundos foi introduzida com cuidado toda a quantidade de agregado, excepto na pasta de referência. Depois de introduzir toda a quantidade de agregado o misturador funcionou durante mais 30 segundos à velocidade lenta. Por último foi introduzido o adjuvante e posteriormente colocou-se o misturador em funcionamento à velocidade lenta durante 30 segundos, seguidos de mais 30 segundos na velocidade rápida [14].

3.1.2. Ensaio de espalhamento

Após a amassadura e ainda no estado fresco, procedeu-se ao ensaio de espalhamento. O material utilizado foi um troncocone com um diâmetro de 100 mm na base e de 70 mm no topo, com uma altura de 60 mm, e uma placa de material plástico endurecido, com um limite marcado de 200 mm de diâmetro [15].

O ensaio de espalhamento foi iniciado depois de garantir que a mistura estava bem homogênea. Numa primeira fase foi colocada uma amostra da mistura no cone que se encontrava alinhado com o limite marcado na placa [15]. Com recurso a uma régua metálica a pasta foi alisada com o cone, como se pode verificar na figura 11.



Figura 11 - Ensaio de espalhamento.

Em seguida, o cone foi levantado verticalmente, sem interferir no fluxo, até a mistura estabilizar sobre placa. Por último foram medidos dois diâmetros ortogonais da mistura, sendo o valor do espalhamento encontrado através da média desses dois valores [15].

3.1.3. Moldagem dos provetes

Os provetes foram moldados logo após a preparação da mistura e do respectivo ensaio de espalhamento.

O molde utilizado é constituído por três compartimentos horizontais, permitindo a preparação simultânea de três provetes prismáticos com a secção transversal de 40 x 40 x 160 (mm) de comprimento. O molde é em aço com paredes de aproximadamente 10 mm de espessura.

Nos moldes utilizados para os provetes de retracção autogénea foram colocados pernas nas suas extremidades, que permitiram a leitura dos resultados do ensaio. O molde utilizado para a retracção autogénea encontra-se na figura 12.

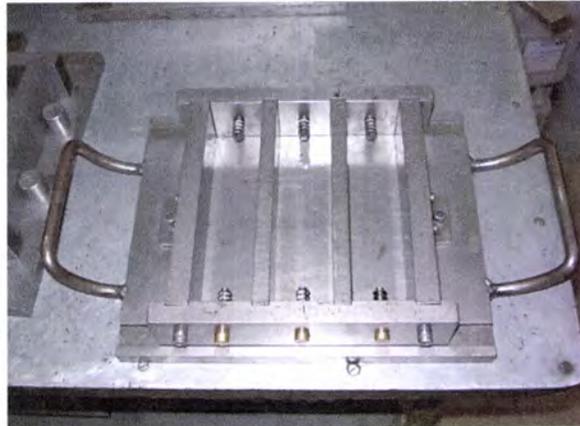


Figura 12 - Molde para provetes da retracção autogénea.

O molde utilizado para os provetes de ensaio de resistência está apresentado na figura 13.



Figura 13 - Molde para provetes de ensaio de resistência.

Seguiu-se o procedimento de moldagem e compactação utilizando para o efeito a mesa de vibração ilustrada na figura 14. O molde foi colocado sobre a mesa de vibração, procedendo-se ao seu enchimento, com recurso a uma colher de pedreiro.



Figura 14 - Mesa de vibração.

Após o enchimento do molde, procedeu-se à compactação sobre a mesa de vibração durante 20 segundos. Depois deste procedimento a mistura foi espalhada e alisada através da utilização da régua metálica plana, com dimensões 30 x 300 mm. Por último, foi colocada sobre o molde uma placa plana de vidro.

Os provetes já moldados e compactados foram conservados numa câmara húmida até à data dos ensaios. Na câmara húmida os moldes foram mantidos a uma temperatura de 20 ± 1 °C e uma humidade relativa não inferior a 95 %.

A câmara húmida para conservação dos provetes encontra-se ilustrada na figura 15.



Figura 15 - Câmara húmida destinada à conservação dos provetes.

3.1.4. Desmoldagem e conservação dos provetes

A desmoldagem foi efectuada com o cuidado de não deteriorar os provetes. Neste processo foram utilizados martelos de borracha, de plástico e ou outros instrumentos concebidos para este fim.

A desmoldagem foi iniciada 20 minutos antes das 18 h do dia zero, uma vez que a primeira medida nos provetes destinados ao ensaio de retracção autogénea foi efectuada às 18 h de idade. Assim que os provetes foram retirados dos seus moldes, foi anotada sobre estes a sua designação.

Após a primeira medição do ensaio de retracção autogénea os provetes foram envolvidos numa película aderente e guardados num recipiente fechado, para que não existissem trocas de humidade com o exterior.

Os provetes para os ensaios de resistência mecânica e módulo de elasticidade, depois de desmoldados, foram conservados em recipientes com água até à data dos ensaios. A temperatura dos recipientes para a conservação dos provetes em água foi mantida a (20 ± 1) °C [14].

3.2. Resistências mecânicas

Para determinar as resistências mecânicas, designadamente à flexão e à compressão das argamassas, seguiu-se a norma NP EN 196-1. O princípio básico desta norma consiste na determinação das resistências à compressão e à flexão de provetes de forma prismática, com as dimensões 40 x 40 x 160 (mm) [14].

Na data de ensaio, designadamente nos dias 1, 3 e 28 de idade, os provetes foram retirados do seu meio de conservação saturado e partidos em duas metades por flexão, sendo determinada a resistência à flexão, e cada metade foi depois submetida ao ensaio de resistência à compressão.

Para cada mistura foram necessários seis provetes para o ensaio de resistência à flexão e à compressão, o que corresponde a dois provetes ensaiados para cada idade [14].

O equipamento e o procedimento de ensaio para a determinação das resistências à flexão e à compressão encontram-se descritos nos pontos que se seguem.



3.2.1. Resistência à flexão

3.2.1.1. Equipamento de ensaio na determinação da resistência à flexão.

O aparelho utilizado na determinação da resistência mecânica à flexão deve satisfazer os seguintes requisitos:

➤ O aparelho para a determinação da resistência à flexão deve permitir a aplicação de cargas até 10 kN com uma exactidão de $\pm 1,0 \%$ da carga registada nos 4/5 superiores da escala de medida e com uma velocidade de (50 ± 10) N/s [14].

➤ A máquina deve ter um dispositivo de flexão com dois cilindros de apoio em aço de $(10,0 \pm 0,5)$ mm de diâmetro, distando um do outro $(100,0 \pm 0,5)$ mm e um terceiro cilindro, de carga, em aço do mesmo diâmetro equidistantes dos dois primeiros. O comprimento destes cilindros deve estar compreendido entre 45 mm e 50 mm [14].

➤ Os três planos verticais passando pelos eixos dos três cilindros devem estar paralelos e permanecer paralelos durante o ensaio, equidistantes e perpendiculares à direcção do provete. Um dos cilindros de apoio e o cilindro de carga devem poder bascular ligeiramente para permitir uma distribuição uniforme da carga na largura do provete evitando todo o esforço de torção [14].

3.2.1.2. Procedimento de ensaio

O prisma foi colocado na máquina de flexão, conforme descrito no ponto 3.2.1.1., com uma face lateral de moldagem sobre os cilindros de apoio e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios [14], como se pode verificar na figura 16.



Figura 16 - Início do ensaio de resistência à flexão.

A carga foi aplicada verticalmente por meio do cilindro de carga sobre a face lateral oposta do prisma e aumentada uniformemente à velocidade de (50 ± 10) N/s, até à rotura [14]. Na figura 17 encontra-se ilustrado o resultado obtido após a rotura no ensaio de resistência à flexão.



Figura 17 - Rotura do provete no ensaio de resistência à flexão.

De seguida os semi-prismas foram conservados e cobertos com um pano húmido até ao momento do ensaio à compressão.

A resistência à flexão (R_f) foi determinada pela seguinte equação [14]:

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

onde:

R_f – Resistência à flexão (MPa);

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

F_f – Carga aplicada ao centro do prisma na rotura (N);

l – Distância entre os apoios (mm).

3.2.2. Resistência à compressão

3.2.2.1. Equipamento de ensaio na determinação da resistência à compressão.

A máquina de ensaio para a determinação da resistência à compressão deve ter uma capacidade conveniente para o ensaio; deve ter nos 4/5 superiores da escala de medida utilizada uma exactidão de $\pm 1,0\%$ da carga registada, de acordo com a EN ISO 7500 1. Deve ter uma velocidade de carga de (2400 ± 200) N/s. Deve possuir um dispositivo indicador que seja construído de maneira que o valor registado quando da rotura do provete permaneça indicado depois do regresso a zero da carga [14].

3.2.2.2. Procedimento de ensaio.

O ensaio foi efectuado sobre as duas metades do prisma rompido no ensaio de resistência à flexão, com a ajuda do equipamento especificado no ponto 3.2.1.2..

Cada semi-prisma foi centrado lateralmente em relação aos pratos da máquina a $\pm 0,5$ mm e longitudinalmente [14], como se pode ver na figura 18.



Figura 18 - Início do ensaio de resistência à compressão.

A carga foi aumentada uniformemente à velocidade de (2400 ± 200) N/s até à rotura [14]. Na figura 19 encontra-se exemplo da rotura do provete.



Figura 19 - Rotura do provete no ensaio de resistência à flexão.

A resistência à compressão (R_c) é dada pela seguinte equação [14]:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (Eq. 2)$$

onde:

R_c – Resistência à compressão (MPa);

F_c – Carga máxima na rotura (N);

1600 – Área dos pratos (40 mm x 40 mm).

3.3. Módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade dos provetes recorreu-se à aplicação da especificação: LNEC E 397-1993 [13].

O módulo de elasticidade a que reporta esta especificação é o modo de elasticidade secante, calculado, após um número específico de ciclos de carga.

Para cada mistura foram necessários dois provetes, ensaiados aos 1, 3 e 28 dias de idade.

3.3.1. Equipamento

A máquina de ensaio deve aplicar e manter a carga necessária com uma precisão não inferior a 1%. Os instrumentos para medir as variações de comprimento devem ter uma base de medida não inferior à aresta do provete, com um mínimo de 100 mm, e ser colocados de tal modo que os pontos de fixação estejam a igual distância dos extremos do provete e a pelo menos 1/4 da altura a contar dos extremos [13].

Na figura 20 encontra-se ilustrada a máquina utilizada no ensaio do módulo de elasticidade.



Figura 20 - Máquina utilizada no ensaio do módulo de elasticidade.

Os pontos de fixação devem ser colocados com precisão sobre os eixos maiores das faces laterais.

Os aparelhos de medida devem permitir determinar a extensão com uma precisão não inferior a 5×10^{-6} [13]. O aparelho de medida utilizado durante o ensaio encontra-se ilustrado na figura 21 que se segue.



Figura 21 – Aparelho de medida para o ensaio de módulo de elasticidade.

3.3.2. Procedimento de ensaio

O provete foi centrado na máquina de ensaio, seguidamente foram fixados ao mesmo os instrumentos de medida.

Foi aplicada uma tensão inicial de 0,5 a 1,0 MPa (σ_b) e anotada a extensão (ε_b). Em seguida, foi incrementada a tensão de uma forma contínua, a uma velocidade de $0,5 \pm 0,1$ MPa por segundo, até que a tensão $\sigma_a = f_c/3$ fosse alcançada, sendo f_c o valor médio da tensão de rotura da argamassa por compressão. Manteve-se a tensão aplicada durante 60 segundos, anotando as leituras das extensões no espaço de 30 segundos (ε_{a1}) de modo a que as estas fossem concluídas nos 90 segundos após se ter alcançado a tensão σ_a [13].

Foram repetidos os ciclos de carga até que a diferença da extensão ($\varepsilon_a - \varepsilon_b$) entre dois ciclos consecutivos não excedeu 1×10^{-5} [13].

O módulo de elasticidade (GPa) foi calculado a partir da seguinte equação [13]:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{(\varepsilon_{a,n} - \varepsilon_{b,n})} \times 10^{-3} \quad (Eq.3)$$

onde:

σ_a – tensão máxima aplicada (MPa);

σ_b – tensão inicial (MPa);

ε_{an} – extensão para a tensão σ_a medida no n-ésimo ciclo de carga;

ε_{bn} - extensão para a tensão σ_b medida no n-ésimo ciclo de carga.

3.4. Retracção autogénea

A retracção é a diferença entre o valor do comprimento de um provete e o valor do seu comprimento logo após a desmoldagem.

Na determinação da retracção autogénea recorreu-se à seguinte especificação: LNEC E 398-1993 [16].

3.4.1. Equipamento

Na medição da retracção autogénea utilizou-se um comparador para medição das variações de comprimento dos provetes, essencialmente constituído por um deflectómetro e respectivo suporte de aço [16].

Foi também necessária uma base de medida, correspondendo esta a uma barra padrão, de aço inoxidável. O padrão utilizado no ensaio de retracção corresponde a um padrão identificado com o n.º 7.

O equipamento utilizado neste ensaio encontra-se na figura 22.



Figura 22 - Equipamento utilizado para medição da retracção autogénea.

3.4.2. Procedimento de ensaio

Para efectuar as medições, foi colocada a peça a ensaiar no equipamento de medida, com as extremidades ajustadas aos dispositivos de encosto da base do comparador e da haste do deflectómetro; rodou-se lentamente a peça em torno do seu eixo e anotou-se o valor mais baixo indicado no deflectómetro. Inverteu-se a posição da peça e procedeu-se do mesmo modo, obtendo um novo valor [16].

Antes de cada medição dos provetes, foi colocado a barra padrão no comparador, registando os valores obtidos no deflectómetro.

As medições para o ensaio de retracção foram efectuadas 18 horas após a amassadura, com e sem película aderente, e nos dias 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28 de idade com película aderente.

A extensão de retracção do provete (em $\mu\text{m}/\text{m}$) foi obtida pela seguinte equação [16]:

$$\varepsilon = \frac{(d_{f1} - d_{i1}) - (d_{f2} - d_{i2})}{160} \times 1\,000\,000 \quad (\text{Eq. 4})$$

onde:

d_{f1} - distância, em mm , entre os pontos de referência do provete no fim do período especificado (dias 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28 de idade);

d_{i1} – distância, em *mm*, entre os pontos de referência do provete no início do ensaio (18 horas);

d_{i2} - distância, em *mm*, entre os pontos de referência da barra padrão no fim do período especificado (dias 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28 de idade);

d_{i2} – distância, em *mm*, entre os pontos de referência da barra padrão no início do ensaio (18 horas).

4. RESULTADOS OBTIDOS

Com o objectivo de avaliar o efeito do agregado na diminuição da retracção de misturas foram efectuados ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão, ensaio de módulo de elasticidade e ensaio de retracção autogénea em sete de misturas cimentícias diferentes, de modo a obter valores experimentais para análise e posterior comparação com o modelo teórico proposto por Hobbs.

Através dos métodos de ensaios mencionados no capítulo anterior, procede-se então à execução destes, sendo apresentado neste capítulo os resultados obtidos. Uma das misturas preparadas é a pasta de referência, a qual não contém agregado na sua constituição e que permite avaliar o efeito deste quando adicionado à pasta para obter as argamassas em estudo. Testaram-se três argamassas com agregado britado e outras três com agregado natural, variando o volume de agregado entre elas. Este procedimento permite analisar o efeito da variação de volume de agregado nas resistências mecânicas, no módulo de elasticidade e na retracção autogénea das argamassas.

Na secção 4.1 encontram-se os resultados obtidos no ensaio de espalhamento, descrito anteriormente na secção 3.1.2.

Os resultados obtidos, respectivamente nos ensaios de resistência mecânica à compressão, de módulo de elasticidade e de retracção autogénea, encontram-se nas secções 4.2. a 4.4., descritos sob a forma de gráficos.

Nos Anexos V e VI constam os quadros com descrição dos resultados para o ensaio de resistência mecânica à flexão e à compressão, respectivamente. Os quadros relativos aos resultados do módulo de elasticidade são apresentados no Anexo VII. No Anexo VIII encontram-se os resultados obtidos no ensaio de retracção autogénea para cada provete de cada argamassa, incluindo as medições da massa e de variação de comprimento. Por último, no Anexo IX estão indicados os valores da retracção autogénea de cada argamassa e respectiva média dos provetes da mesma argamassa.

Tendo em conta que a retracção autogénea está relacionada com a variação macroscópica de volume que ocorre quando não há trocas de humidade entre o material e o ambiente exterior, é importante analisar a massa dos provetes em cada idade com o objectivo de assegurar que não há perda excessiva de massa, garantindo assim que a variação de volume do provete é devido apenas à retracção autogénea e que os provetes estão bem

selados. A variação de massa de cada provete entre os dias 1 e 28 de idade encontra-se no Anexo X.

As designações utilizadas para cada provete estão descritas no quadro 10 que se segue. Para os 3 ensaios discriminados neste quadro foram usados 77 prismas 40 x 40 x 160 (mm).

Quadro 10 - Designação dos provetes usados nos ensaios realizados.

Mistura cimentícia	Resistência	Módulo de elasticidade	Retracção autogénea
REF	R REF 1 - 6	ME REF 1 - 2	REF 1 - 3
BRI 1	R BRI 1 - (1 - 6)	ME BRI 1 - (1 - 2)	BRI 1 - (1 - 3)
BRI 2	R BRI 2 - (1 - 6)	ME BRI 2 - (1 - 2)	BRI 2 - (1 - 3)
BRI 3	R BRI 3 - (1 - 6)	ME BRI 1 - (1 - 2)	BRI 1 - (1 - 3)
NAT 1	R NAT 1 - (1 - 6)	ME NAT 1 - (1 - 2)	NAT 1 - (1 - 3)
NAT 2	R NAT 2 - (1 - 6)	ME NAT 2 - (1 - 2)	NAT 2 - (1 - 3)
NAT 3	R NAT 3 - (1 - 6)	ME NAT 1 - (1 - 2)	NAT 1 - (1 - 3)

É de referenciar que o trabalho experimental foi realizado no LNEC durante um estágio efectuado na instituição, tendo contado com a colaboração dos técnicos do Núcleo de Betões do Departamento de Materiais para a realização dos ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão e do ensaio de módulo de elasticidade.

4.1. Espalhamento

Relativamente ao ensaio de espalhamento, no quadro 11 encontram-se os resultados obtidos em cada mistura. Constata-se, como era de esperar, que o espalhamento diminui com o aumento da concentração de sólidos.

Quadro 11 - Resultado do ensaio de espalhamento efectuado na preparação das argamassas.

Mistura cimentícia	Espalhamento (mm)
BRI 1	162 – 161
BRI 2	130 – 129
BRI 3	100 – 100
NAT 1	141 – 145
NAT 2	126 – 130
NAT 3	100 – 100

Por lapso não se efectuou o ensaio de espalhamento para a pasta de referência. Contudo a pasta apresentava-se bastante fluida o que corresponderia a um espalhamento elevado.

Nas figuras 23 e 24 encontram-se exemplos do aspecto da argamassa no ensaio de espalhamento, respectivamente para o caso de uma argamassa líquida e para uma argamassa mais consistente.



Figura 23 - Resultado do ensaio de espalhamento de uma argamassa líquida.



Figura 24 - Resultado do ensaio de espalhamento de uma argamassa consistente.

4.2. Resultados obtidos na pasta de referência (REF).

Nas figuras 25, 26 e 27, apresentam-se sob a forma de gráfico os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade e retracção autógena, respectivamente na pasta de referência.

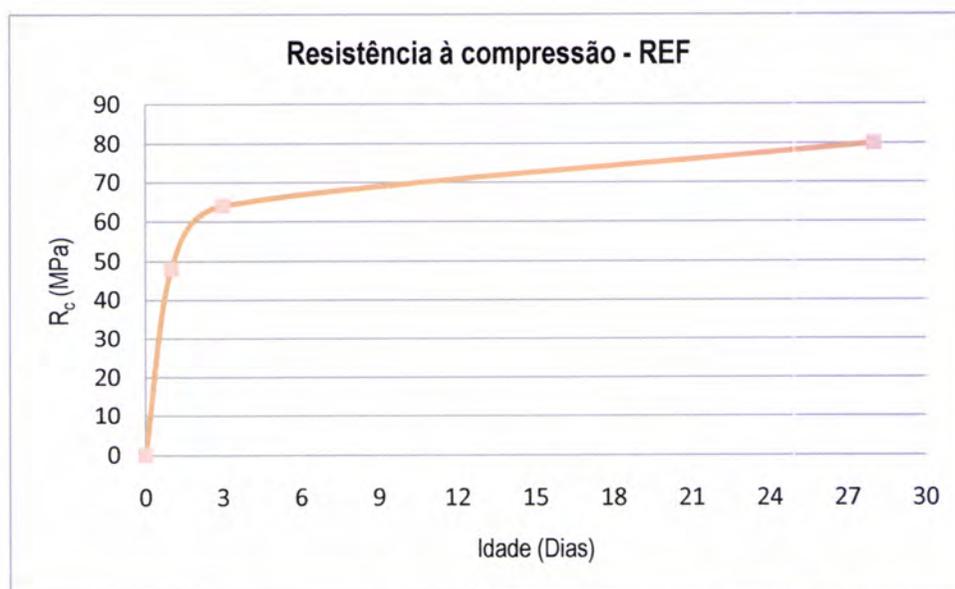


Figura 25 – Resistência à compressão da pasta de referência (REF).

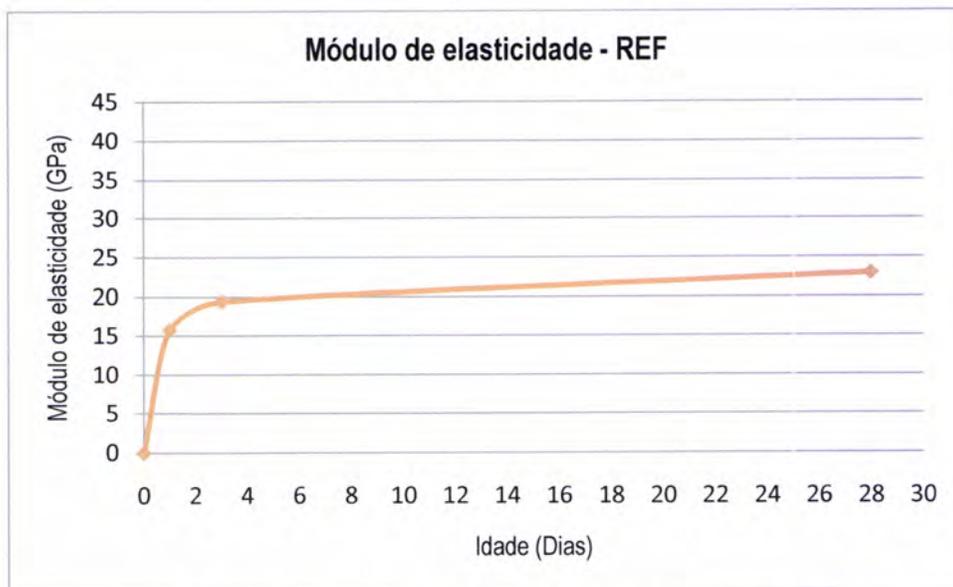


Figura 26 - Módulo de elasticidade médio da pasta de referência (REF).

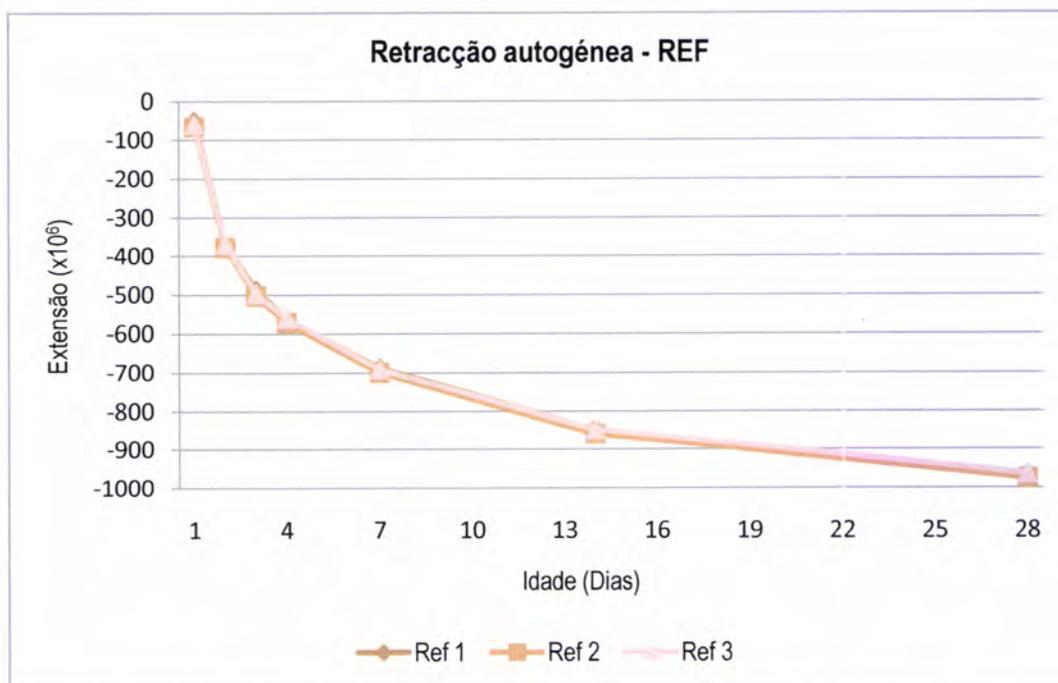


Figura 27 - Retraccção autogénea dos provetes da pasta de referência (REF).

Como se pode verificar no quadro 63 do Anexo X, a variação de massa dos provetes no ensaio para a retracção autogénea, apresentou um valor máximo de 1,04 g, o que representa apenas 0,19% da massa média dos provetes.

4.3. Resultados obtidos na argamassa com agregado britado (BRI).

Em relação às argamassas com agregado britado, encontram-se em seguida os valores relativos aos ensaios de resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade e retracção autogénea, através, respectivamente, das figuras 28, 29 e 30, para a argamassa BRI 1, das figuras 31, 32 e 33, para a argamassa BRI 2, e das figuras 34, 35 e 36 para a argamassa BRI 3.

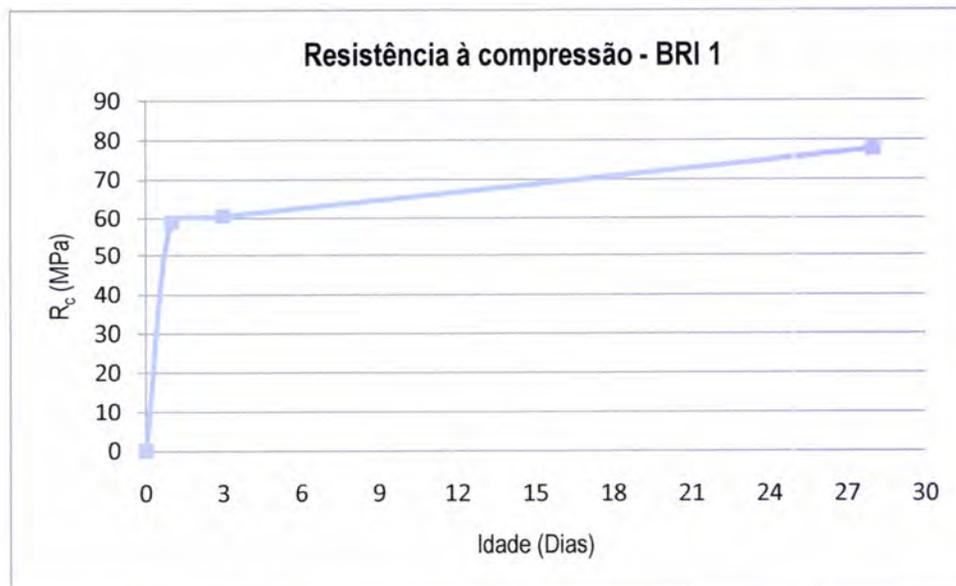


Figura 28 - Resistência à compressão da argamassa BRI 1.

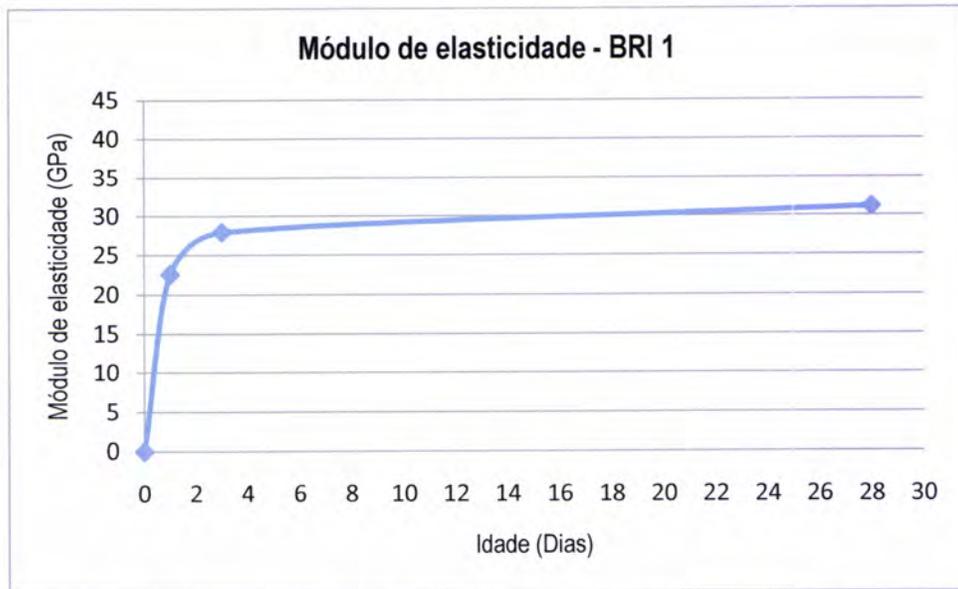


Figura 29 - Módulo de elasticidade médio da argamassa BRI 1.

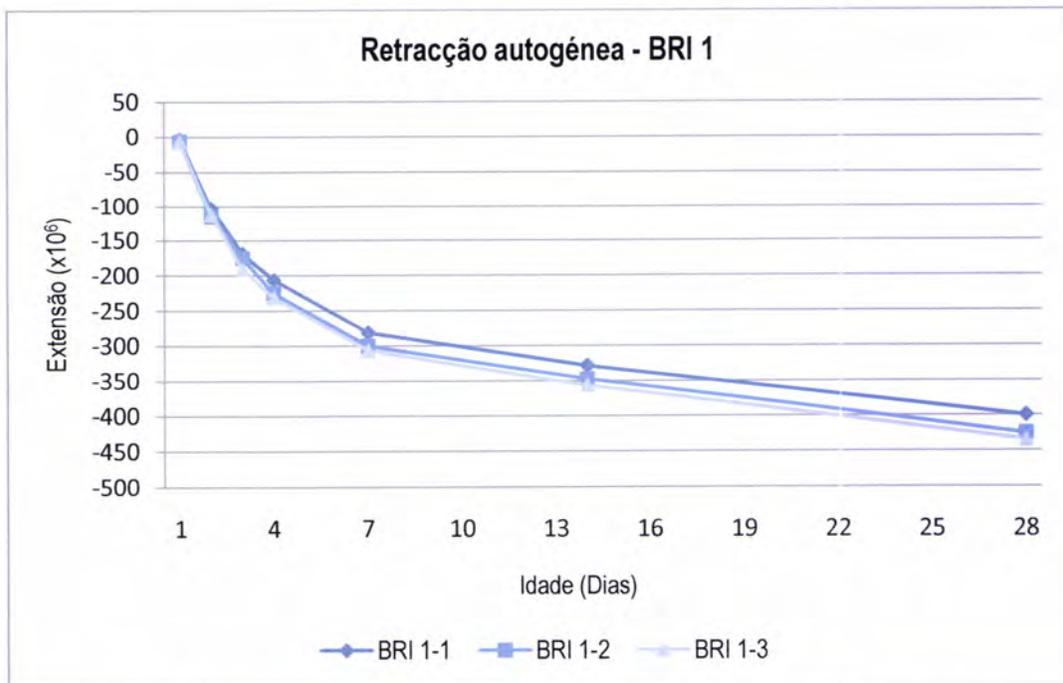


Figura 30 – Retracção autogénea dos provetes da argamassa BRI 1.

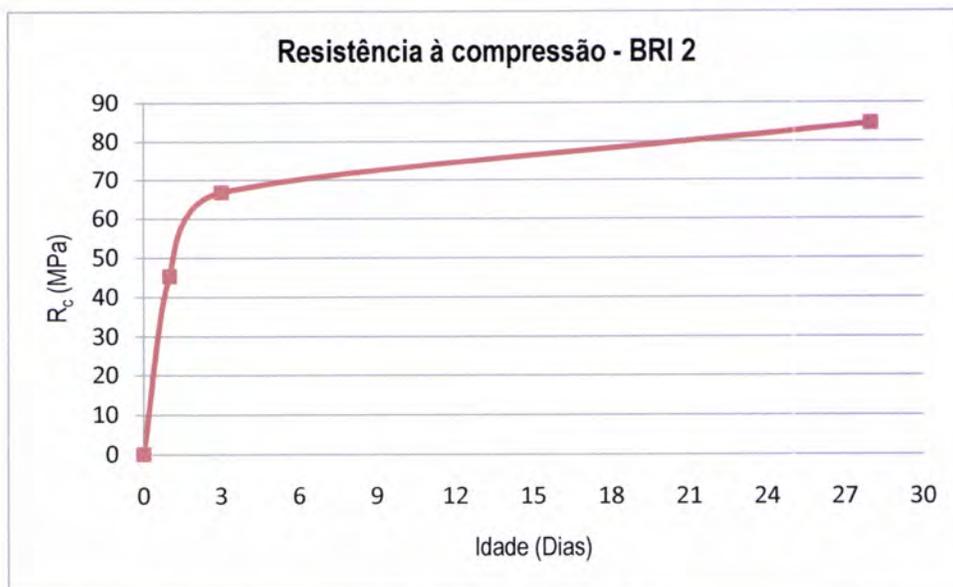


Figura 31 - Resistência à compressão da argamassa BRI 2.

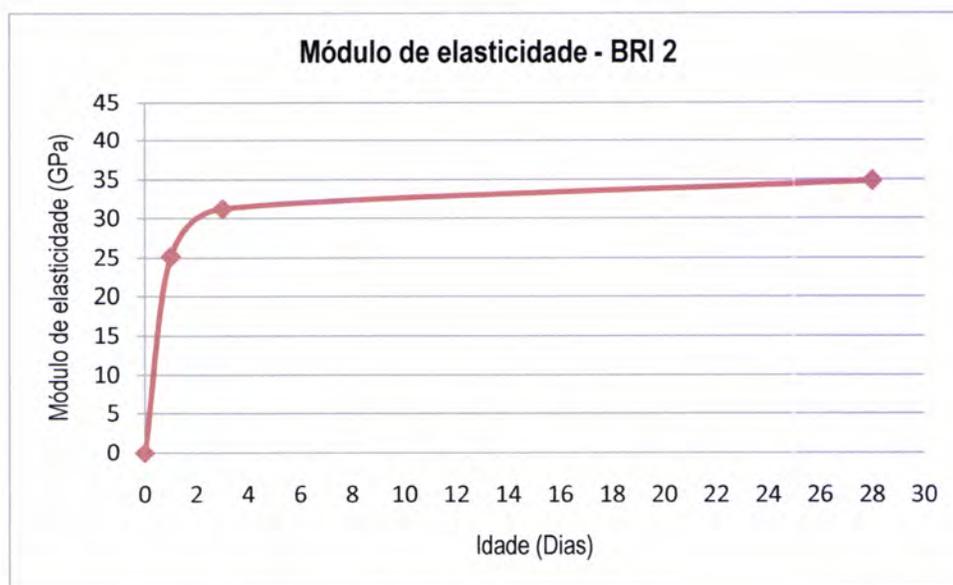


Figura 32 - Módulo de elasticidade médio da argamassa BRI 2.

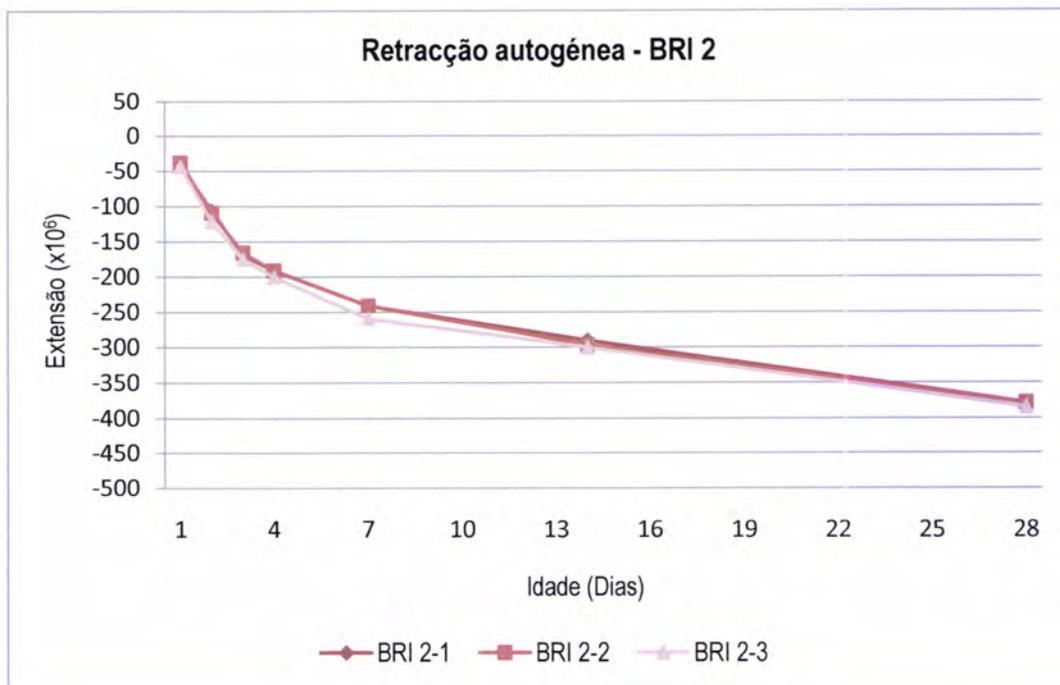


Figura 33 - Retracção autogénea dos provetes da argamassa BRI 2.

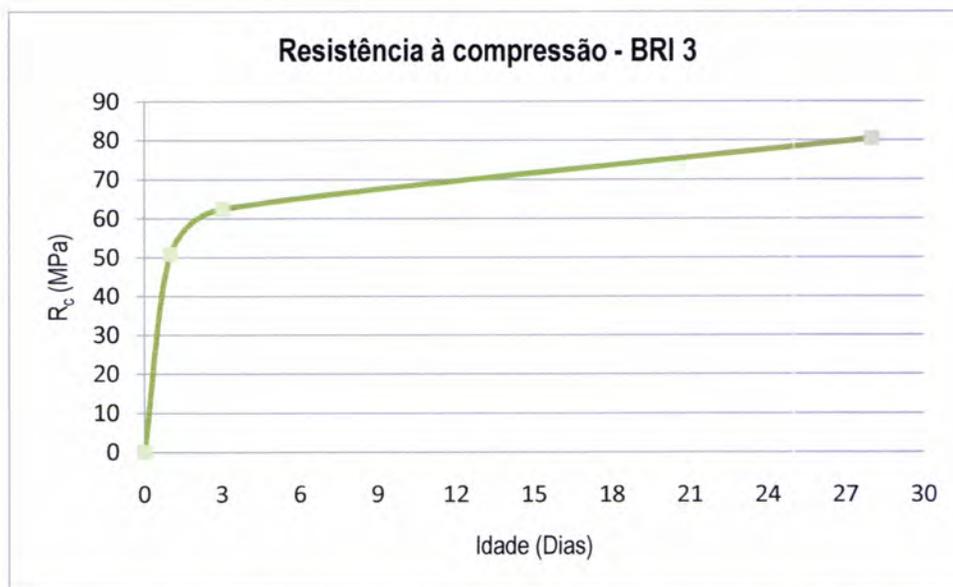


Figura 34 - Resistência à compressão da argamassa BRI 3.

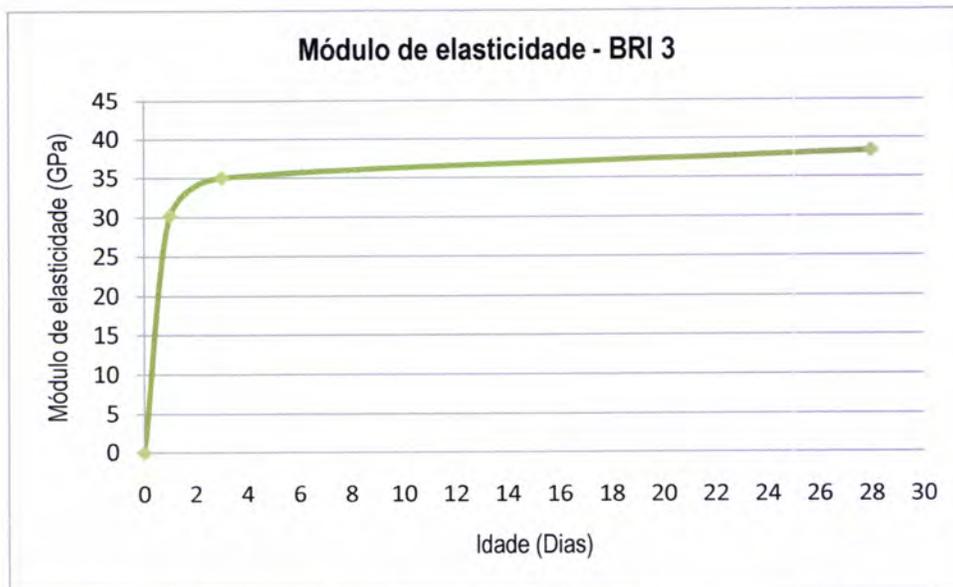


Figura 35 - Módulo de elasticidade médio da argamassa BRI 3.

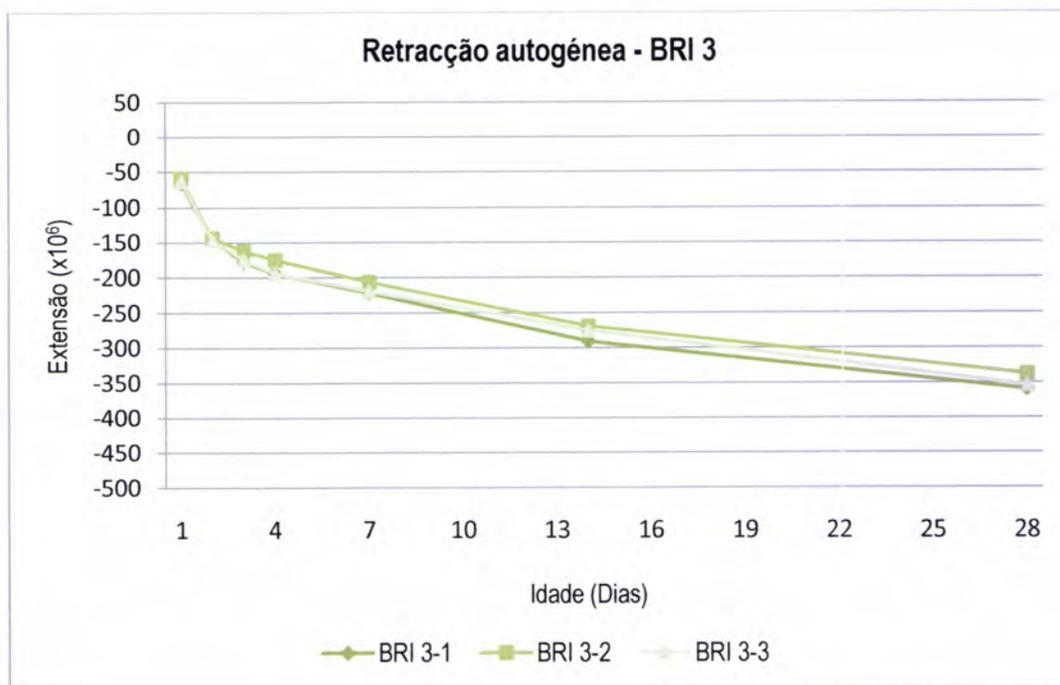


Figura 36 - Retracção autogénea dos provetes da argamassa BRI 3.

Relativamente às variações de massa registadas no quadro 63 no Anexo X, obteve-se um máximo de 0,5 gramas para a mistura BRI 1, 0,7 gramas para a mistura BRI 2 e 0,19 gramas para a mistura BRI 3, o que representa 0,08%, 0,11% e 0,03%, das respectivas massas.

4.4. Resultados obtidos na argamassa com agregado natural (NAT).

Para as argamassas com agregado natural, encontram-se em seguida os valores relativos aos ensaios de resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade e retracção autógena, respectivamente nas figuras 37, 38 e 39, para a mistura NAT 1, nas figuras 40, 41 e 42, para a mistura NAT 2 e nas figuras 43, 44 e 45 para a mistura NAT 3.

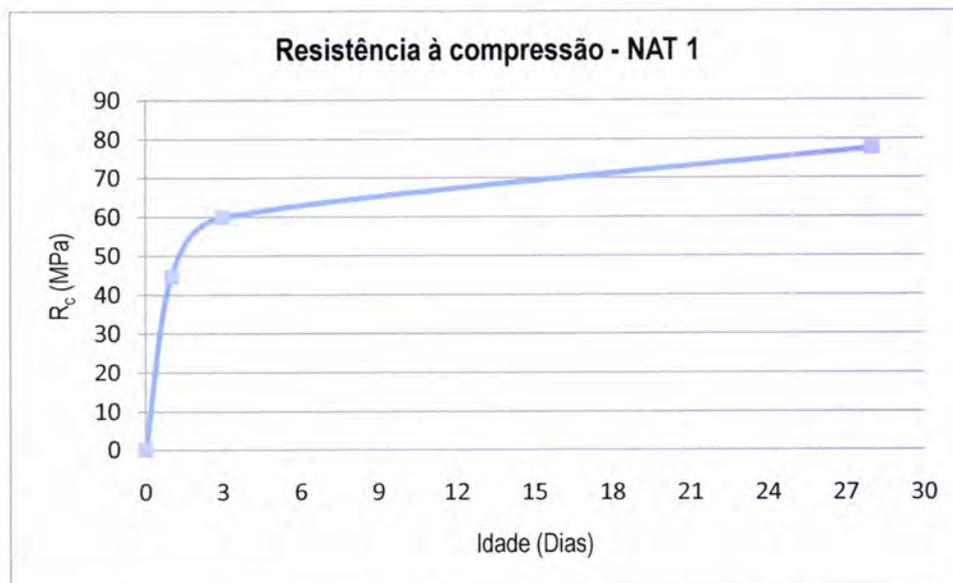


Figura 37 - Resistência à compressão da argamassa NAT 1.

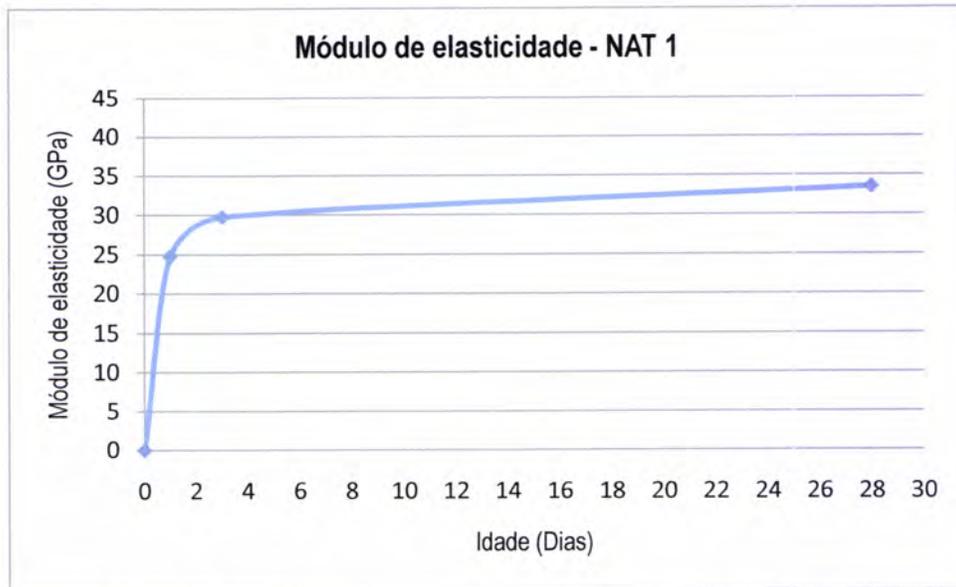


Figura 38 - Módulo de elasticidade médio da argamassa NAT 1.

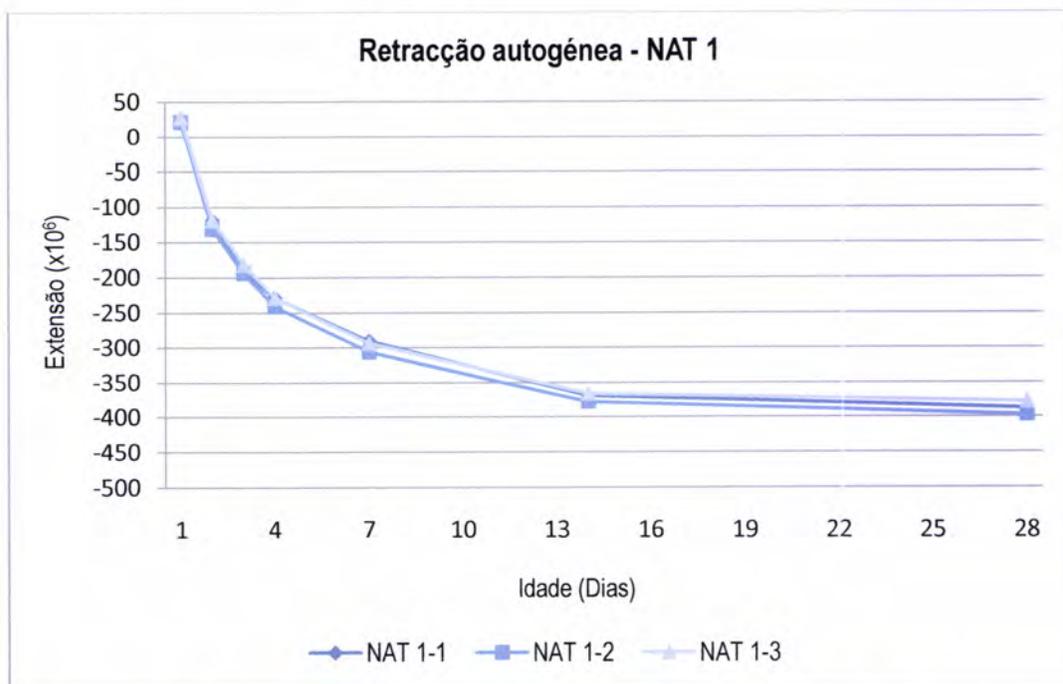


Figura 39 - Retracção autogénea dos provetes da argamassa NAT 1.

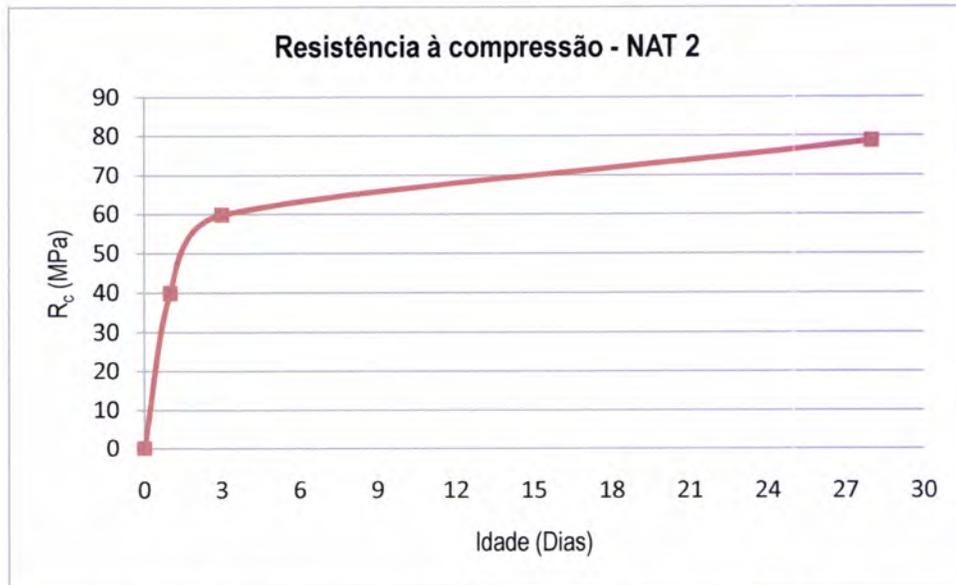


Figura 40 - Resistência à compressão da argamassa NAT 2.

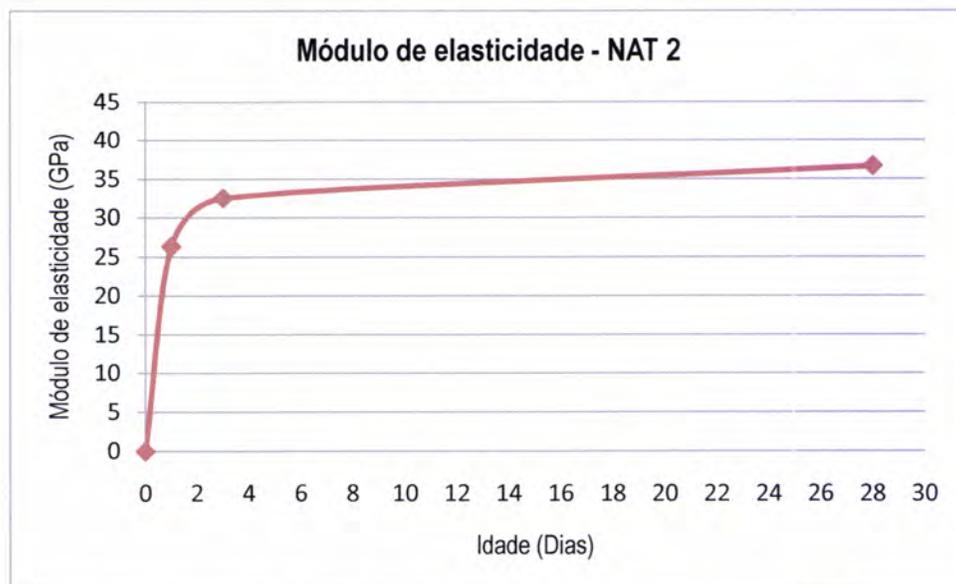


Figura 41 - Módulo de elasticidade médio da argamassa NAT 2.

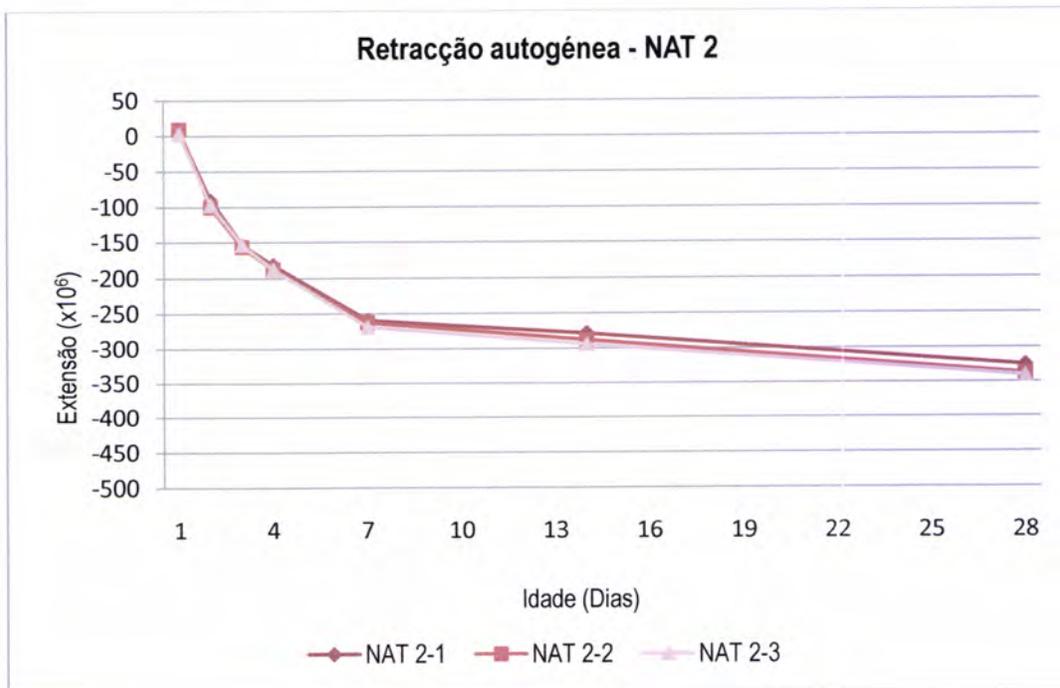


Figura 42 - Retracção autogénea da dos provetes da argamassa NAT 2.

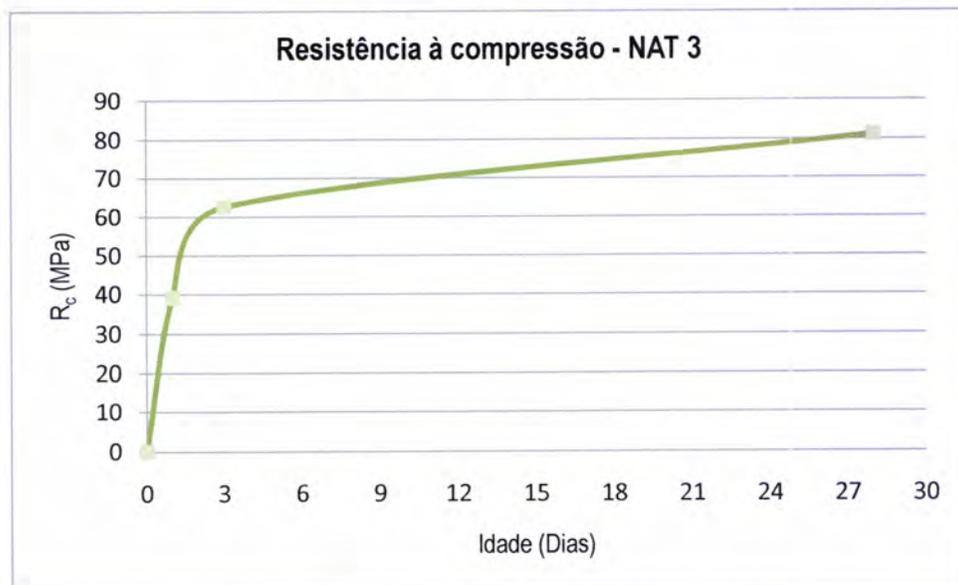


Figura 43 - Resistência à compressão da argamassa NAT 3.

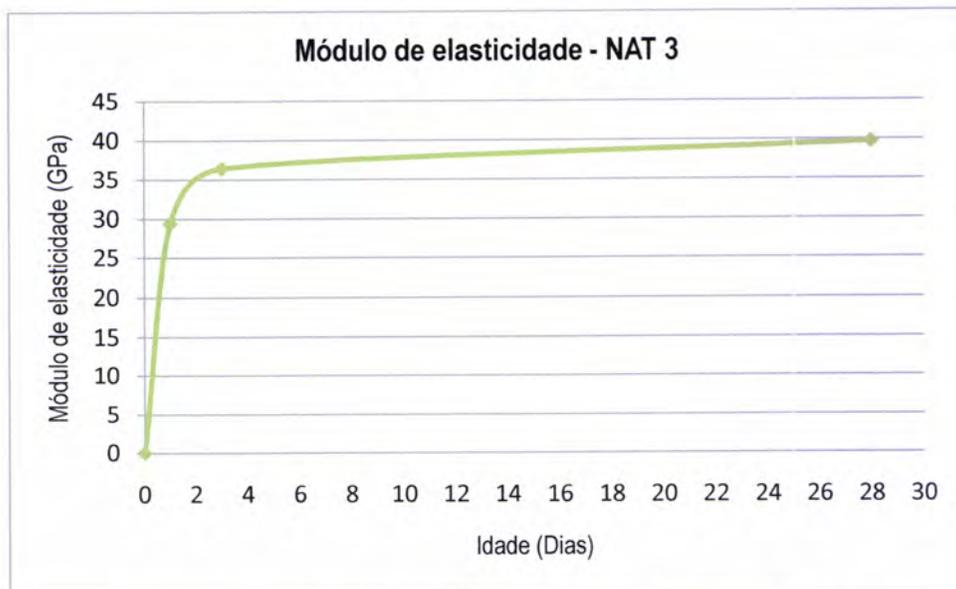


Figura 44 - Módulo de elasticidade médio da argamassa NAT 3.

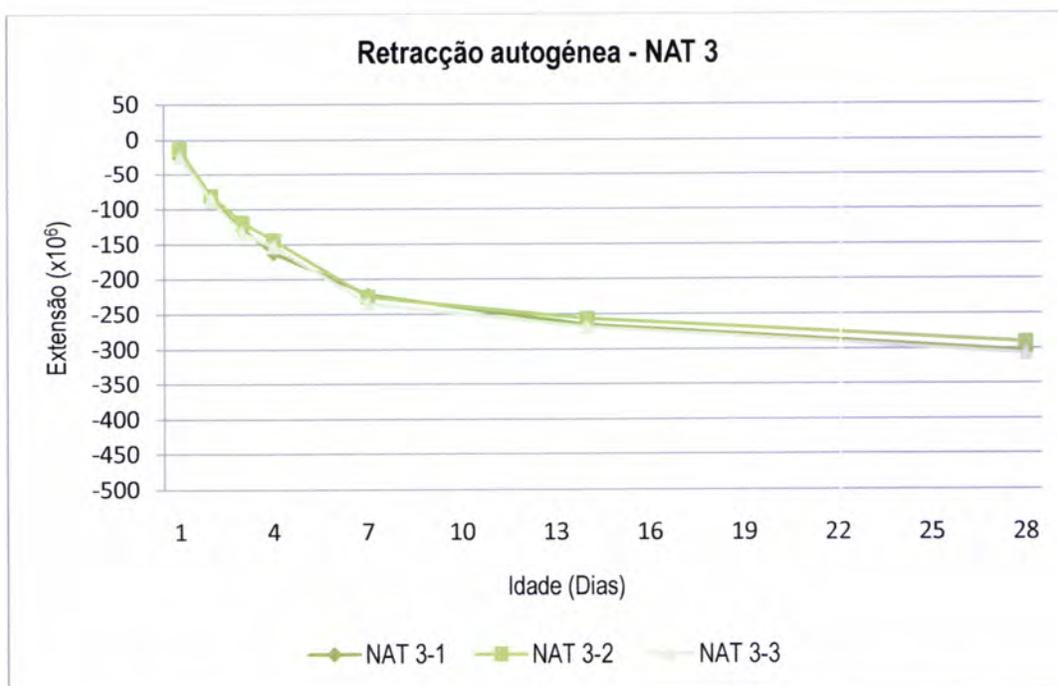


Figura 45 - Retraccção autogénea dos provetes da argamassa NAT 3.

Obtiveram-se nestas misturas variações máximas de massa de 0,11 gramas, 0,22 gramas e 0,35 gramas para as misturas NAT 1, NAT 2 e NAT 3, respectivamente, o que representa 0,02%, 0,04% e 0,06% da massa média dos provetes.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Através dos resultados obtidos procede-se neste capítulo à respectiva análise, com a finalidade de avaliar o efeito do agregado na diminuição da retracção de misturas cimentícias.

Como referido anteriormente, foram preparadas sete misturas, uma correspondente à pasta de referência, sem agregado na sua composição, e seis argamassas que contêm, duas a duas, distinto volume de agregado. Cada um destes pares de argamassas era composto por uma argamassa com agregado britado e outra com agregado natural.

Através dos resultados médios obtidos no ensaio de retracção autogénea das misturas, na figura 46 procede-se à análise dos mesmos.

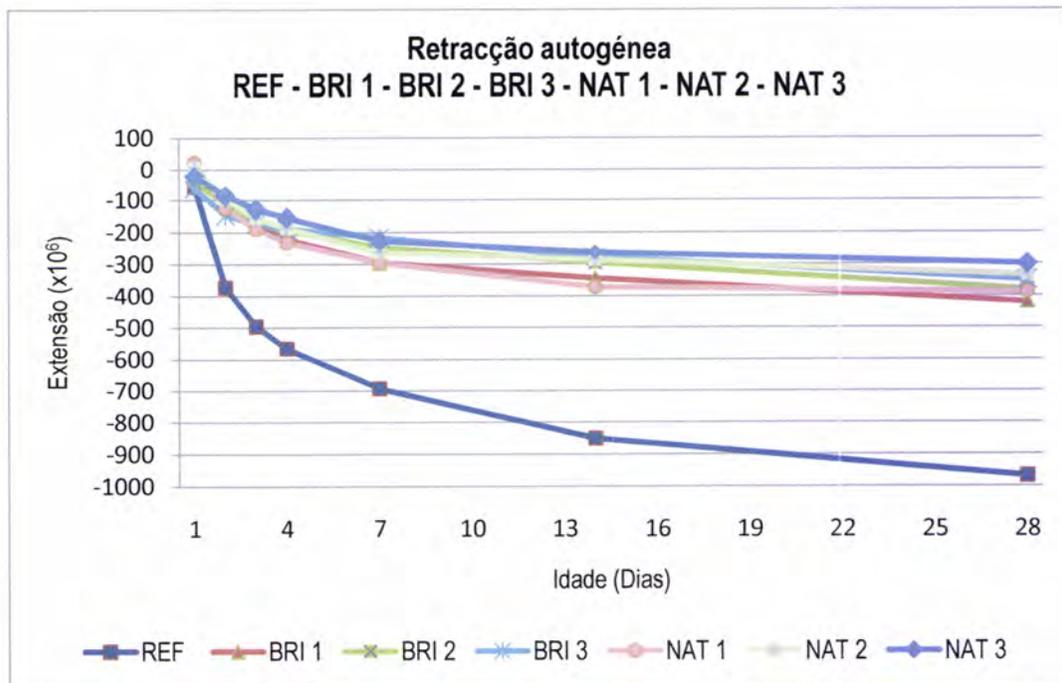


Figura 46 - Retracção autogénea das misturas REF, BRI 1, BRI 2, BRI 3, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.

Como esperado, da análise da figura 46 verifica-se que com a adição de agregado na pasta a retracção autogénea diminui significativamente, uma vez que este não é fonte de retracção autogénea e vai restringir a deformação da pasta de cimento.

Se ao introduzir agregado na composição das argamassas a retracção autogénea diminui, então ao aumentar a concentração de volume do mesmo também vai resultar numa redução adicional da mesma. O aumento da concentração de volume de agregado provoca não só uma diminuição do volume de pasta, que é a fonte da retracção, mas também um aumento das restrições à deformação da pasta de cimento.

Para avaliar em pormenor o efeito da variação da concentração de volume de agregado na retracção autogénea das misturas em estudo, nas figuras 47 e 48 encontram-se a análise comparativa entre as misturas com agregado britado e natural, respectivamente.

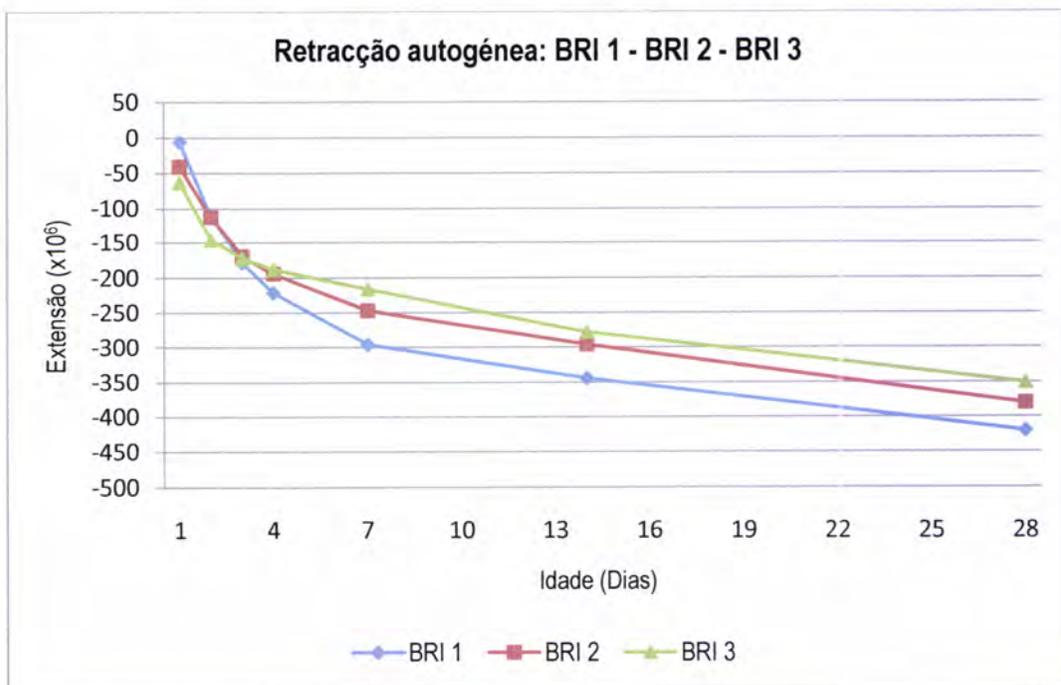


Figura 47 - Comparação dos valores do ensaio de retracção autogénea das misturas BRI 1, BRI 2 e BRI 3.

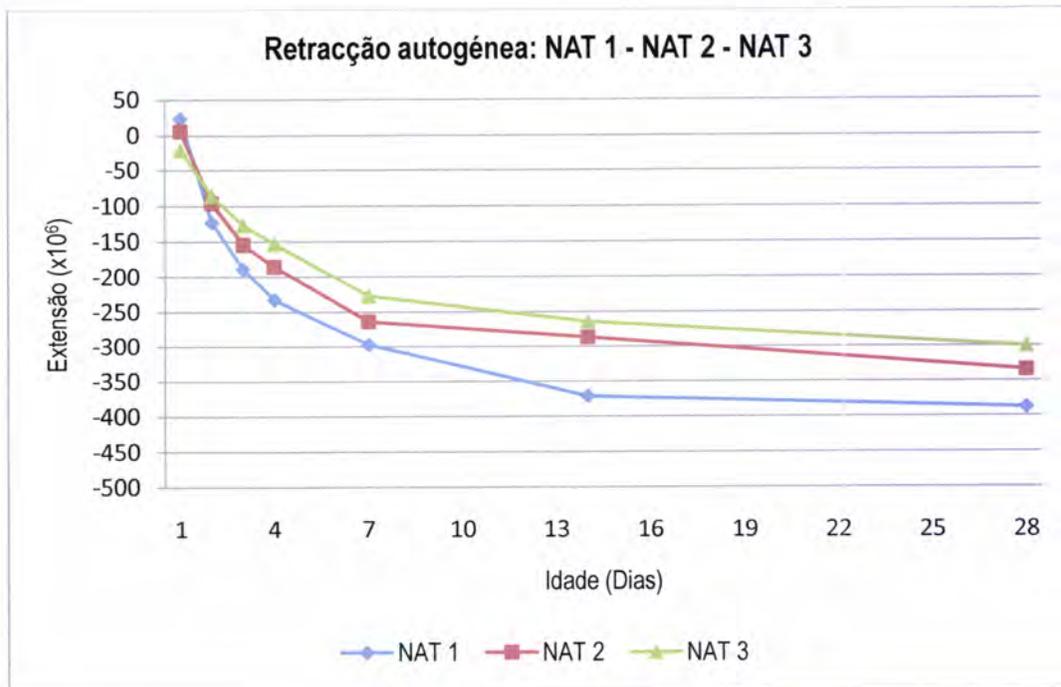


Figura 48 - Comparação dos valores do ensaio de retração autogénea das misturas NAT 1, NAT 2 e NAT 3.

Da análise das figuras 47 e 48 verificou-se que os resultados obtidos vão de encontro ao que é esperado teoricamente. Para as misturas com agregado britado e natural, ao aumentar a concentração de volume de agregado, para a mesma razão A / C, os resultados obtidos evidenciam uma redução da retração autogénea.

Uma ressalva deve ser feita para os resultados a idades muito jovens, nomeadamente relativos às medições a 1 dia. Neste caso a retração autogénea é maior quando cresce o volume de agregado, e portanto em sentido contrário ao suposto. Apesar de os valores serem muito baixos, quase da ordem de grandeza da incerteza da medição, este fenómeno deve estar relacionado com a absorção de água pelos agregados. Efectivamente, os agregados foram introduzidos secos na misturadora, e apesar de a absorção ser pequena, ela permite reduzir a razão A/C da água livre na pasta. Desta forma, quanto maior o volume de agregado maior o consumo de água e, portanto, maior a retração autogénea. No entanto, este é um efeito de segunda ordem, que se dissipa quando os valores da retração sobem, evidenciando assim posteriormente o principal efeito dos agregados na retração.

Os dois tipos diferentes de agregado utilizados, nomeadamente agregado britado e agregado natural, apresentam diferenças ao nível do módulo de elasticidade, natureza,

forma, absorção de água e massa volúmica. Os resultados obtidos podem ser analisados atendendo a estas propriedades do agregado britado e natural, uma vez que a pasta utilizada em todas as argamassas era idêntica. Neste sentido, as figuras 49, 50 e 51 que se seguem ilustram a relação entre as misturas BRI 1 / NAT 1, BRI 2 / NAT 2 e BRI 3 / NAT 3.

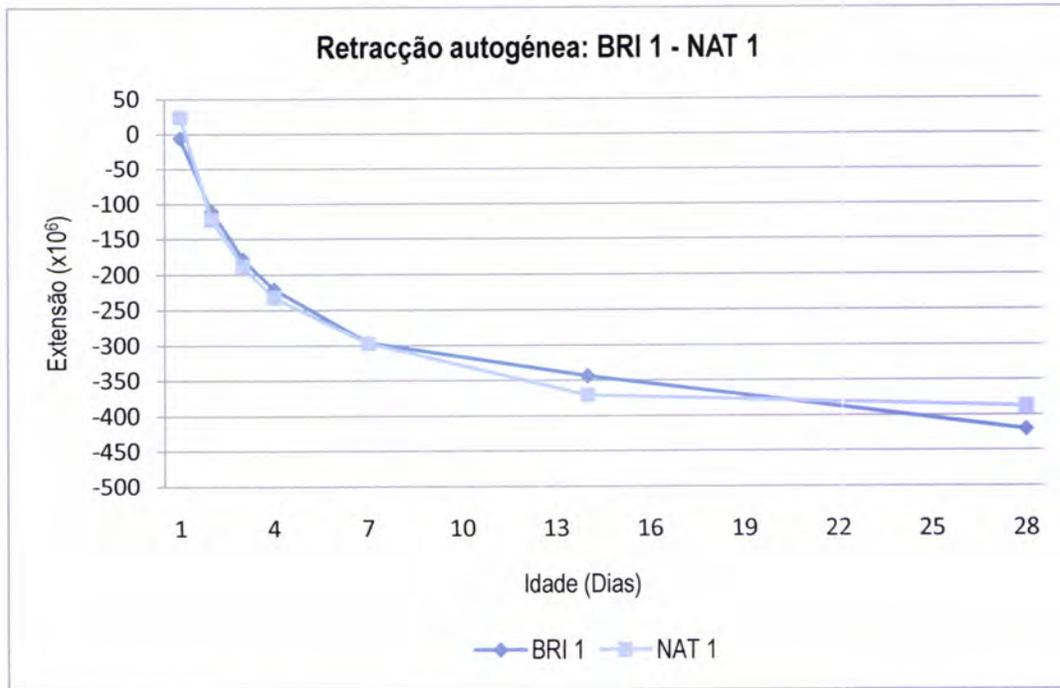


Figura 49 - Comparação dos valores do ensaio de retração autogénea das misturas BRI 1, NAT 1.

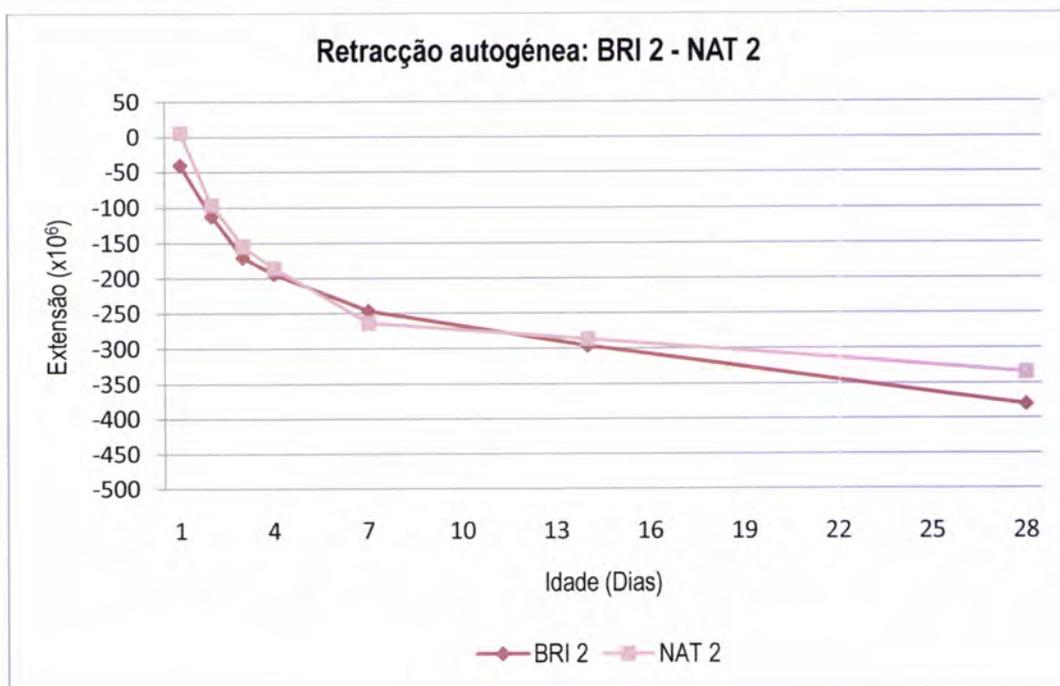


Figura 50 - Comparação dos valores do ensaio de retração autogénea das misturas BRI 2, NAT 2.

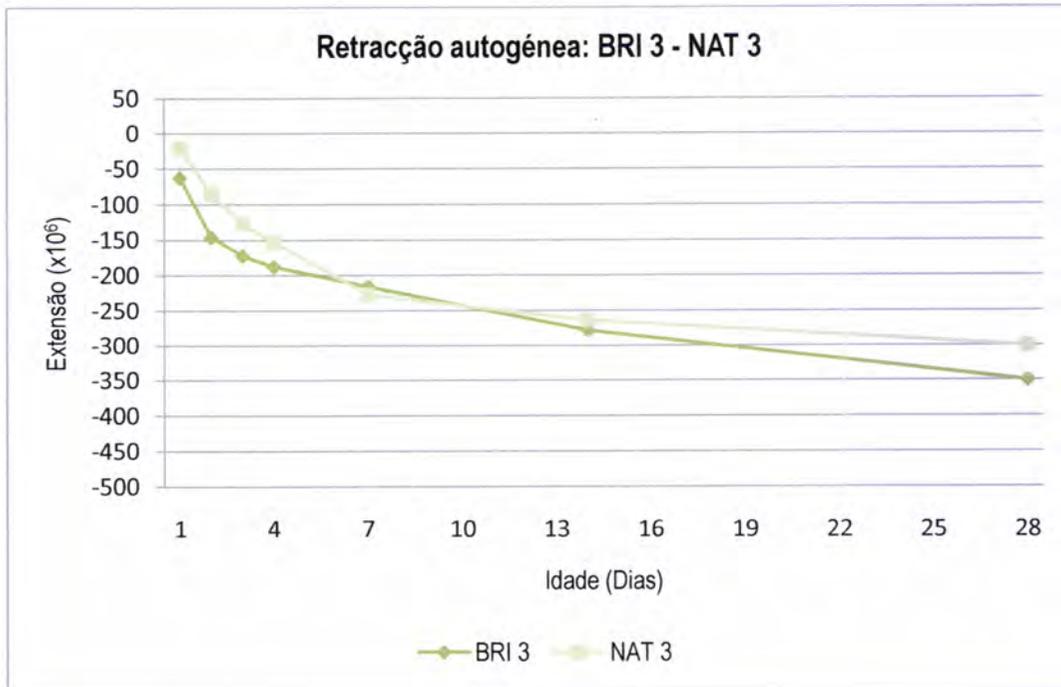


Figura 51 - Comparação dos valores do ensaio de retracção autogénea das misturas BRI 3, NAT 3.

Após a análise das figuras 49, 50 e 51 constatou-se que as misturas que apresentam agregado natural na sua composição, aos 28 dias de idade, exibem uma extensão um pouco menor do que as argamassas com agregado britado. Este facto ficará a dever-se ao maior módulo de elasticidade do agregado natural. Logo, ao apresentar maior rigidez vai ter maior influência na retracção autogénea, uma vez que esta limita as deformações provenientes do processo de autodessecação da pasta de cimento.

Relativamente ao módulo de elasticidade das misturas, é de esperar que através da adição de agregado na sua constituição este aumente. Uma vez que o módulo de elasticidade do agregado é maior que o módulo de elasticidade da pasta de cimento, vai proporcionar à argamassa maior rigidez. Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade estão apresentados na figura 52.

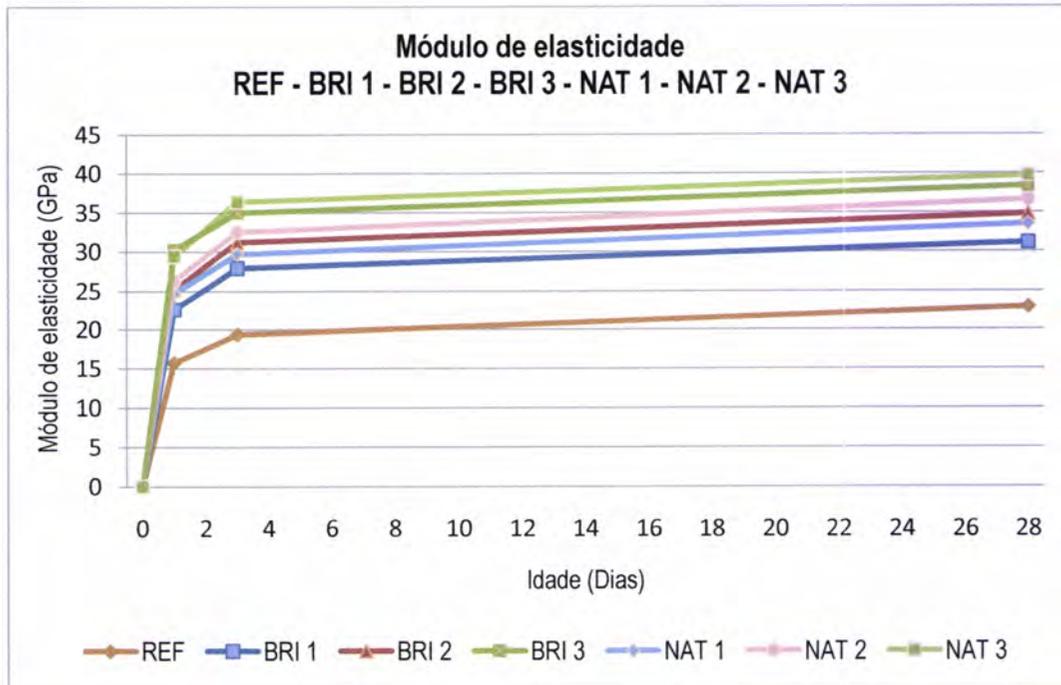


Figura 52 - Módulo de elasticidade das misturas REF, BRI 1, BRI 2, BRI 3, NAT 1, NAT 2 e NAT3.

Como esperado, através da análise do gráfico verifica-se que com a adição de agregado o módulo de elasticidade aumenta.

Tendo em conta que o módulo de elasticidade da argamassa depende do módulo de elasticidade do agregado, é de esperar que as argamassas com agregado natural apresentem módulo de elasticidade superior ao das argamassas com agregado britado. As figuras 53, 54 e 55 seguintes mostram essa análise comparativa entre as misturas com o mesmo teor de agregado mas com agregado diferente.

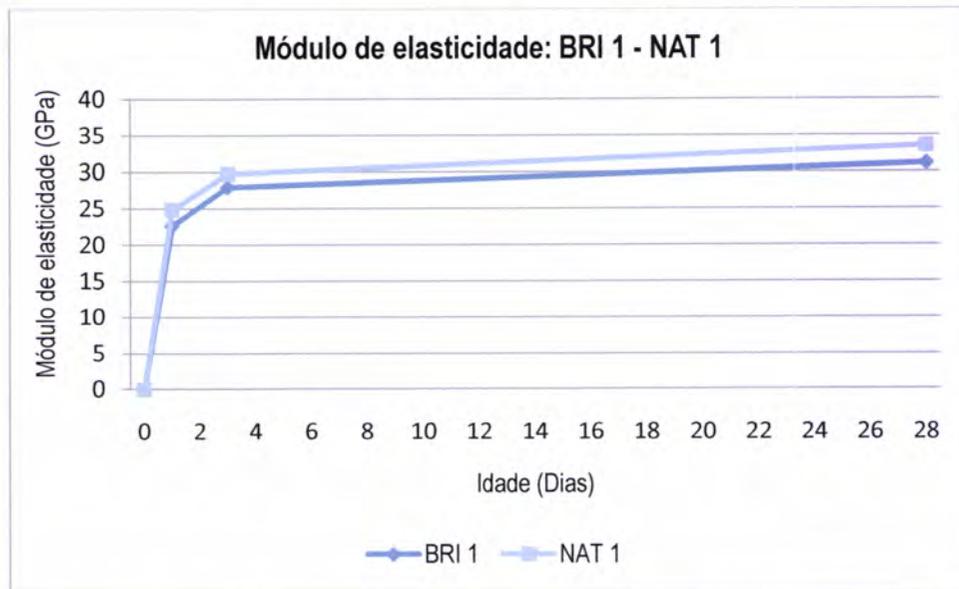


Figura 53 - Comparação dos valores do ensaio de módulo de elasticidade das misturas BRI 1, NAT 1.

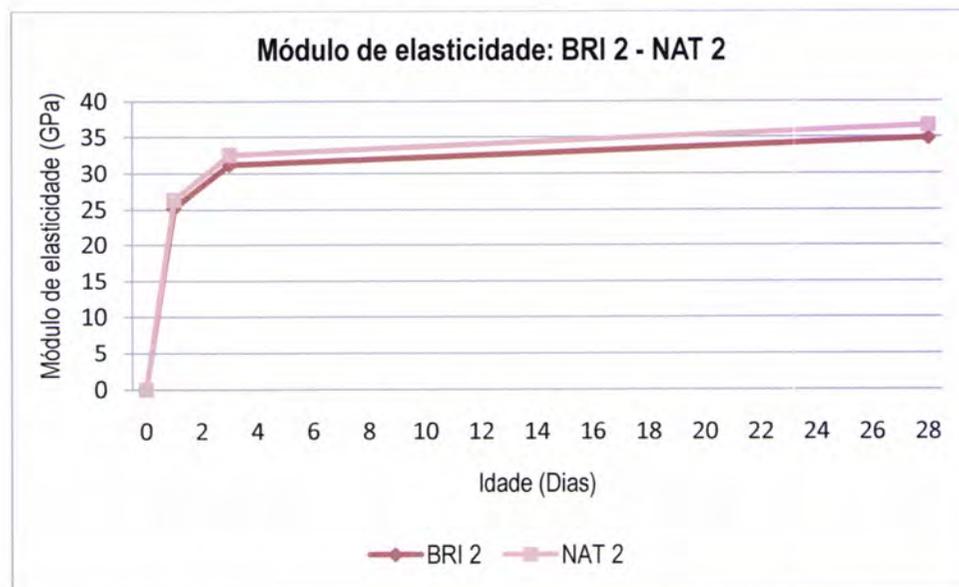


Figura 54 - Comparação dos valores do ensaio de módulo de elasticidade das misturas BRI 2, NAT 2.

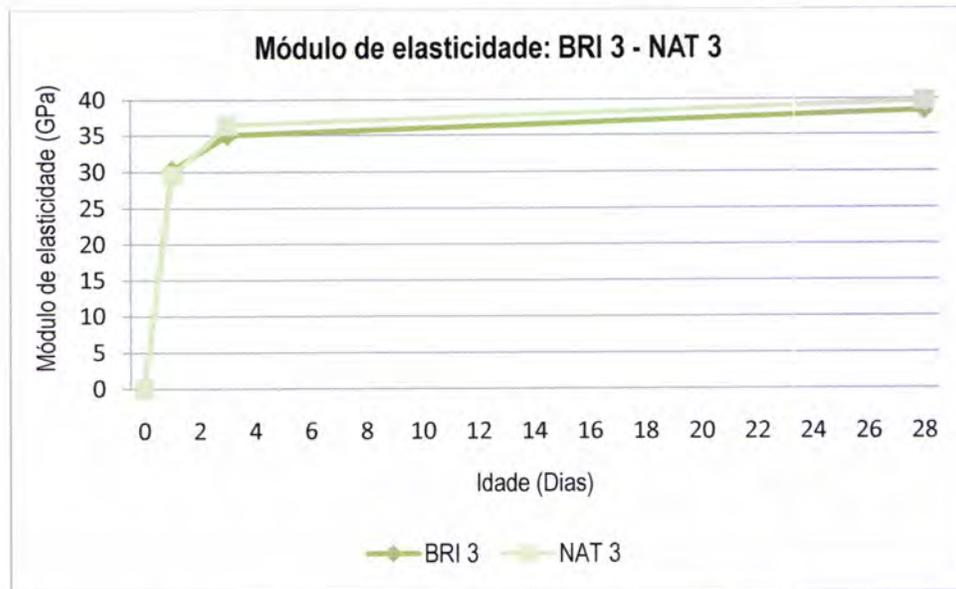


Figura 55 - Comparação dos valores do ensaio de módulo de elasticidade das misturas BRI 3, NAT 3.

Os resultados obtidos vão de encontro ao esperado, ou seja, as argamassas com agregado natural apresentam maior módulo de elasticidade que as argamassa com agregado britado. Note-se, porém, que o módulo de elasticidade do agregado britado foi determinado experimentalmente através de amostras da rocha original, por outro lado o módulo de elasticidade do agregado natural foi estimado com base na natureza do material. Os resultados obtidos nas argamassas vêm, assim, suportar a estimativa efectuada.

Apesar de existirem diferenças na retracção autogénea das argamassas produzidas com os dois tipos de agregado, verifica-se que elas são relativamente pequenas, tal como o foram as diferenças no módulo de elasticidade. Já o mesmo não acontece quando a comparação é feita em termos do volume de agregado e em vez do tipo de agregado, como se viu anteriormente.

5.1. Cálculo dos valores teóricos de retracção autógena das misturas cimentícias

Através dos ensaios de retracção autógena para as argamassas em estudo, obtiveram-se os valores reais desta. Estes resultados encontram-se no Anexo IX.

Com recurso a um modelo de cálculo proposto por Hobbs, na década de 70, foram determinados os valores teóricos de retracção autógena. Este modelo de cálculo permite determinar a retracção das misturas, tendo em conta a sua concentração de volume de agregado [4 e 5].

A comparação dos valores teóricos, obtidos por aplicação do modelo de cálculo proposto por Hobbs com os valores reais permite verificar a adequação deste modelo às misturas cimentícias produzidas actualmente.

Os parâmetros considerados no modelo de cálculo de Hobbs são o volume de agregado e a rigidez dos seus constituintes [4].

Em seguida apresentam-se as equações propostas por este modelo de cálculo para determinar os valores teóricos de retracção [5]:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = 1 - V_a \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - V_a}{\left(\frac{E_a}{E_p} - 1\right) \times V_a + 1} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{(1 - V_a) \times \left(\frac{K_a}{K_p} + 1\right)}{1 + \left(\frac{K_a}{K_p}\right) + V_a \times \left(\frac{K_a}{K_p} - 1\right)} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde,

ε_c – Retracção autógena do betão;

ε_p – Retracção autógena da pasta de referência;

V_a – Volume de concentração de agregado;

E_a – Módulo de elasticidade do agregado;

E_p – Módulo de elasticidade da pasta de referência;

K_a – Módulo volumétrico de elasticidade do agregado;

$$K_a = \frac{E_a}{3 \times (1 - 2 \times \mu)} \quad (Eq. 8)$$

K_p – Módulo volumétrico de elasticidade da pasta de referência;

$$K_p = \frac{E_p}{3 \times (1 - 2 \times \mu)} \quad (Eq. 9)$$

μ - Coeficiente de Poisson.

Analisando as equações 5, 6 e 7 constata-se que na equação 5 o único parâmetro é o volume de agregado, enquanto que na equação 6 existem já mais dois parâmetros, os módulos de elasticidade da pasta e do agregado, e finalmente a equação 7 contém 5 parâmetros, que incluem também os coeficientes de Poisson da pasta e do agregado.

Nas secções que se seguem, 5.3.1 e 5.3.2, são calculados os valores teóricos de retracção autógena através do modelo de cálculo de Hobbs, para a pasta de referência, a qual não tem agregado na sua constituição, e para as argamassas que apresentam agregado na sua constituição, designadamente BRI 1, BRI 2, BRI 3, NAT 1, NAT 2 e NAT 3. Numa primeira análise foram determinados os valores teóricos através das equações 5, 6 e 7, com o intuito de verificar qual das equações apresenta valores mais próximos dos resultados obtidos através de ensaio.

Para facilitar a análise calculam-se os valores de retracção teóricos da argamassa de referência em conjunto com as argamassas com agregado britado e com as argamassas com agregado natural.

5.3.1. Pasta de referência (REF) e misturas com agregado britado (BRI)

Numa primeira fase foram aplicadas as equações 5, 6 e 7 na determinação dos valores teóricos da retracção para a pasta de referência e para as misturas que apresentam agregado britado na sua constituição (BRI 1, BRI 2 e BRI 3), com o objectivo de comparar graficamente os resultados obtidos nas equações com os valores reais medidos nos

ensaios, e analisar qual das equações apresenta resultados mais próximos dos resultados reais.

Os dados utilizados relativos à aplicação das equações encontram-se no Anexo XI.

Após o cálculo dos valores teóricos de retração autogénea para a pasta de referência e para as misturas com agregado britado e tendo em conta os valores reais obtidos através de ensaio, foram obtidos para os dias 1, 3 e 28 as figuras 56, 57 e 58 que se seguem. Os resultados obtidos encontram-se indicados no Anexo XII.

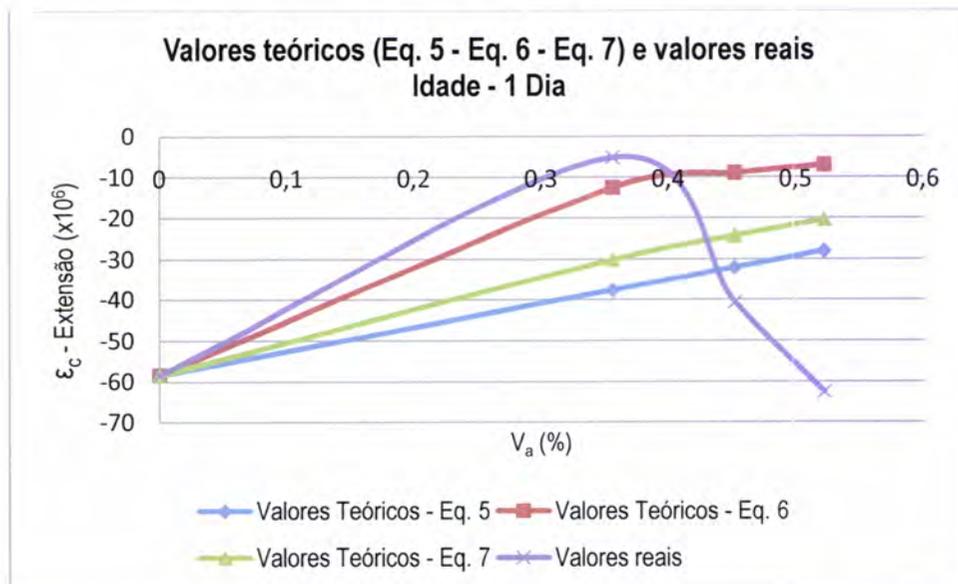


Figura 56 - Valores teóricos obtidos pelas equações 5, 6 e 7 e os valores reais, para 1 dia de idade.

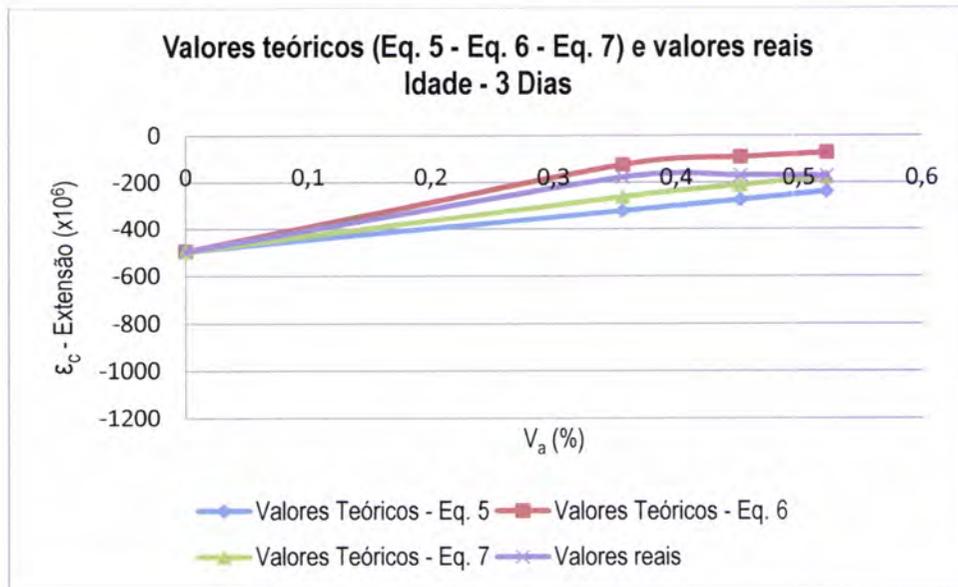


Figura 57 – Valores teóricos obtidos pelas equações 5, 6 e 7 e os valores reais, para 3 dia de idade.

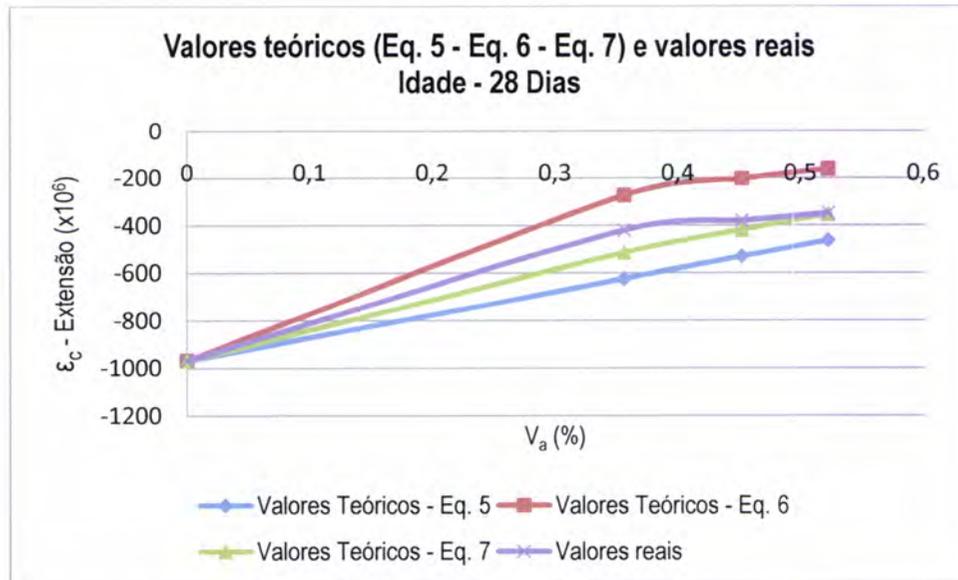


Figura 58 – Valores teóricos obtidos pelas equações 5, 6 e 7 e os valores reais, para 28 dia de idade.

Na figura 56 observa-se uma grande discrepância entre os valores teóricos e os valores reais, provavelmente devido ao efeito da absorção de água pelos agregados, já aventado anteriormente. No primeiro dia de idade, que traduz apenas a deformação ocorrida entre as

18 e as 24 horas, a pasta de referência e as argamassas apresentam ainda extensões relativamente baixas, onde não são desprezáveis os erros associados à incerteza da medição e o efeito de ligeiras variações na água livre.

Da análise das figuras 57 e 58 constata-se que a equação 7 apresenta a melhor estimativa dos valores reais. Saliente-se que os valores do coeficiente de Poisson introduzidos nas equações para se obterem os gráficos 57 e 58 foram valores estimados, respectivamente de 0,20 e 0,15 para a argamassa e para os agregados. Esta equação 7 é a proposta por Hobbs [5].

Dos gráficos resulta que o modelo proposto por Hobbs, e que inclui parâmetros relacionados com a deformabilidade dos materiais constituintes, permite uma melhor aproximação da estimativa aos valores reais.

Propriedades como a natureza, a granulometria, a forma, a dimensão do agregado não estão contempladas na equação 7. Mesmo assim, a diferença entre os valores teóricos e os reais é pequena, o que sugere que elas não são preponderantes para a retracção autógena das misturas cimentícias.

De modo a analisar em maior pormenor as estimativas obtidas através da equação 7, por comparação com os resultados reais, seguem-se as figuras 59, 60 e 61.

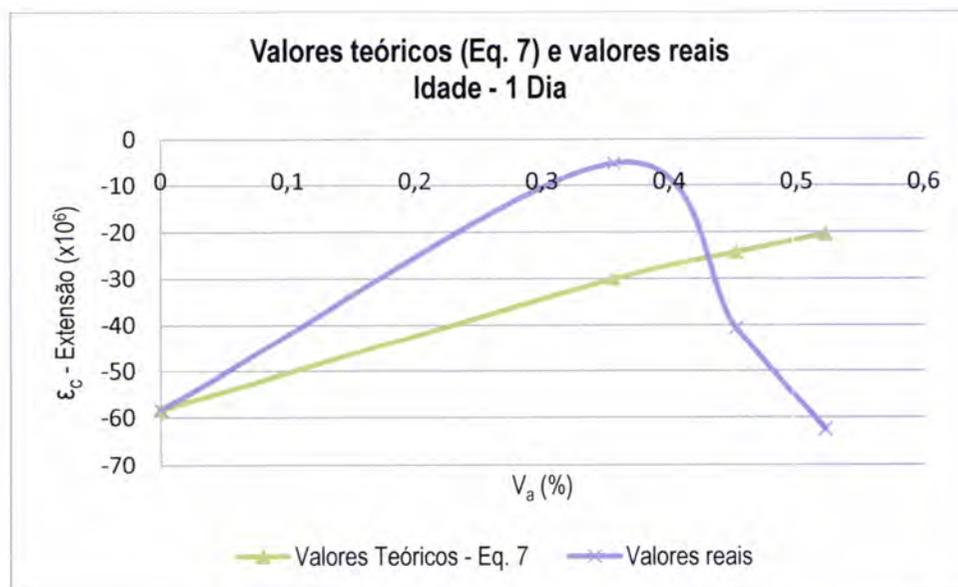


Figura 59 – Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autógena para as misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 1.

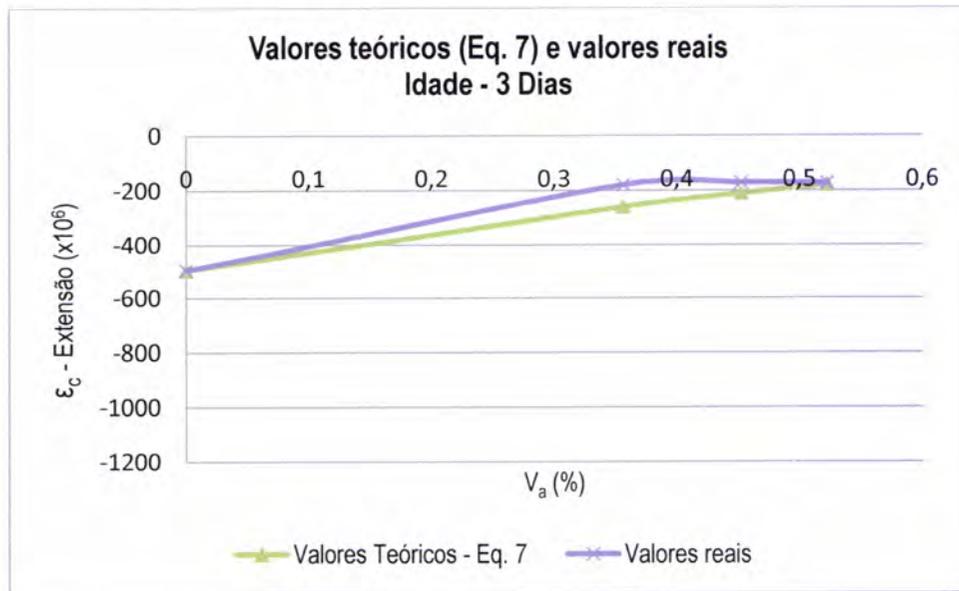


Figura 60 – Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retração autogénea para as misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 3.

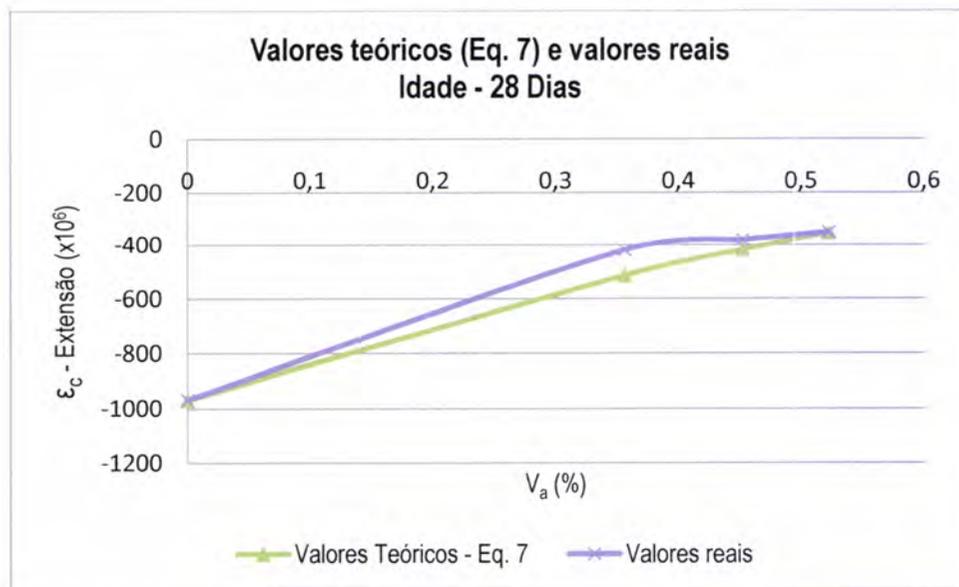


Figura 61 – Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retração autogénea para as misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 28.

Como referido anteriormente, os valores relativos dia 1 indicam os valores da retração ao fim de apenas 6 horas e reflectem também o efeito da absorção, pelo que é natural que apresentem uma dispersão assinalável dado que são afectados por factores não associados às propriedades dos agregados incluídas no modelo.

Nas figuras 60 e 61 verifica-se que a função teórica apresenta um comportamento regular e semelhante aos valores reais. Apesar disso, os valores reais nunca ultrapassam os valores teóricos, sugerindo que existe uma tendência para que a retracção real seja inferior à estimada teoricamente.

Uma causa provável para este comportamento relativo reside nas diferenças entre os betões produzidos na década de 70, quando o modelo de Hobbs foi proposto, e os betões actuais.

Os betões recentes, com menor razão A/C e com maior eficiência do cimento são mais resistentes e vão, portanto, ter maior capacidade de mobilizar os agregados, porque a interface pasta-agregado é menos porosa. Desta forma, existe maior restrição à deformação da pasta de cimento. Logo, partindo do pressuposto que o efeito dos agregados é actualmente maior devido à maior resistência dos betões recentes, é proposto neste trabalho uma correcção da equação 7, de modo a obter valores de retracção teóricos mais próximos dos valores reais.

O factor correctivo proposto neste trabalho para a equação 7, e que resulta do melhor ajuste para os resultados reais, é dado pela seguinte equação:

$$V_a = V_a \times \left[-\ln\left(\frac{1}{12 \times V_c}\right) \right] \quad (Eq. 10)$$

onde,

V_c – Volume de concentração de cimento;

Ao introduzir na equação 7 o factor correctivo proposto pela equação 10 obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{[1 - V_a \times (-\ln(\frac{1}{12 \times V_c}))] \times \left(\frac{K_a}{K_p} + 1\right)}{1 + \left(\frac{K_a}{K_p}\right) + [V_a \times (-\ln(\frac{1}{12 \times V_c}))] \times \left(\frac{K_a}{K_p} - 1\right)} \quad (Eq. 11)$$

Com o objectivo de verificar o efeito do factor correctivo proposto, procedeu-se novamente ao cálculo dos valores teóricos de retracção autógena da pasta de referência e das misturas com agregado britado. Os dados relativos aos parâmetros em estudo da equação 11 encontram-se esquematizados no Anexo XI.

Os resultados obtidos da aplicação da equação 11 encontram-se ilustrados nas figuras 62, 63 e 64 que se seguem. No Anexo XIII encontram-se os valores de retração teóricos.

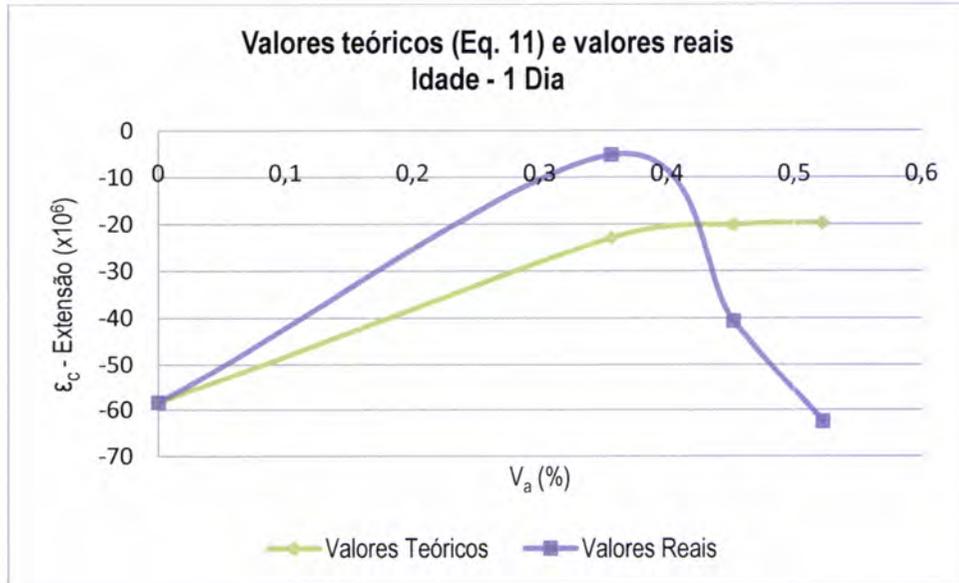


Figura 62 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e valores reais de retração autogênea das misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 1 de idade.

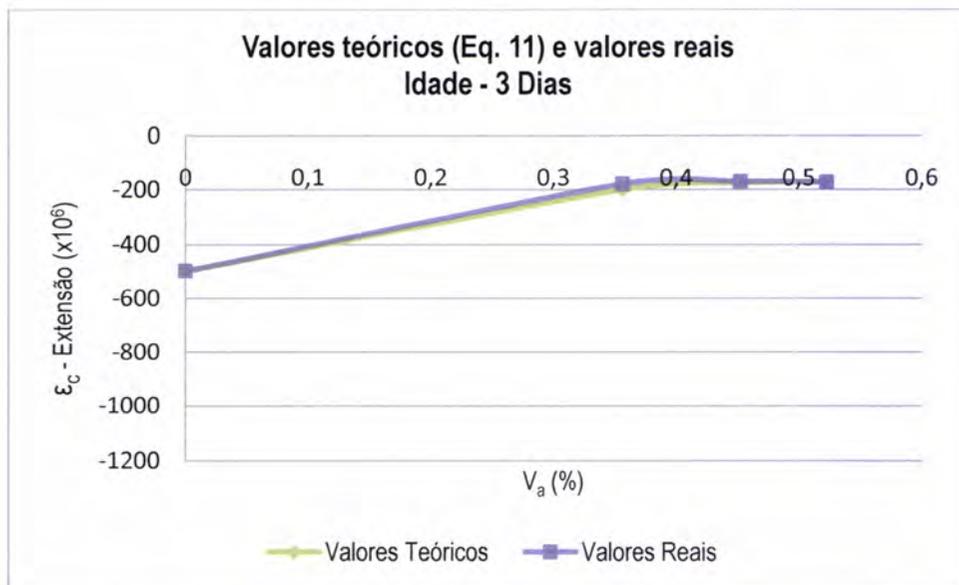


Figura 63 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e valores reais de retração autogênea das misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 3 de idade.

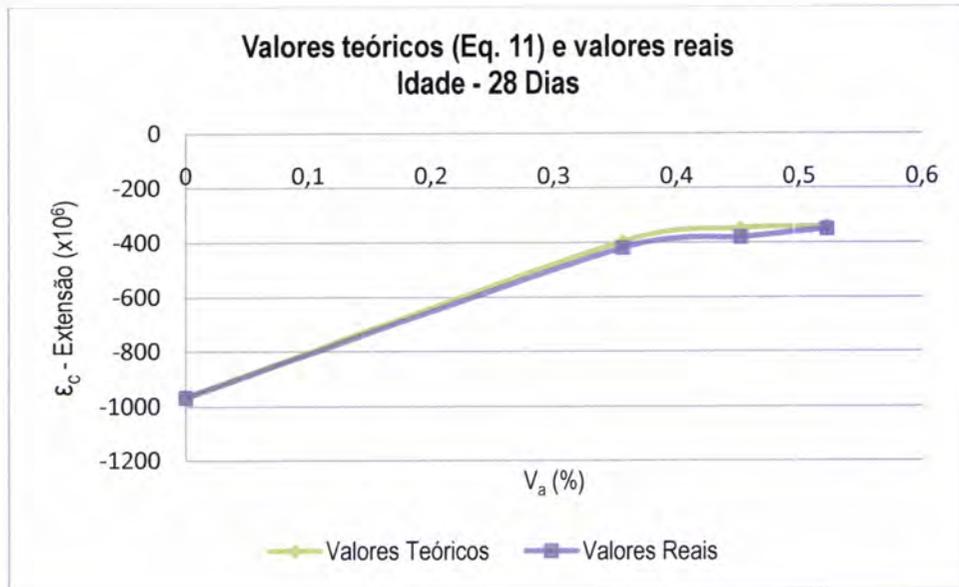


Figura 64 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e valores reais de retração autogénea das misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, no dia 28 de idade.

Da análise das figuras 63 e 64 verifica-se que através da introdução do factor correctivo no modelo de cálculo de Hobbs, a função relativa aos valores teóricos aproxima-se dos valores reais.

Ao relacionar os valores teóricos e os valores reais, antes e após a introdução do factor correctivo no modelo de cálculo proposto por Hobbs, obtiveram-se as figuras 65 e 66, respectivamente.

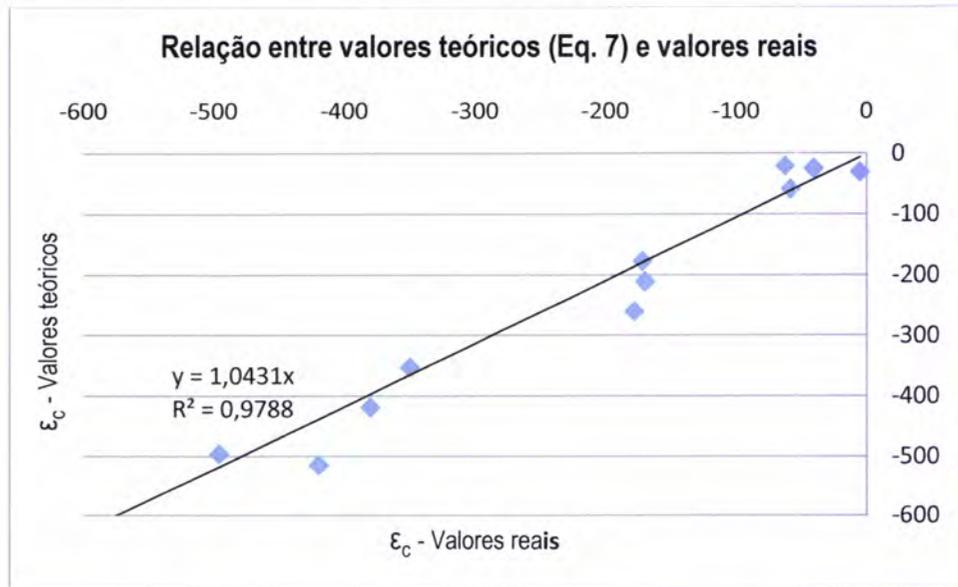


Figura 65 - Relação entre os valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7 e valores reais, para as misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3.

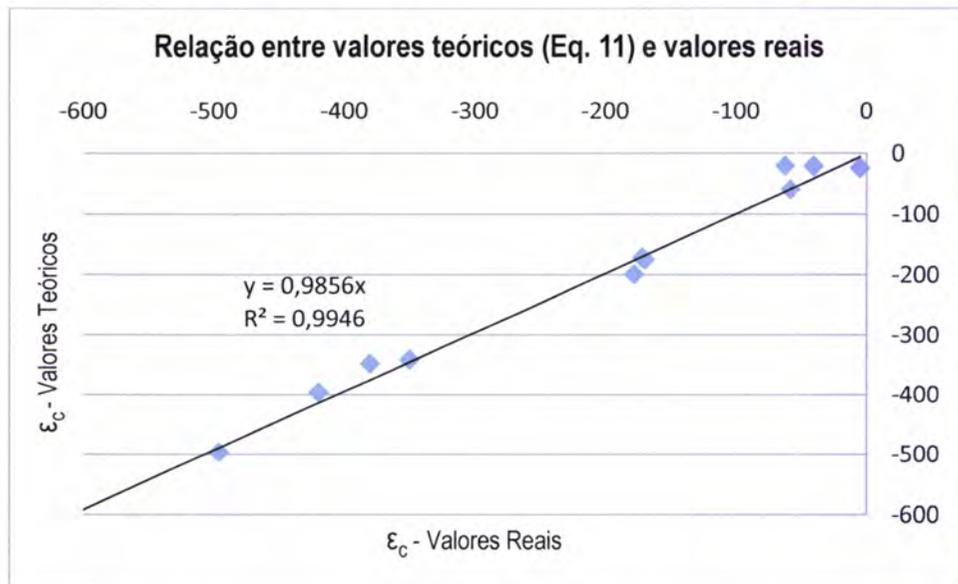


Figura 66 – Relação entre os valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e valores reais, para as misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3.

Ao comparar as figuras 65 e 66, verifica-se que a correcção é útil para a previsão dado que os resultados teóricos de retracção vão estar mais próximos dos valores reais. A validade desta correcção necessita porém ser avaliada através dos resultados obtidos em argamassas fabricadas com outros agregados, uma vez que para esse caso a comparação entre valores teóricos e reais não está viciada pelo ajuste prévio efectuada. Essa comparação é efectuada na secção seguinte.

5.3.2. Pasta de referência (REF) e argamassas com agregado natural (NAT)

Nesta secção apresentam-se comparativamente os resultados obtidos nas argamassas fabricadas com agregado natural e os valores teóricos relativos às misturas cimentícias que apresentam agregado natural na sua composição. Para tal, recorreu-se ao método de cálculo proposto por Hobbs, através da aplicação da equação 7 [5], e posteriormente com recurso ao novo modelo de cálculo proposto no ponto 6.3.1, através da equação 11.

Numa primeira abordagem foram determinados os valores teóricos de retracção autogénea através da equação 7. Os dados necessários das misturas para determinar os valores teóricos da retracção autogénea encontram-se nos quadros do Anexo XIV. Como não era possível determinar o módulo de elasticidade da rocha que deu origem ao agregado natural, o módulo de elasticidade do agregado que foi considerado foi de 130 GPa, dada a sua natureza siliciosa. Usaram-se os coeficientes de Poisson indicados anteriormente.

Após a aplicação da equação 7 e obtidos os resultados teóricos da retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, obtiveram-se as figuras 67, 68 e 69 que se seguem. Os resultados obtidos encontram-se em quadros no Anexo XV.

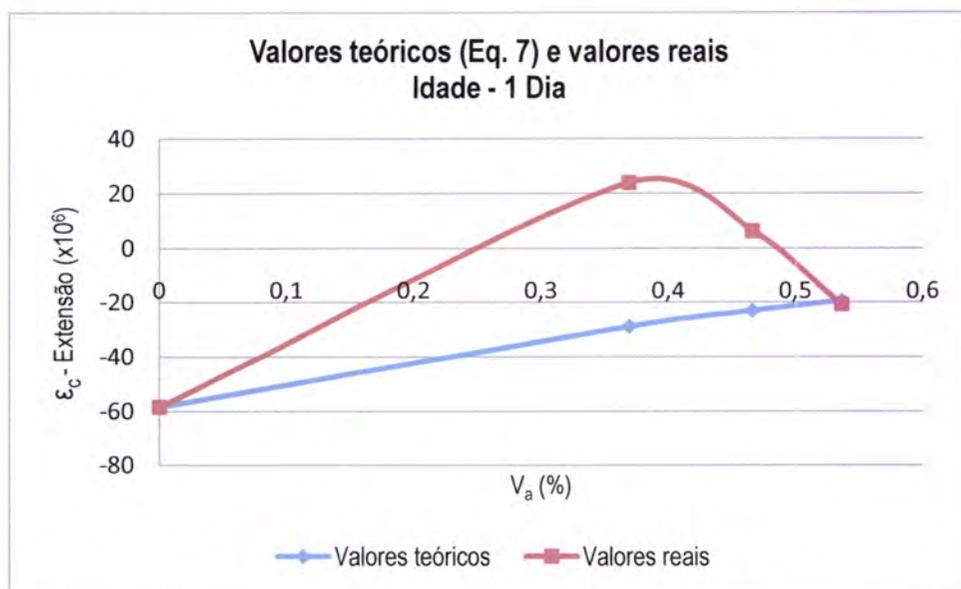


Figura 67 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autógena para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 1.

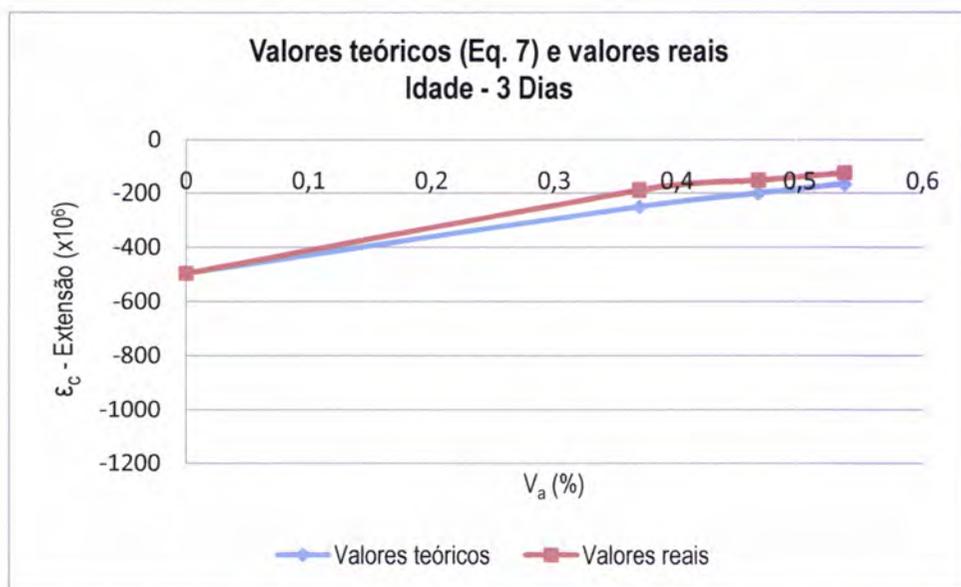


Figura 68 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retracção autógena para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 3.

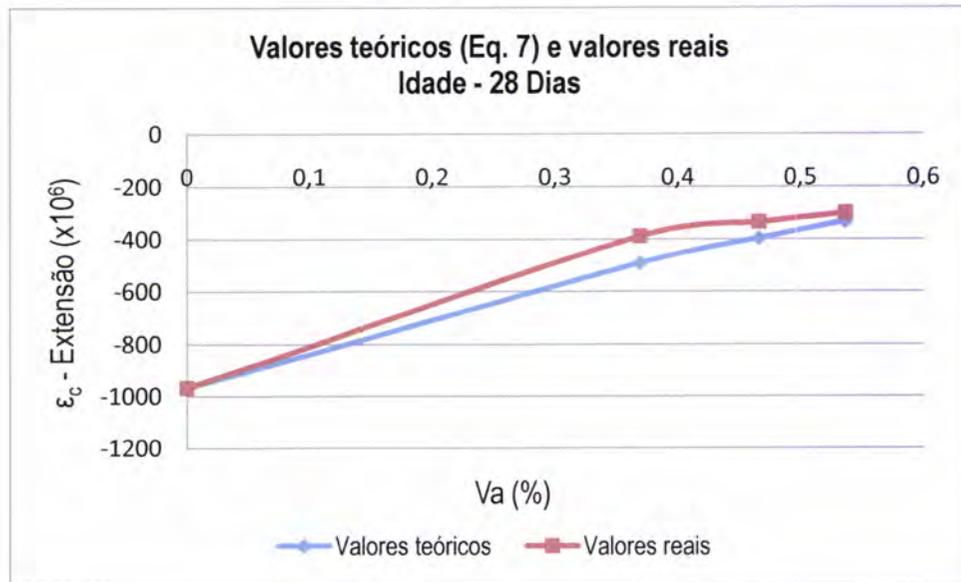


Figura 69 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 7 e valores reais de retração autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 28.

Relativamente à figura 67 nada se pode concluir, como visto anteriormente. Nas primeiras 6 horas as misturas apresentam até uma pequena expansão, associada eventualmente à formação de produtos expansivos como a etringite, que pouco tem a ver com a influência dos agregados, o que mostra a pouca relevância dos resultados a 1 dia para a análise em causa.

Das figuras 68 e 69 verifica-se que os valores teóricos e os valores reais da retração apresentam um comportamento similar. Constata-se também que para as misturas com agregado natural os valores reais são inferiores aos valores teóricos. Tal como para as argamassas estudadas no ponto 6.3.1, este facto pode dever-se à maior resistência que hoje em dia a pasta de cimento exhibe, proporcionando maior mobilidade do agregado, o que por sua vez faz as misturas deformar menos.

Tendo agora em conta a nova equação determinada no ponto anterior, equação 11, os valores teóricos da retração autogénea estão apresentados nas figuras 70, 71 e 72 que se seguem, em comparação com os valores reais, para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, nos dias 1, 3 e 28, respectivamente. Os resultados obtidos encontram-se em quadros no Anexo XVI.

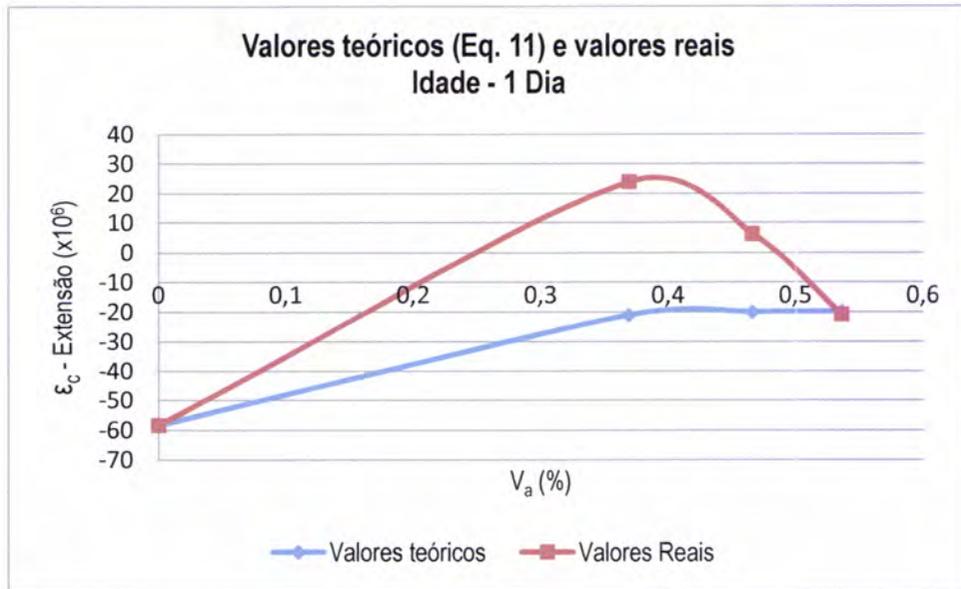


Figura 70 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 11 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 1.

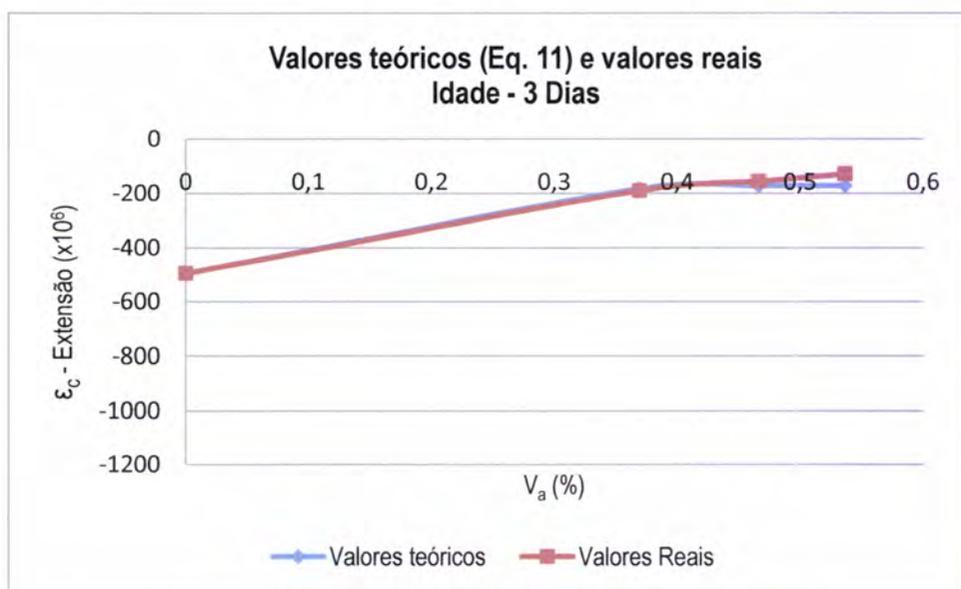


Figura 71 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 11 e valores reais de retracção autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 3.

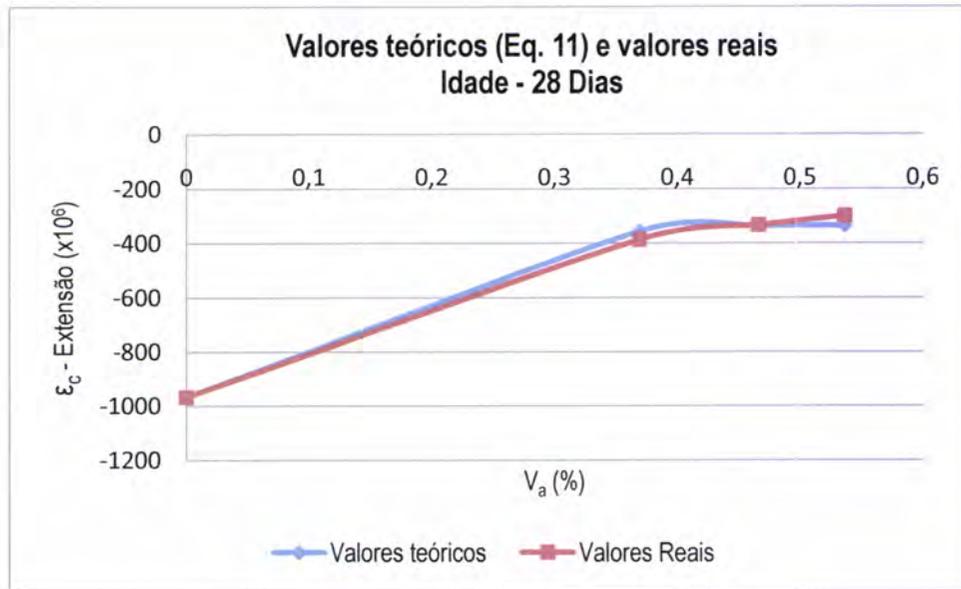


Figura 72 - Valores teóricos obtidos pela aplicação da equação 11 e valores reais de retração autogénea para as misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, no dia 28.

Da análise da figura 70 constata-se que os valores reais e teóricos de retração autogénea para o primeiro dia de idade são díspares, pelo que não se pode avaliar o efeito da introdução do factor correctivo na equação proposta por Hobbs, tal como já se tinha referido anteriormente. Por outro lado, nas figuras 71 e 72 verifica-se que os valores reais e os valores teóricos estão muito próximos.

Para melhor analisar o efeito da introdução do factor correctivo, nas figuras 73 e 74 que se seguem, encontram-se ilustradas as relações entre os valores teóricos e valores reais de retração autogénea, antes e depois da aplicação do mesmo, respectivamente.

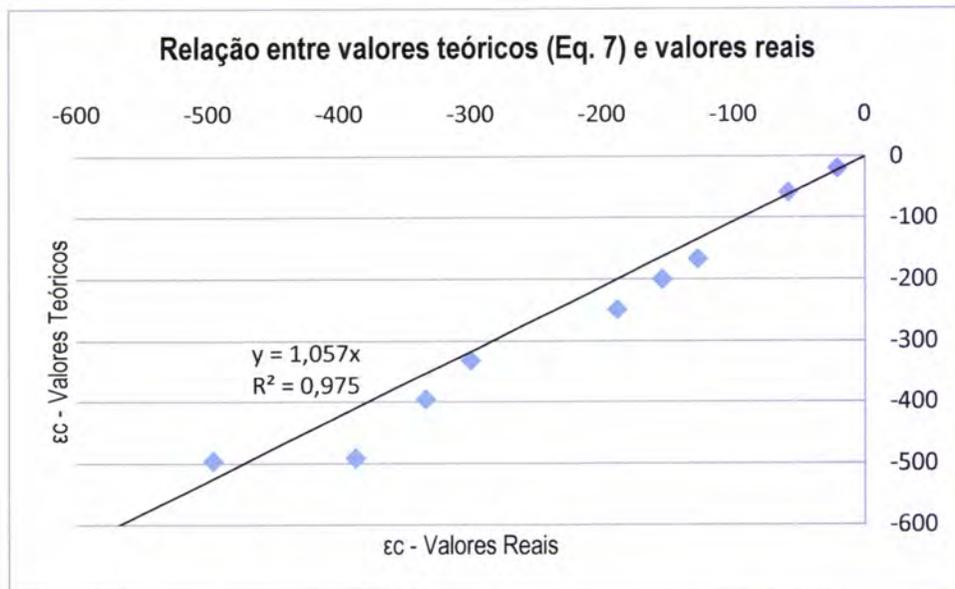


Figura 73 – Relação entre os valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7 e reais das misturas cimentícias REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.

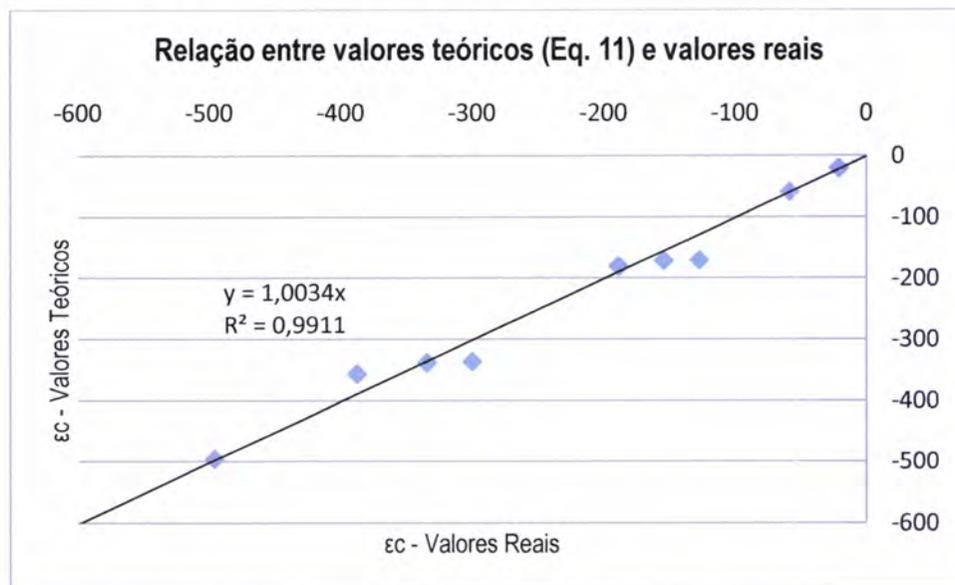


Figura 74 – Relação entre os valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11 e reais das misturas cimentícias REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.

Ao analisar as figuras 73 e 74 mostra-se que a proposta de correcção para o modelo de cálculo de Hobbs dá valores teóricos mais próximos dos valores reais de retracção autogénea, apesar das argamassas em análise usarem agregados diferentes dos que foram utilizados para a correcção ao modelo.

Assim sendo, os resultados obtidos neste trabalho sugerem uma nova equação para a estimativa da influência do agregado na retracção autogénea, com base no modelo proposto por Hobbs, introduzindo um maior peso na restrição da deformação conferida pelo agregado. A nova proposta é dada pela introdução de um factor correctivo na equação 7, obtendo assim uma nova equação, dada por:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{[1 - V_a \times (-\ln(\frac{1}{12 \times V_c}))] \times (\frac{K_a}{K_p} + 1)}{1 + (\frac{K_a}{K_p}) + [V_a \times (-\ln(\frac{1}{12 \times V_c}))] \times (\frac{K_a}{K_p} - 1)} \quad (Eq. 11)$$

6. CONCLUSÃO

A incorporação de agregado na composição de misturas cimentícias conduz, conforme foi verificado experimentalmente, a uma diminuição dos valores da retracção autogénea. Esta redução é superior quanto maior a concentração de agregado nas composições, devido à capacidade de restrição que este provoca na pasta de cimento.

Na década de 70, Hobbs apresentou uma proposta de cálculo de retracção autogénea [4 e 5], a qual foi utilizada para cálculo dos valores teóricos nas misturas cimentícias em estudo. A função obtida através dos valores calculados com recurso a este modelo apresentou um comportamento idêntico à função relativa aos valores obtidos através de ensaio. No entanto, os valores teóricos foram sempre superiores aos valores reais, tanto para as argamassas com agregado britado como para as que continham agregado natural.

Desenvolveu-se, deste modo, uma melhoria à fórmula de cálculo teórico da retracção autogénea, que permite uma previsão mais aproximada dos valores reais. Esta nova fórmula foi aplicada com sucesso a compostos com agregado britado e agregado natural, pelo que se pode concluir que é válida independentemente dos agregados utilizados no fabrico das argamassas.

Ao analisar os parâmetros constantes no modelo de cálculo proposto nesta dissertação, pode verificar-se que o único elemento referente às características do agregado tido em conta é o módulo volumétrico de elasticidade. Variáveis como a natureza, a forma, a dimensão, a absorção de água e a massa volúmica, não estão contempladas neste modelo. O que leva a concluir que, dada a semelhança dos valores teóricos obtidos com recurso ao novo modelo e os valores obtidos através de ensaio, a característica do agregado que mais influencia os valores da retracção autogénea é a rigidez do agregado.

7. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O modelo de cálculo de retracção autogénea proposto nesta dissertação deverá ser testado em misturas com diferentes razões A/C e com outros volumes de agregado com o intuito de aferir da sua validade em compostos com outras características. É também relevante o estudo da aplicabilidade do modelo em misturas que incluam na sua constituição agregados distintos aos testados na presente dissertação, nomeadamente quanto à sua natureza, rigidez, forma e granulometria.

Constatou-se com recurso ao modelo proposto que os valores de retracção autogénea estimados vão de encontro aos valores reais, seria pertinente no futuro avaliar no modelo proposto a retracção total, tendo em conta o efeito do agregado no processo de secagem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bentz DP, Jensen OM, *Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking*, Cement & Concrete Composites 2004, 26: 677-85.
- [2] Jensen OM, Hansen PF, *Autogenous deformation and RH-change in perspective*, Cement and Concrete Research, 2001; 31 (12): 1859-65.
- [3] Jensen OM, Hansen PF, *Influence of temperature on autogenous deformation and RH-change in hardening cement paste*, Cement and Concrete Research, 1999, 29:567-75.
- [4] Hobbs DW, *Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete*, ACI Journal, 1974; 71-30.
- [5] Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute. Part One Committee Report, Proceedings of The International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute), Hiroshima, June 13-14, 1998, Ed. Ei-ichi Tazawa, Hiroshima University, Japan, London: E&FN Spon; 1999, pp. 3-63.
- [6] Tazawa E, Miyazawa S, *Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste*, Cement and Concrete Research, 1995, 25:281-87.
- [7] Holt E, *Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages*, Cement and Concrete Research, 2005, 35:464-72.
- [8] Bentur A, Kovler K, *Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems*, Materials and Structures, 2003, 36:183-90.
- [9] Hansen PF, Jensen OM, *Self-desiccation shrinkage in low porosity cement-silica mortar*, Nordic Concrete Research, 1989, 8:89-102.
- [10] ESPECIFICAÇÃO LNEC E 237-1970, Agregados – Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles. LNEC.
- [11] NP EN 933-1 2000, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica, Método de peneiração. IPQ.
- [12] NP 954-1973, Inertes para argamassas e betões – Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias. LNEC.

- [13] ESPECIFICAÇÃO LNEC E 397-1993, Betões – Determinação do módulo de elasticidade em compressão. LNEC.
- [14] NP EN 196-1 2006, Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. IPQ.
- [15] Vieira, M. G., Betões Auto-compactáveis: Reologia do betão no estado fresco, Capítulo 4, IST/LNEC, 2008.
- [16] ESPECIFICAÇÃO LNEC E 398-1993, Betões – Determinação da retracção e da expansão. LNEC.

ANEXOS

ANEXO I – Análise granulométrica do agregado britado.

Peso da amostra para ensaio = 1322,5 g.

Quadro 12 – Granulometria do agregado britado.

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Massa do material retido (g)	Massa do material retido 4 - 0,150 (g)	Percentagem do material retido (%)	Percentagem cumulativa do material passado (%)
4	567,7	0,0	0,0	100
2,8	276,8	276,8	39,7	60,3
2	158,4	158,4	22,7	37,6
1,6	61,9	61,9	8,9	28,7
1	80,6	80,6	11,6	17,2
0,5	63,1	63,1	9,0	8,1
0,15	56,6	56,6	8,1	0,0
Refugo	53,6	0	0,0	0,0
Total	1318,7	697,4	100,0	-

ANEXO II – Análise granulométrica do agregado natural.

Peso da amostra para ensaio = 849,3 g.

Quadro 13 - Granulometria do agregado natural.

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Massa do material retido (g)	Massa do material retido 4 - 0,150 (g)	Percentagem do material retido (%)	Percentagem cumulativa do material passado (%)
4	29,6	0,0	0,0	100
2,8	39,6	39,6	5,0	95,0
2	65,4	65,4	8,2	86,8
1,6	50,9	50,9	6,4	80,4
1	107,5	107,5	13,5	66,9
0,5	181,2	181,2	22,8	44,0
0,15	350	350	44,0	0,0
Refugo	23,5	0,0	0,0	0,0
Total	847,7	794,6	100	-

ANEXO III – Determinação da absorção e massa volúmica do agregado britado.

✓ Massa do provete com as partículas saturadas sem água superficial

$$m_1 = 500,6 \text{ g}$$

✓ Massa do balão com o provete e água

$$m_2 = 1555 \text{ g}$$

✓ Massa do provete seco

$$m_3 = 496,2 \text{ g}$$

✓ Massa do balão com água

$$m_4 = 1237 \text{ g}$$

$$\text{Massa do Balão} = 239,5 \text{ g}$$

Absorção = 0,89 %

Massa volúmica do material impermeável das partículas = 2,78 g/cm³

Massa volúmica das partículas saturadas = 2,74 g/cm³

Massa volúmica das partículas secas = 2,72 g/cm³

Na determinação da absorção e massa volúmica do agregado britado, seguiu-se a Norma NP-954. Tendo em conta a Norma aplicada, a absorção de água da areia, em percentagem é dada por:

$$\frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100 \quad (\text{Eq. 12})$$

A massa volúmica do material impermeável das partículas (g/cm³) é dado por:

$$\frac{m_3}{m_3 + m_4 - m_2} \quad (\text{Eq. 13})$$

A massa volúmica das partículas saturadas (g/cm³) é dado por:

$$\frac{m_1}{m_1 + m_4 - m_2} \quad (\text{Eq. 14})$$

A massa volúmica das partículas secas (g/cm³) é dado por:

$$\frac{m_3}{m_1 + m_4 - m_2} \quad (\text{Eq. 15})$$

ANEXO IV – Determinação da absorção e massa volúmica do agregado natural.

- ✓ Massa do provete com as partículas saturadas sem água superficial

$$m_1 = 500,1 \text{ g}$$

- ✓ Massa do balão com o provete e água

$$m_2 = 1544,7 \text{ g}$$

- ✓ Massa do provete seco

$$m_3 = 1359,8 \text{ g}$$

- ✓ Massa do balão com água

$$m_4 = 1238 \text{ g}$$

$$\text{Massa do Balão} = 239,5 \text{ g}$$

$$\text{Absorção} = 0,60 \%$$

$$\text{Massa volúmica do material impermeável das partículas} = 2,61 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Massa volúmica das partículas saturadas} = 2,59 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Massa volúmica das partículas secas} = 2,57 \text{ g/cm}^3$$

Na determinação da absorção e massa volúmica do agregado britado, seguiu-se a Norma NP-954. Tendo em conta a Norma aplicada, a absorção de água da areia, em percentagem é dada por:

$$\frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100 \quad (\text{Eq. 12})$$

A massa volúmica do material impermeável das partículas (g/cm^3) é dado por:

$$\frac{m_3}{m_3 + m_4 - m_2} \quad (\text{Eq. 13})$$

A massa volúmica das partículas saturadas (g/cm^3) é dado por:

$$\frac{m_1}{m_1 + m_4 - m_2} \quad (\text{Eq. 14})$$

A massa volúmica das partículas secas (g/cm^3) é dado por:

$$\frac{m_3}{m_1 + m_4 - m_2} \quad (\text{Eq. 15})$$

ANEXO V – Resultados obtidos do ensaio de resistência mecânica à flexão.

✓ Pasta de referência (REF)

Quadro 14 - Resistência à flexão dos provetes da pasta de referência - REF.

Provete	Idade (Dias)	σ (MPa)	σ Médio (Mpa)
R REF 1	1	7,2	7,5
R REF 2		7,8	
R REF 3	3	11,2	10,1
R REF 4		9,0	
R REF 5	28	8,2	8,8
R REF 6		9,3	

✓ Misturas com agregado britado (BRI 1, BRI 2 e BRI 3)

Quadro 15 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado britado – BRI 1.

Provete	Idade (Dias)	σ (MPa)	σ Médio (Mpa)
R BRI 1-1	1	9,0	9,1
R BRI 1-2		9,1	
R BRI 1-3	3	9,8	9,8
R BRI 1-4		9,7	
R BRI 1-5	28	9,1	9,6
R BRI 1-6		10,1	

Quadro 16 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado britado – BRI 2.

Provete	Idade (Dias)	σ (MPa)	σ Médio (Mpa)
R BRI 2-1	1	8,0	8,1
R BRI 2-2		8,1	
R BRI 2-3	3	10,7	10,0
R BRI 2-4		9,3	
R BRI 2-5	28	10,5	10,2
R BRI 2-6		9,9	

Quadro 17 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado britado – BRI 3.

Provete	Idade (Dias)	σ (MPa)	σ Médio (Mpa)
R BRI 3-1	1	8,6	8,2
R BRI 3-2		7,8	
R BRI 3-3	3	10,8	11,1
R BRI 3-4		11,4	
R BRI 3-5	28	10,1	10,65
R BRI 3-6		11,2	

✓ Misturas com agregado natural (NAT 1, NAT 2 e NAT 3)

Quadro 18 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado natural – NAT 1.

Provete	Idade (Dias)	σ (MPa)	σ Médio (Mpa)
R NAT 1-1	1	7,6	7,5
R NAT 1-2		7,3	
R NAT 1-3	3	9,0	9,6
R NAT 1-4		10,1	
R NAT 1-5	28	8,8	9,0
R NAT 1-6		9,2	

Quadro 19 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado natural – NAT 2.

Provete	Idade (Dias)	σ (MPa)	σ Médio (Mpa)
R NAT 2-1	1	6,7	6,65
R NAT 2-2		6,6	
R NAT 2-3	3	10,4	10,05
R NAT 2-4		9,7	
R NAT 2-5	28	9,5	9,4
R NAT 2-6		9,3	

Quadro 20 - Resistência à flexão dos provetes da mistura com agregado natural – NAT 3.

Provete	Idade (Dias)	σ (MPa)	σ Médio (Mpa)
R NAT 3-1	1	5,7	5,9
R NAT 3-2		6,1	
R NAT 3-3	3	9,0	9,1
R NAT 3-4		9,2	
R NAT 3-5	28	9,2	9,4
R NAT 3-6		9,5	

ANEXO VI – Resultados obtidos do ensaio de resistência mecânica à compressão.

✓ Pasta de referência (REF)

Quadro 21 - Resistência à compressão dos provetes da pasta de referência REF.

Provete	Idade (Dias)	σ Médio (MPa)
R REF 1 R REF 2	1	48,0
R REF 3 R REF 4	3	64,1
R REF 5 R REF 6	28	80,1

✓ Misturas com agregado britado (BRI 1, BRI 2 e BRI 3)

Quadro 22 - Resistência à compressão dos provetes da mistura BRI 1.

Provete	Idade (Dias)	σ Médio (MPa)
R BRI 1-1 R BRI 1-2	1	59,0
R BRI 1-3 R BRI 1-4	3	60,6
R BRI 1-5 R BRI 1-6	28	77,7

Quadro 23 - Resistência à compressão dos provetes da mistura BRI 2.

Provete	Idade (Dias)	σ Médio (MPa)
R BRI 2-1 R BRI 2-2	1	45,4
R BRI 2-3 R BRI 2-4	3	66,8
R BRI 2-5 R BRI 2-6	28	84,7

Quadro 24 - Resistência à compressão dos provetes da mistura BRI 3.

Provete	Idade (Dias)	σ Médio (MPa)
R BRI 3-1 R BRI 3-2	1	50,9
R BRI 3-3 R BRI 3-4	3	62,5
R BRI 3-5 R BRI 3-6	28	80,5

✓ Misturas com agregado natural (NAT 1, NAT 2 e NAT 3)

Quadro 25 - Resistência à compressão dos provetes da mistura NAT 1.

Provete	Idade (Dias)	σ Médio (MPa)
R NAT 1-1 R NAT 1-2	1	44,6
R NAT 1-3 R NAT 1-4	3	60,0
R NAT 1-5 R NAT 1-6	28	77,7

Quadro 26 - Resistência à compressão dos provetes da mistura NAT 2.

Provete	Idade (Dias)	σ Médio (MPa)
R NAT 2-1 R NAT 2-2	1	39,9
R NAT 2-3 R NAT 2-4	3	59,9
R NAT 2-5 R NAT 2-6	28	78,8

Quadro 27 - Resistência à compressão dos provetes da mistura NAT 3.

Provete	Idade (Dias)	σ Médio (MPa)
R NAT 3-1 R NAT 3-2	1	39,2
R NAT 3-3 R NAT 3-4	3	62,7
R NAT 3-5 R NAT 3-6	28	81,2

ANEXO VII – Resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade.

- ✓ Pasta de referência;

Quadro 28 - Módulo de elasticidade dos provetes da pasta de referência REF.

Idade (Dias)	ME REF 1 (GPa)	ME REF 2 (GPa)	Média (GPa)
1	15,69	15,8	15,75
3	19,2	19,6	19,40
28	22,5	23,4	22,95

- ✓ Misturas com agregado britado, BRI 1, BRI 2 e BRI 3;

Quadro 29 - Módulo de elasticidade dos provetes da mistura BRI 1.

Idade (Dias)	ME BRI 1-1 (GPa)	ME BRI 1-2 (GPa)	Média (GPa)
1	22,8	22,4	22,6
2	26,9	26,3	26,6
3	28,7	27,2	28,0
28	31,8	30,5	31,2

Quadro 30 - Módulo de elasticidade dos provetes da mistura BRI 2.

Idade (Dias)	ME BRI 2-1 (GPa)	ME BRI 2-2 (GPa)	Média (GPa)
1	25,3	25,1	25,2
3	31,6	30,9	31,3
28	35	34,7	34,9

Quadro 31 - Módulo de elasticidade dos provetes da mistura BRI 3.

Idade (Dias)	ME BRI 3-1 (GPa)	ME BRI 3-2 (GPa)	Média (GPa)
1	30,6	29,9	30,3
3	34,8	35,3	35,1
28	38,9	37,9	38,4

- ✓ Misturas com agregado natural, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.

Quadro 32 - Módulo de elasticidade dos provetes da mistura NAT 1.

Idade (Dias)	ME NAT 1-1 (GPa)	ME NAT 1-2 (GPa)	Média (GPa)
1	24,7	24,9	24,8
3	29,4	30,1	29,75
28	33,6	33,5	33,55

Quadro 33 – Módulo de elasticidade dos provetes da mistura NAT 2.

Idade (Dias)	ME NAT 2-1 (GPa)	ME NAT 2- 2 (GPa)	Média (GPa)
1	26,6	26,1	26,35
3	32,8	32,3	32,55
28	36,9	36,4	36,65

Quadro 34 – Módulo de elasticidade dos provetes da mistura NAT 3.

Idade (Dias)	ME NAT 3-1 (GPa)	ME NAT 3-2 (GPa)	Média (GPa)
1	29,6	29,3	29,45
3	36,9	36	36,45
28	40,1	39,4	39,75

ANEXO VIII – Medição da massa e da retracção autógena dos provetes.

- ✓ Provetes da pasta de referência REF.

Quadro 35 – Leitura da massa e da retracção autógena do provete REF 1.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
23.Junho	11h15	18h s/ película	538,66	0,000 0,013	0,007	8,909 8,900	8,905
23.Junho	12h15	18h c/ película	542,05	0,001 0,012	0,007	8,909 8,900	8,905
23.Junho	16h	1	541,04	0,002 0,013	0,008	8,902 8,893	8,898
24.Junho	15h	2	541,03	0,004 0,016	0,010	8,853 8,845	8,849
25.Junho	15h	3	541,02	0,001 0,014	0,008	8,833 8,822	8,823
26.Junho	15h45	4	541,01	0,000 0,013	0,007	8,820 8,809	8,815
29.Junho	15h10	7	541,00	0,000 0,012	0,006	8,799 8,789	8,794
06.Julho	15h10	14	541,00	0,002 0,015	0,009	8,776 8,766	8,771
20.Julho	17h	28	541,01	0,003 0,015	0,009	8,758 8,747	8,753

Quadro 36 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete REF 2.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
23.Junho	11h15	0 s/ película	544,18	0,000 0,013	0,007	8,840 8,826	8,833
23.Junho	12h15	0 c/ película	546,51	0,001 0,012	0,007	8,842 8,829	8,836
23.Junho	16h	1	546,52	0,002 0,013	0,008	8,833 8,819	8,826
24.Junho	15h	2	546,50	0,004 0,016	0,010	8,786 8,771	8,779
25.Junho	15h	3	546,49	0,001 0,014	0,008	8,763 8,749	8,756
26.Junho	15h45	4	546,49	0,000 0,013	0,007	8,751 8,737	8,744
29.Junho	15h10	7	546,48	0,000 0,012	0,006	8,730 8,716	8,723
06.Julho	15h10	14	546,46	0,002 0,015	0,009	8,707 8,693	8,700
20.Julho	17h	28	546,47	0,003 0,015	0,009	8,689 8,675	8,682

Quadro 37 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete REF 3.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
23.Junho	11h15	0 s/ película	537,73	0,000 0,013	0,007	8,903 8,896	8,899
23.Junho	12h15	0 c/ película	540,26	0,001 0,012	0,007	8,902 8,896	8,899
23.Junho	16h	1	540,25	0,002 0,013	0,008	8,892 8,889	8,891
24.Junho	15h	2	540,23	0,004 0,016	0,010	8,845 8,842	8,844
25.Junho	15h	3	540,23	0,001 0,014	0,008	8,823 8,818	8,821
26.Junho	15h45	4	540,22	0,000 0,013	0,007	8,811 8,808	8,810
29.Junho	15h10	7	540,22	0,000 0,012	0,006	8,789 8,787	8,788
06.Julho	15h10	14	540,18	0,002 0,015	0,009	8,767 8,764	8,766
20.Julho	17h	28	540,21	0,003 0,015	0,009	8,749 8,746	8,748

✓ Provetes da mistura BRI 1.

Quadro 38 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 1-1.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
14. Julho	10h50	0 s/ película	624,47	0,000	0,006	9,342	9,342
				0,012		9,341	
14. Julho	11h20	0 c/ película	625,14	0,001	0,007	9,342	9,342
				0,013		9,342	
14. Julho	16h	1	625,13	0,005	0,011	9,346	9,346
				0,017		9,345	
15. Julho	16h08	2	625,10	0,004	0,010	9,329	9,329
				0,016		9,328	
16. Julho	16h	3	625,10	0,002	0,009	9,317	9,317
				0,015		9,316	
17. Julho	15h50	4	625,10	0,002	0,008	9,311	9,310
				0,014		9,309	
20. Julho	16h10	7	625,10	0,002	0,009	9,300	9,299
				0,015		9,297	
27. Julho	16h55	14	625,14	0,002	0,008	9,291	9,291
				0,014		9,290	
10. Agosto	15h55	28	625,19	0,002	0,009	9,280	9,280
				0,015		9,279	

Quadro 39 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 1-2.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
14. Julho	10h50	0 s/ película	623,00	0,000 0,012	0,006	9,487 9,462	9,475
14. Julho	11h20	0 c/ película	623,68	0,005 0,018	0,012	9,493 9,467	9,480
14. Julho	16h	1	623,68	0,005 0,017	0,011	9,491 9,466	9,479
15. Julho	16h08	2	623,67	0,004 0,016	0,010	9,473 9,447	9,460
16. Julho	16h	3	623,66	0,002 0,015	0,009	9,461 9,437	9,449
17. Julho	15h50	4	623,65	0,002 0,014	0,008	9,453 9,428	9,441
20. Julho	16h10	7	623,65	0,002 0,015	0,009	9,441 9,417	9,429
27. Julho	16h55	14	623,69	0,002 0,014	0,008	9,433 9,409	9,421
10. Agosto	15h55	28	623,73	0,002 0,015	0,009	9,421 9,397	9,409

Quadro 40 - Leitura da massa e da retracção autógena do provete BRI 1-3.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
14. Julho	10h50	0 s/ película	631,83	0,000 0,012	0,006	9,215 9,197	9,206
14. Julho	11h20	0 c/ película	632,78	0,005 0,018	0,012	9,220 9,203	9,212
14. Julho	16h	1	632,79	0,005 0,017	0,011	9,219 9,201	9,210
15. Julho	16h08	2	632,78	0,004 0,016	0,010	9,201 9,183	9,192
16. Julho	16h	3	632,76	0,002 0,015	0,009	9,187 9,169	9,178
17. Julho	15h50	4	632,77	0,002 0,014	0,008	9,180 9,162	9,171
20. Julho	16h10	7	632,78	0,002 0,015	0,009	9,169 9,150	9,160
27. Julho	16h55	14	632,81	0,002 0,014	0,008	9,160 9,142	9,151
10. Agosto	15h55	28	632,82	0,002 0,015	0,009	9,148 9,130	9,139

✓ Provetes da mistura BRI 2.

Quadro 41 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 2-1.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
21. Julho	10h	0 s/ película	641,08	0,001 0,016	0,009	9,036 9,012	9,024
21. Julho	10h15	0 c/ película	642,29	0,005 0,017	0,011	9,036 9,014	9,025
21. Julho	15h	1	642,29	0,005 0,018	0,012	9,030 9,008	9,019
22. Julho	15h	2	642,27	0,004 0,017	0,011	9,019 8,996	9,008
23. Julho	15h	3	642,26	0,004 0,018	0,011	9,009 8,987	8,998
24. Julho	15h10	4	642,27	0,003 0,016	0,010	9,004 8,982	8,993
27. Julho	15h	7	642,26	0,003 0,017	0,010	8,996 8,975	8,986
03. Agosto	15h	14	642,27	0,000 0,013	0,007	8,985 8,963	8,974
17. Agosto	15h26	28	642,23	0,001 0,014	0,008	8,972 8,950	8,961

Quadro 42 - Leitura da massa e da retracção autógena do provete BRI 2-2.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
21. Julho	10h	0 s/ película	632,67	0,001 0,016	0,009	9,171 9,177	9,174
21. Julho	10h15	0 c/ película	634,16	0,005 0,017	0,011	9,171 9,178	9,175
21. Julho	15h	1	634,17	0,005 0,018	0,012	9,165 9,173	9,169
22. Julho	15h	2	634,13	0,004 0,017	0,011	9,153 9,160	9,157
23. Julho	15h	3	634,15	0,004 0,018	0,011	9,145 9,151	9,148
24. Julho	15h10	4	634,15	0,003 0,016	0,010	9,139 9,146	9,143
27. Julho	15h	7	634,14	0,003 0,017	0,010	9,131 9,139	9,135
03. Agosto	15h	14	634,16	0,000 0,013	0,007	9,119 9,126	9,123
17. Agosto	15h26	28	634,13	0,001 0,014	0,008	9,106 9,115	9,111

Quadro 43 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 2-3.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
21. Julho	10h	0 s/ película	635,77	0,001 0,016	0,009	9,021 9,035	9,028
21. Julho	10h15	0 c/ película	637,15	0,005 0,017	0,011	9,021 9,030	9,026
21. Julho	15h	1	637,14	0,005 0,018	0,012	9,015 9,023	9,019
22. Julho	15h	2	637,13	0,004 0,017	0,011	9,001 9,01	9,006
23. Julho	15h	3	637,11	0,004 0,018	0,011	8,994 9,001	8,998
24. Julho	15h10	4	637,11	0,003 0,016	0,010	8,988 8,996	8,992
27. Julho	15h	7	637,11	0,003 0,017	0,010	8,979 8,987	8,983
03. Agosto	15h	14	637,10	0,000 0,013	0,007	8,968 8,978	8,973
17. Agosto	15h26	28	637,08	0,001 0,014	0,008	8,956 8,965	8,961

✓ Provetes da mistura BRI 3.

Quadro 44 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 3-1.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Proвете	
				Leitura	Média	Leitura	Média
28. Julho	10h05	0 s/ película	628,45	0,001 0,014	0,008	9,028 9,024	9,026
28. Julho	10h25	0 c/ película	630,01	0,001 0,013	0,007	9,024 9,018	9,021
28. Julho	15h45	1	630,02	0,003 0,015	0,009	9,014 9,011	9,013
29. Julho	15h40	2	630,02	0,003 0,015	0,009	9,001 8,998	9,000
30. Julho	15h45	3	630,01	0,001 0,014	0,008	8,994 8,992	8,993
31. Julho	15h40	4	630,01	0,001 0,014	0,008	8,992 8,989	8,991
03. Agosto	15h45	7	630,00	0,000 0,013	0,007	8,986 8,984	8,985
10. Agosto	15h50	14	629,97	0,001 0,014	0,008	8,976 8,974	8,975
24. Agosto	15h41	28	629,85	0,001 0,014	0,008	8,965 8,963	8,964



Quadro 45 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 3-2.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
28. Julho	10h05	0 s/ película	642,57	0,001 0,014	0,008	9,370 9,361	9,366
28. Julho	10h25	0 c/ película	644,16	0,001 0,013	0,007	9,367 9,358	9,363
28. Julho	15h45	1	644,16	0,003 0,015	0,009	9,360 9,350	9,355
29. Julho	15h40	2	644,14	0,003 0,015	0,009	9,346 9,337	9,342
30. Julho	15h45	3	644,14	0,001 0,014	0,008	9,342 9,332	9,337
31. Julho	15h40	4	644,12	0,001 0,014	0,008	9,340 9,330	9,335
03. Agosto	15h45	7	644,12	0,000 0,013	0,007	9,334 9,324	9,329
10. Agosto	15h50	14	644,10	0,001 0,014	0,008	9,325 9,315	9,320
24. Agosto	15h41	28	643,97	0,001 0,014	0,008	9,314 9,304	9,309

Quadro 46 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete BRI 3-3.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
28. Julho	10h05	0 s/ película	635,83	0,001 0,014	0,008	9,363 9,350	9,357
28. Julho	10h25	0 c/ película	637,28	0,001 0,013	0,007	9,359 9,348	9,354
28. Julho	15h45	1	637,27	0,003 0,015	0,009	9,35 9,341	9,346
29. Julho	15h40	2	637,24	0,003 0,015	0,009	9,337 9,327	9,332
30. Julho	15h45	3	637,24	0,001 0,014	0,008	9,331 9,321	9,326
31. Julho	15h40	4	637,24	0,001 0,014	0,008	9,328 9,318	9,323
03. Agosto	15h45	7	637,22	0,000 0,013	0,007	9,323 9,313	9,318
10. Agosto	15h50	14	637,20	0,001 0,014	0,008	9,315 9,305	9,310
24. Agosto	15h41	28	637,09	0,001 0,014	0,008	9,303 9,292	9,298

✓ Provetes da mistura NAT 1.

Quadro 47 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 1-1.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
11.Agosto	10h12	0 s/ película	606,05	0,002 0,015	0,009	9,045 9,043	9,044
11.Agosto	10h41	0 c/ película	607,53	0,009 0,022	0,016	9,043 9,039	9,041
11.Agosto	15h	1	607,52	0,001 0,014	0,008	9,038 9,035	9,037
12.Agosto	15h10	2	607,52	0,001 0,014	0,008	9,015 9,013	9,014
13.Agosto	15h	3	607,52	0,000 0,013	0,007	9,002 9,001	9,002
14.Agosto	15h30	4	607,52	0,000 0,013	0,007	8,996 8,995	8,996
17.Agosto	15h20	7	607,52	0,000 0,014	0,007	8,987 8,985	8,986
24.Agosto	16h02	14	607,56	0,000 0,014	0,007	8,974 8,973	8,974
7.Set	15h	28	607,60	0,003 0,016	0,010	8,974 8,972	8,973

Quadro 48 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 1-2.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
11.Agosto	10h12	0 s/ película	593,87	0,002 0,015	0,009	8,992 8,960	8,976
11.Agosto	10h41	0 c/ película	595,25	0,009 0,022	0,016	8,987 8,955	8,971
11.Agosto	15h	1	595,26	0,001 0,014	0,008	8,982 8,951	8,967
12.Agosto	15h10	2	595,24	0,001 0,014	0,008	8,958 8,926	8,942
13.Agosto	15h	3	595,24	0,000 0,013	0,007	8,946 8,916	8,931
14.Agosto	15h30	4	595,23	0,000 0,013	0,007	8,939 8,908	8,924
17.Agosto	15h20	7	595,25	0,000 0,014	0,007	8,929 8,898	8,914
24.Agosto	16h02	14	595,30	0,000 0,014	0,007	8,916 8,888	8,902
7.Set	15h	28	595,35	0,003 0,016	0,010	8,915 8,888	8,902

Quadro 49 - Leitura da massa e da retracção autógena do provete NAT 1-3.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
11.Agosto	10h12	0 s/ película	585,34	0,002 0,015	0,009	9,089 9,073	9,081
11.Agosto	10h41	0 c/ película	586,60	0,009 0,022	0,016	9,088 9,071	9,080
11.Agosto	15h	1	586,58	0,001 0,014	0,008	9,084 9,068	9,076
12.Agosto	15h10	2	586,58	0,001 0,014	0,008	9,060 9,045	9,053
13.Agosto	15h	3	586,57	0,000 0,013	0,007	9,049 9,034	9,042
14.Agosto	15h30	4	586,57	0,000 0,013	0,007	9,042 9,026	9,034
17.Agosto	15h20	7	586,58	0,000 0,014	0,007	9,032 9,016	9,024
24.Agosto	16h02	14	586,60	0,000 0,014	0,007	9,020 9,005	9,013
7.Set	15h	28	586,71	0,003 0,016	0,010	9,021 9,005	9,013

✓ Provetes da mistura NAT 2.

Quadro 50 - Leitura da massa e da retracção autogénea do provete NAT 2-1.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
8.Set	09h50	0 s/ película	607,16	0,003 0,016	0,010	8,908 8,920	8,914
8.Set	10h	0 c/ película	608,68	0,005 0,018	0,012	8,909 8,921	8,915
8.Set	15h	1	608,67	0,002 0,016	0,009	8,907 8,92	8,914
9.Set	14h36	2	608,65	0,002 0,016	0,009	8,892 8,904	8,898
10.Set	14h35	3	608,63	0,003 0,016	0,010	8,882 8,895	8,889
11.Set	14h35	4	608,63	0,002 0,015	0,009	8,876 8,890	8,883
14.Set	14h42	7	608,62	0,008 0,017	0,013	8,868 8,881	8,875
21.Set	14h27	14	608,59	0,004 0,018	0,011	8,864 8,876	8,870
6.Out	15h10	28	608,53	0,005 0,018	0,012	8,857 8,869	8,863

Quadro 51 - Leitura da massa e da retracção autógena do provete NAT 2-2.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
8.Set	09h50	0 s/ película	602,24	0,003 0,016	0,010	9,148 9,156	9,152
8.Set	10h	0 c/ película	603,73	0,005 0,018	0,012	9,149 9,157	9,153
8.Set	15h	1	603,70	0,002 0,016	0,009	9,148 9,156	9,152
9.Set	14h36	2	603,69	0,002 0,016	0,009	9,132 9,137	9,135
10.Set	14h35	3	603,67	0,003 0,016	0,010	9,123 9,129	9,126
11.Set	14h35	4	603,66	0,002 0,015	0,009	9,117 9,123	9,120
14.Set	14h42	7	603,64	0,008 0,017	0,013	9,109 9,115	9,112
21.Set	14h27	14	603,6	0,004 0,018	0,011	9,103 9,110	9,107
6.Out	15h10	28	603,51	0,005 0,018	0,012	9,096 9,102	9,099

Quadro 52 - Leitura da massa e da retracção autógena do provete NAT 2-3.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
8.Set	09h50	0 s/ película	602,58	0,003 0,016	0,010	8,718 8,785	8,752
8.Set	10h	0 c/ película	604,03	0,005 0,018	0,012	8,720 8,787	8,754
8.Set	15h	1	604,02	0,002 0,016	0,009	8,718 8,785	8,752
9.Set	14h36	2	604,01	0,002 0,016	0,009	8,703 8,768	8,736
10.Set	14h35	3	603,98	0,003 0,016	0,010	8,695 8,759	8,727
11.Set	14h35	4	603,98	0,002 0,015	0,009	8,688 8,753	8,721
14.Set	14h42	7	603,96	0,008 0,017	0,013	8,679 8,744	8,712
21.Set	14h27	14	603,90	0,004 0,018	0,011	8,674 8,738	8,706
6.Out	15h10	28	603,83	0,005 0,018	0,012	8,667 8,731	8,699

✓ Provetes da mistura NAT 3.

Quadro 53 - Leitura da massa e da retracção autógena do provete NAT 3-1.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
15.Set	09h47	0 s/ película	614,89	0,004 0,017	0,011	9,402 9,402	9,402
15.Set	09h55	0 c/ película	616,25	0,004 0,017	0,011	9,403 9,402	9,403
15.Set	15h35	1	616,24	0,002 0,015	0,009	9,397 9,396	9,397
16.Set	15h	2	616,20	0,002 0,015	0,009	9,387 9,386	9,387
17.Set	15h02	3	616,18	0,002 0,014	0,008	9,380 9,379	9,380
18.Set	14h56	4	616,16	0,002 0,015	0,009	9,375 9,374	9,375
21.Set	14h34	7	616,13	0,007 0,02	0,014	9,371 9,369	9,370
28.Set	15h	14	616,03	0,004 0,017	0,011	9,361 9,359	9,360
12.Out	14h50	28	615,90	0,004 0,017	0,011	9,355 9,353	9,354

Quadro 54 - Leitura da massa e da retracção autógena do provete NAT 3-2.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
15.Set	09h47	0 s/ película	607,87	0,004 0,017	0,011	9,041 9,038	9,040
15.Set	09h55	0 c/ película	609,36	0,004 0,017	0,011	9,037 9,037	9,037
15.Set	15h35	1	609,35	0,002 0,015	0,009	9,033 9,033	9,033
16.Set	15h	2	609,32	0,002 0,015	0,009	9,022 9,022	9,022
17.Set	15h02	3	609,31	0,002 0,014	0,008	9,016 9,015	9,016
18.Set	14h56	4	609,29	0,002 0,015	0,009	9,012 9,012	9,012
21.Set	14h34	7	609,27	0,007 0,02	0,014	9,004 9,004	9,004
28.Set	15h	14	609,20	0,004 0,017	0,011	8,995 8,997	8,996
12.Out	14h50	28	609,09	0,004 0,017	0,011	8,991 8,990	8,991

Quadro 55 - Leitura da massa e da retracção autógena do provete NAT 3-3.

Data	Hora	Idade (Dias)	Massa (g)	Padrão		Provete	
				Leitura	Média	Leitura	Média
15.Set	09h47	0 s/ película	618,54	0,004 0,017	0,011	9,112 9,121	9,117
15.Set	09h55	0 c/ película	619,99	0,004 0,017	0,011	9,113 9,121	9,117
15.Set	15h35	1	619,97	0,002 0,015	0,009	9,108 9,114	9,111
16.Set	15h	2	619,94	0,002 0,015	0,009	9,099 9,103	9,101
17.Set	15h02	3	619,93	0,002 0,014	0,008	9,091 9,095	9,093
18.Set	14h56	4	619,91	0,002 0,015	0,009	9,089 9,092	9,091
21.Set	14h34	7	619,87	0,007 0,020	0,014	9,081 9,084	9,083
28.Set	15h	14	619,80	0,004 0,017	0,011	9,073 9,075	9,074
12.Out	14h50	28	619,70	0,004 0,017	0,011	9,067 9,069	9,068

ANEXO IX – Média final de retracção autogénea das misturas cimentícias REF, BRI 1, BRI 2, BRI 3, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.

Quadro 56 - Média final de retracção autogénea da pasta de referência REF.

Idade (Dias)	Extensão (x10 ⁶)			
	REF 1	REF 2	REF 3	Média
1	-50,00	-65,62	-59,38	-58,33
2	-368,75	-378,12	-368,75	-371,87
3	-487,50	-503,12	-496,88	-495,83
4	-562,50	-571,87	-559,38	-564,58
7	-687,50	-700,00	-690,63	-692,71
14	-846,87	-859,38	-846,88	-851,04
28	-965,63	-975,00	-962,50	-967,71

Quadro 57 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia BRI 1.

Idade (Dias)	Extensão (x10 ⁶)			Média
	BRI 1-1	BRI 1-2	BRI 1-3	
1	-3,12	-6,25	-6,25	-5,21
2	-103,13	-115,62	-112,50	-110,42
3	-168,75	-175,00	-190,63	-178,13
4	-206,25	-225,00	-231,25	-220,83
7	-281,25	-300,00	-306,25	-295,83
14	-328,13	-346,88	-356,25	-343,75
28	-400,00	-425,00	-434,38	-419,79

Quadro 58 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia BRI 2.

Idade (Dias)	Extensão (x10 ⁶)			Média
	BRI 2-1	BRI 2-2	BRI 2-3	
1	-40,63	-37,50	-43,75	-40,63
2	-106,25	-109,37	-121,88	-112,50
3	-168,75	-165,63	-175,00	-169,79
4	-190,63	-190,63	-200,00	-193,75
7	-240,62	-240,63	-259,38	-246,87
14	-290,62	-296,88	-300,00	-295,83
28	-378,13	-378,13	-384,38	-380,21

Quadro 59 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia BRI 3.

Idade (Dias)	Extensão (x10 ⁶)			Média
	BRI 3-1	BRI 3-2	BRI 3-3	
1	-65,63	-59,38	-62,50	-62,50
2	-146,88	-143,75	-146,87	-145,83
3	-178,13	-162,50	-175,00	-171,88
4	-193,75	-175,00	-193,75	-187,50
7	-221,88	-206,25	-218,75	-215,63
14	-290,62	-268,75	-275,00	-278,13
28	-359,38	-337,50	-353,13	-350,00

Quadro 60 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia NAT 1.

Idade (Dias)	Extensão (x10 ⁶)			Média
	NAT 1-1	NAT 1-2	NAT 1-3	
1	21,87	21,87	28,13	23,96
2	-118,75	-131,25	-118,75	-122,92
3	-190,63	-193,75	-181,25	-188,54
4	-228,13	-240,62	-228,13	-232,29
7	-290,62	-306,25	-293,75	-296,87
14	-368,75	-378,12	-365,63	-370,83
28	-387,50	-396,88	-378,12	-387,50

Quadro 61 - Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia NAT 2.

Idade (Dias)	Extensão (x10 ⁶)			Média
	NAT 2-1	NAT 2-2	NAT 2-3	
1	6,25	9,38	3,12	6,25
2	-90,62	-100,00	-96,88	-95,83
3	-153,12	-156,25	-153,13	-154,17
4	-181,25	-187,50	-187,50	-185,42
7	-259,37	-262,50	-268,75	-263,54
14	-278,12	-287,50	-293,75	-286,46
28	-325,00	-337,50	-340,63	-334,37

Quadro 62 – Média final de retracção autogénea da mistura cimentícia NAT 3.

Idade (Dias)	Extensão (x10 ⁶)			Média
	NAT 3-1	NAT 3-2	NAT 3-3	
1	-25,00	-12,50	-25,00	-20,83
2	-87,50	-81,25	-87,50	-85,42
3	-128,12	-118,75	-134,38	-127,08
4	-162,50	-143,75	-153,13	-153,12
7	-221,87	-225,00	-234,38	-227,08
14	-265,63	-256,25	-268,75	-263,54
28	-303,13	-290,63	-306,25	-300,00

ANEXO X – Variação da massa dos provetes.

Quadro 63 - Registo da variação de massa de cada provete entre os dias 1 e 28 de idade.

Mistura cimentícia	Provete	Variação de massa (g)
REF	REF 1	1,04
	REF 2	0,04
	REF 3	0,05
BRI 1	BRI 1-1	0,05
	BRI 1-2	0,05
	BRI 1-3	0,04
BRI 2	BRI 2-1	0,06
	BRI 2-2	0,03
	BRI 2-3	0,07
BRI 3	BRI 3-1	0,16
	BRI 3-2	0,19
	BRI 3-3	0,19
NAT 1	NAT 1-1	0,07
	NAT 1-2	0,10
	NAT 1-3	0,11
NAT 2	NAT 2-1	0,15
	NAT 2-2	0,22
	NAT 2-3	0,20
NAT 3	NAT 3-1	0,35
	NAT 3-2	0,27
	NAT 3-3	0,29

ANEXO XI – Dados relativos ao cálculo dos valores teóricos da retração autogénea da pasta de referência e das argamassas com agregado britado.

- ✓ Concentração de volume dos constituintes das misturas cimentícias

Quadro 64 – Massa volúmica em kg/m³ dos constituintes das misturas cimentícias.

Materiais	Massa volúmica (kg/m³)
Cimento	3080
Agregado Britado	2742
Agregado Natural	2590
Adjuvante	1030
Água	1000

Quadro 65 – Concentração de volume em % dos constituintes das misturas cimentícias.

Mistura cimentícia	Cimento (%)	Agregado Britado (%)	Agregado Natural (%)	Adjuvante (%)	Água (%)	Total (%)
REF	49,78	-	-	2,23	45,99	98,0
NAT 1	31,03	-	36,90	1,39	28,67	98,0
NAT 2	26,11	-	46,58	1,17	24,13	98,0
NAT 3	22,54	-	53,62	1,01	20,83	98,0
BRI 1	31,69	35,60	-	1,42	29,28	98,0
BRI 2	26,82	45,19	-	1,20	24,78	98,0
BRI 3	23,25	52,23	-	1,04	21,48	98,0

- ✓ Coeficiente de Poisson do agregado britado: $\mu = 0,15$
- ✓ Coeficiente de Poisson da pasta de cimento: $\mu = 0,2$

Quadro 66 – Módulo de elasticidade da pasta de referência e respectivo módulo volumétrico de elasticidade.

Idade (Dias)	E_p (GPa)	K_p (GPa)
1	15,75	8,75
3	19,40	10,78
28	22,95	12,75

Quadro 67 – Módulo de elasticidade do agregado britado e respectivo módulo volumétrico de elasticidade.

E_a (GPa)	K_a (GPa)
105	50

Quadro 68 – Valores Reais da retracção autogénea obtidos através de ensaio, das misturas BRI 1, BRI 2 e BRI 3.

Mistura cimentícia	Idade (Dias)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c
REF	1	-58,33
	3	-495,83
	28	-967,71
BRI1	1	-5,21
	3	-178,13
	28	-419,79
BRI2	1	-40,63
	3	-169,79
	28	-380,1
BRI3	1	-62,50
	3	-171,88
	28	-350,00

ANEXO XII – Valores teóricos da retracção autogénea da pasta de referência e das misturas com agregado britado, através do modelo de cálculo proposto por Hobbs (Eq. 5, 6 e 7).

Quadro 69 – Valores teóricos obtidos através da aplicação das equações 5, 6 e 7, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 1 de idade.

Mistura cimentícia	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 5)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 6)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 7)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-58,33	-58,33	-58,33	-58,33
BRI1	-37,57	-12,45	-30,05	-5,21
BRI2	-31,97	-8,98	-24,27	-40,63
BRI3	-27,87	-7,04	-20,39	-62,50

Quadro 70 – Valores teóricos obtidos através da aplicação das equações 5, 6 e 7, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 3 de idade.

Mistura cimentícia	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 5)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 6)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 7)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-495,83	-495,83	-495,83	-495,83
BRI1	-319,32	-124,21	-259,66	-178,13
BRI2	-271,76	-90,76	-210,40	-169,79
BRI3	-236,87	-71,68	-177,16	-171,88

Quadro 71 – Valores teóricos obtidos através da aplicação das equações 5, 6 e 7, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 28 de idade.

Mistura cimentícia	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 5)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 6)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 7)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-967,71	-967,71	-967,71	-967,71
BRI1	-623,20	-274,20	-514,48	-419,79
BRI2	-530,38	-202,77	-418,19	-380,21
BRI3	-462,30	-161,23	-352,89	-350,00

ANEXO XIII – Valores teóricos de retracção autógena da pasta de referência e das misturas com agregado britado através da introdução do factor correctivo no modelo de cálculo proposto por Hobbs (Eq. 11).

Quadro 72 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, BRI 1, BRI 2, BRI 3, para o dia 1 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 11)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-58,33	-58,33
BRI1	-22,93	-5,21
BRI2	-20,07	-40,63
BRI3	-19,67	-62,50

Quadro 73 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 3 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 11)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-495,83	-495,83
BRI1	-198,97	-178,13
BRI2	-174,43	-169,79
BRI3	-170,01	-171,88

Quadro 74 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, BRI 1, BRI 2 e BRI 3, para o dia 28 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 11)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-967,71	-967,71
BRI1	-395,77	-419,79
BRI2	-347,52	-380,21
BRI3	-340,78	-350,00

ANEXO XIV – Dados relativos ao cálculo dos valores teóricos da retracção autógena da pasta de referência e das argamassas com agregado natural.

- ✓ Concentração de volume dos constituintes das misturas cimentícias

Quadro 75 – Massa volúmica em kg/m³ dos constituintes das misturas cimentícias.

Materiais	Massa volúmica (kg/m³)
Cimento	3080
Agregado Britado	2742
Agregado Natural	2590
Adjuvante	1030
Água	1000

Quadro 76 – Concentração de volume em % dos constituintes das misturas cimentícias.

Mistura cimentícia	Cimento (%)	Agregado Britado (%)	Agregado Natural (%)	Adjuvante (%)	Água (%)	Total (%)
REF	49,78	-	-	2,23	45,99	98,0
NAT 1	31,03	-	36,90	1,39	28,67	98,0
NAT 2	26,11	-	46,58	1,17	24,13	98,0
NAT 3	22,54	-	53,62	1,01	20,83	98,0
BRI 1	31,69	35,60	-	1,42	29,28	98,0
BRI 2	26,82	45,19	-	1,20	24,78	98,0
BRI 3	23,25	52,23	-	1,04	21,48	98,0

- ✓ Coeficiente de Poisson do agregado natural: $\mu = 0,15$
- ✓ Coeficiente de Poisson da pasta de cimento: $\mu = 0,2$

Quadro 77 - Módulo de elasticidade da pasta de referência e respectivo módulo volumétrico de elasticidade.

Idade (Dias)	E_p (GPa)	K_p (GPa)
1	15,75	8,75
3	19,40	10,78
28	22,95	12,75

Quadro 78 - Módulo de elasticidade do agregado natural e respectivo módulo volumétrico de elasticidade.

E_a (GPa)	K_a (GPa)
130	61,90

Quadro 79 - Valores Reais da retracção autogénea obtidos através de ensaio, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3.

Mistura cimentícia	Idade (Dias)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c
REF	1	-58,33
	3	-495,83
	28	-967,71
BRI1	1	-5,21
	3	-178,13
	28	-419,79
BRI2	1	-40,63
	3	-169,79
	28	-380,1
BRI3	1	-62,50
	3	-171,88
	28	-350,00

ANEXO XV – Valores teóricos da retracção autogénea da pasta de referência e das misturas com agregado natural, através do modelo de cálculo proposto por Hobbs (Eq. 7).

Quadro 80 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 1 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão (x10⁶) - ϵ_c (Eq. 7)	Extensão (x10⁶) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-58,33	-58,33
NAT1	-28,81	23,96
NAT2	-23,07	6,25
NAT3	-19,28	-20,83

Quadro 81 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 3 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão (x10⁶) - ϵ_c (Eq. 7)	Extensão (x10⁶) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-495,83	-495,83
NAT1	-248,54	-188,54
NAT2	-199,49	-154,17
NAT3	-167,00	-127,08

Quadro 82 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 7, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 28 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão (x10⁶) - ϵ_c (Eq. 7)	Extensão (x10⁶) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-967,71	-967,71
NAT1	-491,24	-387,50
NAT2	-395,58	-334,38
NAT3	-331,75	-300,00

ANEXO XVI – Valores teóricos de retracção autogénea da pasta de referência e das misturas com agregado britado através da introdução do factor correctivo no modelo de cálculo proposto por Hobbs (Eq. 11).

Quadro 83 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 1 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 11)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-58,33	-58,33
NAT1	-22,00	23,96
NAT2	-19,49	6,25
NAT3	-19,41	-20,83

Quadro 84 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 3 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 11)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-495,83	-495,83
NAT1	-190,31	-188,54
NAT2	-168,82	-154,17
NAT3	-168,16	-127,08

Quadro 85 - Valores teóricos obtidos através da aplicação da equação 11, das misturas REF, NAT 1, NAT 2 e NAT 3, para o dia 28 de idade.

Misturas cimentícias	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Eq. 11)	Extensão ($\times 10^6$) - ϵ_c (Val. Reais)
REF	-967,71	-967,71
NAT1	-377,58	-387,50
NAT2	-335,32	-334,38
NAT3	-334,02	-300,00

