



Influência de polímeros superabsorventes na retracção de argamassas

Mafalda Sofia Raimundo Coelho Guerreiro Vinagre

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil



Orientador: Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

Abril de 2010



Influência de polímeros superabsorventes na retracção de argamassas

Autora: Mafalda Sofia Raimundo Coelho Guerreiro Vinagre
Orientador: Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro



*Para os meus pais,
José e Emília.*

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível através do contributo de diversos intervenientes, quer directa ou indirectamente.

Ao Engenheiro Bettencourt Ribeiro, orientador científico da dissertação, agradeço a sua total disponibilidade, apoio e incentivo ao longo de todo o trabalho, assim como a sua transmissão de conhecimentos, que foram, sem dúvida, extremamente importantes para a realização deste trabalho e para o meu enriquecimento pessoal.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, pela experiência que me proporcionou ao me atribuir um estágio na Instituição para realização da parte laboratorial deste trabalho, o meu muito obrigada. Foi uma experiência gratificante e que aumentou o meu conhecimento académico.

Ao Sr. João Balsinha, Pedro Amaral, Gil Rosa e Sr. Ferreira agradeço o apoio contínuo que me deram ao longo dos ensaios experimentais e a boa disposição com que encaram o dia-a-dia.

À BASF agradeço o fornecimento dos polímeros em estudo neste trabalho, PLUS 1000, proporcionando a investigação de um material novo ainda em fase de estudo.

Ao Eng. Carlos Reis agradeço a disponibilidade e o fornecimento do agregado leve, Leca®, utilizado no trabalho experimental.

À IBERA - Indústria de Betão, S.A. agradeço a cedência do cimento utilizado no trabalho experimental.

À minha amiga Júlia Oliveira agradeço a sua colaboração e boa disposição, assim como o seu espírito de entajuda ao longo da campanha experimental e todo o trabalho realizado para esta dissertação.

Ao meu namorado Vítor agradeço a paciência, a motivação, o espírito crítico e todo o alto astral que me transmitiu durante a elaboração deste trabalho. Foi a minha inspiração nos dias menos criativos.

Ao meu irmão Marco e à minha cunhada Teresa agradeço a amizade, os momentos de lazer e a maneira descontraída de viverem a vida e todo o contributo dado nas traduções para a realização deste trabalho.

À D. Hortense e ao Sr. José Eduardo agradeço pela amabilidade de me receberem durante toda a campanha experimental. Sem dúvida, uma grande ajuda.

Por último, agradeço aos meus Pais que tornaram possível a minha formação académica e tudo fazem para que eu seja feliz. Obrigada.

Resumo

Hoje em dia, o desenvolvimento dos superplastificantes permite a produção de betões com menor razão água/cimento. Ao usar razões água/cimento mais baixas, os materiais cimentícios apresentam maior tendência para fissurar devido à retracção autogénea.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização de polímeros superabsorventes (SAP) no controlo da retracção.

O uso de SAPs em materiais cimentícios atenua a retracção autogénea pois estes produtos permitem o fornecimento interno de água. Estes produtos podem também afectar outras propriedades, afectando as características mecânicas e a trabalhabilidade.

Para análise do efeito dos SAP foram estudadas argamassas com várias concentrações deste produto, tendo como referência argamassas semelhantes sem SAP, determinando-se as retracções autogénea e total, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

Além de SAP, foi também utilizado um agregado leve, um outro tipo de introdutor de água, para comparação com os polímeros em estudo.

Palavras-Chave: Polímeros superabsorventes, controlo da retracção, retracção autogénea, autodessecação, fissuração, cura interna.

Influence of superabsorbent polymers on mortars shrinkage

Nowadays, the development of superplasticizers allows the production of concrete with low water/cement ratio. When using lower water/cement, the cementitious materials have greater tendency to crack due to autogenous shrinkage.

This work presents a study on the use of superabsorbent polymers (SAP) in the control of shrinkage.

The use of SAPs in cementitious materials reduces the autogenous shrinkage because these products enable the internal supply of water. These materials can also affect other properties such as mechanical properties and workability.

To analyze the effect of SAP, mortars containing various concentrations of this product were studied, in comparison with reference mortars without SAP. The tests performed were autogenous and total shrinkage, compressive strength and modulus of elasticity.

Besides SAP, it was also used a lightweight aggregate, another type of internal supply of water, for comparison with the polymers under study.

Keywords: super absorbent polymers, shrinkage control, autogenous shrinkage, self-desiccation, cracking, internal curing.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objectivo	1
1.3. Estrutura da dissertação	1
2. Os polímeros superabsorventes e o seu efeito nas misturas cimentícias	3
2.1. Produção dos SAP	4
2.1.1. Produção com base em solução aquosa	4
2.1.2. Produção através de polimerização por suspensão inversa	5
2.2. O mecanismo da retracção	6
2.3. Modelo de Powers	6
2.3.1. Desenvolvimento da hidratação do cimento	7
2.3.2. Efeitos da água introduzida na retracção	10
2.4. Efeito dos SAPs na trabalhabilidade da argamassa	11
2.5. Efeito dos SAPs na retracção autogénea e na retracção por secagem	11
2.6. Efeito dos SAPs nas propriedades mecânicas	13
2.7. Efeito dos SAPs na durabilidade da argamassa	14
3. Materiais utilizados	16
3.1. Cimento	16
3.2. Areia	18
3.2.1. Granulometria da Areia	18
3.2.2. Massa Volúmica e Absorção de Água da Areia	20
3.3. Polímeros Super Absorventes	23
3.4. Agregado Leve	23
3.4.1. Granulometria do Agregado Leve	24
3.4.2. Massa Volúmica e Absorção de Água do Agregado Leve	25

3.5.	Água.....	26
3.6.	Adjuvante.....	26
4.	Descrição do programa experimental e métodos de ensaio.....	27
4.1.	Preparação das argamassas.....	27
4.2.	Ensaio em estado fresco.....	34
4.2.1.	Espalhamento.....	34
4.3.	Preparação dos provetes.....	36
4.4.	Ensaio no estado endurecido.....	38
4.4.1.	Ensaio de resistência à flexão e à compressão.....	38
4.4.2.	Módulo de Elasticidade.....	42
4.4.3.	Retracção autogénea.....	45
4.4.4.	Retracção total.....	47
5.	Resultados obtidos no estado endurecido.....	50
5.1.	Argamassa Referência 32,5 (R 32,5).....	50
5.2.	Argamassa Referência Nova 42 (RN 42).....	54
5.3.	Argamassa Referência 42 (R 42).....	57
5.4.	Argamassa Agregado Leve (ALeVe).....	61
5.5.	Argamassa SAP 2 (SAP 2).....	65
5.6.	Argamassa SAP 3,25 (SAP 3,25).....	68
5.7.	Argamassa SAP 4,5 (SAP 4,5).....	71
5.8.	Argamassa Referência 32,5 + SAP (R 32,5 + SAP).....	74
5.9.	Argamassa Referência Nova 42 + SAP (RN 42 + SAP).....	77
6.	Análise de resultados.....	81
6.1.	Análise das Argamassas de Referência.....	81
6.2.	Efeito dos SAP.....	87
6.2.1.	Razão A/C=0,325 e razão cimento:areia constante.....	87

6.2.2.	Razão A/C=0,42 e razão cimento:areia constante	93
6.2.3.	Razão A/C=0,42 e maior razão cimento:areia na argamassa de referência.....	99
6.3.	Efeito do Agregado Leve	105
6.4.	Efeito da Areia	111
6.5.	Efeito Interno da Água	116
6.6.	Referências vs argamassas com melhores resultados obtidos	122
6.7.	Resistência vs água/cimento mais água do adjuvante e do SAP	129
7.	Conclusões	131
8.	Sugestões para desenvolvimentos futuros.....	132
9.	Bibliografia	133
Anexos		135
Anexo 1 - Argamassa Referência 32,5.....		i
Anexo 2 - Argamassa Referência Nova 42		vii
Anexo 3 - Argamassa Referência 42.....		xiii
Anexo 4 - Argamassa Agregado Leve.....		xix
Anexo 5 - Argamassa SAP 2		xxv
Anexo 6 - Argamassa SAP 3,25		xxxi
Anexo 7 - Argamassa SAP 4,5		xxxvii
Anexo 8 - Argamassa Referência 32,5 + SAP		xlili
Anexo 9 - Argamassa Referência Nova 42 + SAP.....		xliv

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia.....	19
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado leve.....	24
Gráfico 3 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa R 32,5	51
Gráfico 4 - Média da retracção por secagem da argamassa R 32,5.....	52
Gráfico 5 - Evolução da resistência à compressão da argamassa R 32,5.....	52
Gráfico 6 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa R 32,5.....	53
Gráfico 7 - Perda de massa dos provetes da retracção total da argamassa R 32,5	54
Gráfico 8 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa RN 42.....	55
Gráfico 9 - Média da retracção por secagem da argamassa RN 42	55
Gráfico 10 - Evolução da resistência à compressão da argamassa RN 42.....	56
Gráfico 11 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa RN 42	56
Gráfico 12 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa RN 42.....	57
Gráfico 13 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa R 42	58
Gráfico 14 - Média da retracção por secagem da argamassa R 42.....	59
Gráfico 15 - Evolução da resistência à compressão da argamassa R 42.....	59
Gráfico 16 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa R 42.....	60
Gráfico 17 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa R 42	61
Gráfico 18 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa ALeve.....	62
Gráfico 19 - Média da retracção por secagem da argamassa ALeve	62
Gráfico 20 - Evolução da resistência à compressão da argamassa ALeve	63
Gráfico 21 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa ALeve	64
Gráfico 22 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa ALeve.....	64
Gráfico 23 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa SAP 2.....	65
Gráfico 24 - Média da retracção por secagem da argamassa SAP 2	66
Gráfico 25 - Evolução da resistência à compressão da argamassa SAP 2	66

Gráfico 26 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa SAP 2	67
Gráfico 27 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa SAP 2	68
Gráfico 28 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa SAP 3,25	69
Gráfico 29 - Média da retracção por secagem da argamassa SAP 3,25	69
Gráfico 30 - Evolução da resistência à compressão da argamassa SAP 3,25	70
Gráfico 31 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa SAP 3,25	70
Gráfico 32 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa SAP 3,25	71
Gráfico 33 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa SAP 4,5	72
Gráfico 34 - Média da retracção por secagem da argamassa SAP 4,5	72
Gráfico 35 - Evolução da resistência à compressão da argamassa SAP 4,5	73
Gráfico 36 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa SAP 4,5	73
Gráfico 37 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa SAP 4,5	74
Gráfico 38 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa R 32,5 + SAP	75
Gráfico 39 - Média da retracção por secagem da argamassa R 32,5 + SAP	75
Gráfico 40 - Evolução da resistência à compressão da argamassa R 32,5 + SAP	76
Gráfico 41 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa R 32,5 + SAP	76
Gráfico 42 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa R 32,5 + SAP	77
Gráfico 43 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa RN 42 + SAP	78
Gráfico 44 - Média da retracção por secagem da argamassa RN 42 + SAP	78
Gráfico 45 - Valores da resistência à compressão da argamassa RN 42 + SAP	79
Gráfico 46 - Valores do módulo de elasticidade da argamassa RN 42 + SAP	79
Gráfico 47 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa RN 42 + SAP	80
Gráfico 48 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 32,5, RN 42 e R 42	82
Gráfico 49 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5, RN 42 e R 42	83
Gráfico 50 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,50, entre R 32,5, RN 42 e R 42	83

Gráfico 51 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 32,5, RN 42 e R 42	84
Gráfico 52 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre a R 32,5, RN 42 e R 42	85
Gráfico 53 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 32,5, RN 42 e R 42	85
Gráfico 54 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5, RN 42 e R 42.....	86
Gráfico 55 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5, RN 42 e R 42 .	87
Gráfico 56 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 32,5 e a R 32,5 + SAP	88
Gráfico 57 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5 e R 32,5 + SAP ..	89
Gráfico 58 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,495, entre R 32,5 e R 32,5 + SAP	89
Gráfico 59 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 32,5 e a R 32,5 + SAP	90
Gráfico 60 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre a R 32,5 e R 32,5 + SAP	91
Gráfico 61 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 32,5 e R 32,5 + SAP ..	91
Gráfico 62 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5 e R 32,5 + SAP	92
Gráfico 63 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5 e a R 32,5 + SAP	93
Gráfico 64 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	94
Gráfico 65 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	95
Gráfico 66 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,50, entre RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	95
Gráfico 67 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	96
Gráfico 68 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	97

Gráfico 69 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	97
Gráfico 70 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	98
Gráfico 71 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	99
Gráfico 72 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	100
Gráfico 73 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	100
Gráfico 74 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,49, entre R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	101
Gráfico 75 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	102
Gráfico 76 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	103
Gráfico 77 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	103
Gráfico 78 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	104
Gráfico 79 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP	105
Gráfico 80 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 32,5 e ALeve..	106
Gráfico 81 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5 e ALeve	107
Gráfico 82 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,529, entre R 32,5 e ALeve.....	107
Gráfico 83 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 32,5 e ALeve.....	108
Gráfico 84 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre a R 32,5 e ALeve...	109
Gráfico 85 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 32,5 e ALeve.....	109
Gráfico 86 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5 e ALeve	110

Gráfico 87 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5 e ALeve	110
Gráfico 88 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a RN 42 e R 42.....	111
Gráfico 89 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre RN 42 e R 42	112
Gráfico 90 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,50, entre RN 42 e R 42.....	112
Gráfico 91 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a RN 42 e R 42.....	113
Gráfico 92 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre a RN 42 e R 42.....	114
Gráfico 93 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a RN 42 e R 42.....	114
Gráfico 94 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a RN 42 e R 42	115
Gráfico 95 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a RN 42 e R 42.....	116
Gráfico 96 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP.....	117
Gráfico 97 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP	118
Gráfico 98 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,495, entre R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP.....	118
Gráfico 99 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP	119
Gráfico 100 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP.....	120
Gráfico 101 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP	120
Gráfico 102 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP	121
Gráfico 103 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP.....	122
Gráfico 104 - Comparação dos valores médios da retracção autogénea entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP	123

Gráfico 105 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP	124
Gráfico 106 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,50, entre R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP.....	125
Gráfico 107 - Comparação dos valores médios da retracção total entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP	126
Gráfico 108 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP	127
Gráfico 109 - Comparação dos valores de resistência à compressão entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP	127
Gráfico 110 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP	128
Gráfico 111 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP	129
Gráfico 112 - Resistência à compressão vs razão A/C + água do adjuvante e do SAP	130

Índice de Quadros

Quadro 1 - Constituintes do cimento	16
Quadro 2 - Resultados dos ensaios mecânicos segundo a NP EN 196-1	17
Quadro 3 - Resultados dos ensaios físicos	17
Quadro 4 - Resultados da análise química.....	18
Quadro 5 - Material passado	19
Quadro 6 - Valores das massas necessárias para o cálculo das massas volúmicas e absorção de água	22
Quadro 7 - Material passado	24
Quadro 8 - Valores das massas necessárias para o cálculo das massas volúmicas e absorção de água	25
Quadro 9 - Identificação das argamassas e dos provetes	30
Quadro 10 - Massas volúmicas dos materiais.....	31
Quadro 11 - Traços em peso usados para o fabrico das argamassas	31
Quadro 12 - Massas usadas para o fabrico das argamassas	32
Quadro 13 - Dosagem das argamassas.....	32
Quadro 14 - Espalhamento do estudo da concentração de SAP a utilizar	33
Quadro 15 - Espalhamento de argamassa com 3,5% de SAP ao fim de 45 minutos da realização da argamassa	33
Quadro 16 - Resultados do ensaio de espalhamento	36
Quadro 17 - Temperaturas e Humidade Relativa registadas na sala de armazenamento	48
Quadro 18 - Valores para avaliação da coerência dos resultados.....	130

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação do efeito da água num polímero superabsorvente: à esquerda no estado seco e à direita no estado expandido, após absorção da água	3
Figura 2 - Partículas e forma dos poros para polímeros de polimerização gel [2]	5
Figura 3 - Partículas e forma dos poros para polímeros de polimerização de suspensão inversa [2] ...	5
Figura 4 - Distribuição volumétrica da pasta de cimento em função do grau de hidratação, α , com uma razão A/C=0,6 [1]	8
Figura 5 - Esquema de desenvolvimento das isotérmicas de absorção durante a hidratação em sistema fechado com razão A/C=0,6 de acordo com o Modelo de Powers [1]	9
Figura 6 - Distribuição volumétrica da pasta de cimento em função do grau de hidratação, α , com uma razão A/C=0,3 [1]	9
Figura 7 - Esquema de desenvolvimento das isotérmicas de absorção durante a hidratação em sistema fechado com razão A/C=0,3 de acordo com o Modelo de Powers [1]	10
Figura 8 - Areia saturada com superfície seca	21
Figura 9 - Misturador A	28
Figura 10 - Misturador B	28
Figura 11 - Recipiente do misturador A	29
Figura 12 - Recipiente do misturador B	29
Figura 13 - Pá misturadora do misturador A	29
Figura 14 - Pá misturadora do misturador B	29
Figura 15 - Alisamento e retiro da argamassa em excesso	34
Figura 16 - Argamassa com baixo espalhamento	35
Figura 17 - Argamassa fluida	35
Figura 18 - Molde utilizado para elaboração dos provetes das resistências e módulo de elasticidade	37
Figura 19 - Molde utilizado para a elaboração dos provetes da retracção autogénea e total	37
Figura 20 - Início do ensaio de resistência à flexão	38
Figura 21 - Carga aplicada no provete no ensaio de resistência à flexão	39

Figura 22 - Ruptura do provete no ensaio de resistência à flexão	39
Figura 23 - Aparelho para ensaio de resistência à compressão	41
Figura 24 - Aplicação da carga no ensaio de resistência à compressão no semi-prisma	41
Figura 25 - Ruptura do semi-prisma no ensaio de resistência à compressão	41
Figura 26 - Equipamento de aplicação de cargas no ensaio do módulo de elasticidade	43
Figura 27 - Provetes com instrumentos de medida para o ensaio do módulo de elasticidade.....	44
Figura 28 - Equipamento para leitura das extensões incitadas pelo ensaio.....	44
Figura 29 - Equipamento para medição das extensões no ensaio de retracção autogénea.....	46
Figura 30 - Provetes para medição da retracção autogénea.....	46
Figura 31 - Provetes para medição da retracção total	49
Figura 32 - Pormenor dos pernos.....	49

Índice de Quadros em Anexo

Quadro A. 1 - Dados obtidos no ensaio da retracção autogénea da argamassa R 32,5.....	iii
Quadro A. 2 - Dados obtidos no ensaio da retracção total da argamassa R 32,5.....	iv
Quadro A. 3 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa R 32,5.....	v
Quadro A. 4 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa R 32,5.....	vi
Quadro A. 5 - Valores obtidos através dos ensaios mecânicos e módulo de elasticidade da argamassa R 32,5.....	vi
Quadro A. 6 - Dados obtidos no ensaio da retracção autogénea da argamassa RN 42.....	ix
Quadro A. 7 - Dados obtidos no ensaio da retracção total da argamassa RN 42.....	x
Quadro A. 8 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa RN 42.....	xi
Quadro A. 9 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa RN 42.....	xii
Quadro A. 10 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa RN 42...xii	
Quadro A. 11 - Dados obtidos no ensaio da retracção autogénea da argamassa R 42.....	xv
Quadro A. 12 - Dados obtidos no ensaio da retracção total da argamassa R 42.....	xvi
Quadro A. 13 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa R 42.....	xvii
Quadro A. 14 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa R 42.....	xviii
Quadro A. 15 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa R 42... xviii	
Quadro A. 16 - Dados obtidos no ensaio da retracção autogénea da argamassa ALeve.....	xxi
Quadro A. 17 - Dados obtidos no ensaio da retracção total da argamassa ALeve.....	xxii
Quadro A. 18 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa ALeve.....	xxiii
Quadro A. 19 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa ALeve.....	xxiv
Quadro A. 20 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa ALeve	xxiv
Quadro A. 21 - Dados obtidos no ensaio da retracção autogénea da argamassa SAP 2.....	xxvii
Quadro A. 22 - Dados obtidos no ensaio da retracção total da argamassa SAP 2.....	xxviii
Quadro A. 23 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa SAP 2.....	xxix
Quadro A. 24 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa SAP 2.....	xxx

Quadro A. 25 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa SAP 2	.xxx
Quadro A. 26 - Dados obtidos no ensaio da retracção autogénea da argamassa SAP 3,25	..... xxxiii
Quadro A. 27 - Dados obtidos no ensaio da retracção total da argamassa SAP 3,25	..... xxxiv
Quadro A. 28 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa SAP 3,25	.xxxv
Quadro A. 29 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa SAP 3,25	..... xxxvi
Quadro A. 30 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa SAP 3,25	..... xxxvi
Quadro A. 31 - Dados obtidos no ensaio da retracção autogénea da argamassa SAP 4,5	..... xxxix
Quadro A. 32 - Dados obtidos no ensaio da retracção total da argamassa SAP 4,5	..... xl
Quadro A. 33 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa SAP 4,5	..... xli
Quadro A. 34 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa SAP 4,5	..... xlii
Quadro A. 35 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa SAP 4,5	..... xlii
Quadro A. 36 - Dados obtidos no ensaio da retracção autogénea da argamassa R 32,5 + SAP	..... xlv
Quadro A. 37 - Dados obtidos no ensaio da retracção total da argamassa R 32,5 + SAP	..... xlvi
Quadro A. 38 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa R 32,5 + SAP	..... xlvii
Quadro A. 39 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa R 32,5 + SAP	.... xlviii
Quadro A. 40 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa R 32,5 + SAP	..... xlviii
Quadro A. 41 - Dados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa RN 42 + SAP	..... li
Quadro A. 42 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa RN 42 + SAP	..... lii
Quadro A. 43 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa RN 42 + SAP	..... liii
Quadro A. 44 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa RN 42 + SAP	..... liv
Quadro A. 45 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa RN 42 + SAP	..... liv

Índice de Gráficos em Anexo

Gráfico A. 1 - Retracção autogénea da argamassa R 32,5.....	v
Gráfico A. 2 - Retracção total da argamassa R 32,5.....	vi
Gráfico A. 3 - Retracção autogénea da argamassa RN 42.....	xi
Gráfico A. 4 - Retracção total da argamassa RN 42.....	xii
Gráfico A. 5 - Retracção autogénea da argamassa R 42.....	xvii
Gráfico A. 6 - Retracção total da argamassa R 42.....	xviii
Gráfico A. 7 - Retracção autogénea da argamassa ALeve.....	xxiii
Gráfico A. 8 - Retracção total da argamassa ALeve.....	xxiv
Gráfico A. 9 - Retracção autogénea da argamassa SAP 2.....	xxix
Gráfico A. 10 - Retracção total da argamassa SAP 2.....	xxx
Gráfico A. 11 - Retracção autogénea da argamassa SAP 3,25.....	xxxv
Gráfico A. 12 - Retracção total da argamassa SAP 3,25.....	xxxvi
Gráfico A. 13 - Retracção autogénea da argamassa SAP 4,5.....	xli
Gráfico A. 14 - Retracção total da argamassa SAP 4,5.....	xlii
Gráfico A. 15 - Retracção autogénea da argamassa R 32,5 + SAP.....	xlvii
Gráfico A. 16 - Retracção total da argamassa R 32,5 + SAP.....	xlviii
Gráfico A. 17- Retracção autogénea da argamassa RN 42 + SAP.....	liii
Gráfico A. 18 - Retracção total da argamassa RN 42 + SAP.....	liv

Abreviaturas

A/C – Água/Cimento;

HR – Humidade relativa;

LWA – (Light Weight Aggregate) Agregado Leve;

SAP – (Super Absorbent Polymers) Polímeros Superabsorventes;

SP – Superplastificante;

Simbologia

b – Lado da secção quadrada do prisma;

E_a – Módulo de elasticidade do agregado;

E_c – Módulo de elasticidade em compressão;

E_p – Módulo de elasticidade da pasta.

F_c – Carga máxima na rotura;

f_c – tensão de rotura à compressão;

F_r – Carga aplicada no centro do prisma na rotura;

l₁ – Resultado da medição da barra padrão, no início do ensaio, 0,75 dias;

l₂ – Resultado da medição do provete, no início do ensaio, 0,75 dias;

l₃ – Resultado da medição da barra padrão, no final do ensaio, aos 1, 2, 3, 4, 7, 14, 28 dias;

l₄ – Resultado da medição do provete, no final do ensaio, aos 1, 2, 3, 4, 7, 14, 28 dias;

l – Distância entre os apoios;

m₁ – Massa do provete com partículas saturadas sem água superficial (g);

m₂ – Massa do balão com o provete e água (g);

m₃ – Massa do provete seco (g);

m₄ – Massa do balão com água (g);

p – Porosidade inicial;

R_c – Resistência à compressão;

R_f – Resistência à flexão;

u – Conteúdo de água evaporável;

V_a – Volume de agregado;

V_{cs} – Volume relativo da retracção química;

V_{cw} – Volume relativo da água capilar;

V_{gw} – Volume relativo da água gel;

V_i – Volume relativo;

V_{uc} – Volume relativo do cimento anidro;

α – Grau de hidratação;

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

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

ϵ_c – Retracção autogénea da argamassa;

ϵ_p – Retracção autogénea da pasta;

ρ – Massa volúmica (kg/m^3);

ρ_c – Massa volúmica do cimento;

ρ_w – Massa volúmica da água;

σ – Tensão de resistência;

σ_a – Tensão máxima aplicada;

σ_b – Tensão inicial;

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

Actualmente usam-se argamassas e betões com menor razão água/cimento (A/C) devido ao desenvolvimento dos superplastificantes. Uma razão A/C baixa leva a que surja mais fissuração nas obras devido à retracção autogénea.

Os polímeros super absorventes (SAPs) são um novo material que permite fornecer água internamente, com efeitos menores na resistência, ou seja obtendo desempenhos equivalentes a misturas de razão A/C baixa.

O âmbito deste trabalho é o controlo da retracção através de SAPs. Estes materiais permitem diminuir a retracção autogénea por introdução de água adsorvida tendo assim potencial para diminuir a fissuração por retracção autogénea.

1.2. Objectivo

A utilização de SAPs na construção é ainda incipiente, existem apenas casos esporádicos de aplicação, mas as obras onde eles foram aplicados mostram que eles podem ser muito eficientes.

Este material não está porém ainda disponível no mercado para utilização corrente. No entanto, a indústria já disponibiliza produtos que estão em fase experimental para esse fim. O objectivo deste trabalho foi o de avaliar a eficiência de um desses produtos, usado em diferentes quantidades, por comparação com resultados obtidos em misturas de referência sem introdutores de água e numa mistura com agregados leves (LWA), um outro introdutor de água.

A presente dissertação, baseada num trabalho laboratorial, tem como objectivo fundamental a avaliação da eficiência da utilização de SAPs no controlo da retracção de argamassas.

Desenvolveram-se assim nove argamassas distintas, três argamassas de referência, uma com adição de agregado leve (LWA) e cinco argamassas com SAP.

1.3. Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em 7 capítulos principais, cujo conteúdo é apresentado nos parágrafos seguintes.

O 2º capítulo descreve os conceitos teóricos fundamentais que estão na base do funcionamento dos SAPs. Apresenta-se a relação entre os SAPs e a retracção de argamassas que os incorporem, bem como outros efeitos dos SAPs em propriedades relevantes para o comportamento do material.

No 3º capítulo faz-se referência aos materiais utilizados no trabalho laboratorial e apresentam-se as suas características. Algumas dessas características foram determinadas especificamente para este trabalho, sendo as metodologias usadas descritas neste capítulo.

Segue-se, no 4º capítulo, a descrição do programa experimental e dos métodos de ensaio, englobando os ensaios a realizar e respectivos procedimentos laboratoriais, atendendo à normalização portuguesa e a outros métodos normalizados.

No 5º capítulo apresentam-se os resultados obtidos na campanha experimental e é apresentado um breve comentário sobre estes resultados.

É no 6º capítulo que se faz a análise de resultados, comparando as várias argamassas entre si e analisando separadamente a influência dos vários parâmetros objecto de estudo.

No 7º capítulo apresentam-se as conclusões finais do presente trabalho.

O 8º capítulo é dedicado aos desenvolvimentos futuros que poderão surgir na sequência do estudo realizado.

2. Os polímeros superabsorventes e o seu efeito nas misturas cimentícias

Os polímeros superabsorventes, SAPs, são um grupo de materiais poliméricos com capacidade para adsorver uma quantidade significativa de líquido e de reter esse líquido na sua estrutura. Os SAPs são utilizados principalmente para adsorverem água e soluções aquosas – cerca de 95 % dos SAPs produzidos no mundo são usados como absorventes de urina em tecidos descartáveis (fraldas). Os SAPs podem ser produzidos com uma adsorção de água até 5000 vezes o seu tamanho. Contudo, em soluções com sal diluído, tais como a urina, a adsorvência dos SAPs produzidos comercialmente é de cerca de 50 g/g [1].

São conhecidos dois tipos diferentes de SAPs, por serem obtidos de duas maneiras diferentes. Estas duas formas de obtenção dos SAPs são descritas mais à frente. As partículas podem ser preparadas com vários tamanhos e formas [1].

Os SAPs, polímeros que expandem em contacto com água ou soluções aquosas, resultam na formação de um hidrogel [2].

Os SAPs consistem em cadeias ligadas que têm dissociados grupos funcionais iónicos facilitando a adsorção de grandes quantidades de água. Esta água fica retida no polímero, e não é libertada mesmo sob pressão. Do ponto de vista químico, toda a água dentro de um polímero super absorvente pode, essencialmente, ser considerado uma massa de água [1, 3].

Os SAPs existem em duas fases distintas, secos e dilatados. A fase de transição é o resultado de um balanço competitivo entre as forças de repulsão que actuam de forma a expandir a estrutura do polímero e forças atractivas que retraem a estrutura [1]. Na Figura 1 é possível ver a representação da fase seca e da fase dilatada.



Figura 1 - Representação do efeito da água num polímero superabsorvente: à esquerda no estado seco e à direita no estado expandido, após absorção da água

Propriedades importantes dos SAPs incluem a capacidade de expansão, a resistência e módulo de elasticidade do gel expandido. Estas propriedades dependem da densidade de reticulação da rede no polímero: o módulo de elasticidade aumenta e diminui a capacidade de expansão com o aumento da densidade das ligações. Geralmente, quanto maior o teor de água do gel, piores as propriedades mecânicas do gel [1].

2.1. Produção dos SAP

A produção dos SAPs pode ser realizada por dois métodos diferentes. Num dos métodos as partículas ficam com um aspecto anguloso no final da produção, enquanto no outro as partículas têm uma forma esférica. O primeiro processo é um processo mais barato, sendo por isso mais atractivo do ponto de vista económico. Os processos são descritos a seguir.

2.1.1. Produção com base em solução aquosa

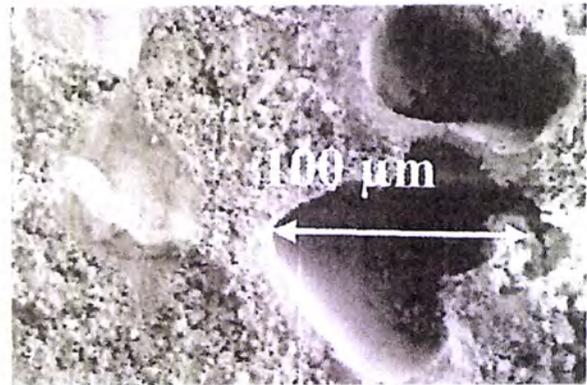
A produção dos SAPs por este método começa com uma solução aquosa do monómero, com uma concentração de 25 a 40 por cento em massa. A solução é arrefecida a uma temperatura entre 0 ° a 10 °C e transferida para o reactor, que pode ser uma correia sem-fim ou uma amassadora. No caso da utilização de sem-fim, a solução aquosa é vertida no início desta correia e a polimerização é executada de forma adiabática formando uma borracha dura, tipo gel. No final da correia o gel é cortado por uma extrusora em pequenos pedaços, que depois são secos. As partículas secas são moídas para a granulometria desejada. No caso da amassadora a polimerização e o corte do gel são feitos de uma só vez. Ambos os processos são usados em larga escala, acima de 100.000 toneladas por ano [2].

As partículas que são feitas com estes processos têm uma forma irregular e, por observação ao microscópio, assemelham-se a vidro partido.

Na Figura 2 é ilustrada a forma das partículas do gel de polímero e os poros formados numa pasta de cimento após secagem.



Partículas



Poros

Figura 2 - Partículas e forma dos poros para polímeros de polimerização gel [2]

2.1.2. Produção através de polimerização por suspensão inversa

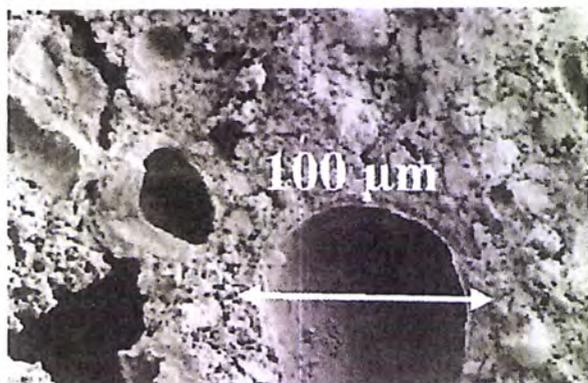
Um processo alternativo é a tecnologia de produção através de polimerização por suspensão inversa. Neste processo, o monómero encontra-se numa suspensão com um solvente orgânico, por exemplo hexano ou ciclohexano. A polimerização é iniciada a uma temperatura entre 50 ° e 70 °C e, após a polimerização, a água pode ser removida por destilação azeotrópica. O produto é filtrado e seco. Os SAPs que são produzidos por este processo são esféricos ou apresentam a forma de framboesa quando aglomerados [2].

A produção de grandes volumes de SAPs através de polimerização por suspensão inversa é limitada devido ao custo elevado.

Na Figura 3 é ilustrado a forma das partículas obtidas por polimerização de suspensão inversa e os poros formados numa pasta de cimento após secagem.



Partículas



Poros

Figura 3 - Partículas e forma dos poros para polímeros de polimerização de suspensão inversa [2]

2.2. O mecanismo da retracção

As variações de volume de pastas, argamassas e betões devidas à retracção são fontes importantes de tensões autoequilibradas e de esforços, que em muitos casos levam à fissuração [4]. A retracção é um fenómeno caracterizado pela redução de volume de materiais cimentícios associada às reacções de hidratação do ligante e à saída de água. A principal razão desta redução é a perda de parte da água utilizada no seu fabrico, designando-se esta diminuição de volume por retracção autogénea e retracção de secagem. Além destes dois tipos de retracção, existem outros tipos de retracção, como retracção plástica, retracção química ou retracção por carbonatação, cuja análise não é objecto deste trabalho dado que o efeito dos SAPs nestas retracções é de menor relevância.

A retracção autogénea acontece como resultado do processo de hidratação do ligante, sem trocas de humidade com o exterior e a temperatura constante, e aumenta com a diminuição da razão água/cimento, resultando apenas da diminuição de volume associado a reacções de hidratação.

A retracção por secagem é devida à diminuição da humidade relativa (HR) nos poros dos materiais cimentícios, por evaporação, sendo a parcela mais significativa de toda a retracção em betões correntes. A retracção por secagem aumenta com o aumento de razão água/cimento dos materiais cimentícios.

A retracção plástica ocorre nas primeiras horas após a mistura e antes do material endurecer, ou seja, antes do desenvolvimento das propriedades mecânicas. Este tipo de retracção pode resultar em fendilhação, principalmente superficial, e além do aspecto estético negativo pode prejudicar a durabilidade do material.

A retracção por carbonatação ocorre porque a reacção do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono para formar o carbonato de cálcio dá-se com diminuição de volume.

À soma de todas as retracções designa-se retracção total.

Para compreender o mecanismo da retracção é necessário abordar a hidratação do cimento e a sua relação com as variações de volume. Para tal, apresenta-se em seguida o Modelo de Powers.

2.3. Modelo de Powers

Powers e Brownyard dedicaram 12 anos de investigação à distribuição de fases na pasta de cimento e o resultado foi apresentado em 1948 [1]. Esta distribuição de fases na pasta de cimento é importante para propriedades tais como a permeabilidade, a resistência e a acção gelo/degelo. Mais tarde, Powers continuou a investigação do modelo e é, por isso, hoje em dia, chamado de Modelo de Powers.

Neste modelo, a água na pasta de cimento pode ser classificada em três fases: água capilar (água livre), água gel (água ligada fisicamente) e água ligada quimicamente (água não evaporável). O Modelo de Powers é baseado nesta distribuição de fases da água.

Powers define água ligada quimicamente como a água que reage com o cimento durante a hidratação, uma vez que faz parte dum gel sólido e é apenas expelida a temperaturas acima de 105 °C. A água gel corresponde a uma película de água adsorvida no gel sólido que pode ser extraída com diferentes energias correspondentes ao intervalo de humidade relativa entre 0 a 100 %. A água livre é a água presente nos poros capilares e é apenas esta água capilar que pode ser utilizada para a continuação da hidratação do cimento.

As quantidades de água ligada quimicamente, água gel e retracção química dependem da composição do cimento. Todavia, de forma aproximada o Modelo de Powers permite o cálculo dessas quantidades, com base no grau de hidratação, que reflecte a parcela de cimento hidratada, em relação ao total de cimento anidro inicial.

As aproximações dos volumes relativos de acordo com o Modelo de Powers para o cimento Portland são obtidas pelas expressões seguintes:

$V_{cs} = \rho_c 6.4 \cdot 10^{-5} (1 - p)\alpha =$	$0.20(1 - p)\alpha$	(retracção química)
$V_{cw} = p - (\rho_c / \rho_w)(0.19 + 0.23)(1 - p)\alpha =$	$p - 1.32 (1 - p)\alpha$	(água capilar)
$V_{gw} = (\rho_c / \rho_w)0.19(1 - p)\alpha =$	$0.60 (1 - p)\alpha$	(água gel)
$V_{gs} = (1 - \rho_c 6.4 \cdot 10^{-5} + (\rho_c / \rho_w)0.23)(1 - p)\alpha =$	$1.52 (1 - p)\alpha$	(gel sólido)
$V_{uc} = (1 - p)(1 - \alpha) =$	$(1 - p)(1 - \alpha)$	(cimento anidro)

Onde V_i é o volume relativo [m^3/m^3 de pasta de cimento], α é o grau de hidratação [cimento que reagiu/cimento inicial, kg/kg], ρ_c massa volúmica do cimento, ρ_w massa volúmica da água, p é a porosidade inicial, $p = V_{cw,0} = \frac{a/c}{a/c + \rho_w / \rho_c}$, e a/c é a razão água/cimento [kg/kg].

2.3.1. Desenvolvimento da hidratação do cimento

A Figura 4 apresenta as relações volumétricas calculadas pelo Modelo de Powers para a hidratação de uma pasta de cimento com razão A/C elevada. O esquema é relativo a um sistema fechado, sem trocas de humidade entre a pasta de cimento e o meio envolvente. Quando existe uma razão A/C alta ($A/C > 0,42$), a hidratação da pasta de cimento é completa e surge um excesso de água capilar. À medida que a hidratação ocorre, o cimento reage com a água e forma gel sólido. Na superfície do gel

sólido, uma quantidade de água, água gel, é limitada por forças de adsorção. Como o gel sólido ocupa menos espaço do que o cimento anidro e a água, são formados poros dentro do sistema fechado da pasta de cimento, que ficarão preenchidos com água.

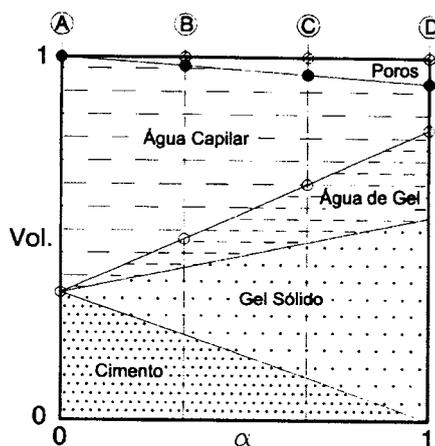


Figura 4 - Distribuição volumétrica da pasta de cimento em função do grau de hidratação, α , com uma razão $A/C=0,6$ [1]

A Figura 5 apresenta esquematicamente isotérmicas de absorção durante a hidratação de uma pasta com uma razão A/C alta.

No início da hidratação temos apenas cimento anidro e água, zona A da Figura 4 e da Figura 5. À medida que a hidratação progride é formado gel sólido e entre este existe água gel. Simultaneamente, o volume de água livre diminui, mas é suficiente para manter a humidade relativa em 100 %, Zonas B, C e D da Figura 4 e da Figura 5. A linha que une os 0 aos 100 % de humidade relativa traduz a água gel em equilíbrio para os diferentes valores de HR.

A água capilar está em equilíbrio com uma humidade relativa de 100 %, para superfícies praticamente horizontais e desprezando a influência de sais dissolvidos. A água gel tem uma gama de energias de ligação correspondentes ao intervalo de humidade relativa de 0 a 100 %. Com um grau crescente de hidratação, a água capilar é parcialmente utilizada, e a quantidade de água gel aumenta. Devido à grande quantidade de água capilar, a humidade relativa nos poros da pasta de cimento será de 100 % após a hidratação completa do cimento.

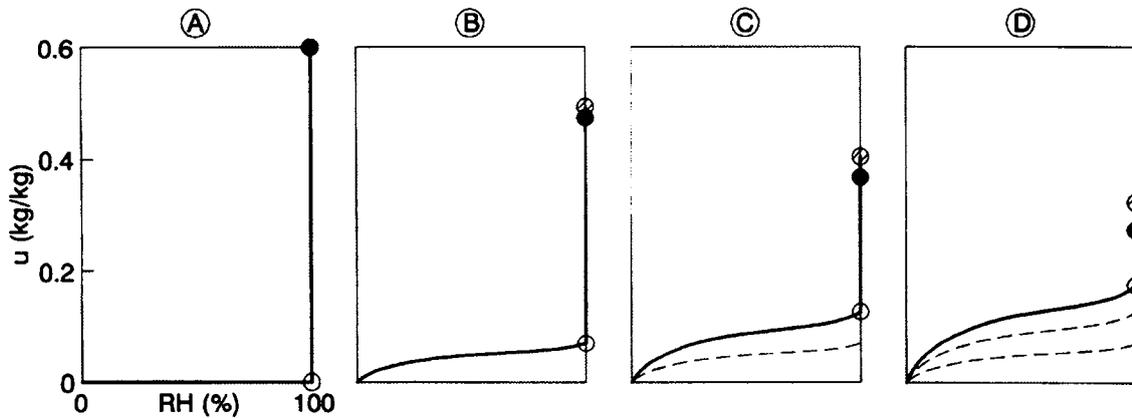


Figura 5 - Esquema de desenvolvimento das isotérmicas de absorção durante a hidratação em sistema fechado com razão A/C=0,6 de acordo com o Modelo de Powers [1]

As isotérmicas A a D referem-se aos diferentes graus de hidratação apresentados na Figura 5. O conteúdo de água evaporável, u , é exibido em kg de água por kg de sólido (cimento e gel sólido). Os símbolos representam: \odot conteúdo de água evaporável em caso de saturação de água. \bullet Conteúdo da água evaporável depois de hidratado e em sistema fechado. \circ Conteúdo água gel a 100 % HR.

Quando a razão A/C é inferior a 0,42, a água capilar existente não é suficiente para garantir a hidratação total do cimento, como pode ser observado na Figura 6. De acordo com o trabalho de

Powers, a hidratação do cimento não pode continuar quando é atingido um mínimo de porosidade no gel de cimento (gel sólido e água gel). Powers explica a porosidade mínima de gel como uma consequência do crescimento no espaço restrito existente no gel e a incapacidade de formar novas partículas na superfície da água adsorvida (água gel). A porosidade mínima de gel é alcançada no estado D da Figura 6 quando a hidratação acaba.

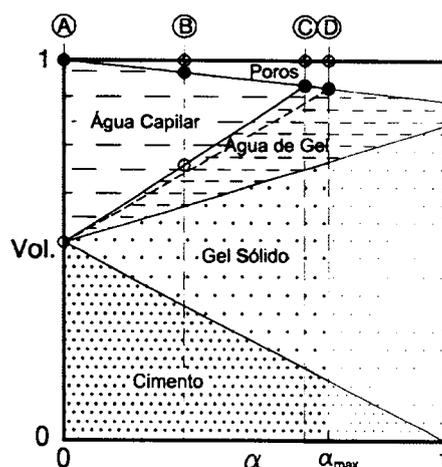


Figura 6 - Distribuição volumétrica da pasta de cimento em função do grau de hidratação, α , com uma razão A/C=0,3 [1]

O diagrama da Figura 6 aplica-se a hidratação selada, em sistema fechado. A hidratação total do cimento não pode ser obtida devido à baixa razão A/C .

A Figura 7 apresenta esquematicamente isotérmicas de absorção durante a hidratação com uma razão A/C baixa. Após o estado C, a água capilar já foi consumida e a hidratação é retardada significativamente pois o cimento tenta reagir com a água gel que não está livre e necessita uma energia superior para ser consumida. Isso resulta numa diminuição da humidade relativa, ou seja, a autodessecação da pasta de cimento (estado C-D).

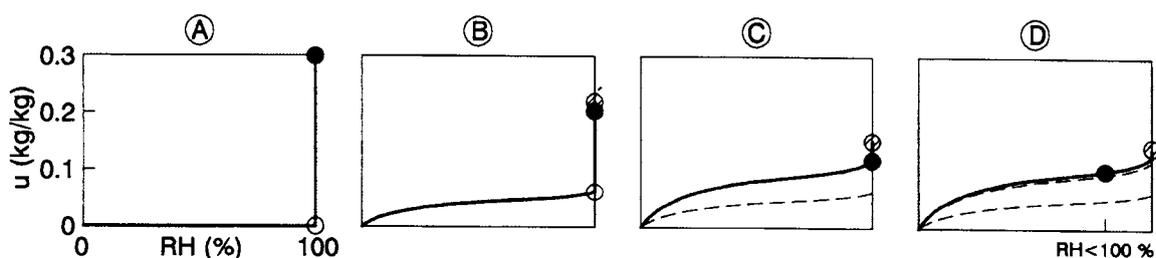


Figura 7 - Esquema de desenvolvimento das isotérmicas de absorção durante a hidratação em sistema fechado com razão $A/C=0,3$ de acordo com o Modelo de Powers [1]

As quatro isotérmicas, A a D apresentados na Figura 7, representam os diferentes graus de hidratação mostrados na Figura 6. Os símbolos representam: ⊕ conteúdo de água evaporável em caso de saturação de água. ● Conteúdo da água evaporável depois de hidratado e em sistema fechado. ○ Conteúdo água gel a 100 % HR. Devido a um défice de água capilar, a pasta de cimento auto-seca na última fase de hidratação (C-D).

2.3.2. Efeitos da água introduzida na retracção

A água introduzida impede efectivamente a autodessecação da pasta de cimento endurecida. A autodessecação só acontece quando a humidade relativa é inferior a 100 %. Quando existe um fornecimento externo ou interno de água, a humidade relativa pode manter-se em 100 % e, portanto, não existir autodessecação, ou secagem interna, mesmo que a água capilar seja consumida.

Uma vez que a existência de água interna aumenta a porosidade, e que os poros geralmente têm uma influência negativa nas propriedades de uma pasta de cimento, deve-se apenas adicionar a quantidade necessária para impedir a auto-secagem dessa pasta. Através do Modelo de Powers, equações apresentadas no capítulo 2.3, é possível estimar-se a quantidade necessária de água introduzida para evitar a auto-secagem.

2.4. Efeito dos SAPs na trabalhabilidade da argamassa

A adição de SAPs em materiais cimentícios pode alterar consideravelmente a sua reologia. Todavia, num estudo realizado descrito em [3] conclui-se que o uso de SAPs não tem efeito negativo sobre a trabalhabilidade do betão. Esta conclusão não deve porém ser interpretada sem ter em conta o que se está efectivamente a comparar, pelo que é necessário analisar de forma pormenorizada a influência dos SAPs no estado fresco.

Mantendo a dosagem de água, a adição de SAPs no estado seco causa uma acção de espessamento, aumentando os parâmetros reológicos, nomeadamente a coesão e a viscosidade.

O efeito causado pelo espessamento dos SAPs pode ser uma vantagem, especialmente para argamassas projectadas por via húmida. O efeito do espessamento pode ser útil uma vez que uma série de dificuldades tecnológicas relacionadas com este processo podem ser evitadas. Por exemplo, para permitir um bombeamento por via húmida é necessário um espalhamento elevado mas, para minimizar as perdas por ricochete e para permitir uma boa espessura durante a projecção da argamassa é necessário ter um espalhamento baixo.

Jensen (2008) acredita que a dificuldades de obter espalhamento elevado pode ser evitada através da adição seca de SAPs no bico durante a projecção da argamassa. A captação de água pelos SAPs cria uma mudança de viscosidade durante a colocação e permite a acumulação de camadas espessas sem se retirar os aditivos aceleradores na mistura.

Apesar de a trabalhabilidade diminuir se os SAPs forem introduzidos no estado seco, uma vez que vai captar a água livre disponível na pasta, e assim reduzir o volume da fase líquida, se a dosagem de água inicial tiver em conta esta adsorção, o efeito na trabalhabilidade pode ser minorado.

2.5. Efeito dos SAPs na retracção autogénea e na retracção por secagem

Este sub-capítulo avalia o efeito dos SAPs como um meio de cura interna para atenuar a retracção autogénea, e, uma vez que o uso de SAPs altera a quantidade de água total, os efeitos sobre a retracção por secagem são também avaliados.

A retracção autogénea é definida como a deformação de um sistema fechado e isotérmico dum material cimentício não sujeito a forças externas. Resulta do processo de hidratação do cimento, onde a água livre é gradualmente ligada quimicamente e fisicamente [4].

Ao existir uma diminuição do raio dos meniscos de água nos poros, ocorre um aumento da tensão na água capilar, e esta tensão desenvolve no esqueleto sólido uma compressão para compensar as tensões de tracção na fase fluida e restaurar o equilíbrio. Este fenómeno resulta da redução do volume de todo o sistema, e é chamado de retracção autogénea [4].

Para combater o efeito da retracção autogénea tem sido proposto adicionar materiais de alta capacidade de armazenamento de água nas misturas promovendo uma cura interna mais prolongada. Nos anos 90 começou por se adicionar agregados leves, LWA, saturados e mais tarde foram propostos outros agentes de cura interna como o caso dos SAPs que tiveram uma boa aprovação e são considerados uns dos agentes mais adequados para a utilização como regulador de água [4].

É necessário escolher técnicas adequadas de medição da retracção autogénea para quantificar a eficiência da cura interna utilizando SAPs. Uma das medidas a tomar é começar com as medições o mais cedo possível, eventualmente imediatamente a seguir à mistura, na tentativa de registar toda a história das deformações nas idades mais jovens. Este método é possível, nomeadamente quando se utilizam moldes ondulados com dilatómetros [16]. Noutro método, o utilizado no trabalho experimental deste estudo e também o mais corrente, as medições iniciam-se após a desmoldagem dos provetes endurecidos. Em geral a primeira medição é efectuada ao fim de um dia, mas neste trabalho ela foi realizada às 18 horas, com vantagens para a apreciação dos resultados. Este segundo método segue o princípio de medição da Especificação LNEC E 398-1993 [17].

Ao se utilizar partículas de SAPs em materiais cimentícios é de esperar uma diminuição da retracção autogénea, que se reflecte em alterações de volume mais moderadas. A deformação autogénea é importante, tal como já se referiu, na medida que, no endurecimento dos materiais cimentícios é reduzido o desenvolvimento de tensões de tracção no material e conseqüentemente a possibilidade dele fissurar.

Quando se usa SAPs em materiais cimentícios é preciso ter em conta alguns factores. Para se obter uma mistura mais homogénea da distribuição das partículas de SAPs é necessária uma mistura mais intensa. Todavia, se a mistura for muito intensa, por exemplo associada à presença de grande volume de agregados, a carga mecânica nos SAPs pode ser tal que ocorra destruição de partículas de SAPs [4].

Em outros estudos realizados, descritos em [4], o uso de SAPs em dosagens crescentes apresentam reduções sucessivas da retracção autogénea com o aumento da concentração dos polímeros, induzindo até alguma expansão. Em alguns casos, com razões A/C baixas (0,25) e concentração de SAPs superior (0,70 % da massa de cimento, em pó) a retracção autogénea foi completamente impedida. Nestas pastas existe dilatação desde o início da cura. Quando se aumentou a razão A/C para 0,33, a retracção autogénea foi reduzida com a presença de SAPs mas não foi totalmente impedida.

Outro factor que pode influenciar o desempenho dos SAPs é a sua granulometria. Lura et al. mostraram que quando se usam partículas de SAPs mais pequenas, esperando um aumento da eficiência da cura interna por causa duma melhor distribuição das partículas, a eficiência geral da cura interna foi menor do que em pastas com partículas de SAPs maiores. É sugerido que as pequenas partículas de SAPs, com uma maior relação superfície/volume, libertem água de cura interna mais devagar em idades precoces e que é a parte interior dos SAPs o principal reservatório

de água. No entanto, quando a quantidade de SAPs é suficiente para evitar a autodessecação, qualquer tamanho das partículas de SAPs é eficiente na eliminação da retracção autogénea [4].

Outro efeito da utilização de SAPs em materiais cimentícios é o aumento da retracção por secagem, contrariamente ao comportamento relativamente à retracção autogénea. A retracção por secagem aumenta quando são utilizados SAPs, com a água de cura interna correspondente. O aumento da quantidade de água resulta num aumento da retracção por secagem. No entanto, o aumento da retracção por secagem devido à cura interna é menos pronunciado do que no caso em que é introduzida água extra para produzir um efeito equivalente na retracção autogénea.

Quando os provetes em estudo são desmoldados mais tarde, em idades mais avançadas do que 1 dia de idade, a retracção por secagem é menor. Este facto é facilmente compreendido uma vez que no período que os provetes ficam nos moldes, não existem trocas de humidade, o que permite uma melhor hidratação superficial e conseqüentemente menos água disponível para a secagem dos espécimes [4].

Os valores reais das tensões de tracção devidas à retracção dependem também do desenvolvimento da rigidez do material cimentício, das deformações de fluência e da dilatação térmica devido ao calor de hidratação. Ao se adicionarem SAPs em materiais cimentícios as tensões devidas à restrição vão ser menores por alteração nestas propriedades. Quando a retracção autogénea é completamente eliminada, com grandes concentrações de SAPs nas misturas, não são gerados esforços de tracção no material. O efeito positivo da cura interna pode ser observado a partir dos primeiros dias, visto que os materiais cimentícios com SAPs atingem valores de retracção mais baixos que outros sem SAPs [4].

A redução da retracção autogénea com a adição de SAPs causa portanto uma redução das tensões associadas à restrição. Isto mostra o potencial destes produtos para reduzir a fissuração dos materiais cimentícios devido à cura interna.

2.6. Efeito dos SAPs nas propriedades mecânicas

A água introduzida deve existir como inclusões esféricas de pequena dimensão de forma a afectar o mínimo possível a resistência e a permeabilidade do betão. Esta água hidrata localmente sob livre acesso. O uso de água introduzida em pastas de cimento forma macro poros que reduzem a resistência, mas ao mesmo tempo melhora as condições de cura, o que aumenta a resistência [1].

A permeabilidade dos materiais cimentícios é importante, uma vez que a velocidade de deterioração depende da facilidade com que o agente de ataque é transportado [1].

Vários estudos já realizados, descritos em [5], mostraram diferentes resultados quando são utilizados SAPs nas misturas como agente de cura interna.

Num dos estudos, Igarashi e Watanabe [5] concluíram que a adição de SAPs resultou na diminuição da resistência à compressão. Quanto mais baixa a relação de A/C, mais sensíveis foram os materiais com adições de SAPs. Neste mesmo trabalho foi também testado a resistência à tracção e a tendência é semelhante à observada para a resistência à compressão.

Segundo Pierard et al. [5], o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades é um pouco lento quando existem SAPs nas misturas, mas a redução na tensão diminui também em idades mais avançadas. Os autores assumem que estas perdas podem ser atribuídas ao aumento da porosidade do betão, devido aos vazios introduzidos pelas partículas de SAPs.

Lura et al. [5], verificaram que a cura interna por meio dos SAPs não tinha quase influência sobre a resistência à compressão de argamassas de alto desempenho, enquanto a resistência à compressão de pastas de cimento era reduzida em 20 % em idades precoces e de 10 % em idades posteriores. O efeito diferente da introdução de SAPs em pastas de cimento e argamassas pode ser explicado pelo maior tamanho de defeito presente na matriz sólida desses materiais. Em pastas de cimento, os vazios deixados pelas partículas maiores de SAPs são relativamente maiores do que no caso de argamassas que têm outros defeitos de dimensão comparável ou superior. Nas argamassas os maiores defeitos são as interfaces pasta-agregado, bem como agregados fracos ou pré-fissurados. Esses defeitos são geralmente do tamanho dos agregados, ou seja, significativamente maior do que as partículas de SAPs.

Pelo trabalho realizado por Mechtcherine et al. [5], concluiu-se que o uso do SAPs resulta numa diminuição da resistência à compressão, e à semelhança das tendências observadas na resistência à compressão, a utilização de SAPs resultou também numa diminuição da resistência à tracção.

O estudo realizado por Gao et al. [5] apresentou resultados de aumento da resistência à compressão em materiais cimentícios com SAPs. Esta tendência é acompanhada pelo módulo de elasticidade e pela resistência à tracção. Este estudo revelou que enquanto a resistência à compressão no dia 1 foi reduzida pela adição de SAPs, a resistência em idades mais avançadas, 7 e 28 dias, aumentou ligeiramente. Esta melhoria pode ser explicada por resultar de um maior grau de hidratação motivada pela libertação de água extra dos SAPs. Quando os SAPs foram usados como agente de cura interna, a redução da resistência a 1 dia de idade foi mais grave, porém, aos 7 e 28 dias a resistência de materiais com SAPs foi praticamente a mesma que a de materiais de referência.

2.7. Efeito dos SAPs na durabilidade da argamassa

A durabilidade de materiais cimentícios é uma propriedade complexa, envolvendo processos químicos e físicos no processo da deterioração. A durabilidade pode ser melhorada se em vez de poros capilares finos interconectados e irregulares, como é o caso de pastas com maior razão água cimento, a pasta tiver inclusões esféricas separadas provenientes de água introduzida, visto que a ligação da estrutura dos poros pode ser de grande importância relativamente à durabilidade [1].

A maior permeabilidade é uma das causas da menor durabilidade, como é o caso da acção do gelo, da corrosão de armaduras ou de outros fenómenos em que está envolvida a necessidade de transporte de líquidos ou gases [6].

A utilização de SAPs em materiais cimentícios cria vazios na matriz quando estes perdem toda a água absorvida para hidratação do cimento. Assim, o espaçamento de vazios referente aos SAPs é um bom indicador da sua eficiência para combater a degradação por gelo/degelo. Conforme Powers [6], o espaçamento de vazios é um bom indicador para a resistência da pasta de cimento contra os danos do gelo/degelo. Esta resistência depende do tamanho dos vazios e do espaçamento entre eles, pelo que a granulometria e distribuição das partículas de SAPs é importante para esta propriedade (os poros da matriz de um material cimentício têm que ter um certo tamanho e distância a fim de verificar a resistência ao gelo/degelo).

Um volume elevado de SAPs pode ter efeitos negativos porque aumenta a rede de poros por onde podem circular os agentes agressivos.

3. Materiais utilizados

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para a elaboração das argamassas e as suas características.

3.1. Cimento

O cimento é o principal material de construção utilizado como ligante, porque tem propriedades hidráulicas. É uma das principais mercadorias mundiais, sendo por vezes um marcador económico. O cimento é constituído por clínquer e de vários outros componentes que distinguem os diversos tipos de cimento existentes, conferindo diferentes propriedades mecânicas e químicas a cada um. O cimento utilizado neste trabalho é cimento CEM II/A-L 42,5 R proveniente da fábrica de Outão da SECIL. Os constituintes do cimento CEM II/A-L são apresentados no Quadro 1.

Constituinte	Percentagem
Clínquer Portland	80% a 94%
Calcário	6% a 20%
Outros Constituintes	0% a 5%

Quadro 1 - Constituintes do cimento

Nos quadros seguintes são expostas as características do cimento utilizado. No Quadro 2 encontram-se as resistências mecânicas, no Quadro 3 ensaios físicos e no Quadro 4 a análise química.

Os resultados apresentados foram fornecidos pela empresa SECIL, referentes ao valor diário do dia 30 de Abril de 2009 e ao valor da média mensal de Abril de 2009. Se for estimado, de forma grosseira, que o teor de filer calcário é duas vezes o valor da perda ao fogo, então o cimento tinha cerca de 17 % deste componente, portanto dentro do intervalo de 6 % a 20 %.

Idade	Diário		Mensal	
	Resistências (MPa)		Resistências (MPa)	
	Flexão	Compressão	Flexão	Compressão
2 dias	5,5	30,4	5,7	32,0
7 dias	6,9	43,1	7,2	44,4
28 dias	7,7	52,7	8,2	53,4

Quadro 2 - Resultados dos ensaios mecânicos segundo a NP EN 196-1

		Diário	Mensal
Peso Específico (kg/m ³)		-	3020
Resíduo de Peneiração (%)	45 µm	3,9	3,3
Superfície Específica pelo método de Blaine (m ² /kg) [NP EN 196-6]		521,9	510,0
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		28,0	28,1
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	105	110
	Fim	135	142
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		0,5	0,6

Quadro 3 - Resultados dos ensaios físicos

			Diário	Mensal
Perda ao fogo	%	P.F.	8,29	8,36
Resíduo insolúvel	%	R.I.	1,84	1,80
Óxido de silício	%	SiO ₂	-	18,09
Óxido de alumínio	%	Al ₂ O ₃	-	3,06
Óxido de ferro	%	Fe ₂ O ₃	-	2,64
Óxido de cálcio	%	CaO	-	61,58
Óxido de magnésio	%	MgO	-	1,60
Sulfatos	%	SO ₃	2,84	2,80
Cloretos	%	Cl	-	0,01
Cal Livre	%		0,96	1,18

Quadro 4 - Resultados da análise química

3.2. Areia

A areia natural é um material de origem mineral finamente dividido em grânulos, composta basicamente por sílica, com dimensões entre os 0,063 e 2 mm. Forma-se à superfície da Terra pela fragmentação das rochas por erosão, por acção do vento ou da água. A areia pode também ser transformada em arenitos através do processo de sedimentação. É utilizada nas obras de engenharia civil em aterros, fabrico de argamassas e betões e também de vidro. O tamanho dos seus grãos tem uma extrema importância nas características dos materiais que a usam como componente. A areia utilizada foi uma areia natural rolada e lavada.

3.2.1. Granulometria da Areia

Uma vez que o tamanho dos grãos e as fracções existentes na areia são importantes, estudou-se a curva granulométrica da areia natural utilizada que define as percentagens de peso que cada fracção possui em relação à massa total da amostra em análise. Para esta análise, segue-se a Norma Portuguesa NP EN 933-1:2000 [18]. Os peneiros utilizados são apresentados no Quadro 5, assim como as fracções retidas em cada peneiro. Pode-se observar a curva granulométrica no Gráfico 1. A areia foi previamente seca em estufa a 105 °C, esquetejada e seguidamente peneirada para obtenção da curva granulométrica da areia. Utilizou-se uma amostra de 1055,4 g. Os peneiros utilizados foram os 150, 300, 600, 1, 2, 2,8 e 4, e tinham as seguintes aberturas: 0,150 mm, 0,300 mm, 0,600 mm, 1 mm, 2 mm, 2,8 mm e 4 mm, respectivamente.

Peneiro	Peso material retido (g)	% Material retido	% Material passado
150	383,2	36,309	9,816
300	316,5	29,989	46,125
600	95,7	9,068	76,113
1	34,7	3,288	85,181
2	47,8	4,529	88,469
2,8	50,9	4,823	92,998
4	23,0	2,179	97,821

Quadro 5 - Material passado

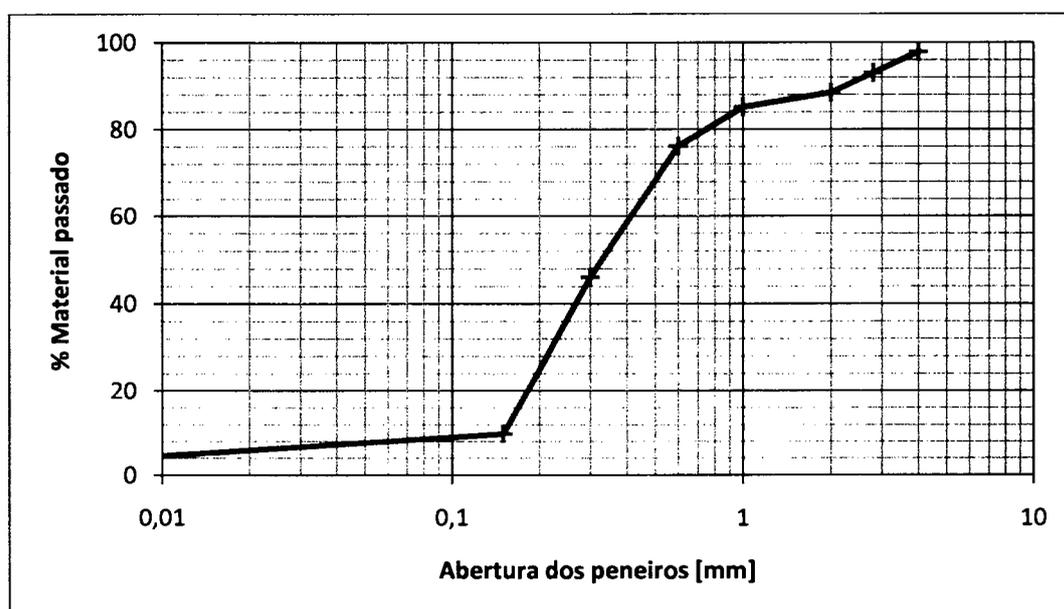


Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia

O material de refugo foi de 101,2 g, correspondendo a 9,59 % de todo o material. Analisando todas as quantidades, chega-se à conclusão que o material perdido no processo de peneiração foi de 2,4 g, correspondente a 0,23 % da amostra, inferior a 1 % o que valida esta peneiração, segundo [18].

Pela análise da curva granulométrica do agregado é possível ver que a areia utilizada possui uma granulometria extensa. Uma granulometria extensa porque apresenta material com 4 mm mas também com uma percentagem elevada de material fino, inferior a 150 μ m.

3.2.2.Massa Volúmica e Absorção de Água da Areia

A massa volúmica define-se como a propriedade da matéria correspondente à proporção existente entre a massa de um corpo e o seu volume. Pode-se dizer que a massa volúmica mede o grau de concentração de massa em determinado volume. A absorção de água da areia é a massa de água que a areia seca é capaz de absorver em 24 horas de imersão. Desta forma, para saber a massa volúmica e a absorção da areia, seguiu-se a Norma Portuguesa NP-954:1973 [19]. O procedimento para a determinação da massa volúmica e absorção de água é descrito a seguir.

Em primeiro lugar é necessário tomar uma amostra de 750 g de areia e secar em estufa a 105 °C - 110 °C até massa constante. Deixa-se arrefecer o material e imerge-se em água à temperatura ambiente, durante 24 h ± 4 h, remexendo algumas vezes.

Ao fim das 24 horas, retira-se o máximo de água tendo cuidado com o material mais fino para não se perder e espalha-se a areia num tabuleiro metálico, onde é submetido a uma secagem leve, por aquecimento suave, remexendo a areia com frequência, a fim de que a secagem seja uniforme. A secagem acaba quando as partículas de areia tiverem a superfície seca.

Para se saber se a superfície das partículas estão secas, usa-se um molde troncocónico numa superfície horizontal, não absorvente, enche-se completamente o molde com areia, sem exercer pressão nas sucessivas camadas de enchimento. A seguir, compacta-se o material com 25 compressões do pilão, uniformemente distribuídas, assentando-o suavemente e sem exercer pressão além da resultante do seu próprio peso.

Retira-se o molde verticalmente, tentando não tocar no material moldado. É de se esperar uma moldagem firme. Caso isso não aconteça devido ao excesso de secagem da areia deve-se humidificar a areia com água e mexer até uniformizar a distribuição da humidade. Se o material ficar com a forma do cone é indício de ainda existir água na superfície da areia. O processo é repetido até se conseguir um aspecto aceitável, em que a areia já não apresenta a forma do molde, mas também não se desmorona completamente, como está ilustrado na Figura 8.



Figura 8 - Areia saturada com superfície seca

Quando este ponto é atingido, interrompe-se o processo de secagem, junta-se todo o material no tabuleiro, toma-se uma quantidade de cerca de 500 g, que constitui o provete, pesa-se e anota-se a sua massa e realiza-se imediatamente o ensaio.

O ensaio consiste na introdução do provete num balão graduado, em pequenas porções, sem perda de partículas, preenche-se o balão com água até cerca de 90% da sua capacidade e agita-se até libertar o ar retido pela areia. Deixa-se estabilizar a temperatura no conteúdo do balão até esta estar no intervalo entre 15 °C e 25 °C. Completa-se o enchimento do balão até ao traço de referência, enxuga-se e pesa-se.

Depois de anotado o peso, mete-se a água e a areia para um peneiro com papel de filtro dentro de um tabuleiro já pesado, retira-se o máximo de água possível e seca-se na estufa a 105 °C – 110 °C, até massa constante.

Para o cálculo da massa volúmica e da absorção de água da areia é necessário anotar a massa do provete com as partículas saturadas sem água superficial (m_1), a massa do balão com o provete e água (m_2), a massa do provete seco (m_3) e a massa do balão com água (m_4). No Quadro 6 apresenta-se os valores necessários para o cálculo das massas volúmicas e absorção de água da areia utilizada.

	Massa (g)
m ₁	500,5
m ₂	1544,5
m ₃	498,5
m ₄	1236,0

Quadro 6 - Valores das massas necessárias para o cálculo das massas volúmicas e absorção de água

Assim, para o cálculo da massa volúmica do material impermeável das partículas é dado pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{m_3}{m_3 + m_4 - m_2}.$$

Substituindo os valores das massas na expressão, obtém-se uma massa volúmica do material impermeável de 2620 kg/m³.

A massa volúmica das partículas saturadas é calculada pela expressão:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 + m_4 - m_2}.$$

O valor da massa volúmica das partículas saturadas para a areia em questão é de 2610 kg/m³.

E para o cálculo da massa volúmica das partículas secas, usa-se a expressão:

$$\rho = \frac{m_3}{m_1 + m_4 - m_2}.$$

Efectuando os cálculos, a massa volúmica das partículas secas é de 2600 kg/m³.

A absorção de água da areia é apresentada em percentagem e é dada pela seguinte expressão:

$$Absorção = \frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100.$$

Assim, a absorção da areia é de 0,4 %.

3.3. Polímeros Super Absorventes

A utilização actual de polímeros na vida diária é cada vez mais significativa. A versatilidade do uso de polímeros é muito grande, actualmente há uma enorme variedade destes materiais, com excelentes propriedades mecânicas, térmicas, eléctricas, superabsorventes, etc.

Os polímeros superabsorventes constituem uma classe de materiais que possui grande afinidade com a água, exemplo disso é o seu uso em produtos higiénicos, nomeadamente fraldas, desertificação florestal, em que os polímeros podem fornecer às árvores água e nutrientes nos períodos de maior seca, e na construção no caso de betões e argamassas que fornece água durante a sua cura.

Neste trabalho os polímeros superabsorventes utilizados são da marca BASF e denomina-se de PLUS 1000. O produto é apresentado num líquido que apenas contém 3 % de polímero, uma vez que o uso deste polímero no estado seco torna as argamassas muito secas. O processo de transformação do polímero em solução aquosa é descrito a seguir. É aquecida água até atingir os 45 – 50 °C e adiciona-se bicarbonato de sódio até saturação, aproximadamente 10 %, e deixa-se arrefecer até temperatura ambiente. Quando o produto está à temperatura ambiente, e caso seja necessário, faz-se uma filtragem e de seguida é adicionado 3 % de polímero agitando-se até dissolução completa.

O resíduo seco dos SAP utilizados foi de 8,07 %. A massa volúmica deste produto foi de 1080 kg/m³. Os SAP utilizados neste trabalho foram obtidos a partir do processo de fabrico explicado no subcapítulo 2.1.1, com formas irregulares e angulosas.

3.4. Agregado Leve

O agregado leve utilizado foi argila expandida. Este material pode ter várias finalidades. Em Portugal, são usados para aplicações geotécnicas; em agricultura, horticultura e floricultura; enchimento de coberturas, pisos térreos ou elevados, pavimentos flutuantes, pisos técnicos; produção de betão leve estrutural, argamassas e rebocos leves e refractários; indústria de prefabricação e pode também substituir os agregados tradicionais. É evidente que existem várias gamas de argila expandida e cada uma tem a sua especificidade. Os agregados leves apresentam como características mais importantes a sua leveza e a sua capacidade de isolamento térmico e acústico. Provavelmente, a maior utilização deste produto em Portugal, na construção, será a de isolante térmico e acústico, devido às suas boas características relativamente a estas propriedades. Este material é também adequado para aplicações onde seja necessário controlar o teor de humidade. O agregado leve utilizado neste trabalho é da marca Leca® com a designação de Areia (0,5/3) e as suas propriedades são apresentadas a seguir.

3.4.1. Granulometria do Agregado Leve

O método utilizado para conhecer a granulometria do agregado leve utilizado é o mesmo que foi descrito anteriormente no ponto 3.2.1, e a Norma Portuguesa NP EN 933-1:2000 [18] foi a adoptada também neste caso. Assim, não se descreve o método e apenas se apresentam os resultados obtidos. O agregado leve foi previamente seco em estufa entre 105 °C e 110 °C. Os peneiros utilizados foram ajustados às necessidades. A amostra depois de seca tem uma massa de 608,8 g. Os peneiros utilizados para obtenção da curva granulométrica do agregado leve foram o 150, 300, 600, 1, 2 e 4 e tinham as seguintes aberturas: 0,150 mm, 0,300 mm, 0,600 mm, 1 mm, 2 mm e 4 mm, respectivamente. No Quadro 7 é apresentado o material passado e no Gráfico 2 é apresentada a curva granulométrica do agregado leve utilizado.

Peneiro	Peso material retido (g)	% Material retido	% Material passado
150	20,2	3,318	8,673
300	33,1	5,437	11,991
600	80,0	13,141	17,428
1	235,5	38,683	30,568
2	178,7	29,353	69,251
4	8,5	1,396	98,604

Quadro 7 - Material passado

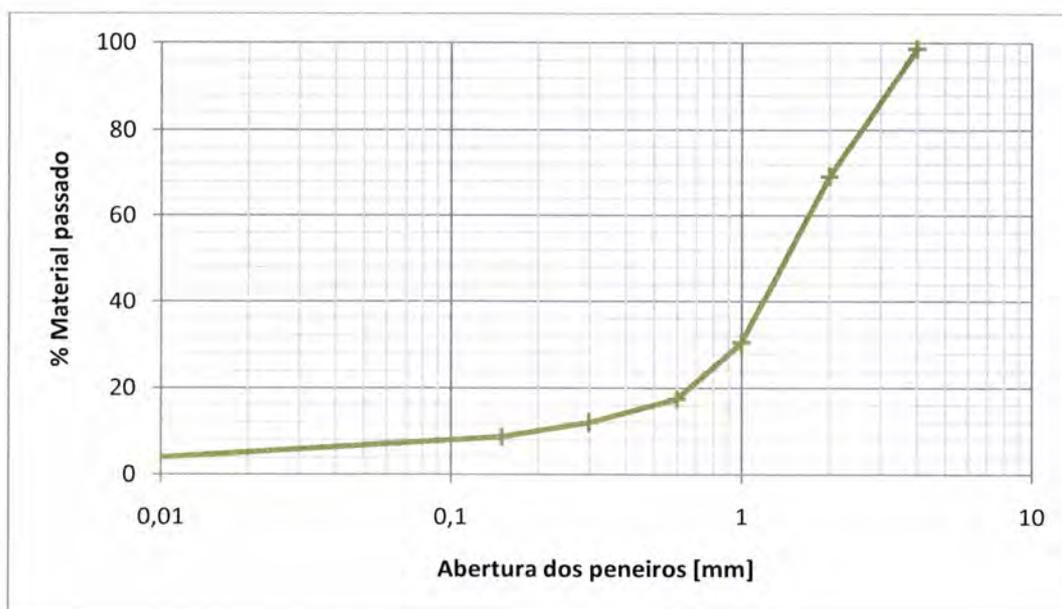


Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado leve

O material de refugo foi de 49,2 g, correspondendo a 8,08 % de todo o material. Analisando todas as quantidades, chega-se à conclusão que o material perdido no processo de peneiração foi de 3,6 g, correspondente a 0,59 % da amostra, inferior a 1 % o que valida esta peneiração.

Pela análise da curva granulométrica do agregado leve, Gráfico 2, é possível ver que o agregado leve utilizado possui uma granulometria contínua. Uma granulometria contínua é caracterizada pela presença de partículas uniformemente distribuídas por todas as dimensões, da mais pequena à maior.

3.4.2. Massa Volúmica e Absorção de Água do Agregado Leve

O ensaio de determinação da massa volúmica e da absorção de água do agregado leve é realizado seguindo a Norma Portuguesa NP-954:1973 [19], a mesma que é utilizada para a areia. Deste modo, não se explica o método já descrito anteriormente no ponto 3.2.2 Massa Volúmica e Absorção de Água da Areia, e apresentam-se os resultados obtidos para o agregado leve. No Quadro 8 são mostradas as massas utilizadas para os cálculos das massas volúmicas e da absorção de água.

	Massa (g)
m_1	500,6
m_2	1379,8
m_3	363,4
m_4	1235,8

Quadro 8 - Valores das massas necessárias para o cálculo das massas volúmicas e absorção de água

Então, para o cálculo da massa volúmica do material impermeável das partículas é dado pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{m_3}{m_3 + m_4 - m_2}.$$

Substituindo os valores das massas na expressão, temos uma massa volúmica do material impermeável de 1660 kg/m³.

A massa volúmica das partículas saturadas é calculada pela expressão:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 + m_4 - m_2}.$$



O valor da massa volúmica das partículas saturadas para o agregado leve em questão é de 1400 kg/m^3 .

E para o cálculo da massa volúmica das partículas secas, usa-se a expressão:

$$\rho = \frac{m_3}{m_1 + m_4 - m_2}.$$

Efectuando os cálculos, a massa volúmica das partículas secas é de 1020 kg/m^3 .

A absorção de água do agregado leve é apresentada em percentagem e é dada pela seguinte expressão:

$$\text{Absorção} = \frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100.$$

Assim, a absorção do agregado leve é de $37,8 \%$.

3.5. Água

O uso da água na construção civil é tão essencial como o cimento ou a areia. É uma componente fundamental para o bom funcionamento geral da construção. É necessário usar água compatível com as necessidades dos trabalhos. Assim, a água usada neste trabalho, para a realização das argamassas, foi água destilada a $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.6. Adjuvante

Os adjuvantes são utilizados em betões e argamassas para melhorar o seu desempenho, durabilidade e racionalizar os custos adjacentes à produção e sustentabilidade das construções. Os redutores de água, o tipo de adjuvante utilizado, têm efeito no que diz respeito ao espalhamento dos betões e das argamassas. Neste trabalho usou-se um polímero superplastificante à base de cadeias de éter carboxílico da marca BASF Glenium SCC, com uma adição máxima de $2,5 \%$ da massa de cimento. A dosagem recomendada em geral para este material é entre 1% a $1,6 \%$, mas pode ser usado em quantidades superiores sem efeitos adversos. O resíduo seco do adjuvante utilizado é de 20% e a sua massa volúmica é 1030 kg/m^3 .

4. Descrição do programa experimental e métodos de ensaio

Todo o trabalho experimental foi realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 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.

No presente trabalho experimental foram formuladas 9 argamassas distintas. Três argamassas de referência (R 32,5, R 42 e RN 42), uma argamassa utilizando agregado leve (ALeVe) e cinco argamassas contendo polímeros super absorventes (SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP).

O desenvolvimento do trabalho começou pela determinação da granulometria da areia e do agregado leve utilizados nas argamassas, assim como a sua massa volúmica e absorção, resultados apresentados em pontos anteriores. Com base nesses elementos e nas características dos outros materiais utilizados determinaram-se as quantidades dos constituintes, necessárias para cada argamassa.

Após a mistura, em cada argamassa no estado fresco foi determinado o espalhamento. Para a caracterização das argamassas no estado endurecido foram elaborados catorze provetes prismáticos com as dimensões 40 x 40 x 160 (mm) para cada argamassa. Seis são utilizados para a determinação da retracção autogénea e total, três para cada uma, com leituras aos dias 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28. Seis são utilizados para a determinação da resistência à flexão e à compressão, dois por cada idade, aos 1, 3 e 28 dias. As leituras do módulo de elasticidade foram realizadas nas mesmas idades das resistências e neste ensaio, não sendo um ensaio destrutivo, utilizaram-se sempre os mesmos dois provetes para todas as idades.

4.1. Preparação das argamassas

Neste subcapítulo é descrita a preparação das argamassas. Não foi seguida nenhuma norma, mas o processo foi igual para todas as argamassas, adaptado às necessidades específicas de cada argamassa. O laboratório onde são realizadas as argamassas tem uma temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa não inferior a 50 %.

Utilizaram-se dois misturadores com capacidades diferentes. Identifica-se o misturador A, Figura 9, com uma capacidade total de 10 litros e o misturador B, Figura 10, com capacidade total de 4 litros. Ambos os misturadores tem o mesmo tipo de funcionamento. Como nem sempre o misturador A estava disponível, utilizou-se também o misturador B. O recipiente do misturador é essencialmente um recipiente em aço inoxidável, Figura 11 e Figura 12, e é equipado de maneira a poder ser fixado firmemente à armação do misturador durante a amassadura, de maneira a que a pá misturadora e o recipiente possam ser ajustados e mantidos com precisão. A pá misturadora, Figura 13 e Figura 14, é accionada por um motor eléctrico, com velocidade regulável num movimento de rotação sobre si

mesmo, acompanhado de um movimento planetário em torno do eixo do recipiente. Os dois sentidos de rotação são opostos. Nas figuras seguintes é possível observar o equipamento descrito anteriormente, misturador, pá misturadora e recipiente.



Figura 9 - Misturador A



Figura 10 - Misturador B

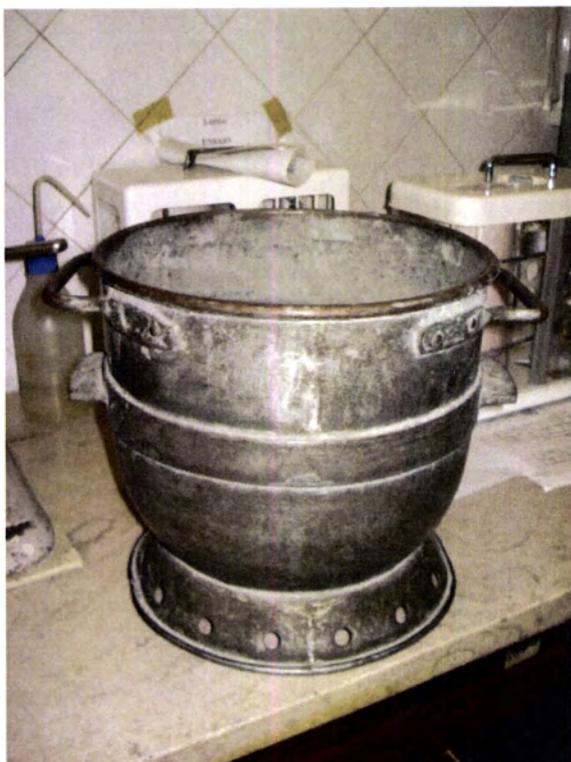


Figura 11 - Recipiente do misturador A

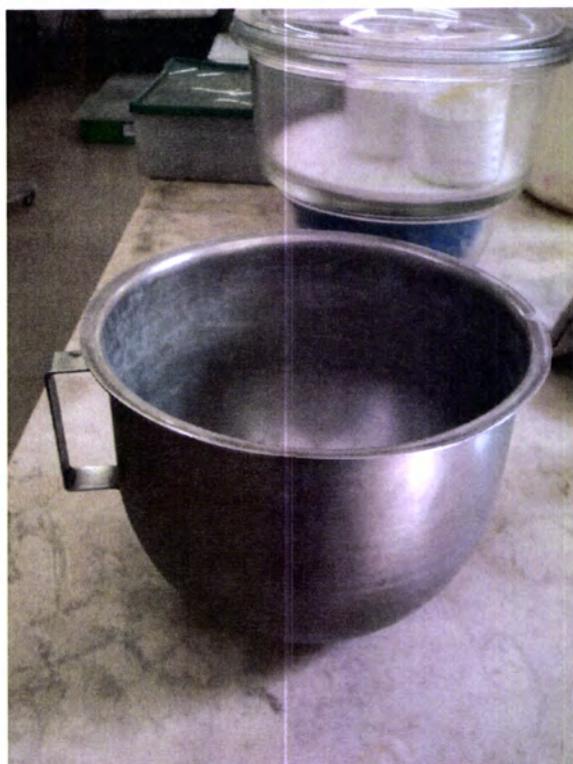


Figura 12 - Recipiente do misturador B



Figura 13 - Pá misturadora do misturador A



Figura 14 - Pá misturadora do misturador B

No recipiente são introduzidos o cimento e a água nas quantidades previamente determinadas. O recipiente é colocado na misturadora e liga-se na velocidade mais lenta durante 30 segundos. De seguida é colocada a areia e mistura-se durante mais 30 segundos também na velocidade mais lenta. Quando existe outro material a juntar, agregado leve ou polímeros superabsorventes, é nesta fase que são adicionados e são misturados durante 30 segundos na mesma velocidade que os anteriores. Por fim, junta-se o adjuvante, mistura-se por 30 segundos na velocidade mais lenta e mais 30 segundos na velocidade mais rápida. Por cada paragem que a misturadora faz é retirado o recipiente e com a ajuda de uma colher de pedreiro, as paredes e o fundo do recipiente são raspados de forma a misturar os constituintes aí acumulados.

No Quadro 9 é possível ver a identificação dada às argamassas e aos provetes para os vários ensaios realizados e ainda o misturador utilizado para cada argamassa. Nos gráficos apresentados no Capítulo 5, no Capítulo 6 e nos Anexos as curvas estão identificadas com os nomes dos provetes ou a média dos provetes no respectivo ensaio, acrescentando neste último caso a letra 'm' de média. A identificação é sempre realizada da mesma forma. Veja-se então como exemplo a identificação R 32,5-m (Gráfico 5): identifica-se em primeiro lugar o ensaio em causa, neste caso R corresponde a Resistência; segue-se a identificação da argamassa, 32,5, que corresponde à argamassa de referência com razão A/C=0,325, e por último o número do provete, neste exemplo a média dos provetes, com a letra 'm'. Esta lógica para a identificação das curvas foi também utilizada para os gráficos de retracção por secagem, identificando o ensaio com as letras RS, e para os gráficos da perda de massa, identificando o ensaio com as letras PM.

Argamassa	Misturadora	Resistência	Módulo de Elasticidade	Retracção Autogénea	Retracção Total
R 32,5	B	R 32,5 (1-6)	ME 32,5 (1-2)	RA 32,5 (1-3)	RT 32,5 (1-3)
RN 42	A	R N42 (1-6)	ME N42 (1-2)	RA N42 (1-3)	RT N42 (1-3)
R 42	B	R 42 (1-6)	ME 42 (1-2)	RA 42 (1-3)	RT 42 (1-3)
ALeVe	A	R AL (1-6)	ME AL (1-2)	RA AL (1-3)	RT AL (1-3)
SAP 2	A	R S2 (1-6)	ME S2 (1-2)	RA S2 (1-3)	RT S2 (1-3)
SAP 3,25	A	R S3 (1-6)	ME S3 (1-2)	RA S3 (1-3)	RT S3 (1-3)
SAP 4,5	A	R S4 (1-6)	ME S4 (1-2)	RA S4 (1-3)	RT S4 (1-3)
R 32,5 + SAP	A	R 32,5S (1-6)	ME 32,5S (1-2)	RA 32,5S (1-3)	RT 32,5S (1-3)
RN 42 + SAP	A	R N42S (1-6)	ME N42S (1-2)	RA N42S (1-3)	RT N42S (1-3)

Quadro 9 - Identificação das argamassas e dos provetes

As composições das argamassas estudadas estão apresentadas no Quadro 11, no Quadro 12 e no Quadro 13.

Sendo o objectivo deste estudo avaliar a eficiência dos SAPs para um melhor desempenho das argamassas, mas simultaneamente não tornar a utilização dos SAPs demasiado oneroso para a construção, começou-se por avaliar argamassas com teores mais reduzidos e só depois se elevou a dosagem face à reduzida eficiência evidenciada pelos primeiros resultados.

A análise dos resultados dos ensaios para várias dosagens permite também conhecer o efeito de diferentes teores de SAP no comportamento das argamassas.

Nos quadros seguintes são apresentadas as massas volúmicas dos materiais e as dosagens de todas as argamassas. É apresentado o traço de cada argamassa e também a quantidade utilizada de cada material para uma amassadura de $\pm 4,5$ litros, sendo esta a quantidade necessária para os 14 provetes utilizados na realização dos ensaios ao longo dos 28 dias. Os valores indicados no Quadro 11, no Quadro 12 e no Quadro 13 foram obtidos considerando um teor de vazios nulo. No Quadro 10 são apresentados os valores das massas volúmicas dos materiais utilizados.

Material	Massa Volúmica (kg/m ³)
Cimento	3020
Areia	2610
Polímeros Super Absorventes	1080
Agregado Leve	1400
Água	1000
Adjuvante	1030

Quadro 10 - Massas volúmicas dos materiais

Argamassa	Composições					
	Cimento	Areia	LWA saturado	SAP	Água	SP
R 32,5	1	2	-	-	0,325	0,0250
RN 42	1	2	-	-	0,420	0,0087
R 42	1	1,69	-	-	0,420	0,0074
ALeve	1	1,27	0,39	-	0,325	0,0100
SAP 2	1	2	-	0,0200	0,420	0,0113
SAP 3,25	1	2	-	0,0325	0,420	0,0147
SAP 4,5	1	2	-	0,0450	0,420	0,0118
R 32,5 + SAP	1	2	-	0,1000	0,325	0,0250
RN 42 + SAP	1	2	-	0,1500	0,420	0,0250

Quadro 11 - Traços em peso usados para o fabrico das argamassas

Argamassa	Quantidades (g)					
	Cimento	Areia	LWA saturado	SAP	Água	SP
R 32,5	3215,17	6430,33	-	-	1044,93	80,36
RN 42	2937,61	5875,21	-	-	1233,80	25,62
R 42	3215,17	5423,34	-	-	1350,37	23,82
ALeve	3215,17	4080,00	1260,58	-	1044,55	32,10
SAP 2	2952,17	5904,34	-	59,04	1239,91	33,44
SAP 3,25	2952,17	5904,34	-	95,95	1239,91	43,49
SAP 4,5	2952,17	5904,34	-	132,85	1239,91	34,83
R 32,5 + SAP	2928,05	5856,10	-	292,81	951,62	73,20
RN 42 + SAP	2675,61	5351,22	-	401,34	1123,76	66,89

Quadro 12 - Massas usadas para o fabrico das argamassas

Argamassa	Dosagem (kg/m ³)						Massa Volúmica teórica
	Cimento	Areia	LWA saturado	SAP	Água	SP	
R 32,5	691	1383	-	-	224,6	17,28	2315
RN 42	655	1311	-	-	275,3	5,72	2247
R 42	712	1201	-	-	299,0	5,28	2217
ALeve	698	886	274	-	226,9	6,97	2092
SAP 2	646	1292	-	12,87	271,3	7,32	2229
SAP 3,25	639	1279	-	20,78	268,5	9,42	2217
SAP 4,5	635	1271	-	28,59	266,9	7,50	2209
R 32,5 + SAP	647	1293	-	64,66	210,1	16,16	2231
RN 42 + SAP	591	1182	-	88,67	248,3	14,78	2125

Quadro 13 - Dosagem das argamassas

Na produção das argamassas teve-se especial atenção à concentração de superplastificante utilizado, tendo-se ajustado a sua dosagem. Para que a argamassa fresca tivesse um espalhamento semelhante nas diversas misturas produzidas e ainda para que a argamassa não segregasse. Nas argamassas R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP foi utilizada uma concentração elevada, mas mesmo assim, e como podemos observar no Quadro 16, o espalhamento obtido foi baixo, devido à adsorção de água pelos SAP.

Inicialmente foram efectuadas amassaduras para analisar o efeito dos SAP no espalhamento, para argamassas com razão A/C=0,42, para uma razão cimento/areia = 2, em massa, e um teor de superplastificante de 2,5 %. Começou por se estudar argamassas com uma concentração de SAP de

2,5, 3 e 3,5 % e os espalhamentos obtidos nos ensaios realizados imediatamente após a amassadura são apresentados no Quadro 14.

Concentração SAP (%)	Leituras (mm)		Média (mm)
2,5	310	297	303,5
3	282	277	279,5
3,5	267	262	264,5

Quadro 14 - Espalhamento do estudo da concentração de SAP a utilizar

Passado 45 minutos foi realizado novo ensaio de espalhamento, mas só na argamassa com concentração de SAPs de 3,5 % e os resultados obtidos são apresentados no Quadro 15.

Concentração SAP (%)	Leituras (mm)		Média (mm)
3,5	297	299	298
3,5	300	296	298

Quadro 15 - Espalhamento de argamassa com 3,5% de SAP ao fim de 45 minutos da realização da argamassa

Ao se observar o Quadro 15, e comparando com o Quadro 14, pode-se concluir que a trabalhabilidade da argamassa aumentou com o tempo, por acção do superplastificante. Uma vez que se conseguiu obter boa trabalhabilidade com as 3 dosagens de SAPs, optou-se por continuar o trabalho com dosagens desta ordem de grandeza, tendo-se seleccionado concentrações de SAP de 2, 3,25 e 4,5 % da massa de cimento, com dois incrementos de igual valor e alargando um pouco o intervalo de dosagens.

Posteriormente, depois de se obterem alguns resultados verificou-se que com estas concentrações de SAP os resultados não eram os esperados, no que se refere ao controlo da retracção. Assim, estudaram-se mais duas argamassas, a R 32,5 + SAP e a R 42 + SAP, com concentrações de 10 % e de 15 %, respectivamente.

4.2. Ensaio em estado fresco

4.2.1. Espalhamento

O ensaio do espalhamento foi realizado de acordo com o método descrito na Tese de Doutorado [7].

Este ensaio é auxiliado por uma placa de plástico endurecido, um tronco-cone e uma régua metálica plana. O tronco-cone tem 100 mm de diâmetro na base e 70 mm de diâmetro no topo e a sua altura é de 60 mm. A placa de plástico endurecido tem marcado o limite do cone e as suas diagonais para se efectuarem as leituras.

O ensaio realiza-se logo após a preparação da argamassa. Coloca-se o cone no meio da placa, ajustando aos limites desenhados, enche-se com a argamassa tentando manter a homogeneidade da amostra e com a ajuda da régua alisa-se e retira-se o excesso de argamassa, Figura 15. Não se utilizou nenhum tipo de compactação neste ensaio. O cone é levantado na vertical, sem intervir no curso do espalhamento. Na Figura 16 apresenta-se um exemplo de uma argamassa com baixo espalhamento, 100 mm, e na Figura 17 é mostrado uma argamassa fluida.



Figura 15 - Alisamento e retiro da argamassa em excesso



Figura 16 - Argamassa com baixo espalhamento

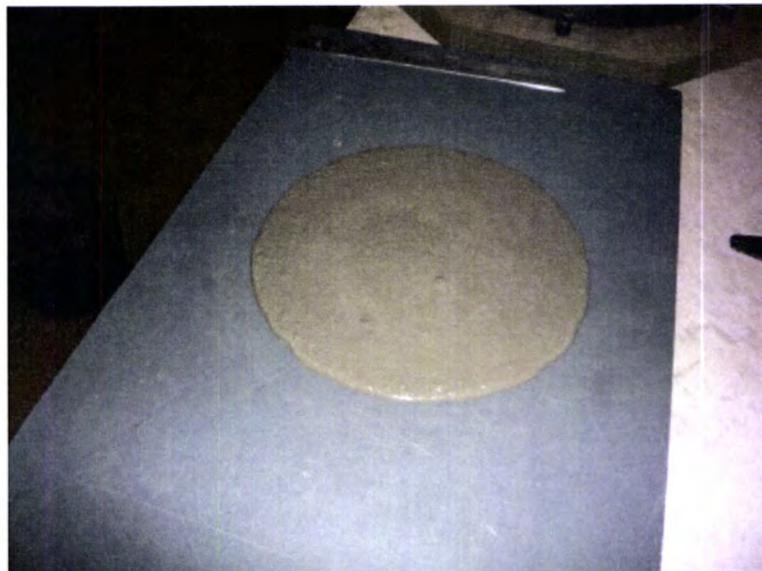


Figura 17 - Argamassa fluida

Concluído o espalhamento mede-se os dois diâmetros ortogonais no alinhamento das diagonais marcadas na placa, determinando o espalhamento pela média dos dois. No Quadro 16 apresentam-se os valores registados para o espalhamento das várias argamassas.

Argamassas	Leituras (mm)		Média (mm)
R 32,5	270	273	271,5
RN 42	246	263	254,5
R 42	269	274	271,5
ALeve	255	253	254,0
SAP 2	267	262	264,5
SAP 3,25	294	300	297,0
SAP 4,5	255	251	253,0
R 32,5 + SAP	100	100	100,0
RN 42 + SAP	100	100	100,0

Quadro 16 - Resultados do ensaio de espalhamento

4.3. Preparação dos provetes

Depois de realizado o espalhamento da argamassa é fundamental ter os moldes a preencher já preparados, de forma a obter os provetes para os ensaios no estado endurecido. Para os ensaios a realizar apenas é necessário moldar provetes prismáticos com dimensões de 40 x 40 x 160 (mm). Estes provetes são utilizados para a determinação da resistência à flexão e à compressão, do módulo de elasticidade, da retracção autogénea e da retracção total. Os moldes utilizados para estes provetes são apresentados na Figura 18. Os moldes para os ensaios de retracção, Figura 19, continham uns pernos de aço inoxidável nas extremidades, para posicionamento no comparador.

Os moldes prismáticos têm três compartimentos horizontais permitindo a preparação simultânea de três provetes prismáticos, com secção transversal de 40 x 40 (mm) e 160 mm de comprimento, e têm de estar limpos e devidamente montados e lubrificados com óleo desmoldante para uma fácil desmoldagem, da mesma maneira que a sua construção também deve facilitar a desmoldagem dos provetes sem os danificar. Os moldes utilizados devem ainda ser estanques. Os moldes são preenchidos com as argamassas, vibrados, com um nível de intensidade 6 em 11 do equipamento, função da consistência da mistura, durante 20 segundos, e alisados depois com uma régua de aço para retirar os excessos de argamassa.



Figura 18 - Molde utilizado para elaboração dos provetes das resistências e módulo de elasticidade

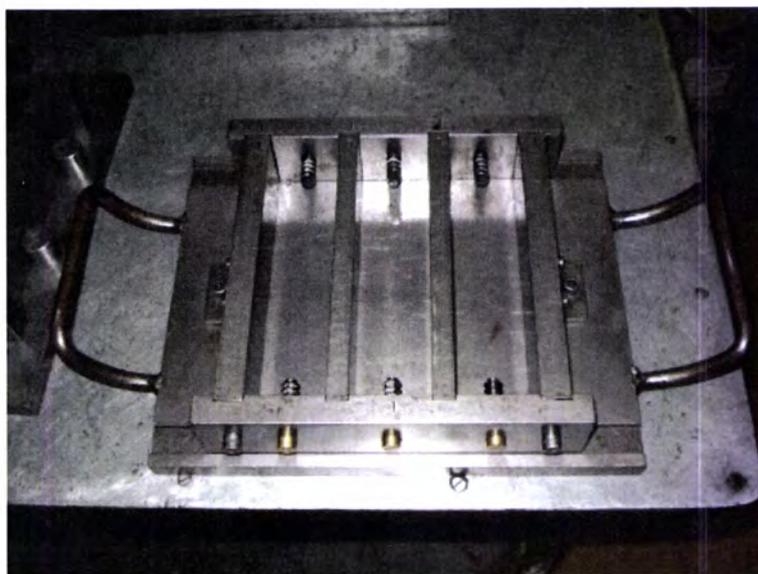


Figura 19 - Molde utilizado para a elaboração dos provetes da retracção autogénea e total

Os moldes são levados para câmara saturada a uma temperatura de 20 ± 1 °C e devidamente protegidos para minimizar as trocas de humidade. A humidade relativa da câmara é mantida acima dos 95 %. Ao fim de 18 ± 2 horas, os moldes são retirados da câmara e desmoldados. Ao efectuar a desmoldagem é necessário ter cuidado para não deteriorar os provetes. Após a desmoldagem, os provetes para os ensaios de determinação da resistência à flexão e à compressão e do módulo de elasticidade são marcados e mantidos submersos em água numa sala com 20 ± 1 °C, onde permanecem até à data do ensaio. Os provetes para as medições da retracção autogénea e da retracção total são pesados e medidos imediatamente. Os da retracção total são guardados ao ar

livre em sala com 20 ± 2 °C e humidade relativa não inferior a 50 %. Os provetes para retracção autógena são embrulhados em filme plástico aderente e novamente pesados e medidos. Estes são guardados em caixa de plástica fechada para minimizar a troca de massa com o exterior, em sala com 20 ± 2 °C e humidade relativa não inferior a 50 %. Para este trabalho foi realizado um total de 126 provetes.

4.4. Ensaio no estado endurecido

4.4.1. Ensaio de resistência à flexão e à compressão

Ambos os ensaios são realizados segundo a Norma Portuguesa NP EN 196-1:2006. [20]

Para o ensaio de resistência à flexão, a determinação do valor desta tensão é efectuada utilizando uma máquina de ensaio para determinação da resistência à flexão, Figura 20, Figura 21 e Figura 22. Este aparelho permite a aplicação de cargas até 10 kN com 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.

A máquina é constituída por dois cilindros de apoio em aço de $10,0 \pm 0,5$ (mm) de diâmetro, afastado um do outro $100,0 \pm 0,5$ (mm) e um terceiro cilindro de carga em aço do mesmo diâmetro e equidistante dos dois cilindros de apoio.



Figura 20 - Início do ensaio de resistência à flexão



Figura 21 - Carga aplicada no provete no ensaio de resistência à flexão



Figura 22 - Ruptura do provete no ensaio de resistência à flexão

O ensaio consiste em colocar o provete com uma face lateral de moldagem sobre os cilindros de apoio e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios, Figura 20. Aplica-se uma carga vertical através do cilindro de carga sobre a face lateral oposta do prisma, Figura 21, e aumenta-se uniformemente à velocidade de 50 ± 10 (N/s), até à rotura do provete, Figura 22. Os semi-prismas resultantes deste ensaio são cobertos com um pano húmido até ao momento do ensaio à compressão.

Os ensaios são realizados aos 1, 3 e 28 dias, utilizando-se dois provetes para cada idade.

A resistência à flexão, R_f , é calculada em MPa pela seguinte expressão:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Onde:

R_f – resistência à flexão, em MPa;

b – lado da secção quadrada do prisma, em mm;

F_f – carga aplicada no centro do prisma na rotura, em N;

l – distância entre os apoios, em mm.

Os resultados obtidos são apresentados em anexo para as várias argamassas.

Para o ensaio de resistência à compressão, a máquina a utilizar deve corresponder a vários requisitos. Em primeiro lugar, a máquina deve possuir duas ou mais escalas de carga. Sendo que o valor mais alto da escala inferior deve ser aproximadamente 1/5 do valor mais alto da escala imediatamente superior. Deve ter nos 4/5 superiores da escala de medida utilizada uma exactidão de $\pm 1,0 \%$ da carga registada. A velocidade de carga deve ser de 2400 ± 200 (N/s). Deve possuir um dispositivo indicador que seja construído de maneira a que o valor registado quando da rotura do provete permaneça indicado depois do regresso a zero da carga.

O eixo vertical do pistão deve coincidir com o eixo vertical da máquina e durante a carga a direcção do movimento do pistão deve ser paralela à do eixo vertical da máquina. Além disso, a resultante das forças deve passar pelo centro do provete. A superfície do prato inferior da máquina deve ser perpendicular ao eixo da máquina e deve ficar perpendicular durante a carga.

O centro da rótula esférica do prato superior deve estar no ponto de intersecção do eixo vertical da máquina com o plano da superfície inferior do prato superior, com uma tolerância de ± 1 mm. O prato superior deve alinhar-se no momento do contacto com o provete mas, durante a carga, a posição relativa dos pratos superior e inferior devem manter-se inalterável.

A máquina de ensaios tem pratos em carbureto de tungsténio ou em aço temperado de dureza Vickers de pelo menos HV 600. Estes pratos têm 10 mm de espessura, $40,0 \pm 0,1$ (mm) de largura e $40,0 \pm 0,1$ (mm) de comprimento, Figura 23.

Com os semi-prismas resultantes do ensaio de resistência à flexão efectua-se o ensaio de resistência à compressão como descrito a seguir. Centra-se lateralmente cada semi-prisma em relação aos pratos da máquina a $\pm 0,5$ mm e longitudinalmente de modo que a base do prisma fique saliente em

relação aos pratos, Figura 24. Aumenta-se a carga uniformemente à velocidade de 2400 ± 200 (N/s) durante toda a aplicação da carga, até à rotura, Figura 25.



Figura 23 - Aparelho para ensaio de resistência à compressão

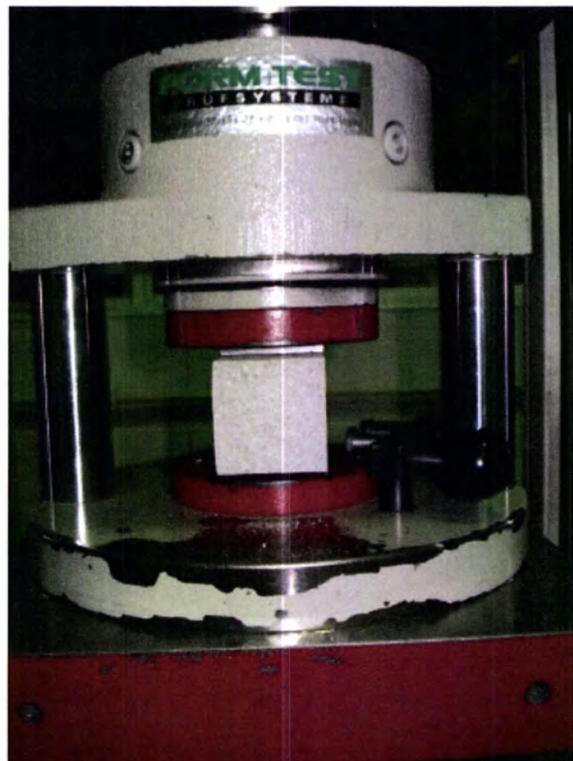


Figura 24 - Aplicação da carga no ensaio de resistência à compressão no semi-prisma



Figura 25 - Ruptura do semi-prisma no ensaio de resistência à compressão

Os ensaios são realizados aos 1, 3 e 28 dias, utilizando-se dois provetes para cada idade.

O cálculo da resistência à compressão R_c , é dado pela expressão:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Sendo:

R_c – resistência à compressão, em MPa;

F_c – carga máxima na rotura, em N;

1600 – área dos pratos (40 x 40 [mm]), em mm².

Os resultados obtidos são apresentados posteriormente e são elaborados gráficos referentes à resistência à compressão para as várias argamassas.

4.4.2. Módulo de Elasticidade

O ensaio é executado segundo a Especificação LNEC E 397-1993 [21]. Os provetes são prismáticos com dimensões de 40 x 40 x 160 (mm). Os provetes são moldados e até ao desmolde aguardam em câmara saturada com 20 ± 2 °C e humidade relativa superior a 95 %. Para este ensaio são necessários pontos de fixação colocados no provete a medir com precisão. No caso de provetes prismáticos, estes pontos são colocados sobre os eixos maiores das faces laterais.

A técnica deste ensaio tem duas fases. A primeira é a determinação da resistência à compressão e em seguida é então determinado o módulo de elasticidade.

No primeiro passo, a tensão de rotura à compressão, f_c , é necessária como valor de referência. O ensaio de compressão deve ser executado de acordo com a Especificação LNEC E 226. O valor médio da tensão de rotura do betão, f_c , determina a tensão a aplicar no ensaio do módulo de elasticidade. O ensaio de determinação da tensão de rotura à compressão foi efectuado segunda a norma NP EN 196-1 [20], que, face às dimensões dos provetes, é mais adequado que a Especificação LNEC.

Na segunda fase, centra-se o provete na máquina de ensaio e fixam-se os instrumentos de medida, Figura 27. Aplica-se uma tensão inicial de 0,5 a 1,0 MPa (σ_b), Figura 26, e lê-se a extensão (ϵ_b), Figura 28. A seguir, aumenta-se a tensão de uma forma contínua, a uma velocidade de $0,5 \pm 0,1$ MPa por segundo, até que a tensão $\sigma_a = f_c / 3$ seja alcançada. Mantém-se a tensão aplicada durante 60 segundos e efectua-se as leituras das extensões no espaço de 30 segundos (ϵ_{a1}) de modo a que as leituras se concluam nos 90 segundos após se ter alcançado a tensão σ_a . As extensões ($\epsilon_{a1} - \epsilon_b$) nas várias bases de medida não devem diferir em mais de 10 %. Caso não se verifique, é necessário

retirar a carga e centrar novamente o provete. Se não se conseguir centrar o provete de modo que a diferença entre as extensões seja inferior a 10 %, o ensaio não é significativo. Quando a centragem é aceitável, reduz-se a carga, à mesma velocidade com que se efectuou o carregamento, até atingir novamente a tensão σ_b . Fazendo um intervalo de 60 segundos, seguidamente efectuam-se as leituras que devem ser concluídas em 30 segundos.

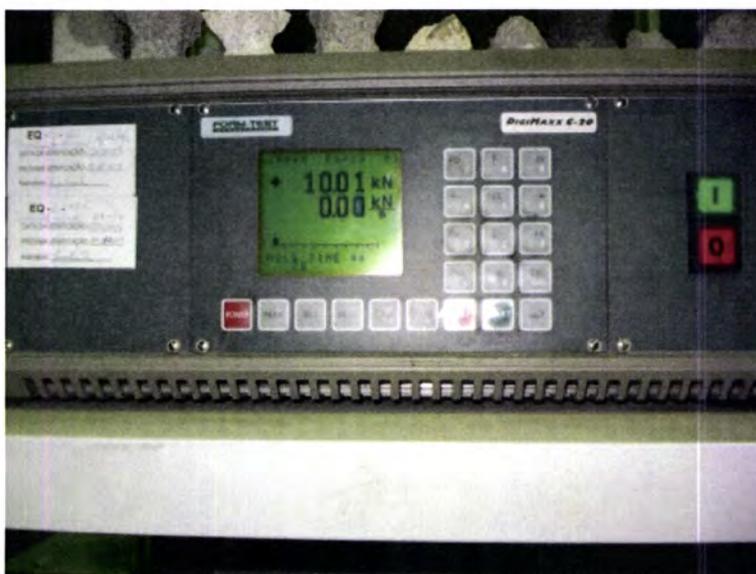


Figura 26 - Equipamento de aplicação de cargas no ensaio do módulo de elasticidade



Figura 27 - Provete com instrumentos de medida para o ensaio do módulo de elasticidade

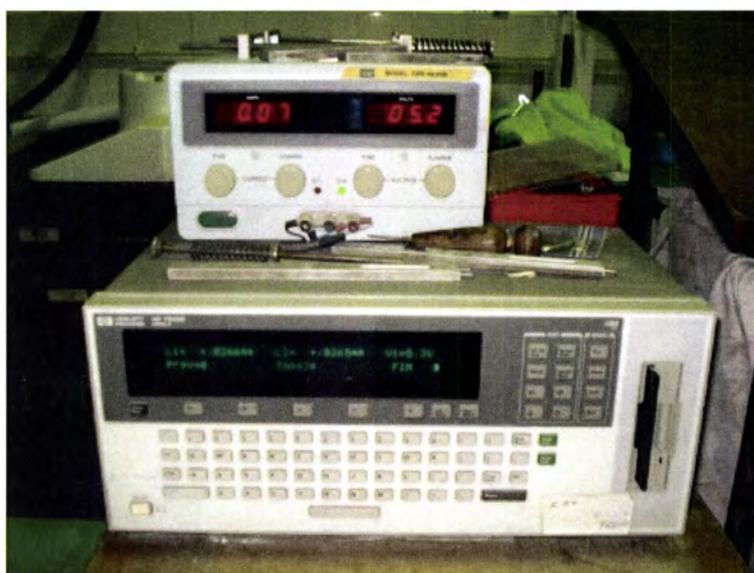


Figura 28 - Equipamento para leitura das extensões incitadas pelo ensaio

A extensão ($\epsilon_a - \epsilon_b$) é a média das extensões nas várias bases de medida. Os ciclos de carga são repetidos até que a diferença da extensão ($\epsilon_{a1} - \epsilon_b$) entre dois ciclos consecutivos não exceda 1×10^{-5} . Os ensaios são realizados aos 1, 3 e 28 dias de idade, utilizando os mesmos provetes uma vez que não é um ensaio destrutivo, de modo a detectar a evolução do módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade em compressão, E_c , é definido pela expressão:

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

Sendo:

σ_a – tensão máxima aplicada, em MPa;

σ_b – tensão inicial, em 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.

Os resultados obtidos são apresentados posteriormente e são elaborados gráficos referentes ao módulo de elasticidade para as várias argamassas.

4.4.3. Retracção autogénea

Para este ensaio, recorre-se à Especificação LNEC E 398-1993 [17]. O ensaio da retracção autogénea começa por ser realizado no momento a seguir ao desmolde do provete. Os provetes são pesados e mede-se a extensão nesse momento, 18 ± 2 horas depois do fabrico. Na retracção autogénea é necessário acondicionar o provete de maneira a existir a menor perda de massa. Assim, embrulham-se os provetes em filme plástico aderente, Figura 30, realizam-se novas leituras, de peso e extensão, e são posteriormente guardados em caixa plástica até à próxima leitura. As leituras da retracção autogénea são realizadas nas idades 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28 dias.

O equipamento utilizado mede a extensão com uma sensibilidade de 6×10^{-6} , Figura 29. A base de medida cumpre com a especificação adoptada, não é inferior a 4 vezes a máxima dimensão do inerte. É utilizada uma barra padrão para referência em aço e designada como Padrão 7 presente na Figura 29.



Figura 29 - Equipamento para medição das extensões no ensaio de retracção autógena



Figura 30 - Provetes para medição da retracção autógena

Durante o ciclo de leituras, os provetes são mantidos em sala com temperatura ambiente de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa não inferior a 50 %.

Os provetes utilizados, como já referido no subcapítulo 4.3, são prismáticos de secção quadrada e satisfazem as condições referidas na Especificação LNEC E 398-1993. Cada provete tem pontos de referência materializados por pernos metálicos posicionados nos topos do provete. São executados 3 provetes por cada argamassa para leitura da extensão.

Para o procedimento de medição da extensão é necessário medir não só os provetes como também uma barra padrão. A barra padrão utilizada é em aço, rígida, com comprimento igual ao dos provetes. As extremidades da barra têm forma e dimensões idênticas às das cabeças dos pernos e a zona central é revestida de material isolante térmico, como se pode verificar na Figura 29.

As medições efectuam-se como a seguir se indica. Coloca-se a peça a medir no comparador, barra padrão ou provete, com as extremidades ajustadas aos dispositivos de encosto da base do comparador e da haste do deflectómetro. Roda-se lentamente a peça em torno do seu eixo, e anota-se o valor mínimo indicado pelo deflectómetro numa rotação completa. Inverte-se a posição da peça e procede-se do mesmo modo, obtendo-se um novo valor. A média dos dois valores constitui o resultado da medição.

O cálculo da extensão dos provetes é calculado da seguinte forma:

$$\frac{I_4 - I_2 + I_1 - I_3}{160} \times 1000000$$

em que:

I_1 – resultado da medição da barra padrão, no início do ensaio, 0,75 dias;

I_2 – resultado da medição do provete, no início do ensaio, 0,75 dias;

I_3 – resultado da medição da barra padrão, no final do ensaio, aos 1, 2, 3, 4, 7, 14, 28 dias;

I_4 – resultado da medição do provete, no final do ensaio, aos 1, 2, 3, 4, 7, 14, 28 dias;

Em anexo são apresentados os valores medidos ao longo do ensaio e que foram utilizados para o cálculo das extensões e elaboração dos gráficos da retracção autogénea para as várias argamassas.

4.4.4. Retracção total

À semelhança da retracção autogénea, também a retracção total segue a Especificação LNEC E 398-1993 [17]. O método é idêntico exceptuando o embrulho dos provetes. Estes são colocados ao ar livre, Figura 31, na sala de ensaio, de modo a que todas as suas faces estejam em contacto com o ar.

Do mesmo modo, como referido anteriormente, o desmolde é feito às 18 ± 2 horas depois do fabrico das argamassas onde os provetes são pesados e são realizadas leituras da extensão. Colocam-se os

provetes no local de secagem até próxima leitura. As leituras são feitas nas mesmas idades que a retracção autogénea, ou seja, 1, 2, 3, 4, 7, 14 e 28 dias.

O equipamento utilizado mede a extensão com uma precisão de 6×10^{-6} . A base de medida cumpre com a especificação adoptada, não é inferior a 4 vezes a máxima dimensão do agregado. É utilizada uma barra padrão para referência em aço e designada como Padrão 7.

Durante o ciclo de leituras, os provetes deverão ser mantidos em sala com temperatura ambiente de 20 ± 2 °C e uma humidade relativa de 50 ± 5 %, segundo a norma aplicada. No Quadro 17 apresentam-se os valores mínimos e máximos da temperatura e da humidade relativa registadas na sala para cada argamassa.

Argamassa	Medições (data)		Temperatura (°C)		Humidade Relativa (%)	
	Início	Fim	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
R 32,5	23-Jun	20-Jul	19	22	61	70
R 42	03-Nov	30-Nov	20	24	46	79
RN 42	14-Jul	10-Ago	19	22	60	70
Aleve	04-Ago	31-Ago	19	22	59	67
SAP 2	04-Ago	31-Ago	19	22	59	67
SAP 3,25	11-Ago	07-Set	19	22	59	67
SAP 4,5	08-Set	06-Out	19	22	60	73
R 32,5 + SAP	03-Nov	30-Nov	20	24	46	79
RN 42 + SAP	10-Nov	07-Dez	20	24	51	75

Quadro 17 - Temperaturas e Humidade Relativa registadas na sala de armazenamento

As salas de acondicionamento dos provetes são munidas de ar condicionado para reproduzir as temperaturas e humidades relativas pretendidas. Neste caso, a temperatura, geralmente, foi mantida no intervalo desejado. A HR esteve, maioritariamente, superior a 60 %. Durante os ensaios o ar condicionado avariou. Esta avaria fez com que a temperatura aumentasse ligeiramente e a HR baixasse. A avaria deu-se por volta do dia 17 de Novembro de 2009.

Os provetes utilizados, como já referido anteriormente, são prismáticos de secção quadrada e satisfazem as condições referidas na Especificação LNEC E 398-1993. Cada provete tem pontos de referência materializados por pernos metálicos posicionados nos topos do provete, Figura 32. São executados 3 provetes por cada argamassa para leitura da extensão.



Figura 31 - Provetes para medição da retracção total



Figura 32 - Pormenor dos pernos

O material utilizado e o método utilizado para a medição das extensões nas várias idades foi descrito anteriormente no subcapítulo 4.4.3, assim como o tratamento de dados para a obtenção dos gráficos da retracção total, uma vez que é igual ao método utilizado na retracção autogénea.

Em anexo são apresentados os valores medidos ao longo do ensaio e que foram utilizados para o cálculo das extensões e elaboração dos gráficos da retracção total para as várias argamassas.

5. Resultados obtidos no estado endurecido

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos sobre as composições das argamassas em estudo, de forma a caracterizá-las no estado endurecido.

Nos próximos subcapítulos (5.1. a 5.9.) são apresentados os resultados para cada argamassa. São exibidos gráficos referentes aos valores médios da retracção autogénea e da retracção total. Os valores utilizados para a elaboração destes gráficos estão apresentados em anexo, assim como os valores individuais de cada provete e os respectivos gráficos, quer da retracção autogénea, quer para a retracção total. De referir que em todas as argamassas, os provetes apresentam valores muito consistentes entre si, na retracção autogénea e na retracção total. Os gráficos respeitantes à retracção por secagem são obtidos pela diferença dos valores médios da retracção total e da retracção autogénea.

São também apresentados os gráficos referentes à resistência à compressão, assim como ao módulo de elasticidade. Na resistência à compressão apenas é apresentada a média dos 4 resultados obtidos, em cada idade, referentes aos dois provetes de cada argamassa.

No módulo de elasticidade, as curvas apresentadas são referentes a cada provete ensaiado. As tabelas com os resultados obtidos são apresentadas em anexo, separadamente para cada argamassa. Além dos valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade são também apresentados valores da resistência à flexão.

O último gráfico apresentado em cada subcapítulo seguinte é relativo à perda de massa dos provetes utilizados nos ensaios de retracção total. Em relação aos provetes utilizados para o ensaio de retracção autogénea não são apresentados gráficos das perdas de massa, uma vez que elas são mínimas. De qualquer forma é sempre referida qual a perda de massa máxima entre os provetes da retracção autogénea de cada argamassa.

5.1. Argamassa Referência 32,5 (R 32,5)

A argamassa Referência 32,5 (32,5 advém da razão $A/C=0,325$) é uma argamassa que serve de referência neste trabalho por não ter adição de introdutores de água, LWA ou SAPs. É uma argamassa à qual se vai recorrer para saber os efeitos criados quer com a introdução de LWA e SAP, quer com razões A/C diferentes. Esta argamassa também é utilizada para comparações de argamassas com diferentes razões cimento/areia.

Os resultados obtidos nos provetes utilizados para medição da retracção autogénea e da retracção total da argamassa R 32,5 são apresentados no Gráfico 3. Ao dia 1, ao fim de cerca de 6 horas após a desmoldagem, na retracção autogénea existe uma pequena expansão, mas a partir dessa medição

os provetes apresentam sempre retracção nas medições efectuadas. Na retracção total os provetes vão sempre retraindo até à idade de 28 dias.

O valor médio atingido pelos provetes aos 28 dias na retracção autógena é de -230×10^{-6} . Na retracção total, o valor médio atingido é de -693×10^{-6} no último dia de leituras. O valor médio e o desvio padrão das diferenças (diferença entre o maior e o menor valor das medições nos 3 provetes em cada idade) foram de, respectivamente, $4,0 \times 10^{-6}$ e $2,4 \times 10^{-6}$ na retracção autógena e de $12,5 \times 10^{-6}$ e $3,6 \times 10^{-6}$ na retracção total. As diferenças na retracção autógena são da ordem de grandeza da sensibilidade do equipamento, podendo concluir-se que os 3 provetes apresentam resultados idênticos. Na retracção total, a influência de pequenas variações nas condições de exposição serão responsáveis por diferenças ligeiramente superiores, mas ainda assim proporcionalmente equivalentes às diferenças encontradas na retracção autógena.

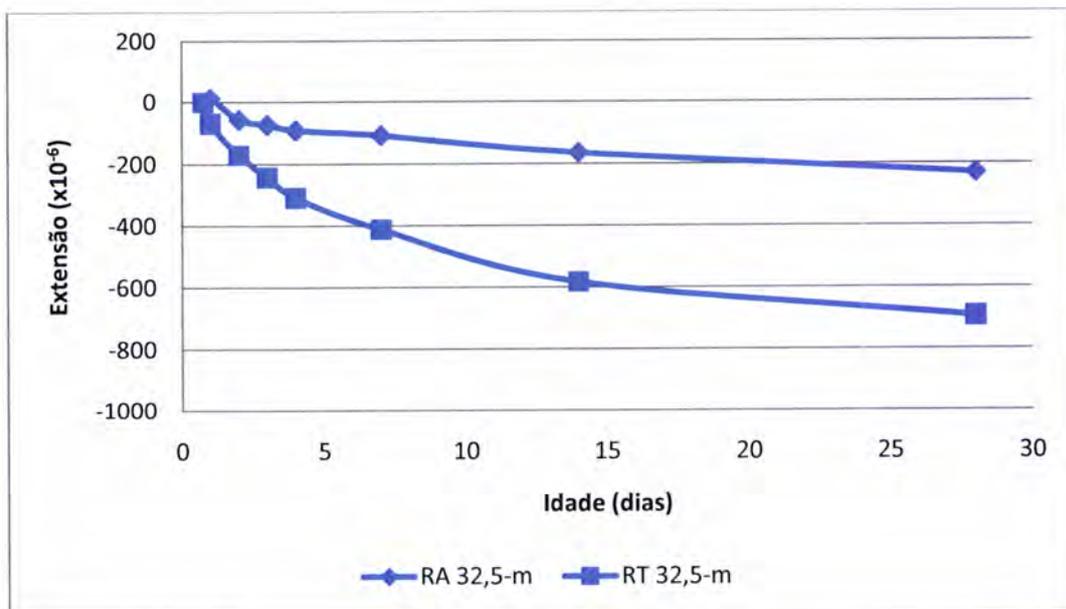


Gráfico 3 - Média da retracção autógena e retracção total da argamassa R 32,5

A retracção por secagem desta argamassa atinge um valor médio de -464×10^{-6} e é possível observar o desenvolvimento da retracção por secagem no Gráfico 4, que traduz a progressiva evaporação da água no tempo.

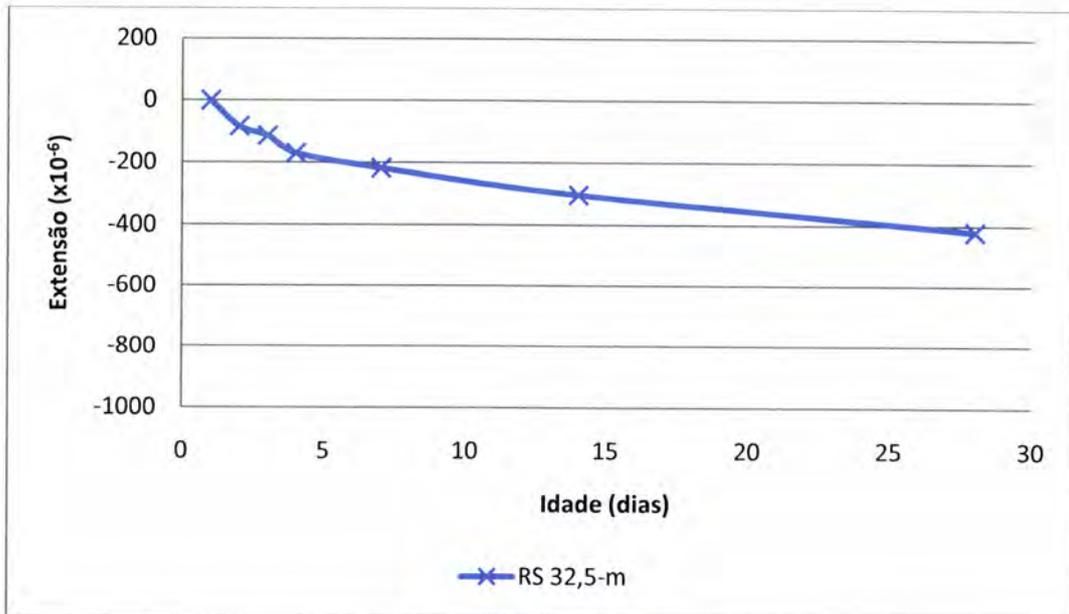


Gráfico 4 - Média da retracção por secagem da argamassa R 32,5

Em relação à resistência à compressão, a argamassa R 32,5 apresenta o valor mais alto de todas as argamassas, dada a sua menor razão A/C, e portanto apresentando uma estrutura menos porosa. Esta resistência atinge os 95,6 MPa aos 28 dias. No Gráfico 5 pode-se observar a resultante dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão.

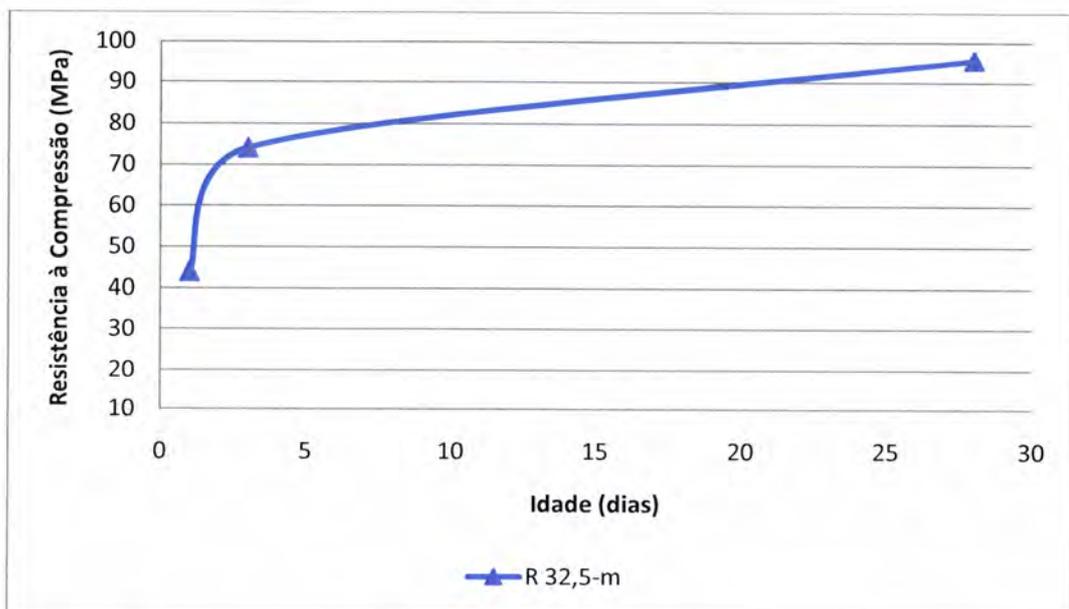


Gráfico 5 - Evolução da resistência à compressão da argamassa R 32,5

O módulo de elasticidade desta argamassa apresenta um valor compatível com o da resistência à compressão, atingindo nesta argamassa também o maior valor, chegando em média aos 38,7 GPa. O provete que tem um módulo de elasticidade maior é o ME 32,5-1, 39,3 GPa, aos 28 dias. O Gráfico 6 exprime a evolução dos resultados do módulo de elasticidade da argamassa R 32,5.

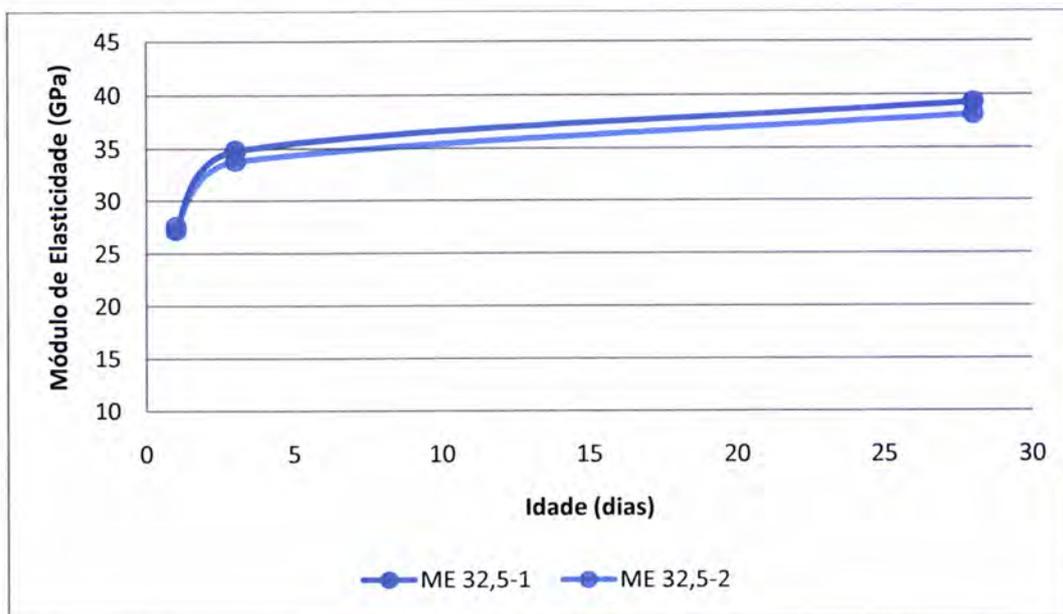


Gráfico 6 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa R 32,5

No Gráfico 7 apresentam-se os valores respeitantes à perda de massa dos provetes utilizados no ensaio de retracção total. O provete RT 32,5-1 foi o provete que teve uma perda de massa maior, sendo esta de 16,85 g. A perda de massa média entre os provetes da retracção total é de 16,71 g. Em relação à perda de massa dos provetes da retracção autogénea, o provete com maior perda de massa reduziu o seu peso em 0,25 g e a média de perda de massa destes provetes é de 0,23 g.

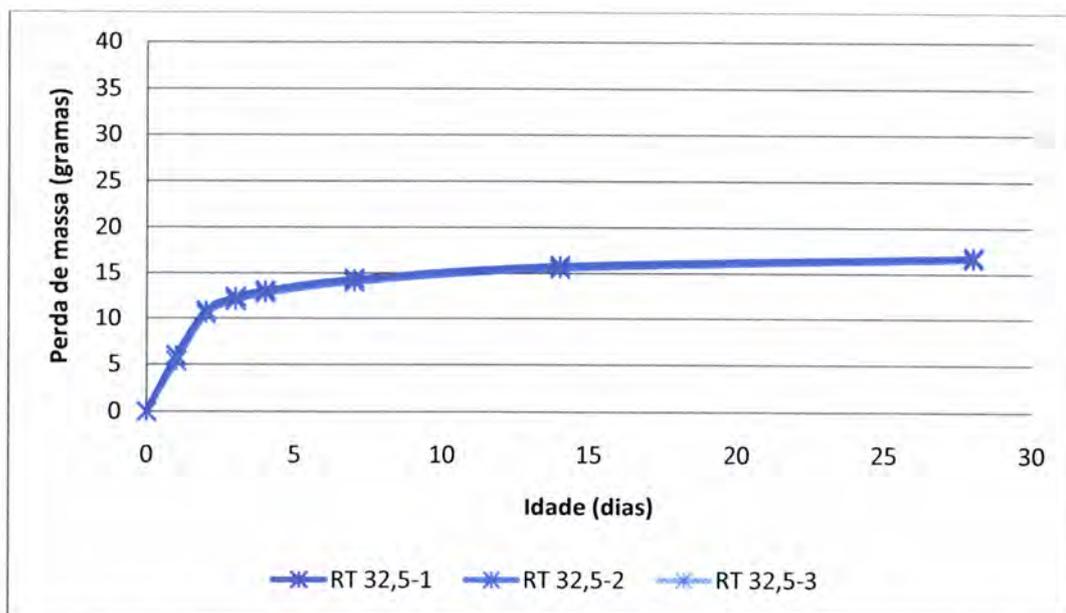


Gráfico 7 - Perda de massa dos provetes da retracção total da argamassa R 32,5

5.2. Argamassa Referência Nova 42 (RN 42)

A argamassa Referência Nova 42 (42 advém da razão A/C=0,42) é uma argamassa, tal como a R 32,5, de referência para este trabalho, com um traço de cimento:areia também de 1:2 e sem adição de LWA ou SAP. Esta argamassa será utilizada para avaliar a influência da razão A/C, mas igualmente para analisar os efeitos criados com a introdução de LWA ou de SAP, agora para outro valor de A/C.

No Gráfico 8 são apresentados os valores médios para a retracção autogénea e para a retracção total da argamassa RN 42. A evolução da retracção nesta argamassa é semelhante à da argamassa R 32,5. Na retracção autogénea existe uma pequena expansão no dia 1 e na retracção total os provetes estão sempre a retrair. Na retracção autogénea o valor atingido aos 28 dias foi de -267×10^{-6} e na retracção total o valor atingiu os -761×10^{-6} . O valor médio e o desvio padrão das diferenças, para esta argamassa, foram de, respectivamente, $22,3 \times 10^{-6}$ e $8,2 \times 10^{-6}$ na retracção autogénea e de $61,2 \times 10^{-6}$ e $24,8 \times 10^{-6}$ na retracção total.

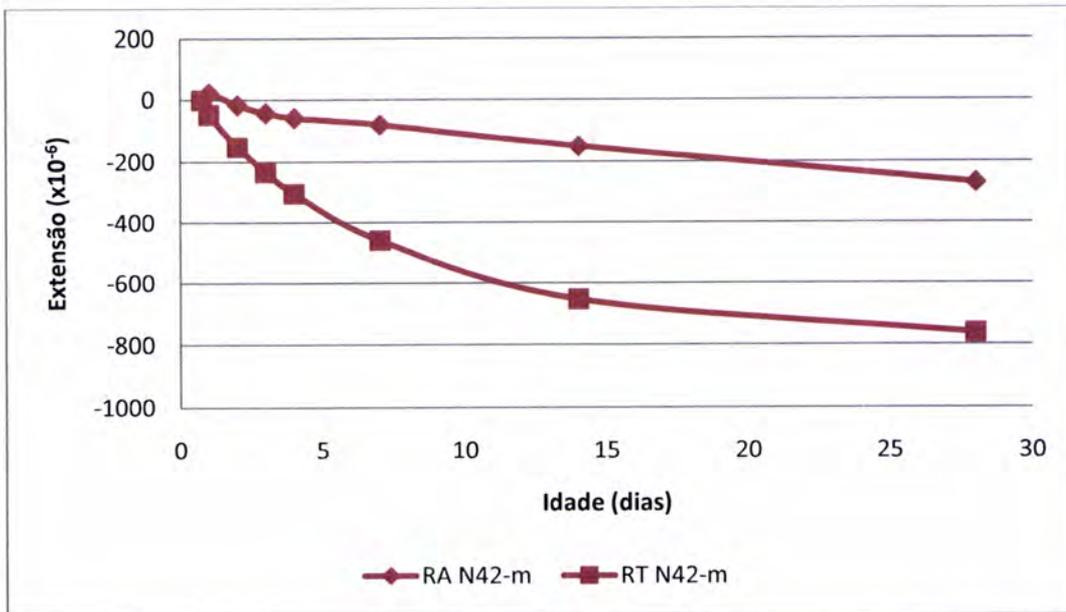


Gráfico 8 - Média da retracção autógena e retracção total da argamassa RN 42

No Gráfico 9 observa-se os resultados para a retracção por secagem. Aos 28 dias o valor para a retracção por secagem é de -494×10^{-6} .

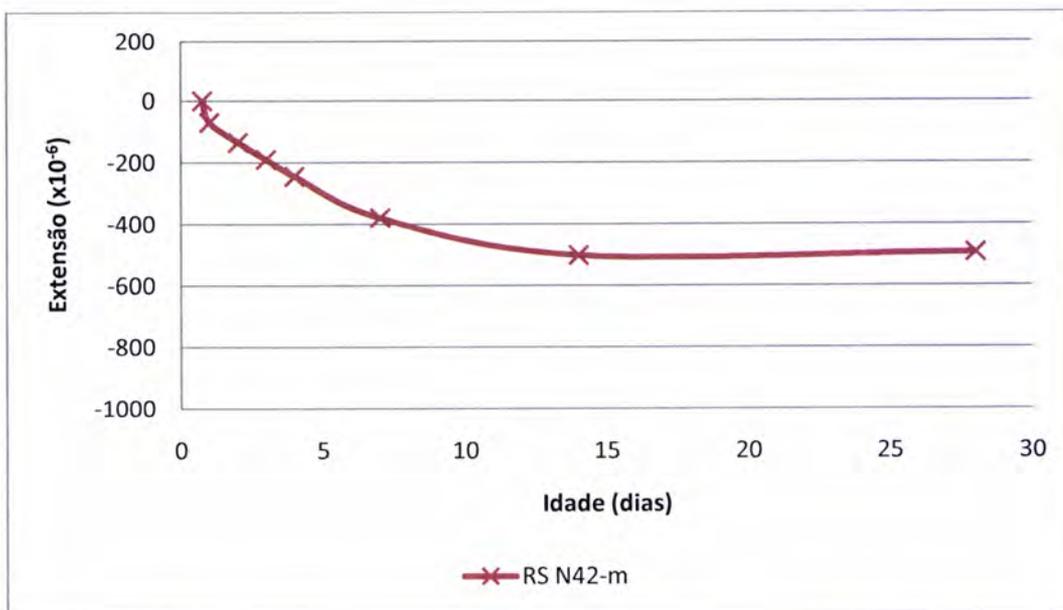


Gráfico 9 - Média da retracção por secagem da argamassa RN 42

Os valores da resistência à compressão são apresentados no gráfico seguinte, Gráfico 10. Aos 28 dias de idade, o valor médio da tensão de rotura é de 72,0 MPa.

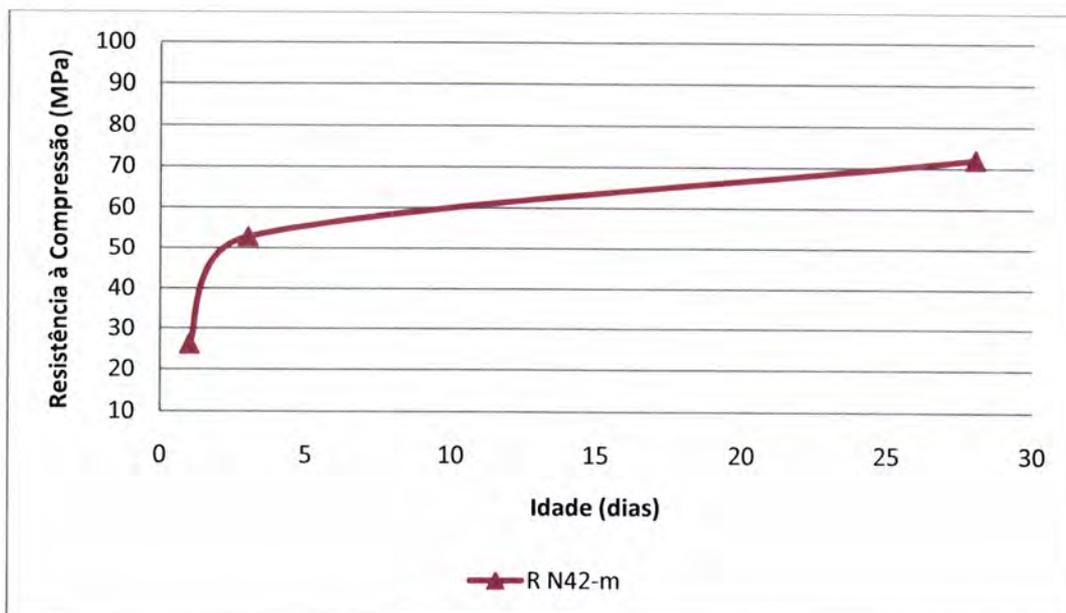


Gráfico 10 - Evolução da resistência à compressão da argamassa RN 42

Para o módulo de elasticidade, o valor máximo que se registou aos 28 dias foi de 33,9 GPa no provete ME N42-1. O valor médio atingido por esta argamassa para o módulo de elasticidade é de 33,5 GPa. No Gráfico 11 pode-se observar a evolução do módulo de elasticidade desta argamassa.

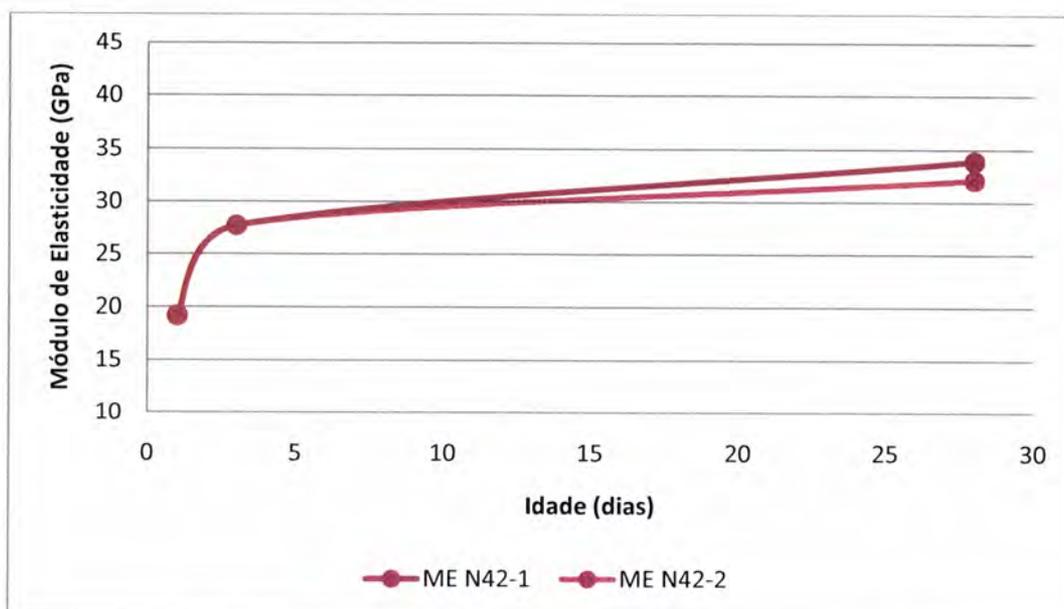


Gráfico 11 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa RN 42

Como se pode verificar no Gráfico 12, os valores de perda de massa são bastante consistentes entre os três provetes. O provete utilizado para a retracção total com maior perda de massa é o RT N42-1 que perde 22,42 g e a média de perda de massa destes provetes é de 22,11 g. Em relação aos provetes de retracção autogénea a média de perda de massa é de 0,40 g e o provete RA N42-3 é o que perdeu mais massa, 0,44 g.

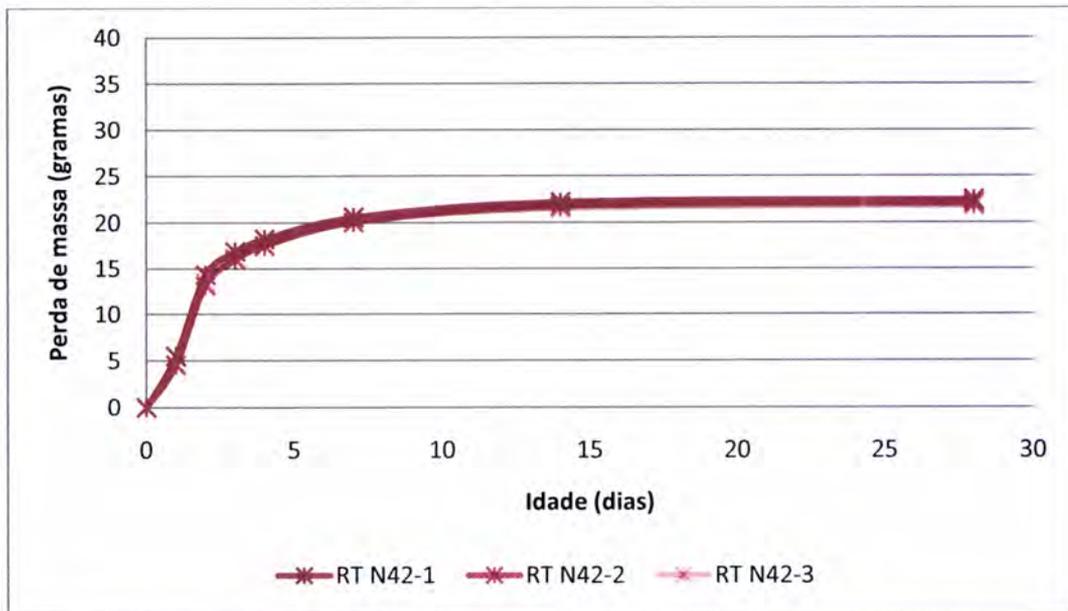


Gráfico 12 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa RN 42

5.3. Argamassa Referência 42 (R 42)

A argamassa Referência 42 é, como as argamassas anteriores, também uma argamassa simples, sem adição de introdutores de água. É uma argamassa que não tem uma razão cimento:areia igual às outras argamassas de referência, R 32,5 e RN 42. Nesta argamassa R42 o volume de agregado é inferior, pois pretendeu-se variar a razão A/C de 0,325 para 0,42, não à custa da diminuição da dosagem de cimento, que permite manter a razão cimento/areia constante, mas por redução da dosagem de areia. Efectivamente, não é possível fazer a variação da razão A/C mantendo simultaneamente a dosagem de cimento e a razão cimento/areia constante. Com os resultados obtidos a partir desta argamassa podemos avaliar também o efeito do agregado nas argamassas, uma vez que, quanto à sua razão de A/C, esta argamassa apresenta um valor igual à da argamassa RN 42.

No Gráfico 13 pode-se observar a evolução da retracção autogénea e da retracção total nesta argamassa R 42. Na retracção autogénea, ao dia 1, existe uma pequena expansão e, a partir dessa

idade, os provetes retraem, sendo que aos 28 dias de idade o valor da extensão é de -348×10^{-6} . Em relação à retracção total, os provetes não sofrem expansão e no 28º dia o valor da sua retracção é de -909×10^{-6} . O valor médio e o desvio padrão das diferenças para a argamassa R 42 foram de, respectivamente, $12,9 \times 10^{-6}$ e $6,6 \times 10^{-6}$ na retracção autogénea e de $13,4 \times 10^{-6}$ e $7,2 \times 10^{-6}$ na retracção total.

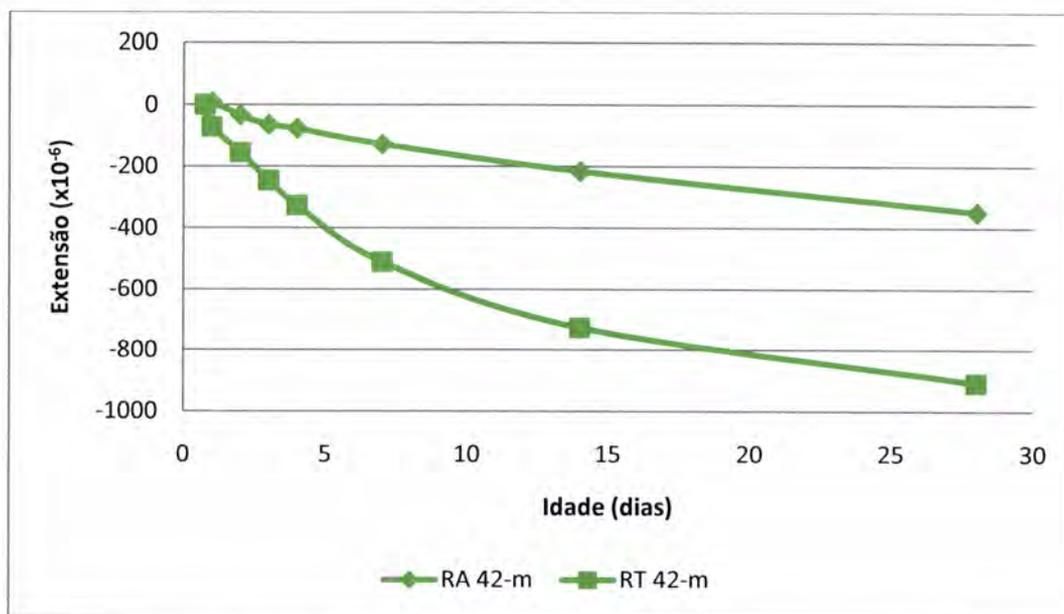


Gráfico 13 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa R 42

A retracção por secagem referente à argamassa é apresentada no Gráfico 14. O valor atingido aos 28 dias de idade é de -562×10^{-6} .

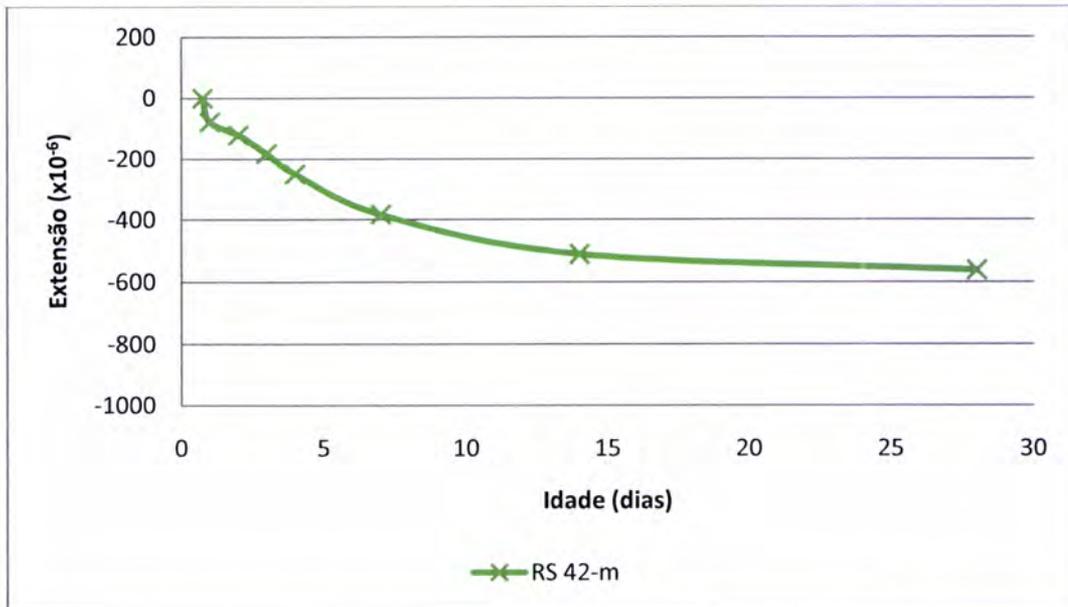


Gráfico 14 - Média da retração por secagem da argamassa R 42

O Gráfico 15 apresenta os valores de resistência à compressão da argamassa R 42. Aos 28 dias o valor obtido é de 71,6 MPa.

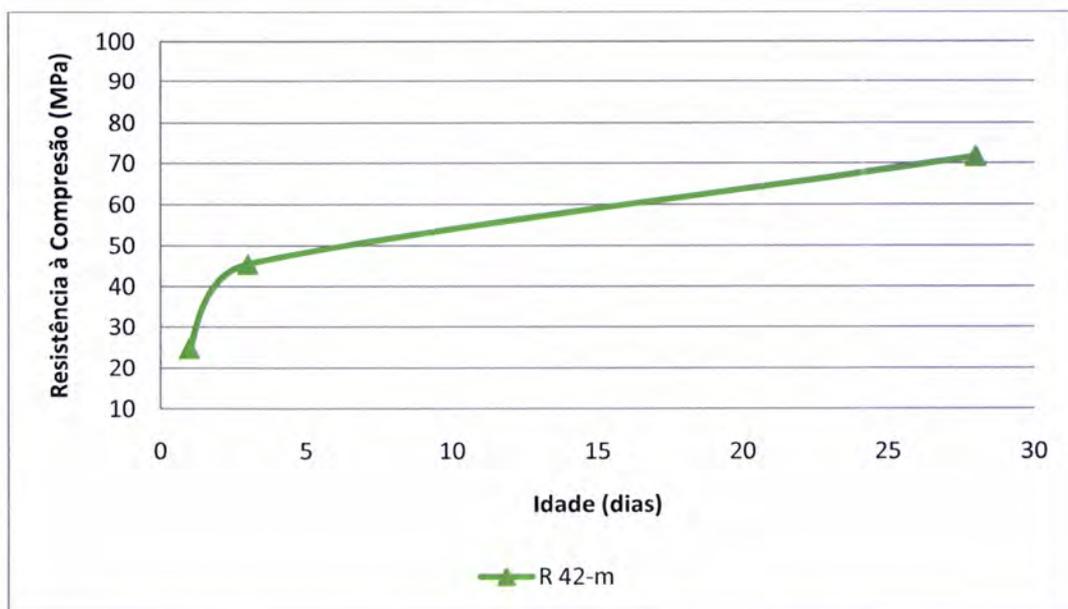


Gráfico 15 - Evolução da resistência à compressão da argamassa R 42

O gráfico seguinte, Gráfico 16, apresenta os resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade. Os valores dos dois provetes utilizados para este ensaio são muito próximos, mas o

que registou maior valor foi o provete ME 42-2, que aos 28 dias tem um módulo de elasticidade de 31,4 GPa. Em média, estes provetes atingem 31,3 GPa.

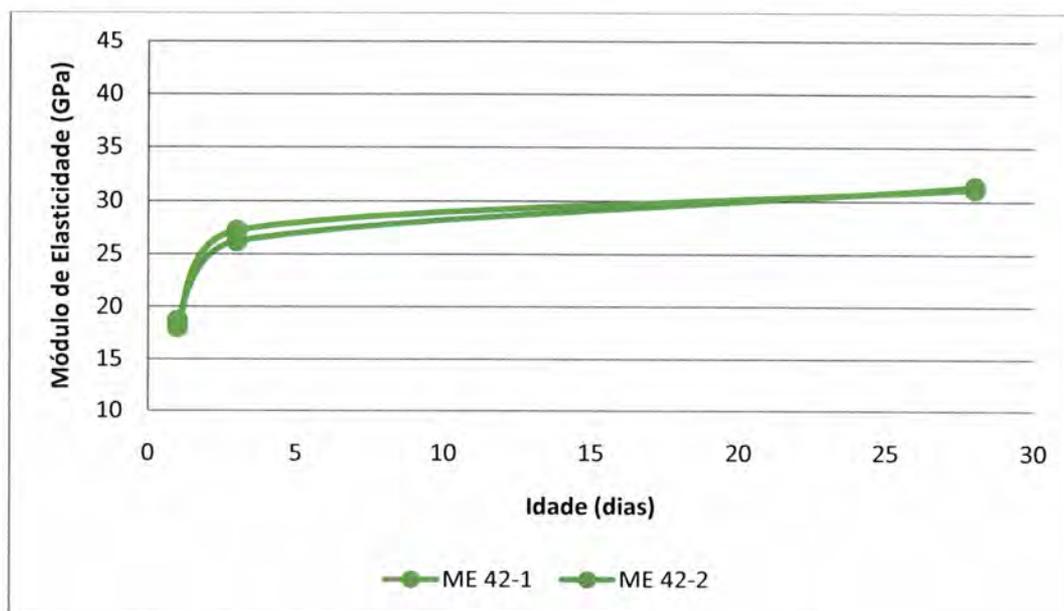


Gráfico 16 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa R 42

Os valores da perda de massa dos provetes de retracção total são apresentados no Gráfico 17. O valor máximo registado de perda de massa é referente ao provete RT 42-1 com uma perda de 26,04 g e a média dos valores de perda de massa dos 3 provetes utilizados para este ensaio é de 25,79 g. Quanto aos valores da perda de massa dos provetes usados na retracção autogénea, o maior foi medido no provete RA 42-2, 0,58 g, e em média estes provetes perderam 0,54 g.

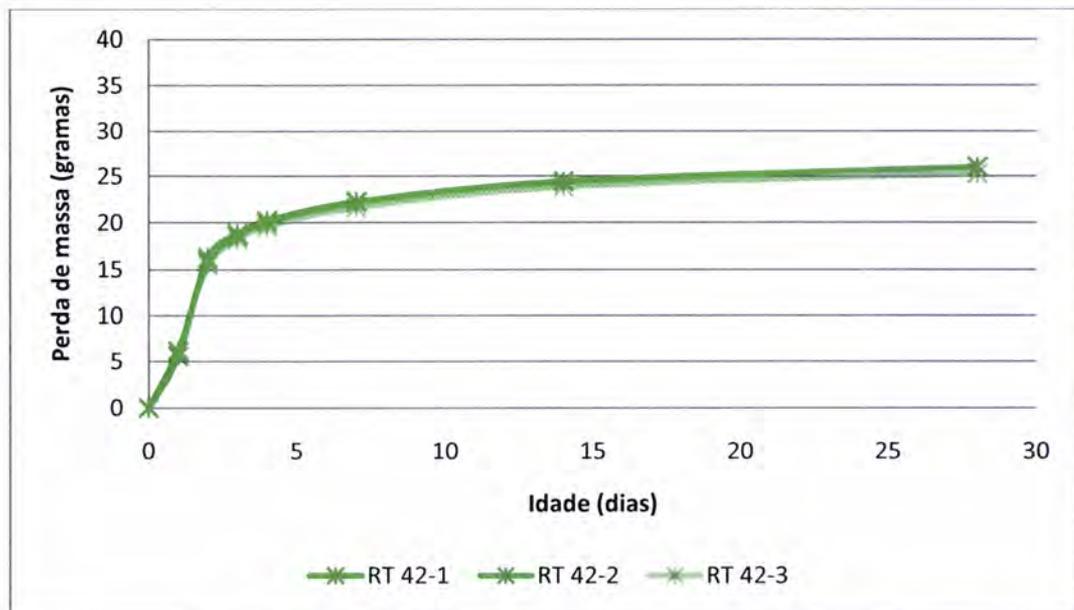


Gráfico 17 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa R 42

5.4. Argamassa Agregado Leve (ALeVe)

Neste trabalho utilizam-se dois tipos de introdutores de água. O agregado leve é um desses introdutores de água. Esta argamassa é utilizada para comparação com as misturas em que se utilizaram os SAP. Esta argamassa foi preparada com uma razão A/C de 0,325, mas como o agregado leve foi introduzido saturado, com a adição extra de água a razão A/C passa para 0,42 se esta água for considerada como água livre.

As leituras para esta argamassa, no que diz respeito aos resultados da retracção, foram efectuadas às idades 1, 2, 3, 4, 7, 22 e 28 dias, uma vez que não foi efectuada, por lapso, a realização das leituras na idade de 14 dias como nas outras argamassas.

Na argamassa Agregado Leve, como nas argamassas descritas anteriormente, é notória uma ligeira expansão inicial nos provetes da retracção autógena, e nos restantes dias de leitura os provetes retraem. Em relação à retracção total, os provetes retraem desde o início. Assim, o resultado da extensão aos 28 dias para a retracção autógena é de -127×10^{-6} e para a retracção total é de -927×10^{-6} . No Gráfico 18 pode-se observar o desenvolvimento dos resultados obtidos para a retracção autógena e para a retracção total. O valor médio e o desvio padrão das diferenças para a argamassa ALeve foram de, respectivamente, $9,4 \times 10^{-6}$ e $3,6 \times 10^{-6}$ na retracção autógena e de $14,3 \times 10^{-6}$ e $5,1 \times 10^{-6}$ na retracção total.

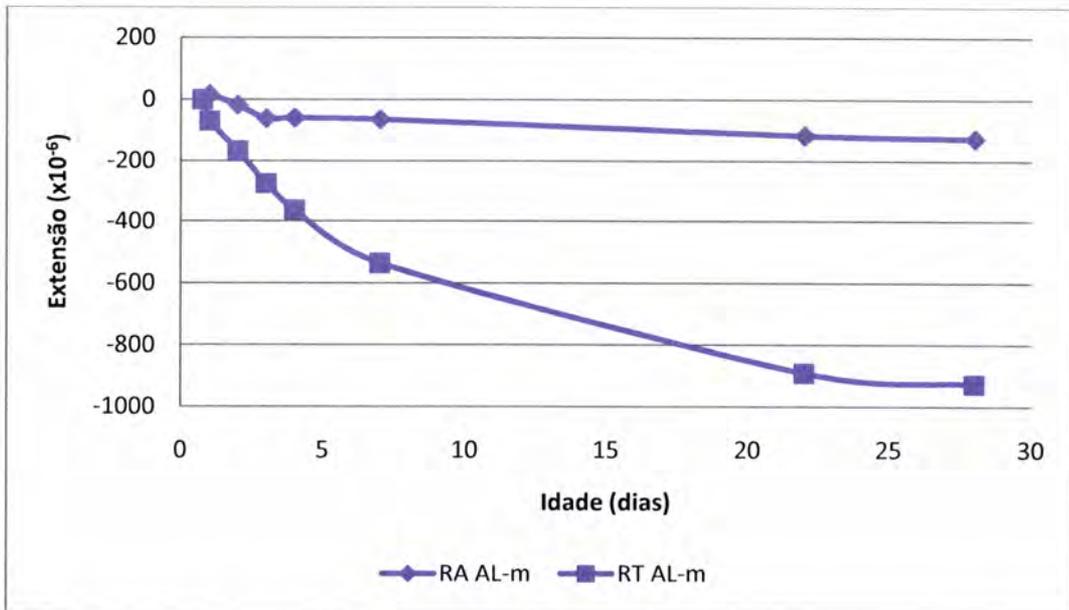


Gráfico 18 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa ALeve

Depois de examinados os resultados da retracção autogénea e da retracção total calcula-se o valor da retracção por secagem. O valor da retracção por secagem para esta argamassa é de -800×10^{-6} , aos 28 dias. No Gráfico 19 é possível verificar a evolução da retracção por secagem para a argamassa ALeve.

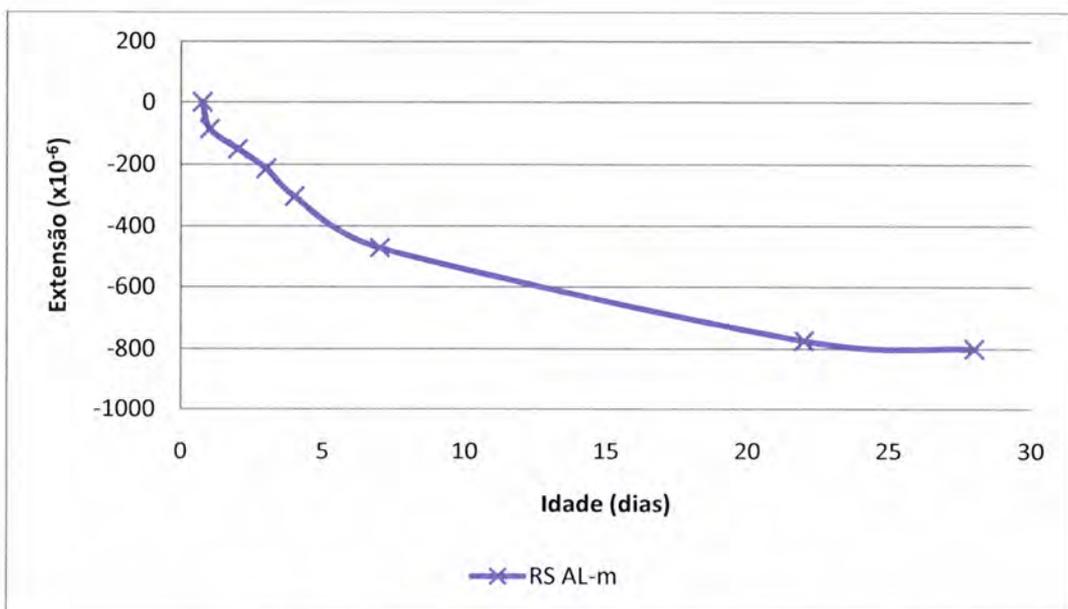


Gráfico 19 - Média da retracção por secagem da argamassa ALeve

O próximo gráfico, Gráfico 20, apresenta a evolução da resistência à compressão para a argamassa ALeve. Aos 28 dias o valor da resistência à compressão é de 58,6 MPa.

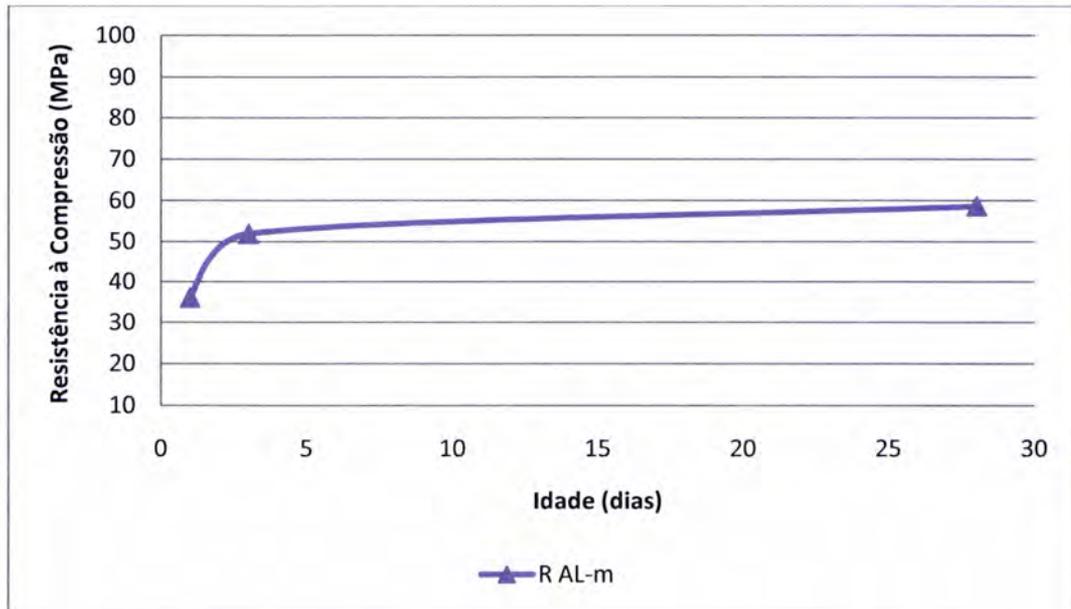


Gráfico 20 - Evolução da resistência à compressão da argamassa ALeve

O módulo de elasticidade máximo atingido para esta argamassa aos 28 dias é de 27,2 GPa no provete ME AL-1. O valor médio destes provetes é de 27,0 GPa. No Gráfico 21 estão representados os valores dos dois provetes utilizados para este ensaio.

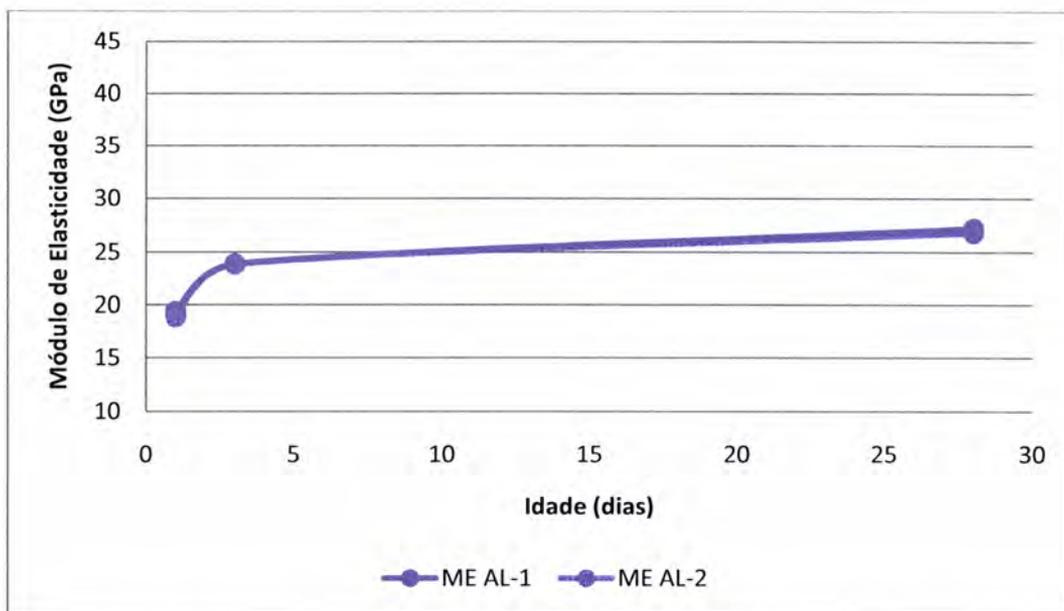


Gráfico 21 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa ALeve

A maior perda de massa nos provetes de retracção total desta argamassa ocorreu no provete RT AL-3, tendo perdido 25,74 g. A média de perda de massa dos 3 provetes da retracção total é de 25,25 g. Na retracção autogénea o provete RA AL-3 teve uma perda de massa de 0,85 g, sendo esta a maior perda de massa entre os 3 provetes e a média entre eles é de 0,84 g. No Gráfico 22 apresentam-se os valores respeitantes à perda de massa dos provetes da retracção total.

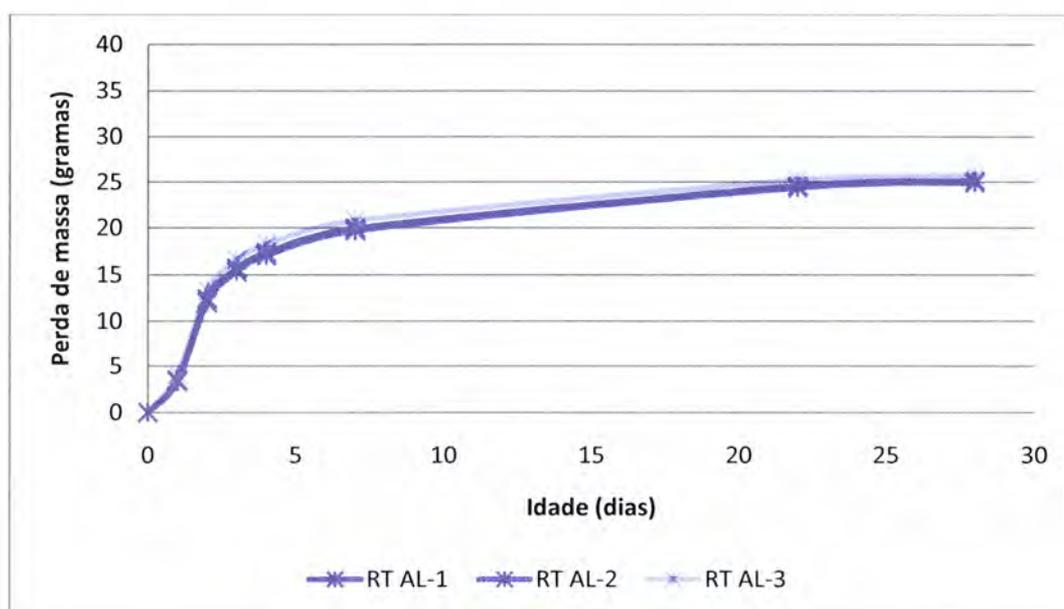


Gráfico 22 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa ALeve

5.5. Argamassa SAP 2 (SAP 2)

A argamassa SAP 2 é uma das 5 argamassas em que se introduz SAP. Para este estudo realizam-se várias argamassas com várias concentrações sendo a concentração desta argamassa a mais reduzida.

As leituras para esta argamassa, no que diz respeito aos resultados da retracção, foram efectuadas às idades 1, 2, 3, 4, 7, 22 e 28 dias, uma vez que, por lapso, não foram realizadas as leituras na idade de 14 dias como nas outras argamassas.

Nos resultados desta argamassa nota-se uma ligeira expansão inicial nos provetes da retracção autogénea e na retracção total apenas existe retracção durante todo o ensaio. No fim do ensaio os resultados obtidos para a extensão da retracção autogénea é de -263×10^{-6} e para a extensão da retracção total é de -873×10^{-6} . O valor médio e o desvio padrão das diferenças para a argamassa SAP 2 foram de, respectivamente, $12,9 \times 10^{-6}$ e $3,8 \times 10^{-6}$ na retracção autogénea e de $27,2 \times 10^{-6}$ e $13,1 \times 10^{-6}$ na retracção total. No Gráfico 23 pode-se observar a evolução da retracção autogénea e da retracção total.

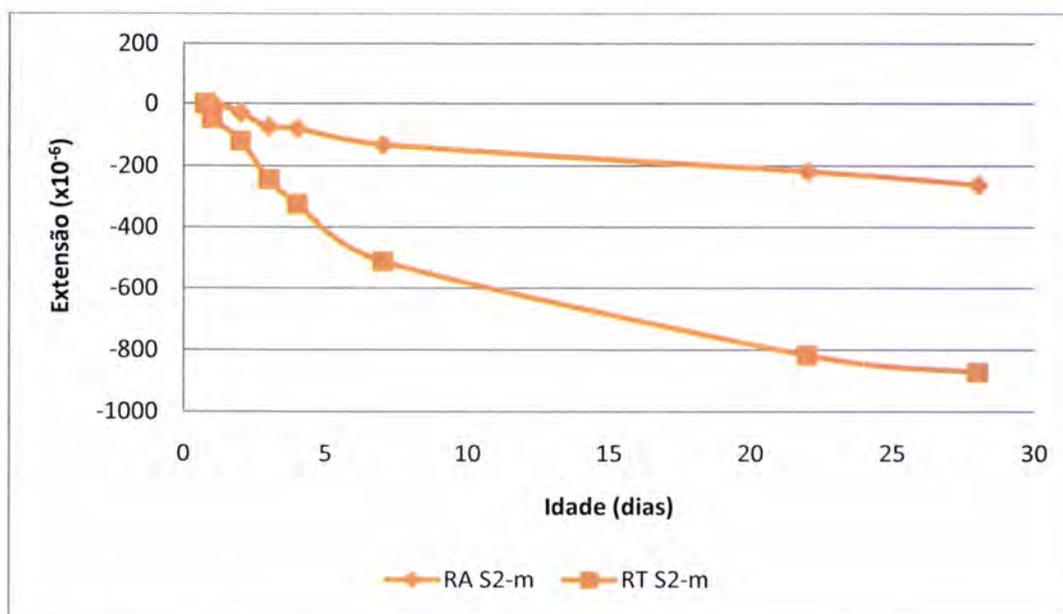


Gráfico 23 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa SAP 2

O Gráfico 24 é referente à retracção por secagem da argamassa SAP 2. O valor da extensão da retracção por secagem aos 28 dias é de -610×10^{-6} .

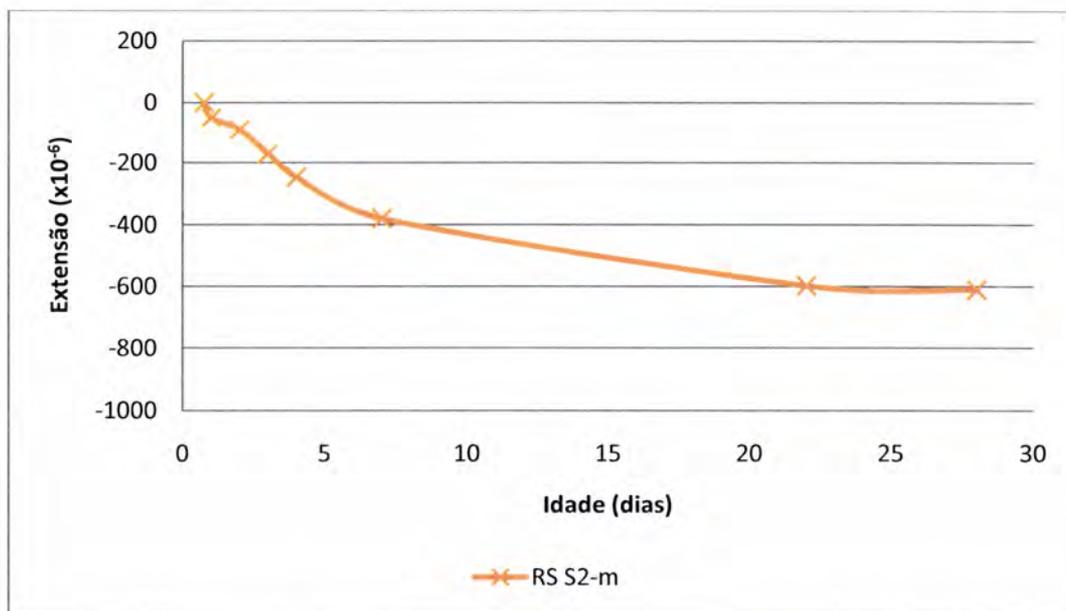


Gráfico 24 - Média da retracção por secagem da argamassa SAP 2

A evolução da resistência à compressão é ilustrada no Gráfico 25. Aos 28 dias a resistência à compressão tem o valor de 66,8 MPa.

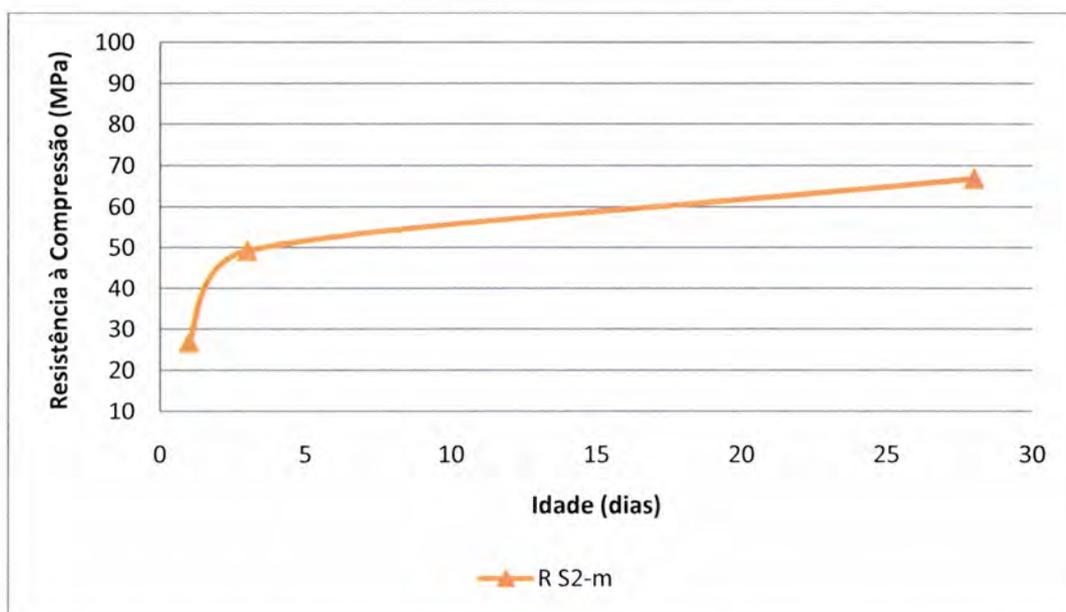


Gráfico 25 - Evolução da resistência à compressão da argamassa SAP 2

O valor médio do módulo de elasticidade desta argamassa é de 31,1 GPa. No Gráfico 26 são apresentados os resultados dos dois provetes utilizados no ensaio. O provete que regista maior módulo de elasticidade é o ME S2-1 com 31,2 GPa.

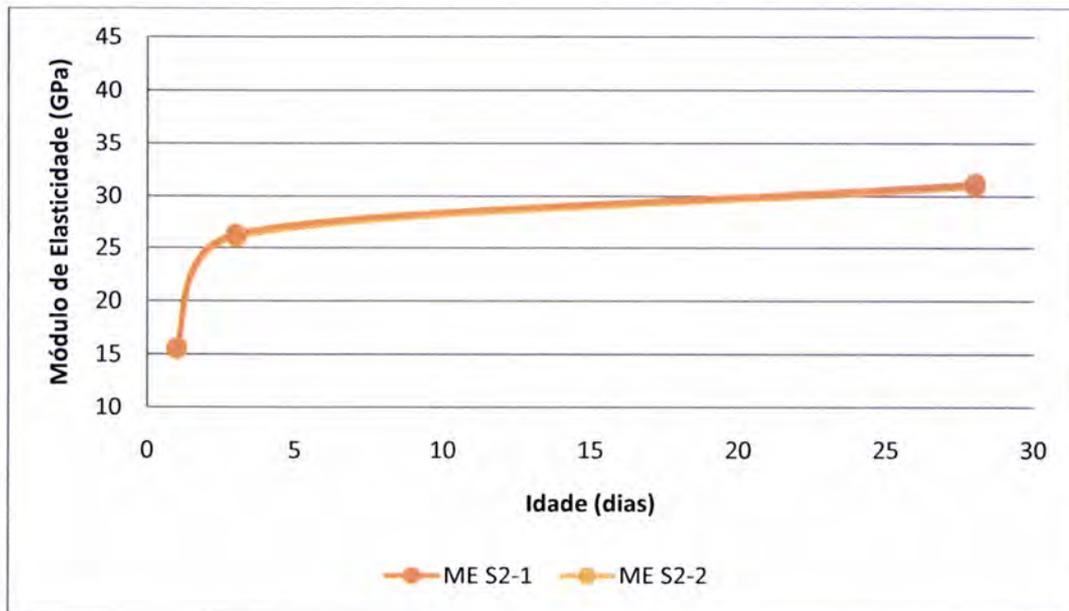


Gráfico 26 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa SAP 2

No Gráfico 27 é apresentado os resultados da perda de massa dos provetes utilizados no ensaio de retracção total. O provete RT S2-3 tem uma perda de massa de 25,49 g e é o que tem maior perda de massa. A média da perda de massa dos provetes apresentados no Gráfico 27 é de 24,70 g. A perda de massa nos provetes do ensaio de retracção autógena é, como nas outras argamassas, muito pequena e o provete RA S2-1 é o que tem a maior perda de massa, 0,51 g e em média os 3 provetes perderam 0,45 g.

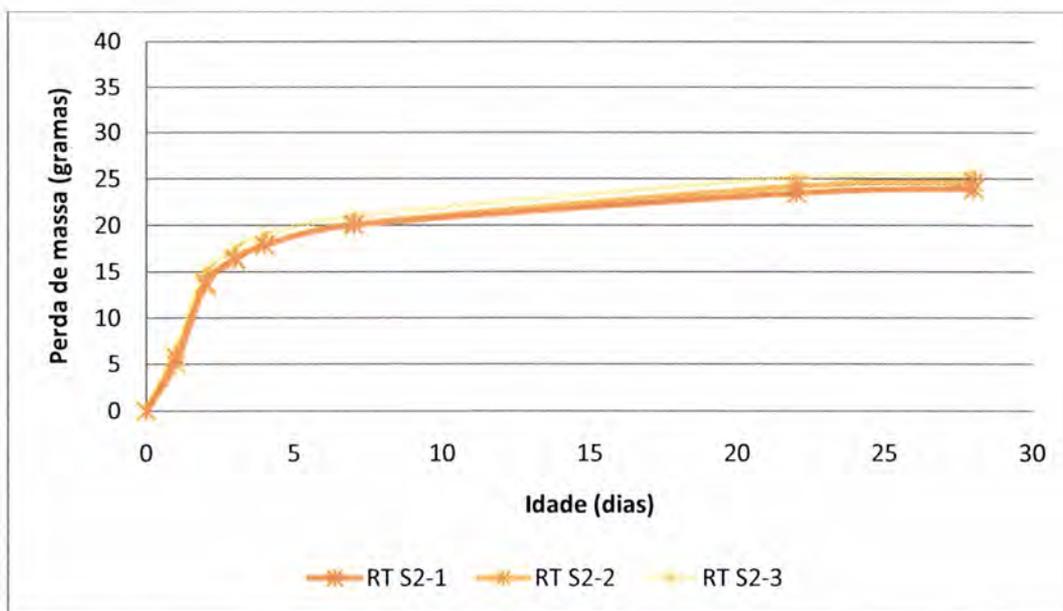


Gráfico 27 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa SAP 2

5.6. Argamassa SAP 3,25 (SAP 3,25)

Na argamassa SAP 3,25 aumentou-se ligeiramente a concentração de SAP. Em seguida, nos gráficos representados neste subcapítulo apresenta-se a evolução dos vários ensaios realizados.

Os resultados obtidos para o ensaio da retracção autógena e retracção total são apresentados no Gráfico 28. A argamassa SAP 3,25 obteve uma extensão de -243×10^{-6} na retracção autógena e de -789×10^{-6} da retracção total. Nesta argamassa há ainda a referenciar expansão no dia 1 nos provetes utilizados no ensaio de retracção autógena. O valor médio e o desvio padrão das diferenças para a argamassa SAP 3,25 foram de, respectivamente, $12,1 \times 10^{-6}$ e $8,2 \times 10^{-6}$ na retracção autógena e de $17,0 \times 10^{-6}$ e $4,7 \times 10^{-6}$ na retracção total.

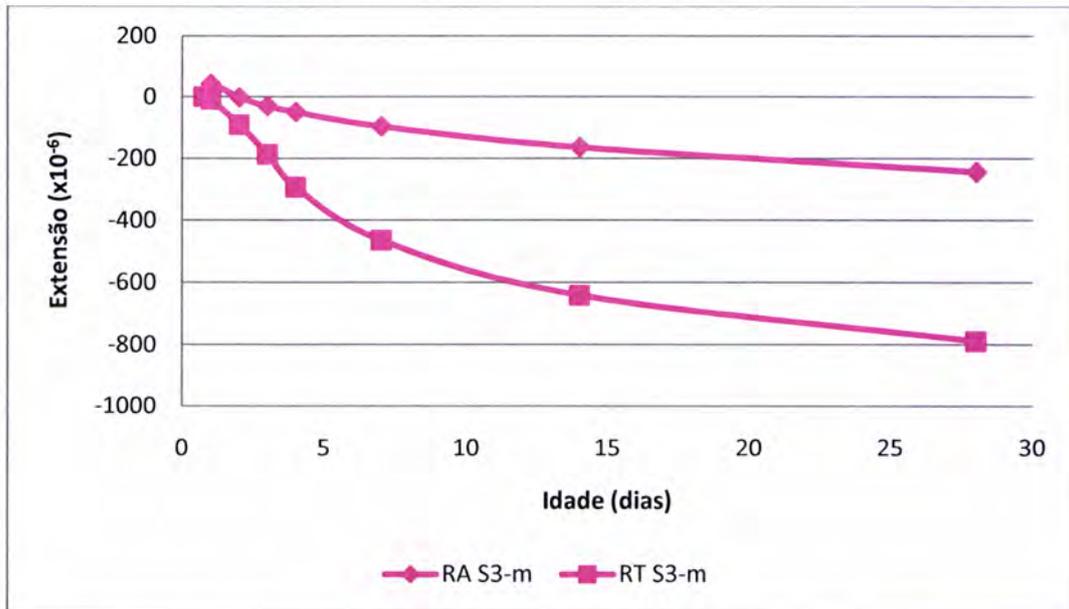


Gráfico 28 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa SAP 3,25

O valor da retracção por secagem desta argamassa é de -546×10^{-6} aos 28 dias de idade. No Gráfico 29 pode observar-se os resultados obtidos.

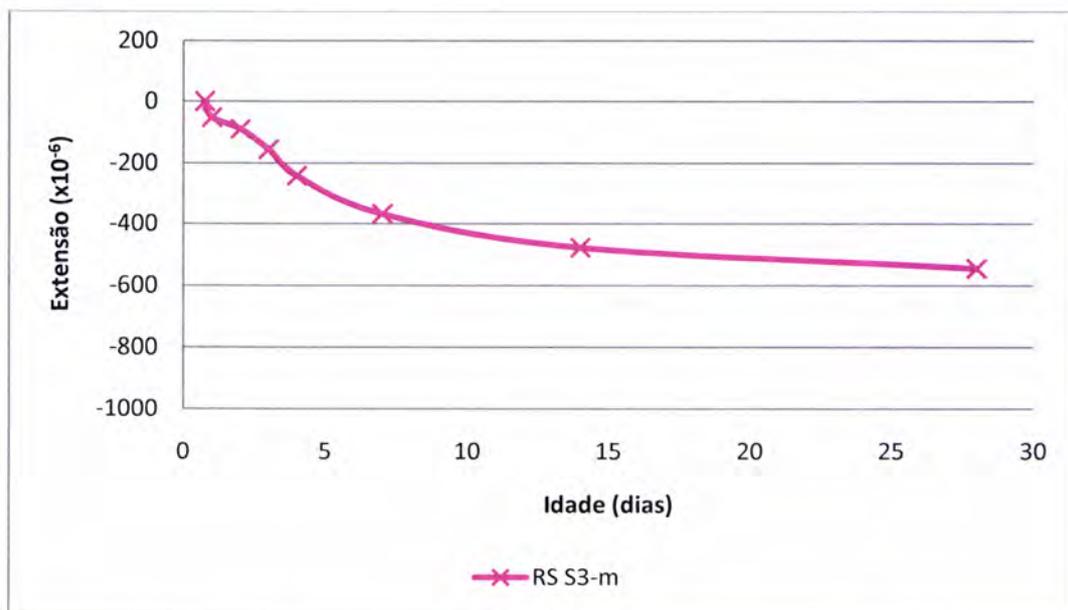


Gráfico 29 - Média da retracção por secagem da argamassa SAP 3,25

A resistência à compressão desta argamassa atingiu o valor de 63,4 MPa aos 28 dias. O Gráfico 30 representa a evolução dos resultados deste ensaio.

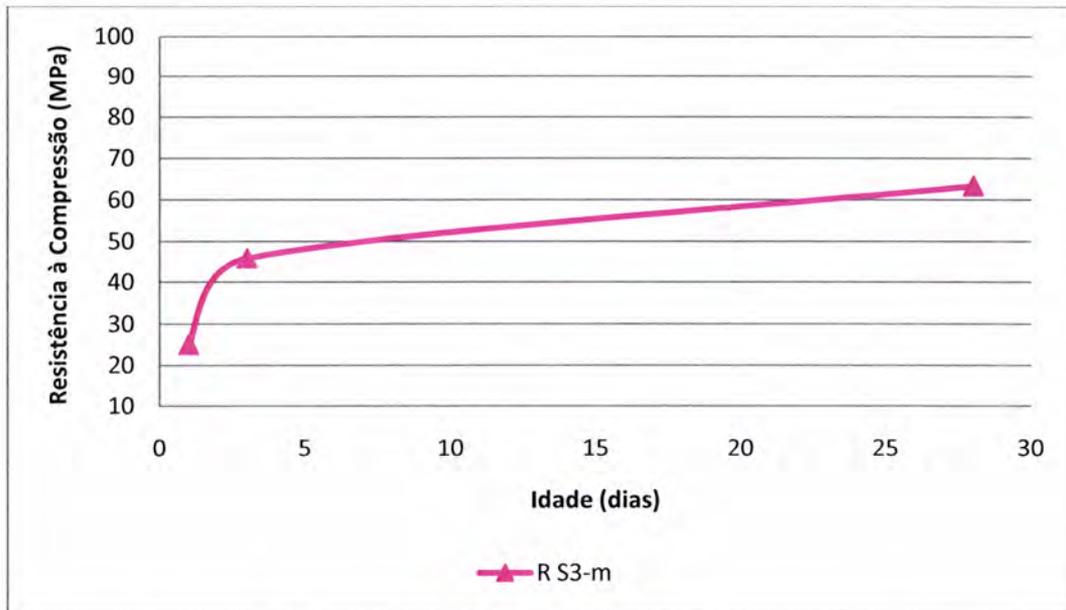


Gráfico 30 - Evolução da resistência à compressão da argamassa SAP 3,25

O próximo gráfico refere-se aos provetes ensaiados para o módulo de elasticidade. Em média estes provetes atingiram um valor de 30,7 GPa. O provete que alcançou o maior resultado é o ME S3-2, 30,9 GPa, como se pode verificar no Gráfico 31.

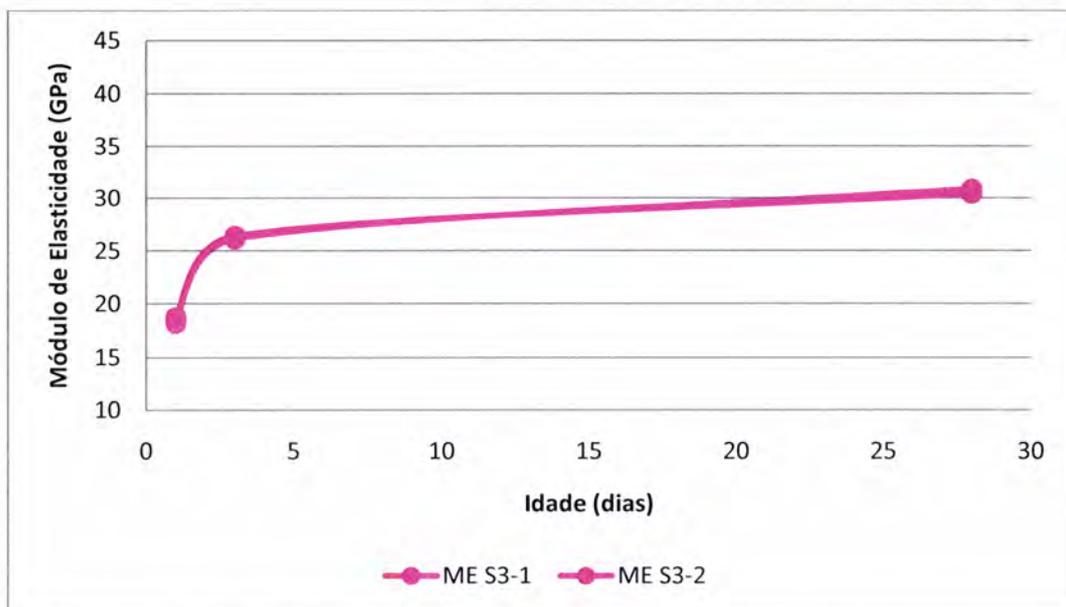


Gráfico 31 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa SAP 3,25

No Gráfico 32 representa-se a perda de massa dos provetes utilizados nos ensaios da retracção total. É notório ao dia 4 no provete RT S3-3 uma perda de massa maior em relação aos outros 2 provetes. Este facto pode ser explicado devido ao armazenamento dos provetes e este puder ter eventualmente ficado mais exposto ao ar que os outros, ou estar associado a um erro de leitura. Para a retracção total a média da perda de massa destes provetes é de 28,42 g e o provete com maior perda de massa é o RT S3-2 com 29,05 g. Na retracção autogénea a média de perda de massa é de 0,37 g e o provete com a maior perda é o RA S3-3 com 0,44 g.

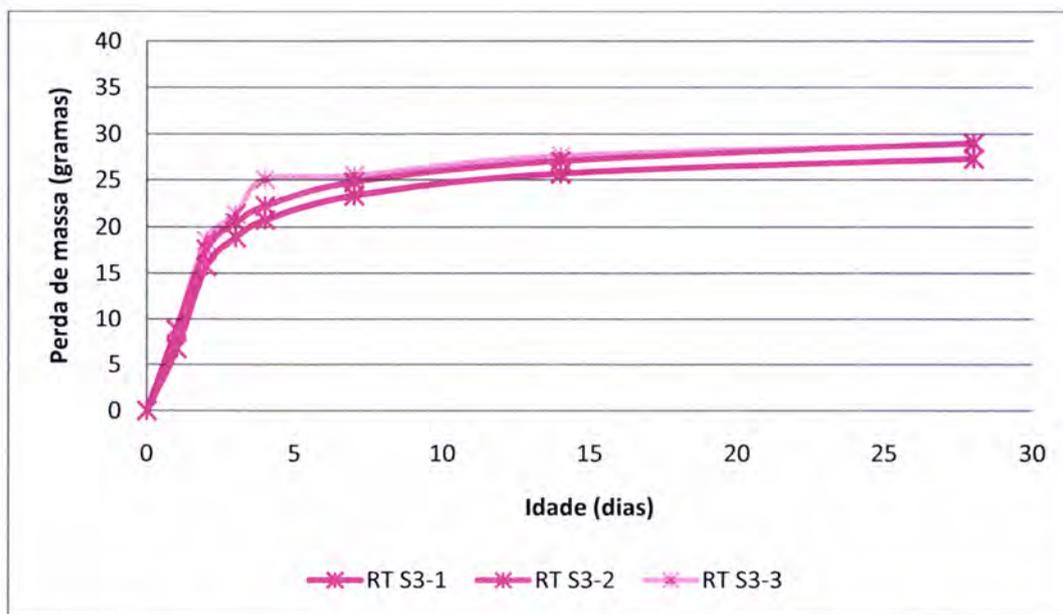


Gráfico 32 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa SAP 3,25

5.7. Argamassa SAP 4,5 (SAP 4,5)

Neste subcapítulo são apresentados os resultados para a argamassa SAP 4,5. É uma argamassa em que também são introduzidos SAPs.

No Gráfico 33 apresenta-se a evolução dos resultados obtidos para a retracção autogénea e para a retracção total. Na retracção autogénea, ao dia 1, existe expansão tal como nas outras argamassas. No ensaio da retracção autogénea, aos 28 dias, a extensão dos provetes é de -275×10^{-6} . Na retracção total a extensão obtida no último dia do ensaio foi de -842×10^{-6} . O valor médio e o desvio padrão das diferenças para a argamassa SAP 4,5 foram de, respectivamente, $9,4 \times 10^{-6}$ e $3,6 \times 10^{-6}$ na retracção autogénea e de $15,2 \times 10^{-6}$ e $3,3 \times 10^{-6}$ na retracção total.

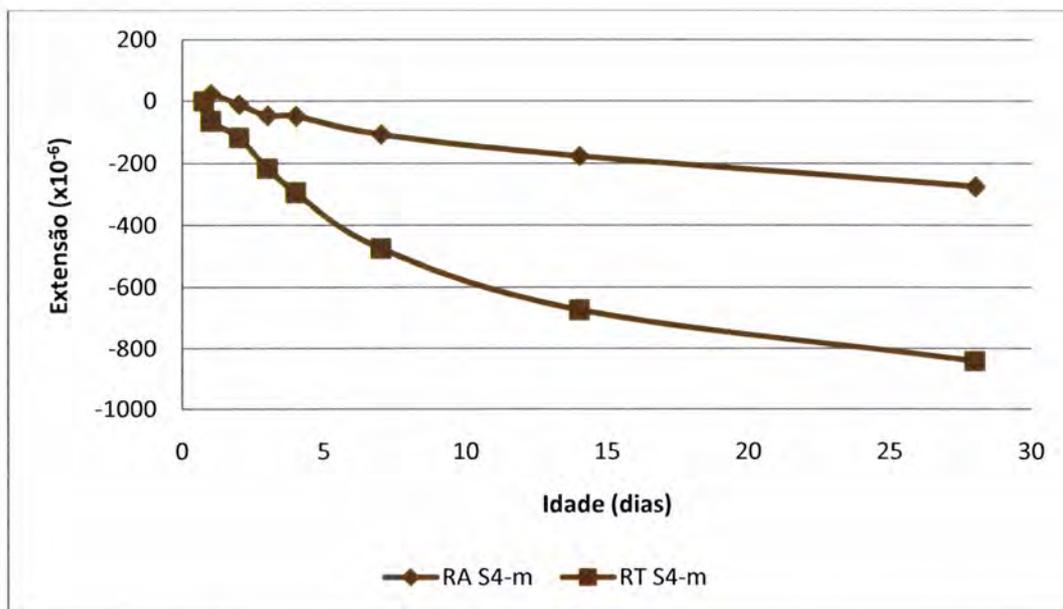


Gráfico 33 - Média da retracção autogénea e retracção total da argamassa SAP 4,5

O Gráfico 34 é referente à retracção por secagem e o valor atingido aos 28 dias de idade da argamassa é de -567×10^{-6} .

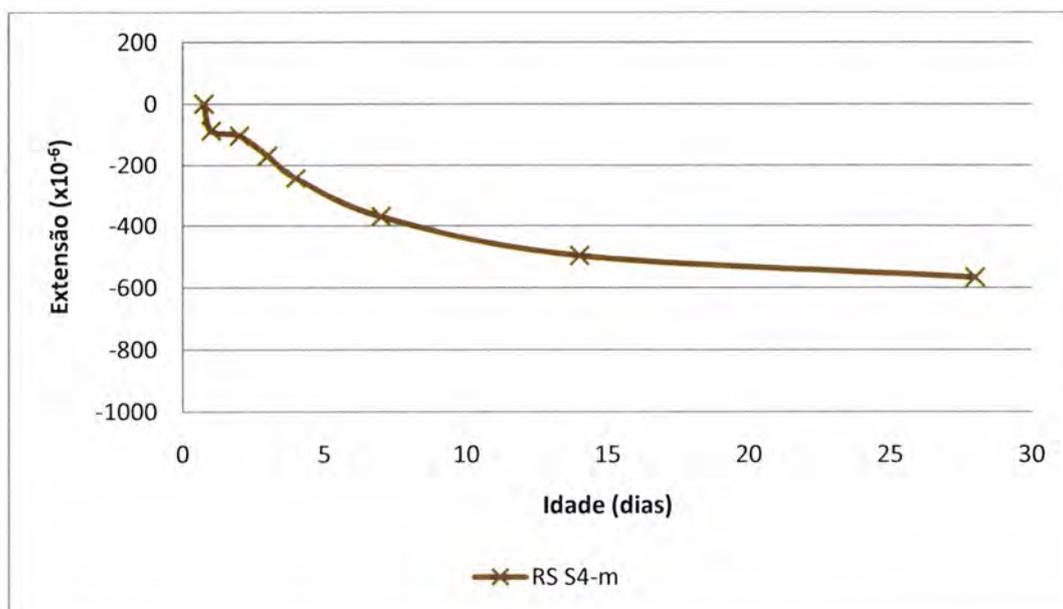


Gráfico 34 - Média da retracção por secagem da argamassa SAP 4,5

A resistência à compressão desta argamassa atinge os 59,4 MPa aos 28 dias. No Gráfico 35 pode observar-se a evolução crescente da resistência à compressão desta argamassa.

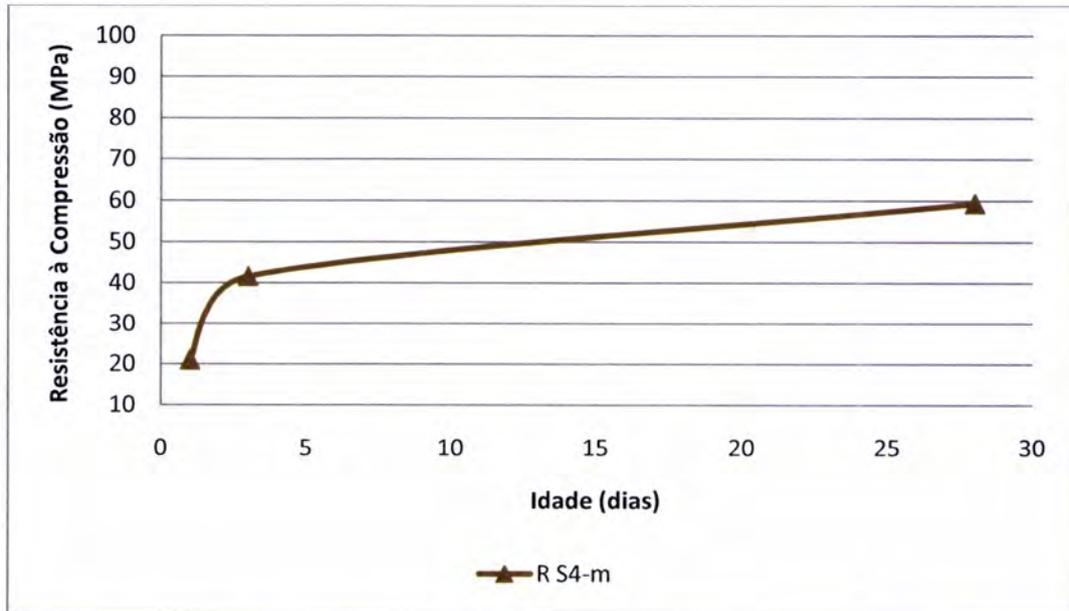


Gráfico 35 - Evolução da resistência à compressão da argamassa SAP 4,5

O módulo de elasticidade da argamassa SAP 4,5 é representado pelo Gráfico 36. Nesta argamassa os resultados obtidos, ao fim de 28 dias, pelos dois provetes são os mesmos. Assim, o valor do módulo de elasticidade atingido por esta argamassa é de 29,6 GPa.

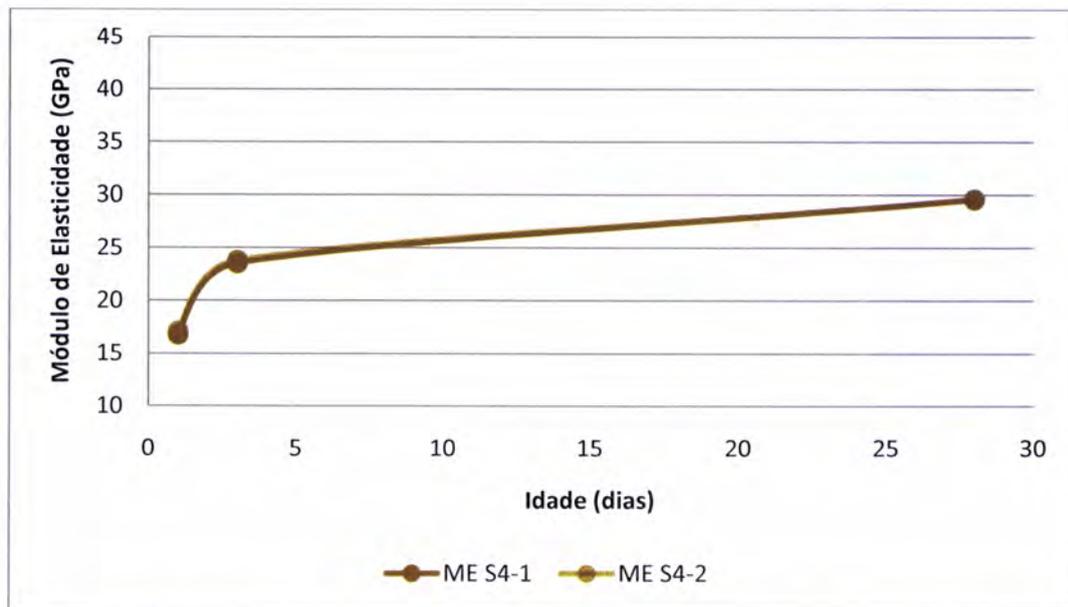


Gráfico 36 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa SAP 4,5

A perda de massa máxima atingida nesta argamassa pelos provetes da retracção total é de 29,75 g pelo provete RT S4-3 e a média de perda de massa dos provetes é de 29,32 g. No Gráfico 37 pode observar-se a perda de massa ao longo do ensaio realizado. Os provetes da retracção autogénea perdem em média 0,89 g, sendo o provete RA S4-1 que tem a maior perda de massa de 0,92 g.

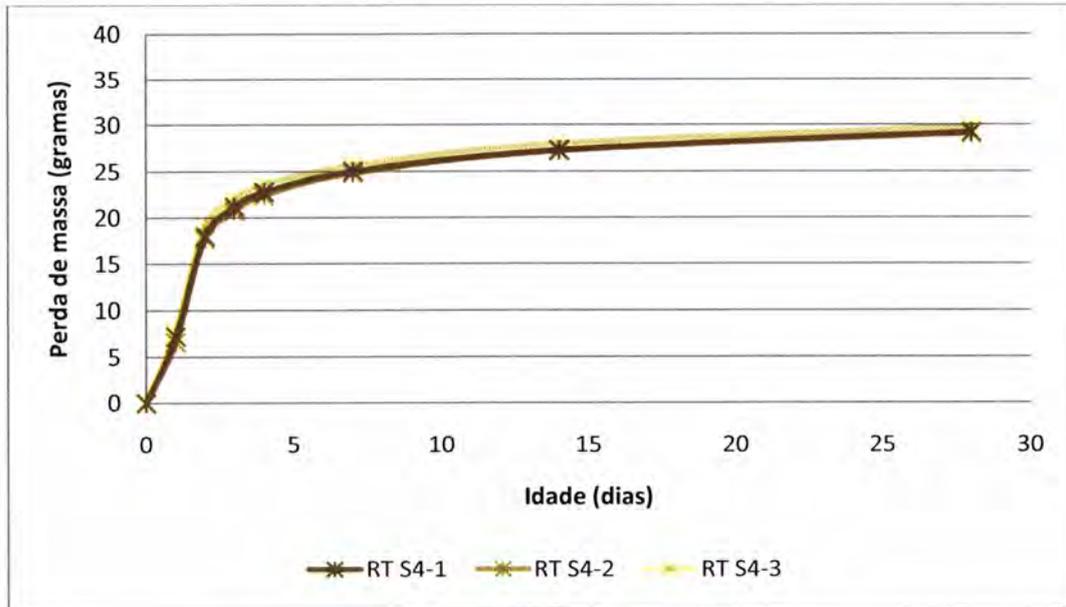


Gráfico 37 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa SAP 4,5

5.8. Argamassa Referência 32,5 + SAP (R 32,5 + SAP)

A Argamassa Referência 32,5 + SAP é uma das duas argamassas em que a concentração de SAP é mais elevada. Apresentam-se os resultados referentes aos ensaios realizados neste subcapítulo.

No Gráfico 38 analisa-se os resultados obtidos quer para a retracção autogénea, quer para a retracção total. Na retracção autogénea o valor da extensão aos 28 dias de idade é de -209×10^{-6} . Para a retracção total a extensão atinge -905×10^{-6} . Nesta argamassa, os provetes da retracção autogénea sofrem expansão até ao 4º dia de idade, sendo nesta argamassa que é atingido a maior expansão registada entre todas as argamassas. O valor médio e o desvio padrão das diferenças para a argamassa R 32,5 + SAP foram de, respectivamente, $13,4 \times 10^{-6}$ e $5,3 \times 10^{-6}$ na retracção autogénea e de $50,0 \times 10^{-6}$ e $22,9 \times 10^{-6}$ na retracção total.

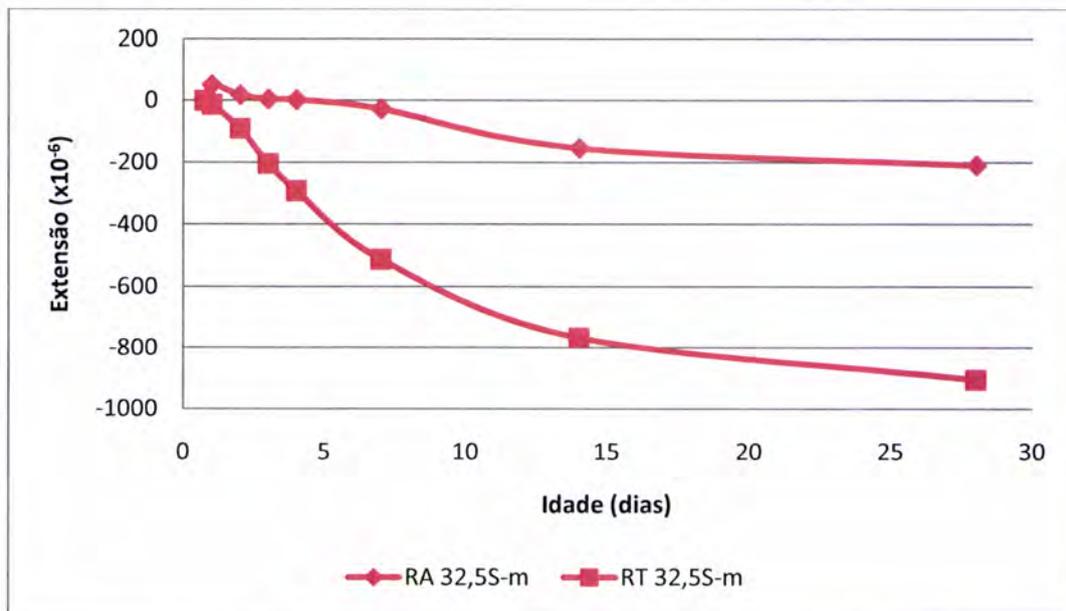


Gráfico 38 - Média da retração autogénea e retração total da argamassa R 32,5 + SAP

A retração por secagem da argamassa tem uma extensão de -696×10^{-6} aos 28 dias. No Gráfico 39 pode observar-se este resultado, bem como a evolução deste tipo de retração ao longo dos 28 dias.

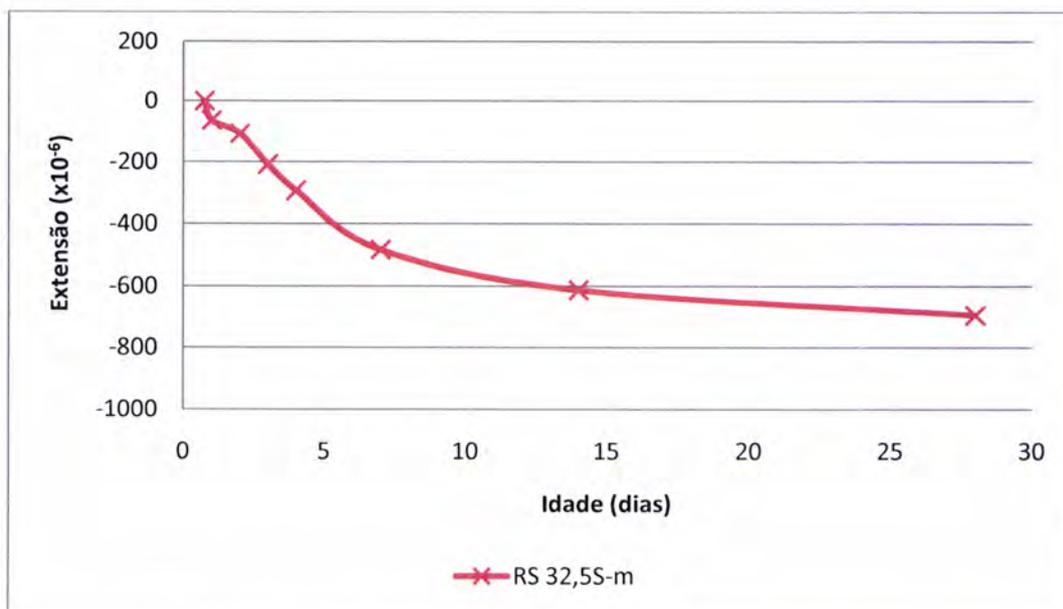


Gráfico 39 - Média da retração por secagem da argamassa R 32,5 + SAP

Esta argamassa aos 28 dias tem uma resistência à compressão de 59,2 MPa. No Gráfico 40 pode-se ver a evolução da argamassa em relação à resistência à compressão.

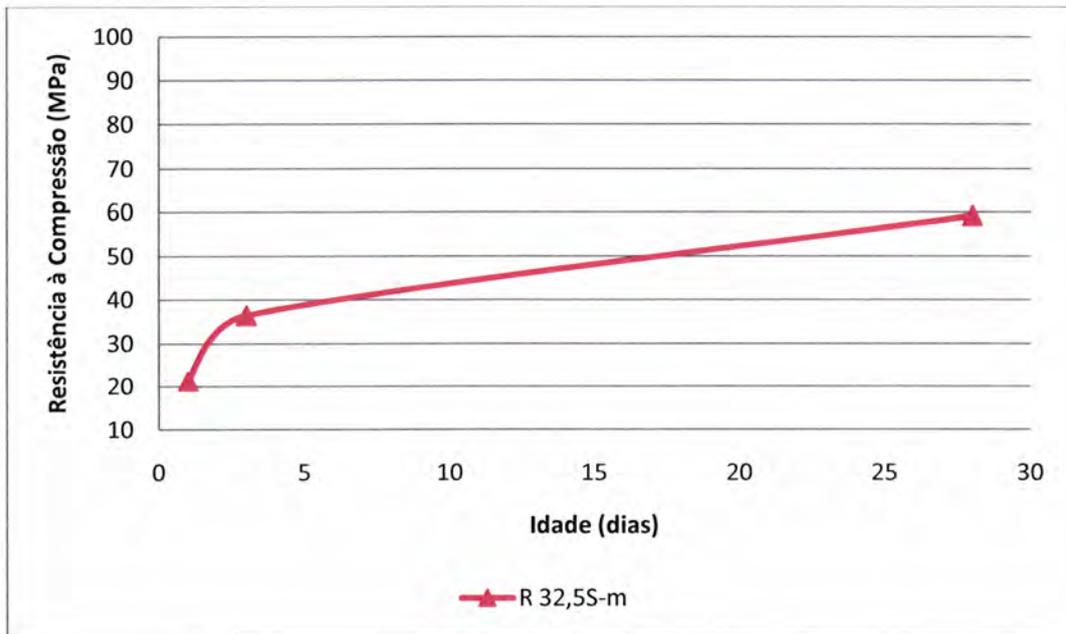


Gráfico 40 - Evolução da resistência à compressão da argamassa R 32,5 + SAP

O módulo de elasticidade da argamassa R 32,5 + SAP atingido aos 28 dias de ensaio é 29,0 GPa. O provete que tem módulo de elasticidade maior é o ME 32,5S-2 e regista um valor de 29,3 GPa. O Gráfico 41 representa a evolução do módulo de elasticidade.

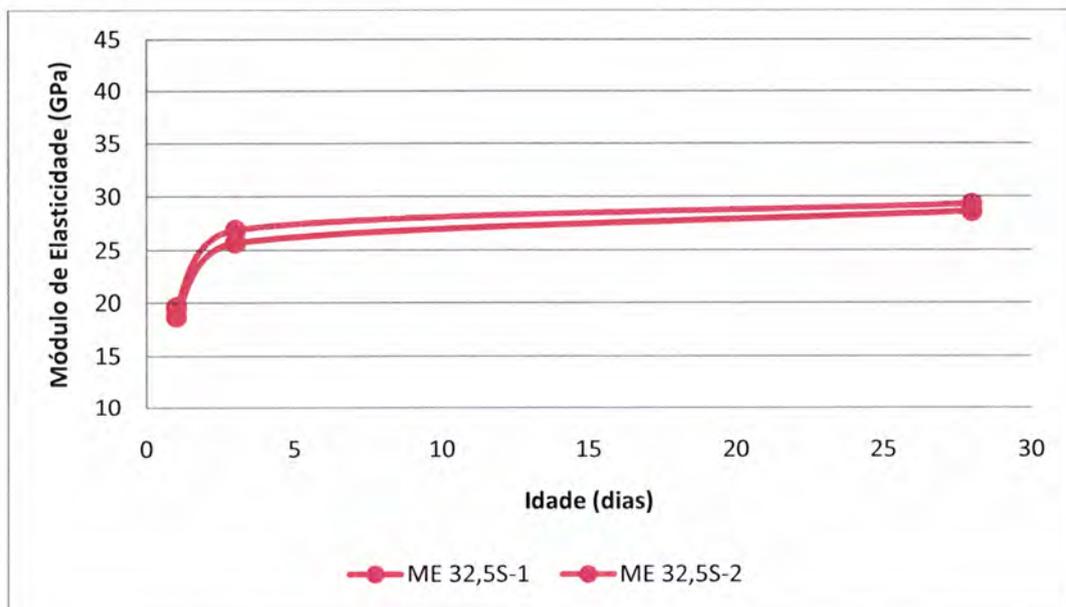


Gráfico 41 - Evolução do módulo de elasticidade da argamassa R 32,5 + SAP

O Gráfico 42 ilustra a perda de massa dos provetes da retracção total ao longo dos 28 dias de ensaio. O provete com maior perda de massa é o RT 32,5S-3, que perde 23,71 g. A média de perda de massa dos provetes utilizados na retracção total é de 22,96 g. Na retracção autogénea a perda de massa média é de 0,55 g e o provete com a maior perda de massa é o RA 32,5S-1 de 0,57 g.

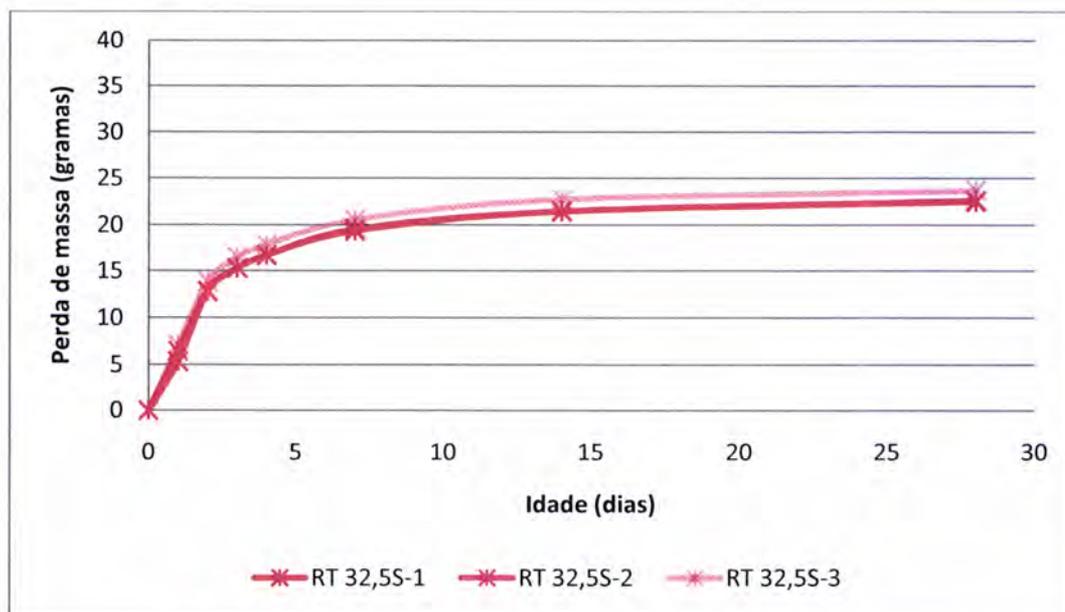


Gráfico 42 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa R 32,5 + SAP

5.9. Argamassa Referência Nova 42 + SAP (RN 42 + SAP)

A argamassa Referência Nova 42 + SAP é a argamassa em que se utilizou a maior concentração de SAP. É nesta argamassa que também é mais visível o efeito dos SAP. Nos gráficos seguintes analisam-se as situações em estudo.

Nesta argamassa os provetes da retracção autogénea são os que retraem menos de entre todas as argamassas. O valor da extensão da retracção autogénea aos 28 dias desta argamassa é de -101×10^{-6} . Na retracção autogénea é ainda visível alguma expansão durante os dois primeiros dias. Em relação à retracção total, os provetes desta argamassa são os que mais retraem. O valor atingido na retracção total para a extensão é de -985×10^{-6} . O valor médio e o desvio padrão das diferenças para a argamassa RN 42 + SAP foram de, respectivamente, $9,4 \times 10^{-6}$ e $4,4 \times 10^{-6}$ na retracção autogénea e de $42,9 \times 10^{-6}$ e $17,7 \times 10^{-6}$ na retracção total. No Gráfico 43 pode observar-se os resultados obtidos para os ensaios de retracção autogénea e retracção total.

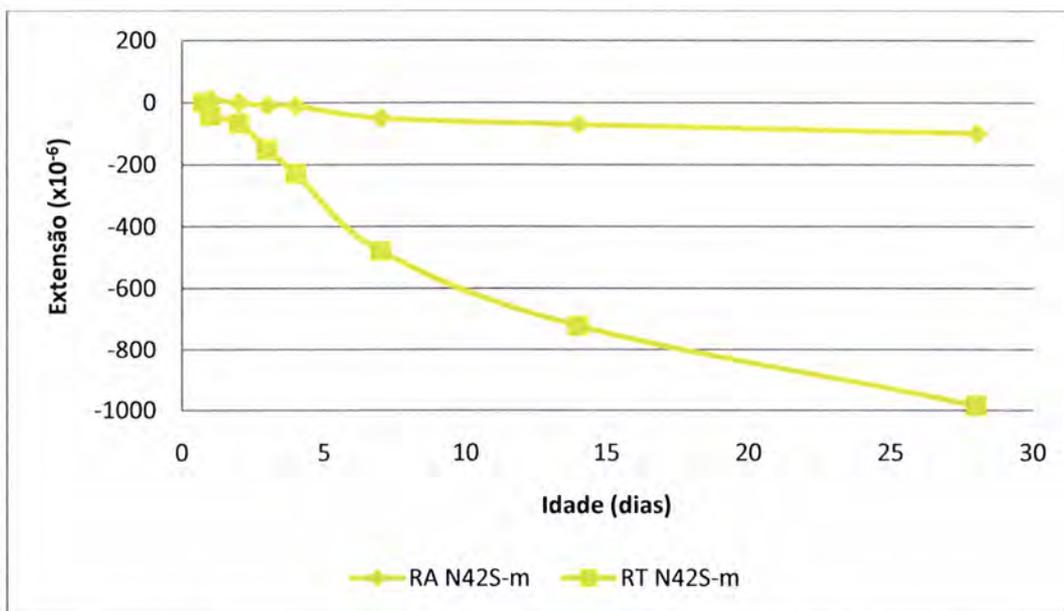


Gráfico 43 - Média da retração autogénea e retração total da argamassa RN 42 + SAP

O Gráfico 44 apresenta o gráfico resultante da retração por secagem e também neste tipo de retração atinge a maior extensão. O valor atingido aos 28 dias é de -884×10^{-6} .

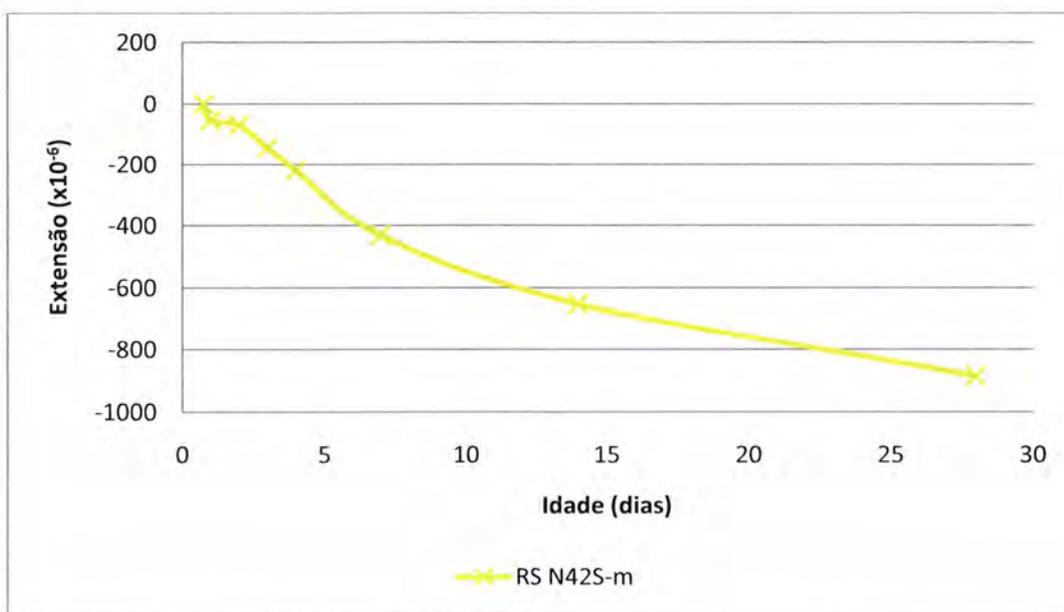


Gráfico 44 - Média da retração por secagem da argamassa RN 42 + SAP

Ao fim de 28 dias, a resistência à compressão assume valores de 34,9 MPa. No Gráfico 45 pode observar-se a evolução dos resultados para o ensaio de resistência à compressão.

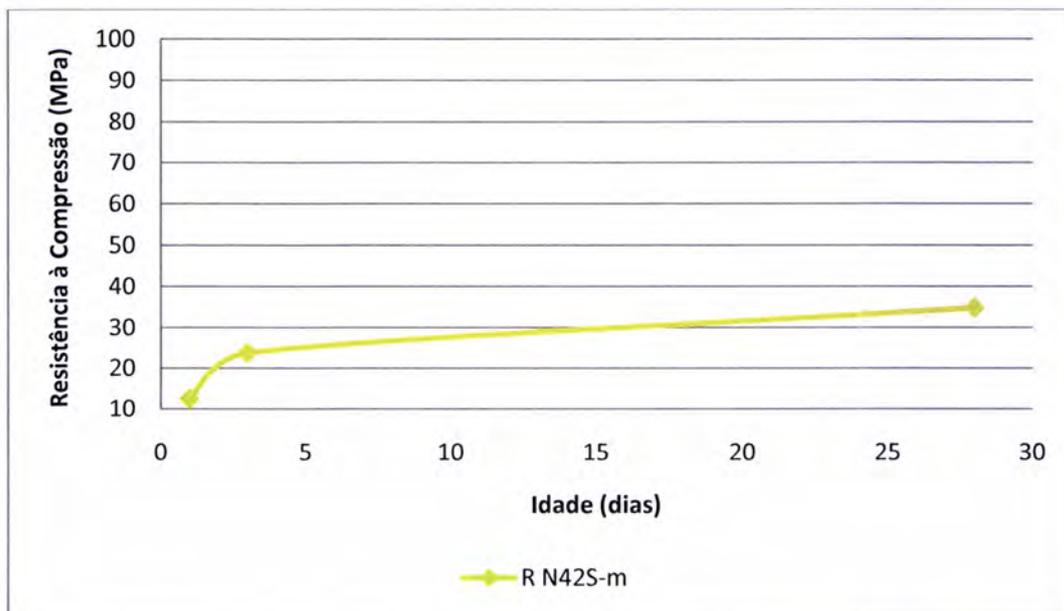


Gráfico 45 - Valores da resistência à compressão da argamassa RN 42 + SAP

O Gráfico 46 caracteriza a evolução do módulo de elasticidade para esta argamassa. Os provetes utilizados para este ensaio apresentam resultados bastante consistentes. Nesta argamassa os dois provetes atingem o mesmo valor aos 28 dias, 21,2 GPa.

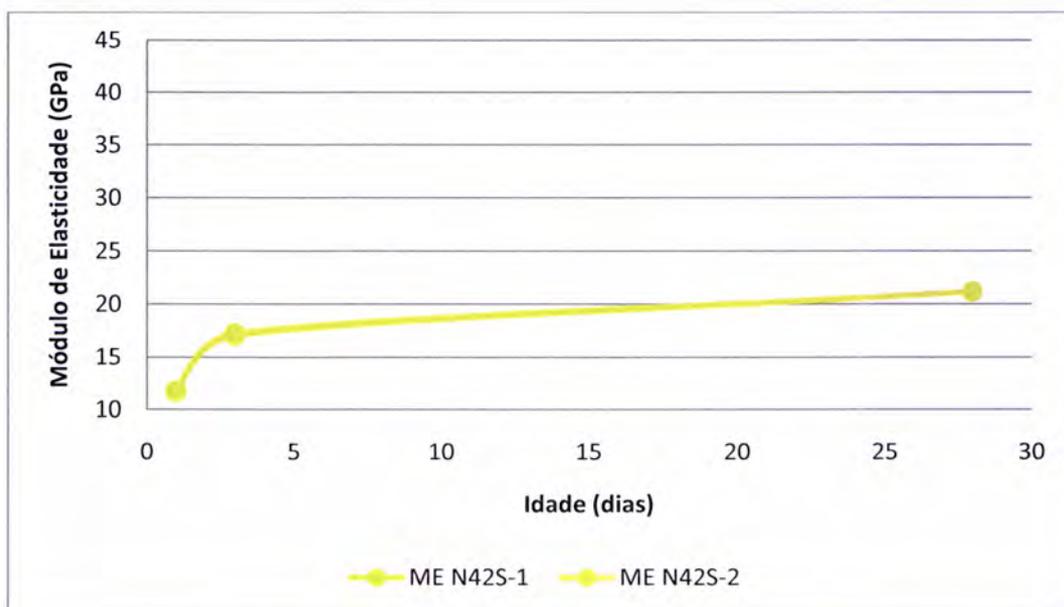


Gráfico 46 - Valores do módulo de elasticidade da argamassa RN 42 + SAP

A perda de massa dos provetes da retracção total desta argamassa é a maior. Os provetes perdem em média 35,24 g sendo que o provete com maior perda de massa é o RT N42S-1 com 35,73 g. Os provetes da retracção autogénea perdem em média 0,76 g e o provete com maior perda de massa é o RA N42S-3 que perde 0,81 g. No Gráfico 47 apresenta-se a perda de massa dos provetes da retracção total.

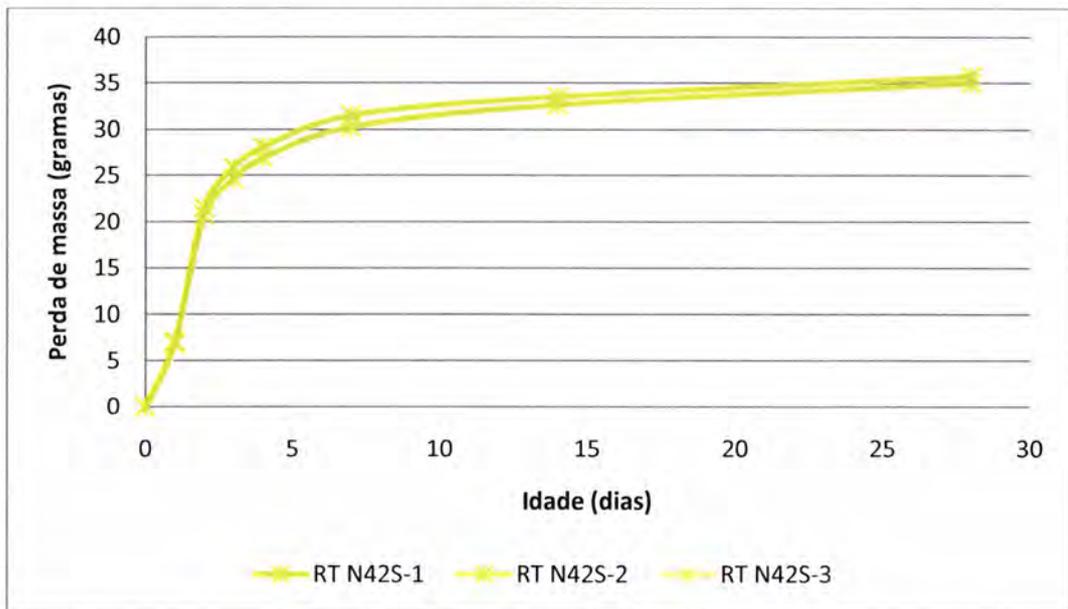


Gráfico 47 - Perda de massa dos provetes de retracção total da argamassa RN 42 + SAP

6. Análise de resultados

O capítulo 6 é destinado à análise de resultados. Está dividido pelos vários parâmetros a analisar, como o efeito da água total, dos SAP, do agregado leve, da areia e também o efeito interno da água.

Para cada parâmetro são apresentados 8 gráficos com os valores médios obtidos para cada argamassa. O primeiro apresenta os valores absolutos referentes aos provetes utilizados no ensaio da retracção autogénea. O segundo e terceiro gráficos mostram a retracção autogénea por kg de cimento, respectivamente, sem e com correcção da influência do volume de agregado, de acordo com o modelo proposto por Hobbs [8, 9]. Esta correcção é efectuada de acordo com a expressão

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \frac{1 - Va}{(Ea/Ep) \times Va + 1}$$

onde:

ε_c – retracção autogénea da argamassa;

ε_p – retracção autogénea da pasta;

Va – volume de agregado;

Ea – módulo de elasticidade do agregado;

Ep – módulo de elasticidade da pasta.

Para aplicação deste modelo é necessário conhecer o módulo de elasticidade da pasta e do agregado. Os valores introduzidos foram 130 GPa para Ea e para os valores de Ep foi admitido 11,7 GPa para as 18 horas, 13,5 GPa para o dia 1, 15,3 GPa para o dia 2, 17,1 GPa para o dia 3, 18 GPa para o dia 4, 18,9 GPa para o dia 7, 19,8 GPa para o dia 14 e 20,7 GPa para o dia 28, por estimativa, com base na natureza dos agregados e no módulo de elasticidade das argamassas.

O quarto gráfico ilustra os valores da retracção total. No quinto gráfico pode-se analisar a retracção por secagem das argamassas em análise. No sexto gráfico observam-se os valores da resistência à compressão e no sétimo gráfico são apresentados os valores do módulo de elasticidade. O último gráfico ilustra a perda de massa associada a cada argamassa.

6.1. Análise das Argamassas de Referência

O efeito da água total vai ser analisado comparando as argamassas de referência R 32,5, RN 42 e R 42. São comparados os valores obtidos ao longo do tempo através dos gráficos seguintes.

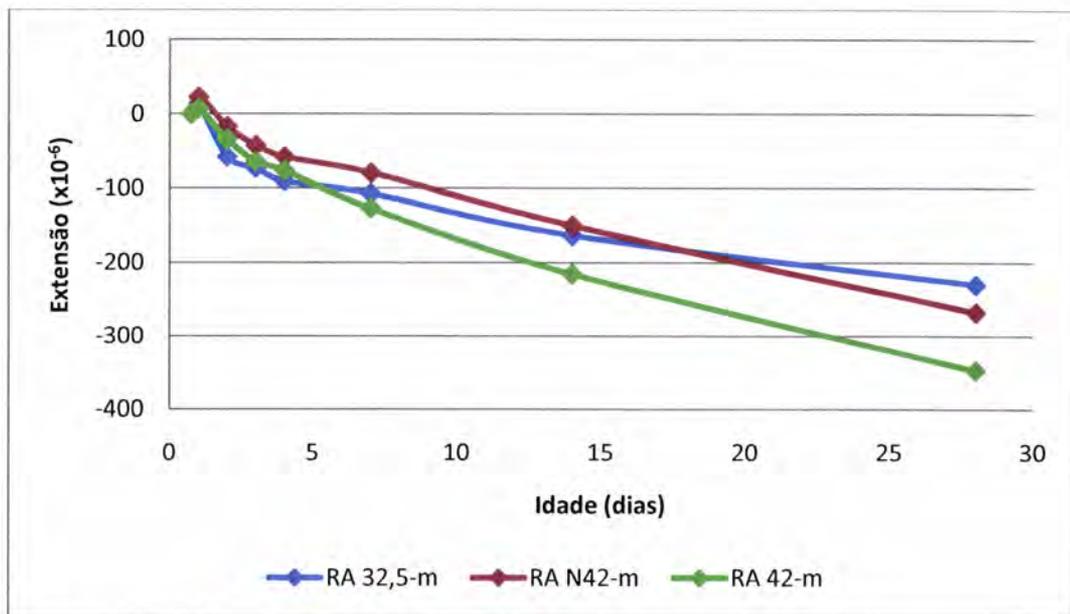


Gráfico 48 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 32,5, RN 42 e R 42

No Gráfico 48 analisa-se os valores das 3 argamassas, em estudo neste subcapítulo, relativos à retracção autogénea.

As argamassas apresentam inicialmente uma pequena expansão. Até aos 4 dias a argamassa R 32,5 apresenta a maior retracção, mas posteriormente a retracção é ultrapassada pelas outras duas argamassas, primeiro pela argamassa R 42, que tem menos areia e só depois pela RN 42.

Numa análise do gráfico constata-se que a argamassa com menor razão A/C tem uma retracção inicial superior, mas ao longo de tempo, inverte-se essa posição relativa. A argamassa com menor razão A/C tem potencial para retrair mais, devido à maior autodessecação, o que é evidenciado nas primeiras idades, mas posteriormente, a menor rigidez das argamassas com razão A/C superior (ver Gráfico 54), faz inverter as posições relativas. Entre as duas argamassas com igual razão A/C, a que retrai mais é a R 42, que tem menor volume de agregado, o que é coerente com o esperado, dado que os agregados restringem a retracção.

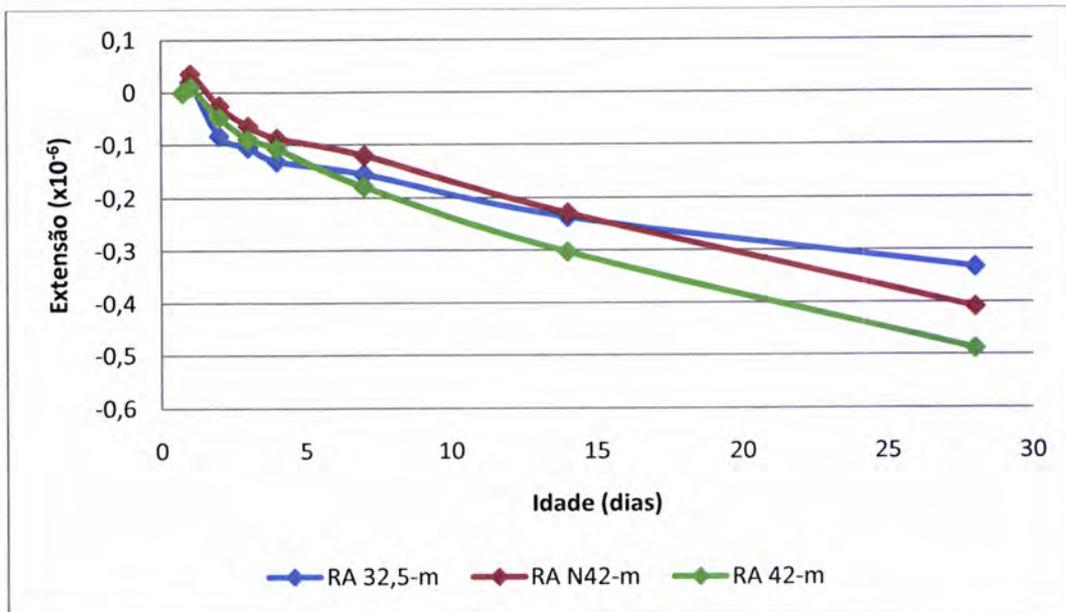


Gráfico 49 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5, RN 42 e R 42

Quando se analisa a retracção autogénea por kg de cimento, Gráfico 49, a tendência é semelhante à do gráfico anterior, mas as diferenças diminuem.

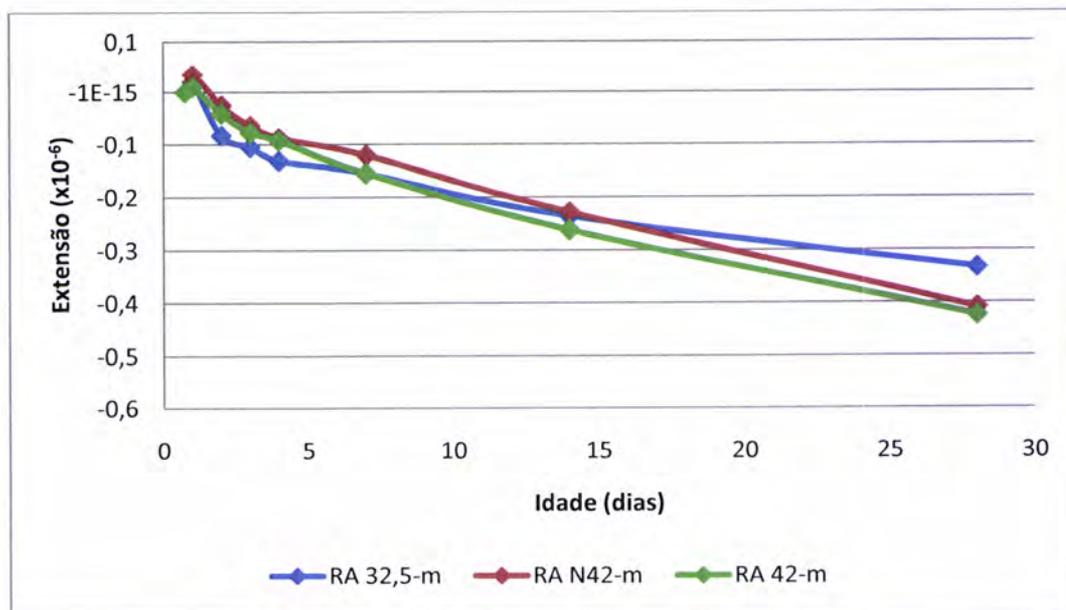


Gráfico 50 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,50, entre R 32,5, RN 42 e R 42

Ao se ajustar o volume de agregado das várias argamassas para um volume normalizado, Gráfico 50, o que surge em evidência é apenas a influência da razão A/C já atrás mencionada, praticamente desaparecendo a influência do agregado, o que mostra a coerência dos resultados e a influência relativa dos diferentes aspectos considerados.

Um aspecto importante a realçar é a pequena diferença entre a retracção autógena das argamassas com A/C=0,325 e A/C=0,42. Efectivamente, seria de esperar uma maior diferenciação nos resultados. Assim, o estudo efectuado sugere que a diminuição da rigidez das argamassas tem, neste caso, um efeito comparável ao aumento da humidade relativa.

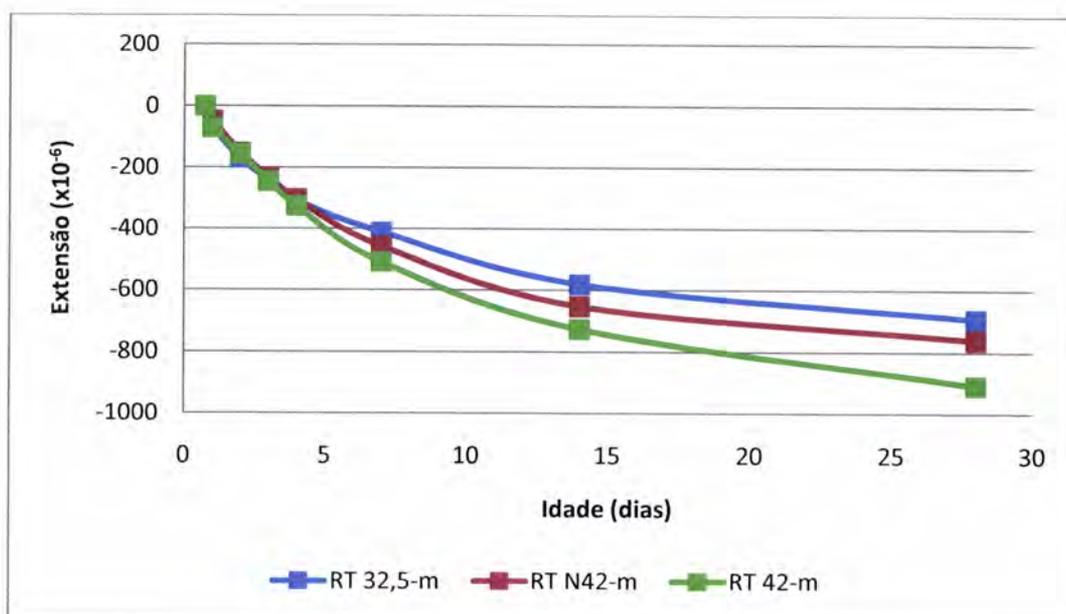


Gráfico 51 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 32,5, RN 42 e R 42

Em relação à retracção total, Gráfico 51, as argamassas têm valores muito iguais até aos 4 dias de idade. A partir dos 4 dias, as argamassas que têm mais água na sua composição são as que mais retraem, como era de esperar. A argamassa R 32,5 é a argamassa que menos retrai. A argamassa que mais retrai é a que tem menor volume de agregado.

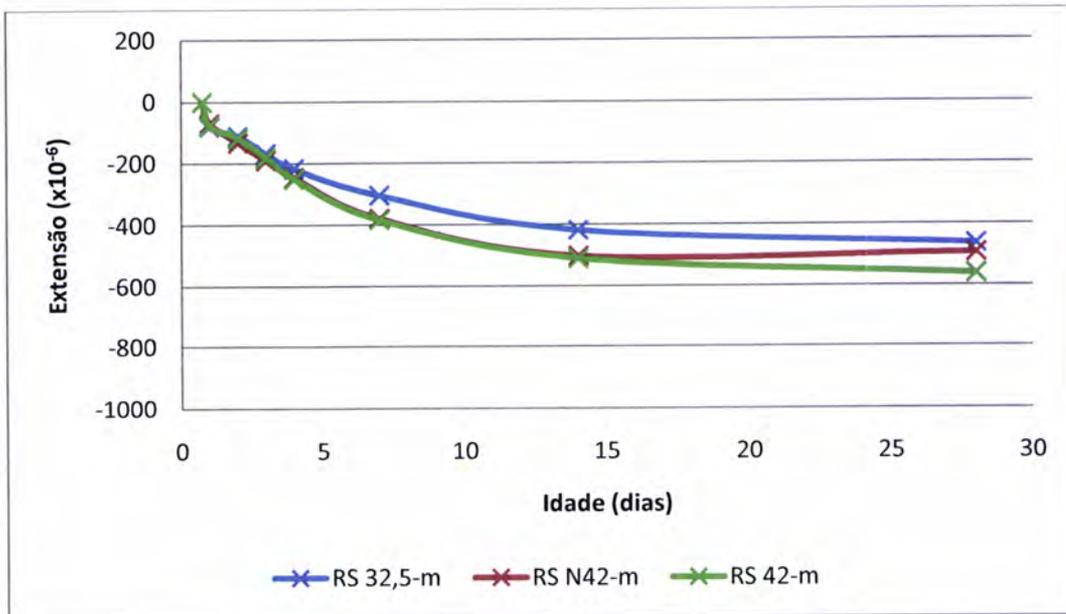


Gráfico 52 - Comparação dos valores médios da retração por secagem entre a R 32,5, RN 42 e R 42

A retração por secagem das argamassas em estudo é dada pelo Gráfico 52. Também neste caso, a argamassas que mais retraem são as que tem mais água, RN 42 e R 42. No entanto, os valores atingidos aos 28 dias pelas argamassas R 32,5 e RN 42 são próximos.

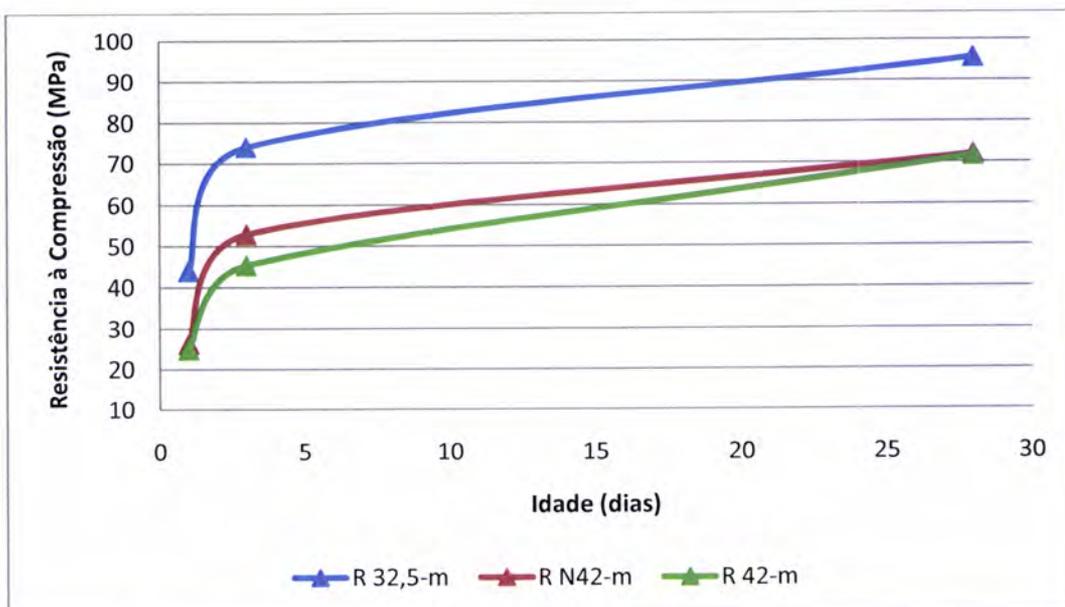


Gráfico 53 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 32,5, RN 42 e R 42

O Gráfico 53 refere-se aos valores da resistência à compressão das 3 argamassas em análise. As argamassas com uma razão A/C maior têm uma resistência à compressão mais baixa, como esperado. A diferença atinge mais de 20 MPa aos 28 dias.

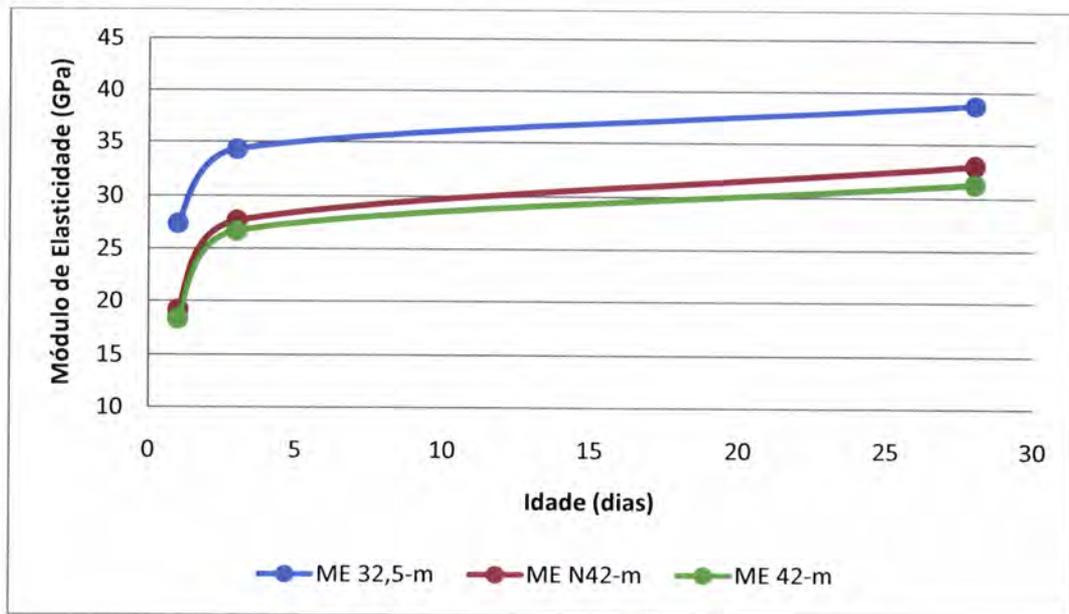


Gráfico 54 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5, RN 42 e R 42

O módulo de elasticidade da argamassa com menos água, R 32,5, é o mais elevado. Pode verificar-se no Gráfico 54 que as argamassas com A/C=0,42, RN 42 e R 42, têm valores do módulo de elasticidade quase idênticos e mais baixos que os da argamassa com A/C=0,325, o que está de acordo com os resultados obtidos no ensaio de determinação da resistência à compressão. A argamassa R 42, linha verde no gráfico, tem menor volume de agregado que a argamassa RN 42, linha vermelha, tendo assim, menor rigidez.

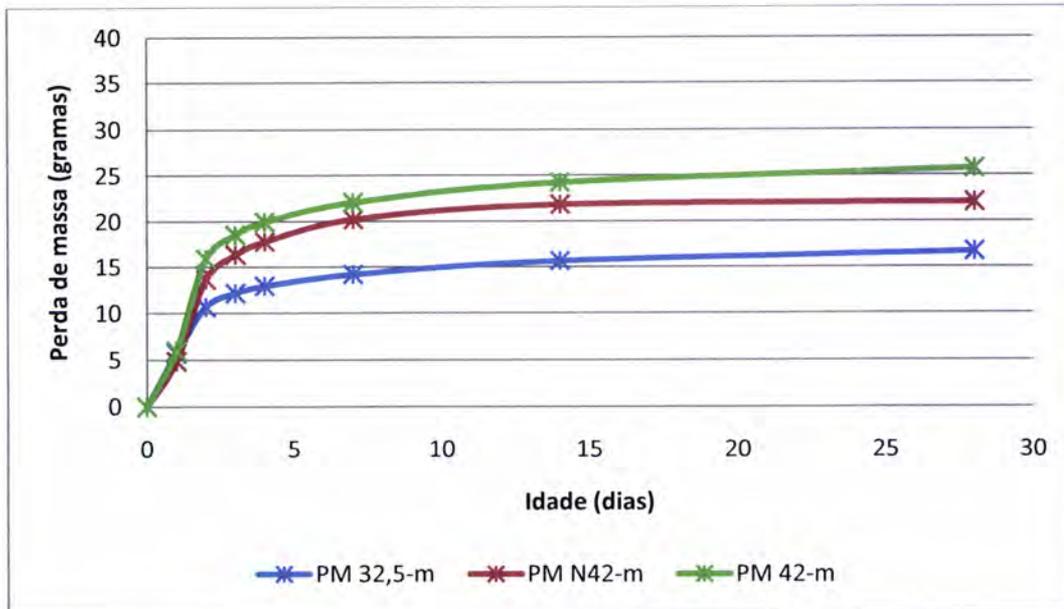


Gráfico 55 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5, RN 42 e R 42

O Gráfico 55 representa a perda de massa dos provetes das argamassas R 32,5, RN 42 e R 42. Nota-se que as argamassas que possuem uma razão de A/C maior têm também uma perda de massa maior, devido à maior porosidade da sua estrutura. A argamassa com menos areia na composição, R 42, é a argamassa que acaba por perder mais massa, pois contém maior volume de pasta, onde se encontra a maior parte da água evaporável. Por oposição, naturalmente a argamassa que tem A/C=0,325 é a argamassa que tem a menor perda de massa.

Em suma dos resultados apresentados neste subcapítulo, a argamassa com menor razão A/C tem valores mais baixos de retracção autogénea, total e por secagem, mas na autogénea com excepção das primeiras idades. A sua resistência à compressão é a mais elevada, assim como os valores do módulo de elasticidade. A perda de massa desta argamassa é menor que a das argamassas com razão A/C superior.

6.2. Efeito dos SAP

6.2.1. Razão A/C=0,325 e razão cimento:areia constante

Neste subcapítulo avalia-se o efeito dos SAP comparando duas argamassas com a mesma razão A/C e a mesma razão cimento:areia, a R 32,5 e a R 32,5 + SAP. A diferença entre estas argamassas reside na presença de SAP na argamassa R 32,5 + SAP.

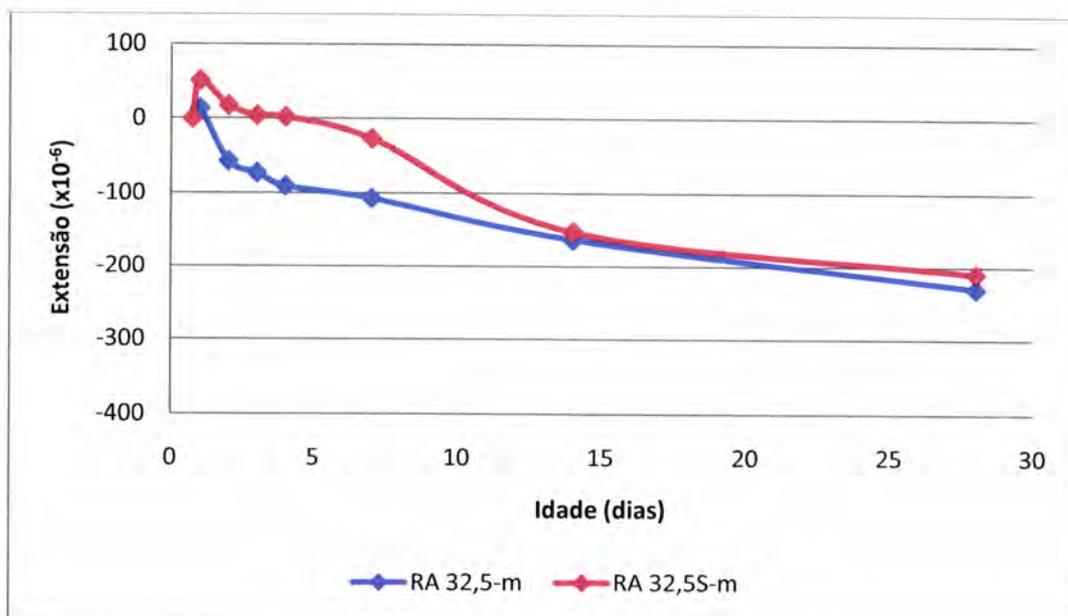


Gráfico 56 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 32,5 e a R 32,5 + SAP

No Gráfico 56 observa-se que, a partir dos 14 dias, os resultados alcançados das argamassas R 32,5 e R 32,5 + SAP na retracção autogénea são próximos, sendo que a argamassa sem adição de SAP retrai mais que a R 32,5 + SAP.

Todavia, nas primeiras idades as duas argamassas têm comportamentos distintos. A R 32,5 tem apenas uma ligeira expansão ao dia 1 e depois sofre uma retracção acentuada, enquanto a R 32,5 + SAP sofre uma expansão mais significativa e até aos 4 dias não exhibe retracção. Nos primeiros dias faz-se sentir a influência da água disponível nos SAP da R 32,5 + SAP, que se traduz na redução da retracção, mas ao longo do tempo a menor rigidez da sua estrutura, em comparação com a argamassa R 32,5, faz aproximar a extensão das duas argamassas a partir do 7º dia.

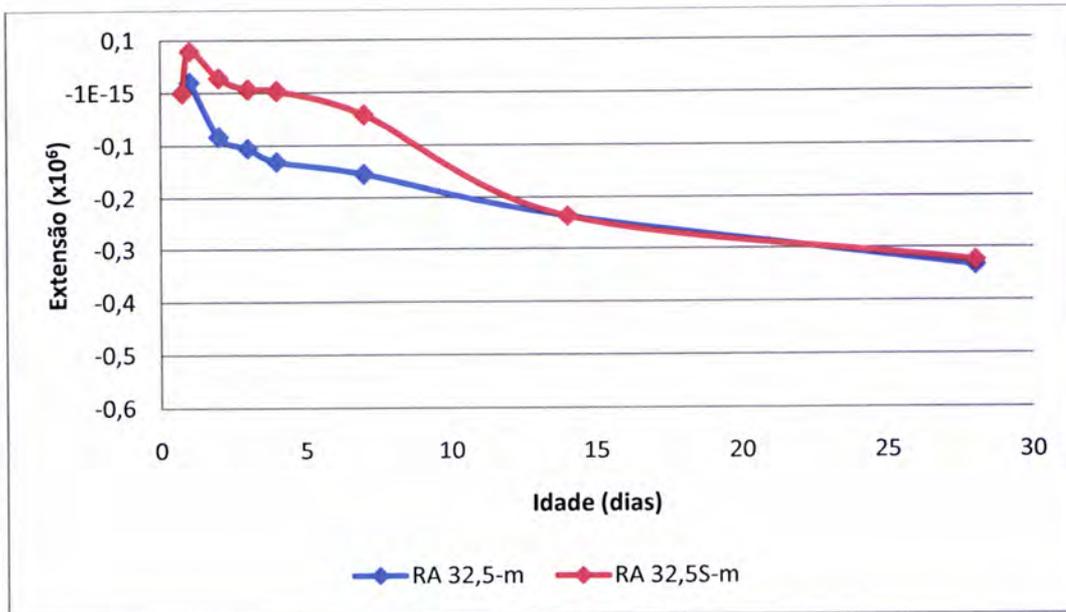


Gráfico 57 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5 e R 32,5 + SAP

No Gráfico 57 pode-se observar a retracção autogénea por kg de cimento das argamassas R 32,5 e R32,5 + SAP. A partir dos 14 dias de idade as duas argamassas atingem valores idênticos de retracção autogénea por kg de cimento.

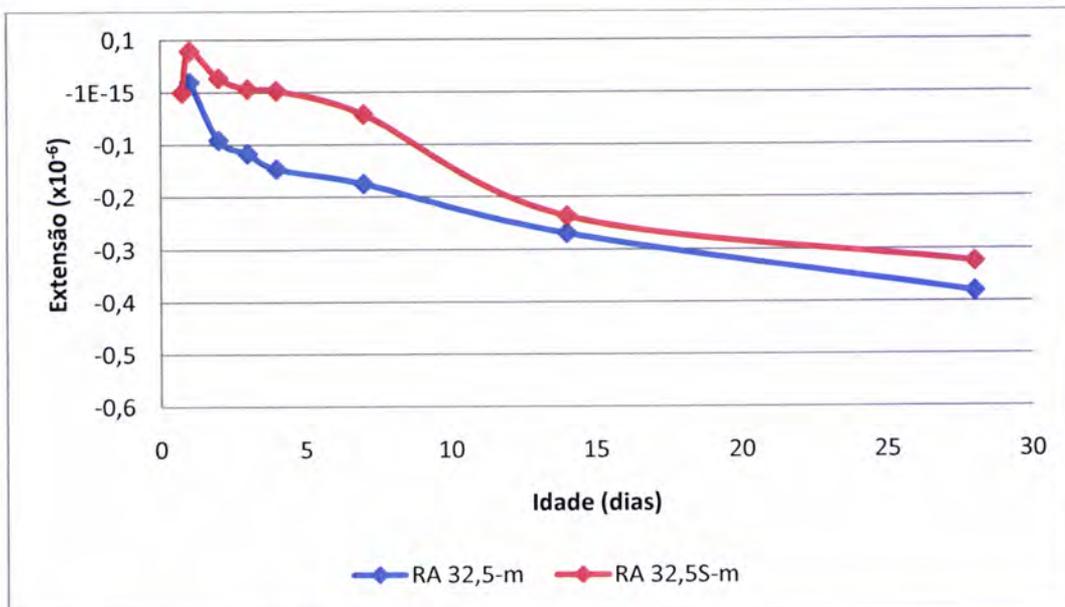


Gráfico 58 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,495, entre R 32,5 e R 32,5 + SAP

Quando se corrige a extensão para idêntico volume de agregado, Gráfico 58, sobressai o efeito dos SAP na diminuição da retracção autogénea, mostrando que mesmo a idades mais avançadas se obtém menor retracção.

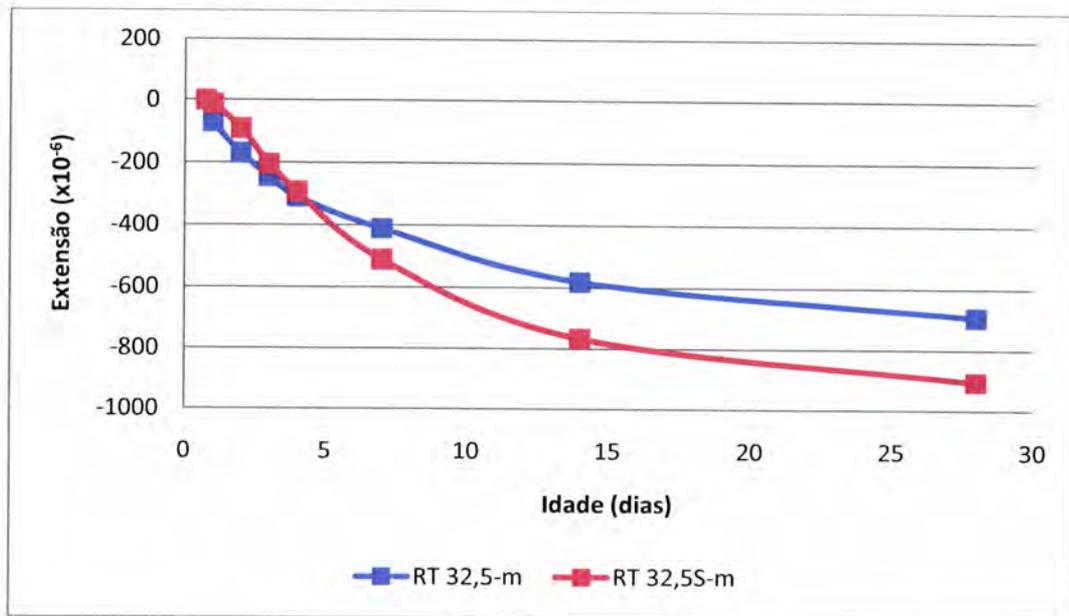


Gráfico 59 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 32,5 e a R 32,5 + SAP

Observando o Gráfico 59, apuramos que ao fim de algum tempo, a argamassa com SAP tem uma retracção total maior que uma argamassa sem SAP. Nas primeiras idades, e mesmo na retracção total, a argamassa com SAP retraiu menos, por efeito da água incorporada nos SAP, produzindo assim uma cura interna. Este efeito positivo é balanceado por uma estrutura mais porosa devido à incorporação dos SAP, que favorece a secagem, tendo-se uma retracção total superior nas medições posteriores à realizada aos 4 dias.

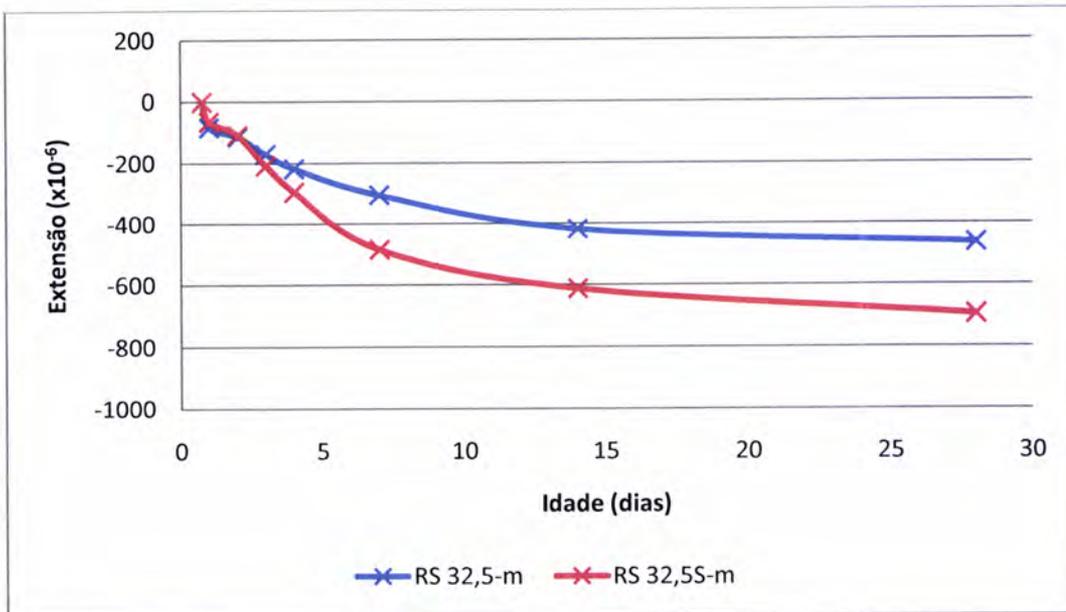


Gráfico 60 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre a R 32,5 e R 32,5 + SAP

O Gráfico 60 compara os valores obtidos das argamassas R 32,5 e R 32,5 + SAP para a retracção por secagem. Através da análise do gráfico anterior, verifica-se que a argamassa R 32,5 + SAP é a argamassa que tem uma retracção por secagem maior.

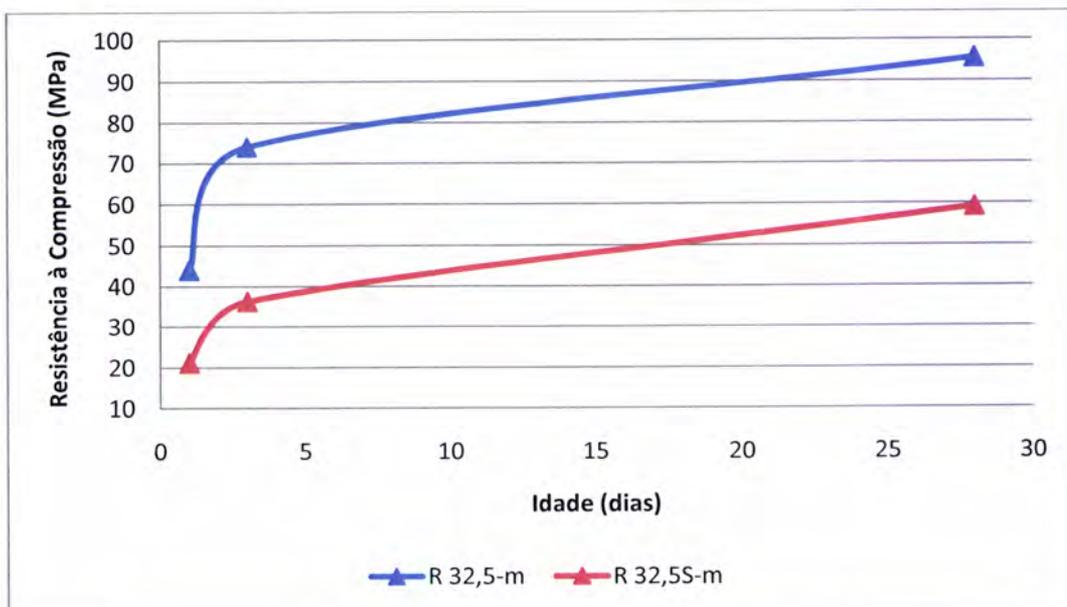


Gráfico 61 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 32,5 e R 32,5 + SAP

Pela análise do Gráfico 61 constata-se que uma argamassa com SAP tem uma resistência à compressão inferior que uma argamassa sem SAP, devido ao maior volume de poros resultantes da utilização deste material. A diferença entre as duas argamassas é superior a 30 MPa, aos 28 dias, o que mostra bem a relevância da diminuição da resistência, quando se usa este tipo de produtos numa dosagem elevada como a que foi utilizada, 10 % da massa do cimento.

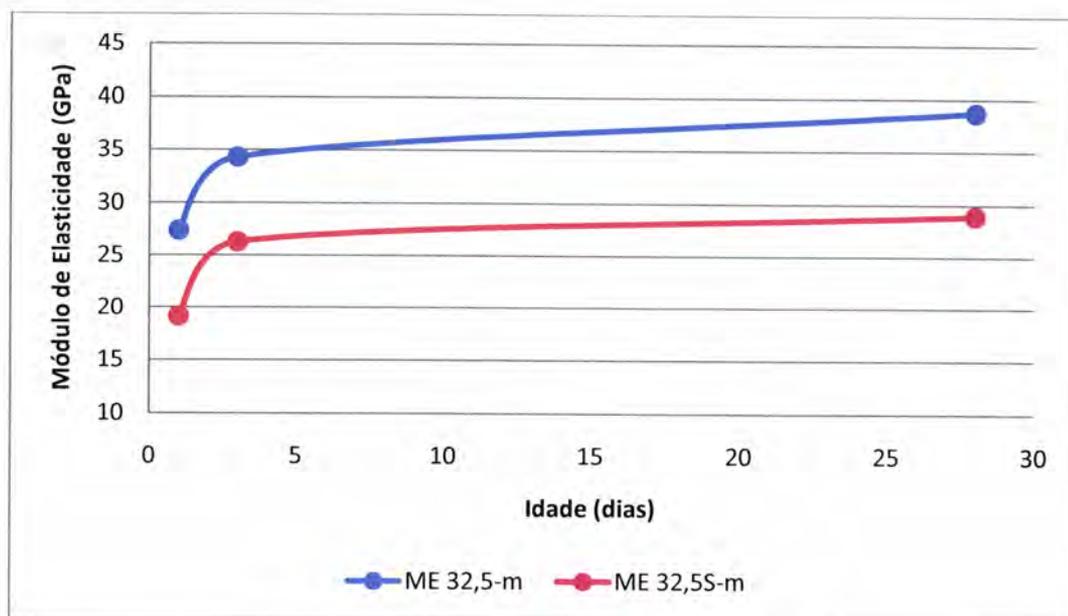


Gráfico 62 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5 e R 32,5 + SAP

Através da análise do Gráfico 62 verifica-se que o módulo de elasticidade diminui em argamassas com adição de SAP, neste caso a argamassa R 32,5 + SAP tem uma diminuição de módulo de elasticidade aproximadamente de 10 GPa aos 28 dias.

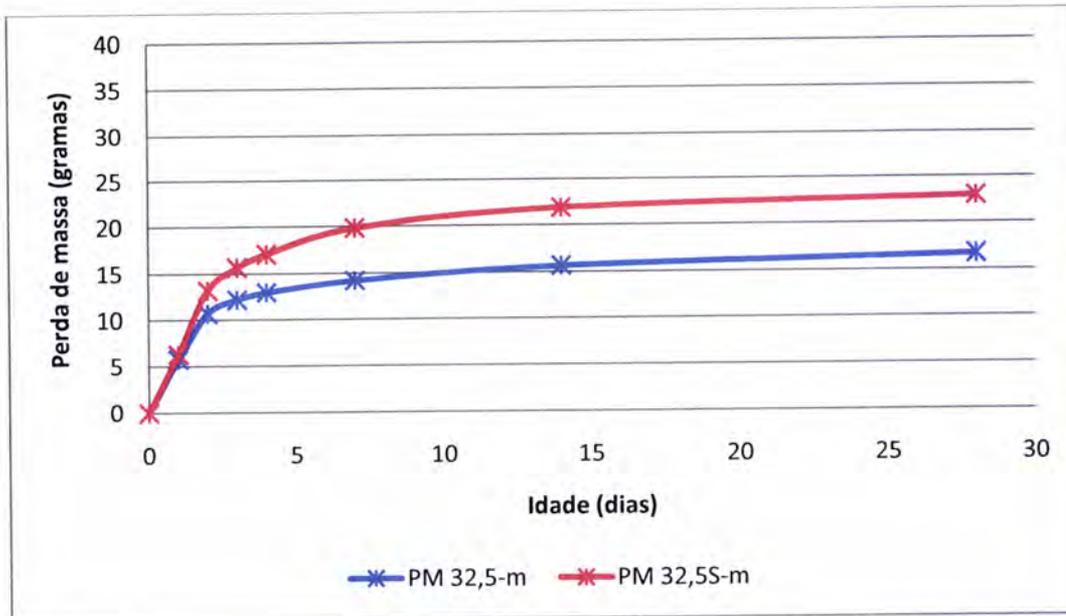


Gráfico 63 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5 e a R 32,5 + SAP

Avaliando o Gráfico 63, conclui-se que a argamassa com SAP tem uma perda de massa maior que a argamassa R 32,5, sem SAP.

Resumindo, o uso de SAP em argamassas diminui a retracção autogénea, anulando-a nas primeiras idades, aumenta a retracção total a longo prazo, e aumenta a retracção por secagem. Todavia, há uma diminuição significativa da resistência à compressão e do módulo de elasticidade e a perda de massas nestas argamassas é maior.

6.2.2. Razão A/C=0,42 e razão cimento:areia constante

Neste subcapítulo pretende-se avaliar o efeito dos SAP em argamassas com razão A/C=0,42. O objectivo é avaliar em que medida os SAP absorvem a água presente na mistura e a disponibiliza posteriormente à medida que ocorre a hidratação. A dosagem de SAP normalmente utilizada, quando fornecida em pó, é muito baixa, em geral inferior a 1 %. Como o produto foi fornecido líquido, com uma concentração de 3 % de SAP sólido, era necessário utilizar dosagens superiores a 1 %. Todavia, e como se observou anteriormente, a utilização de dosagens muito elevadas leva a uma redução da resistência muito significativa. Assim, as dosagens utilizadas nas argamassas apresentadas neste subcapítulo foram de 2,0 %, 3,25 %, 4,5 % e de 15 %. O produto, como é uma solução aquosa, contém água, pelo que a razão A/C efectiva das misturas com SAP é um pouco superior a 0,42 nas primeiras 3 argamassas referidas, e significativamente superior na argamassa com 15 % de SAP. A razão cimento/areia foi mantida constante e igual a 1:2. Para a avaliação do efeito do SAP, os

gráficos seguintes mostram os valores das 5 argamassas, sendo que uma delas é uma argamassa referência, sem adição de SAP, RN 42, e as outras 4 argamassas com adição de SAP em várias concentrações.

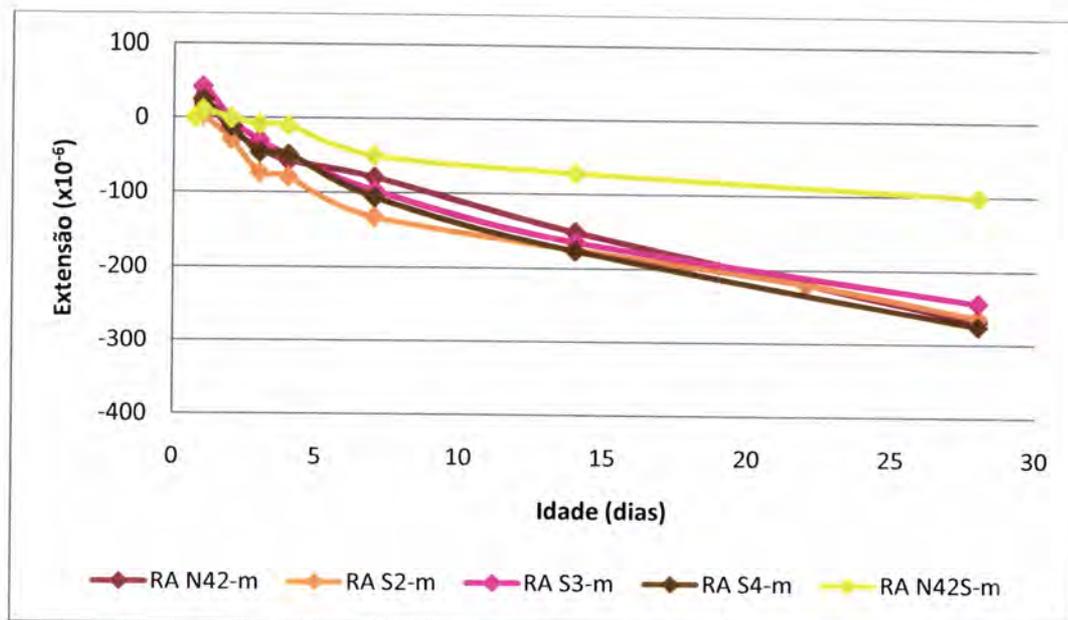


Gráfico 64 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

As primeiras conclusões a retirar do Gráfico 64 é que a argamassa com 15 % de SAP retrai menos que as restantes. A adição de SAP em baixas concentrações não tem grande efeito na retracção autogénea. No caso da argamassa com 15 % de SAP, nas primeiras idades, até aos 4 dias, praticamente não há retracção, acabando por evidenciar retracção em idades mais avançadas, mas mesmo assim inferior à de referência. Comparando o efeito de 10 % de SAP, na argamassa com $A/C=0,325$, Gráfico 56, com a influência de 15 % de SAP na argamassa com $A/C=0,42$, Gráfico 64, nota-se que o acréscimo na dosagem de água fez diminuir significativamente a retracção autogénea nas idades mais avançadas, cerca de 100×10^{-6} aos 28 dias, possivelmente devido a redução da autodessecação propiciada pela elevada quantidade de água.

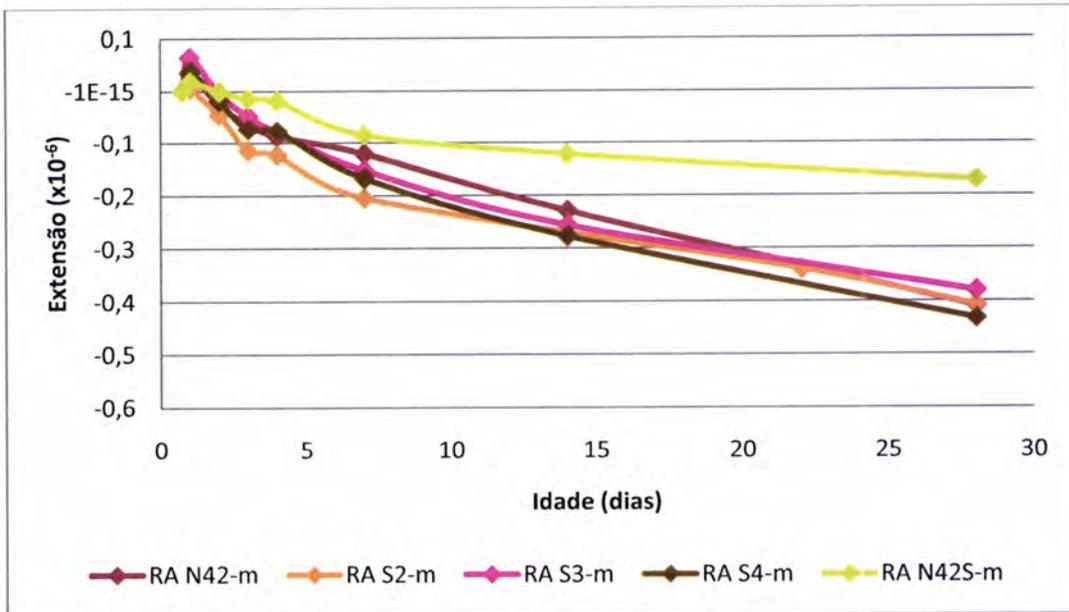


Gráfico 65 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

O Gráfico 65 mostra a retracção autogénea por kg de cimento e comparado com o Gráfico 64 não se notam diferenças significativas.

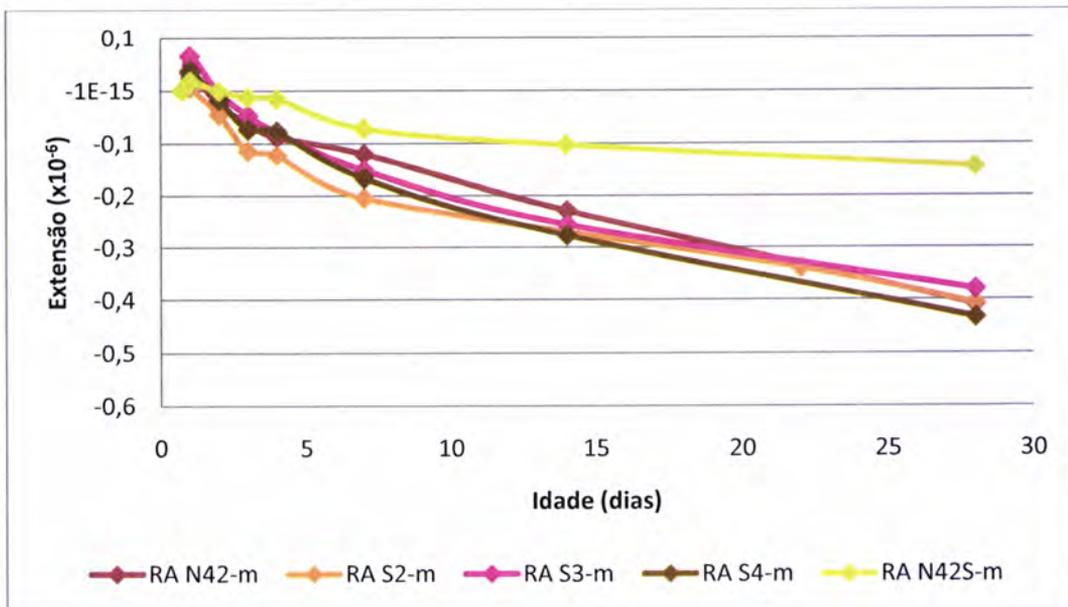


Gráfico 66 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,50, entre RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Pelo Gráfico 66, observa-se que ao corrigir o volume de agregado, é mais evidenciado o efeito do SAP, particularmente o da argamassa RN 42 + SAP.

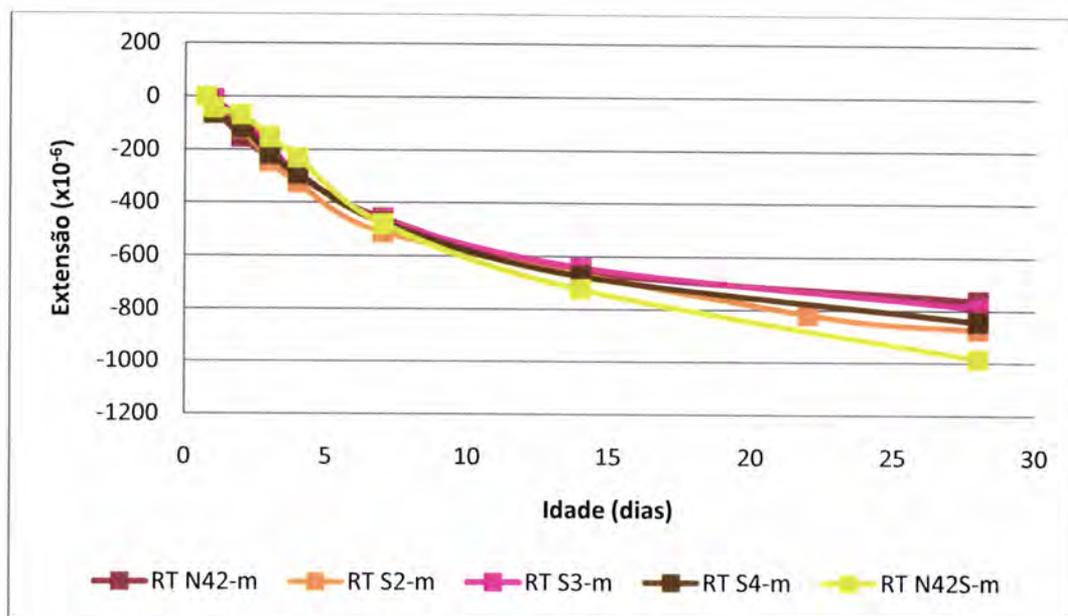


Gráfico 67 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Pelo Gráfico 67 podemos analisar a evolução das argamassas no ensaio de determinação da retracção total. A argamassa que tem uma retracção total maior aos 28 dias é a argamassa com adição maior de SAP, mas esta apresenta valores mais baixos nas primeiras idades, devido ao efeito dos SAP na retracção autógena. A partir do sétimo dia a maior secagem desta argamassa implica uma retracção maior do que nas outras argamassas.

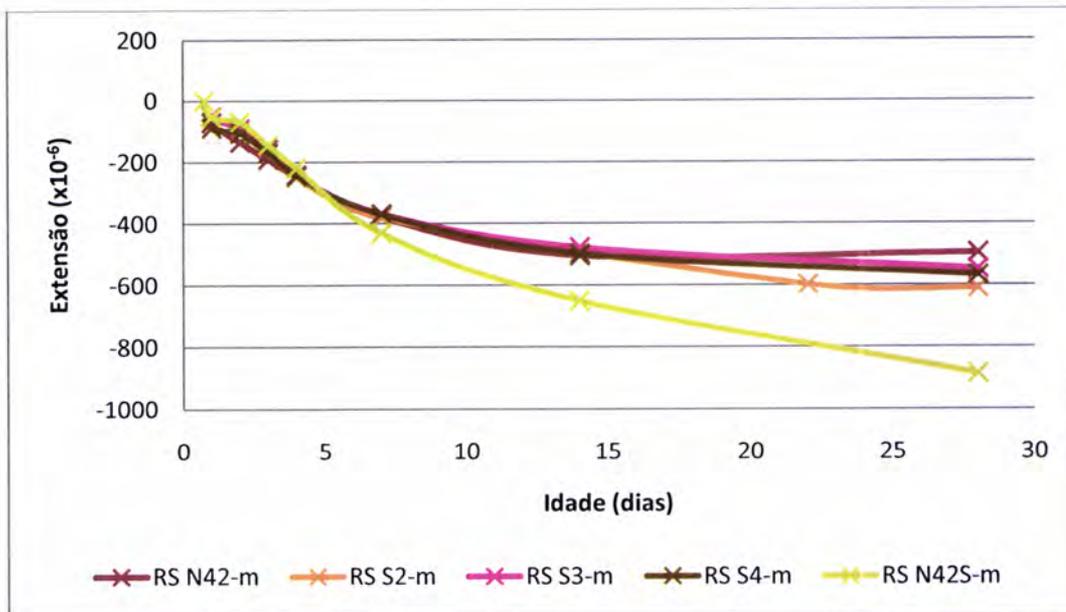


Gráfico 68 - Comparação dos valores médios da retração por secagem entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Pelo Gráfico 68, observa-se o efeito da secagem, onde se destaca a argamassa RN 42 + SAP, a que mais retrai. O efeito da secagem é notável a partir do quarto dia de idade nesta argamassa RN 42 + SAP. Aqui também se nota a pouca influência do SAP na retração quando usado em pequenas dosagens.

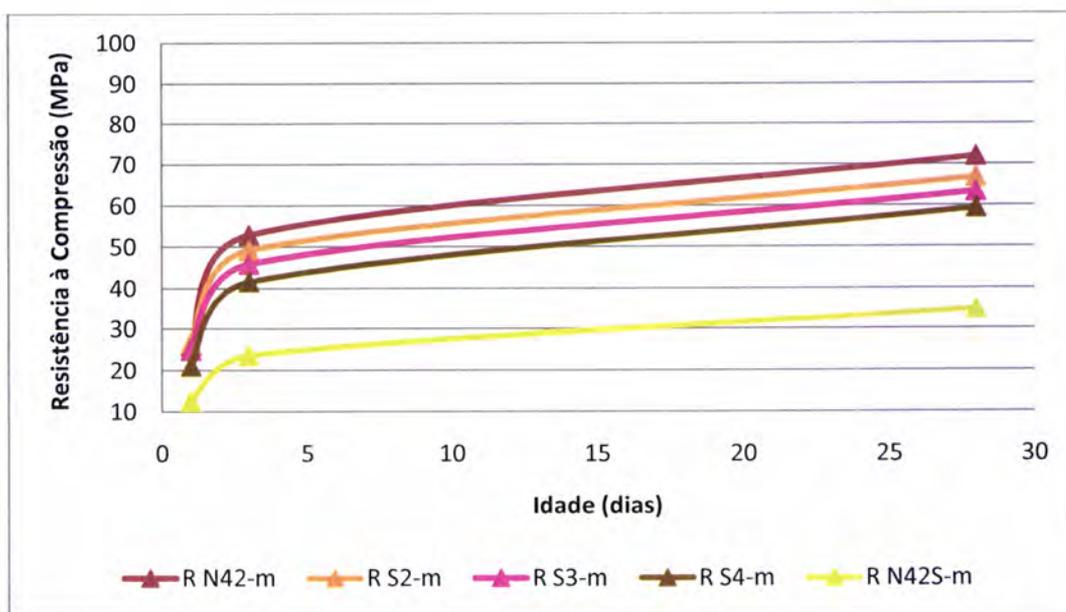


Gráfico 69 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Numa análise comparativa entre as argamassas representadas no Gráfico 69, pode-se dizer que a resistência à compressão diminui proporcionalmente com o aumento da dosagem de SAP.

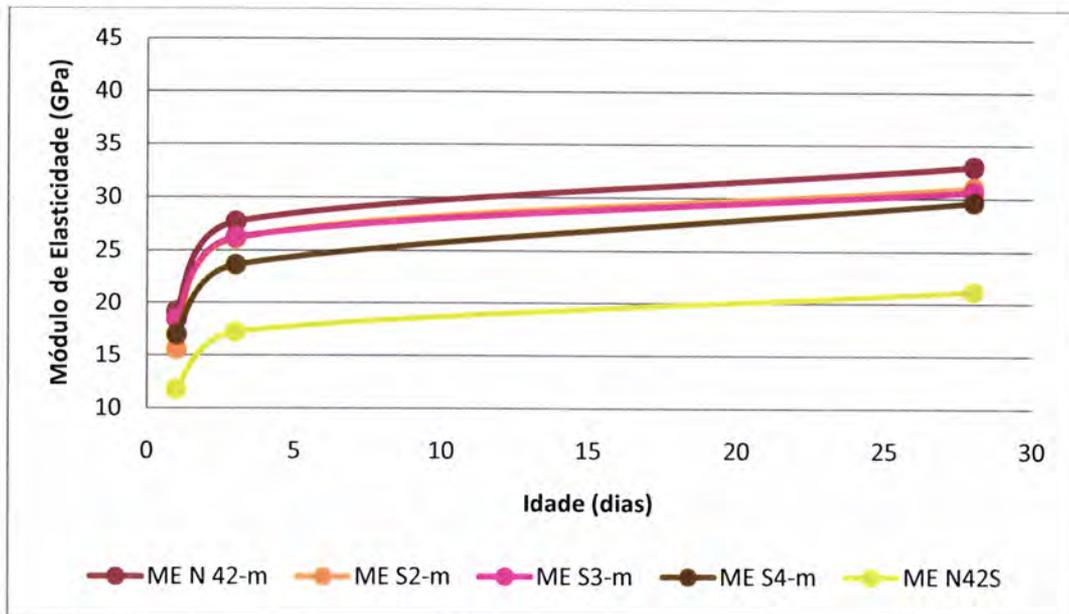


Gráfico 70 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Observando o Gráfico 70, conclui-se também que o aumento da adição de SAP nas argamassas diminui o seu módulo de elasticidade.

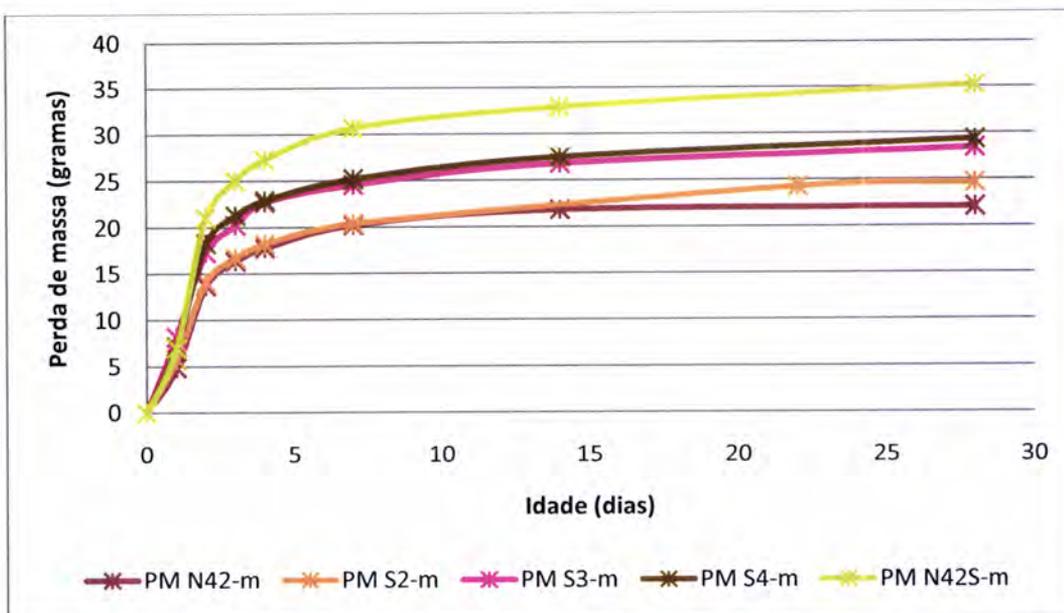


Gráfico 71 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a RN 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

No Gráfico 71, relativo à perda de massa conclui-se que esta é proporcional à dosagem de SAP o que é concordante com os resultados apresentados anteriormente.

Em síntese, em argamassas com igual razão A/C e para igual proporção cimento/areia, tendencialmente quanto maior for a quantidade de SAP introduzidos menor é a sua retracção autogénea, mas a retracção total e por secagem aumenta. Este material provoca redução da resistência à compressão assim como do módulo de elasticidade, e aumenta a perda de massa.

6.2.3. Razão A/C=0,42 e maior razão cimento:areia na argamassa de referência

Neste subcapítulo avalia-se também o efeito dos SAP, mas agora usando para comparação a argamassa de referência R 42 sem adição de SAP. Esta argamassa difere da RN 42 por conter menor volume de agregado. A argamassa R 42 foi obtida partindo da formulação da argamassa R 32,5, que apresenta razões A/C e cimento/areia de 0,325 e 0,50, respectivamente, alterando a razão A/C para 0,42. Sendo necessariamente a soma dos volumes parciais igual a 1, ao pretender manter a dosagem de cimento em valores da mesma ordem de grandeza, resulta a obrigação de aumentar a razão cimento/areia, por diminuição do volume de areia. Desta forma, ao comparar esta argamassa de referência com as argamassas onde se incluiu SAP, deve ter-se também em conta que o volume de areia não é igual.

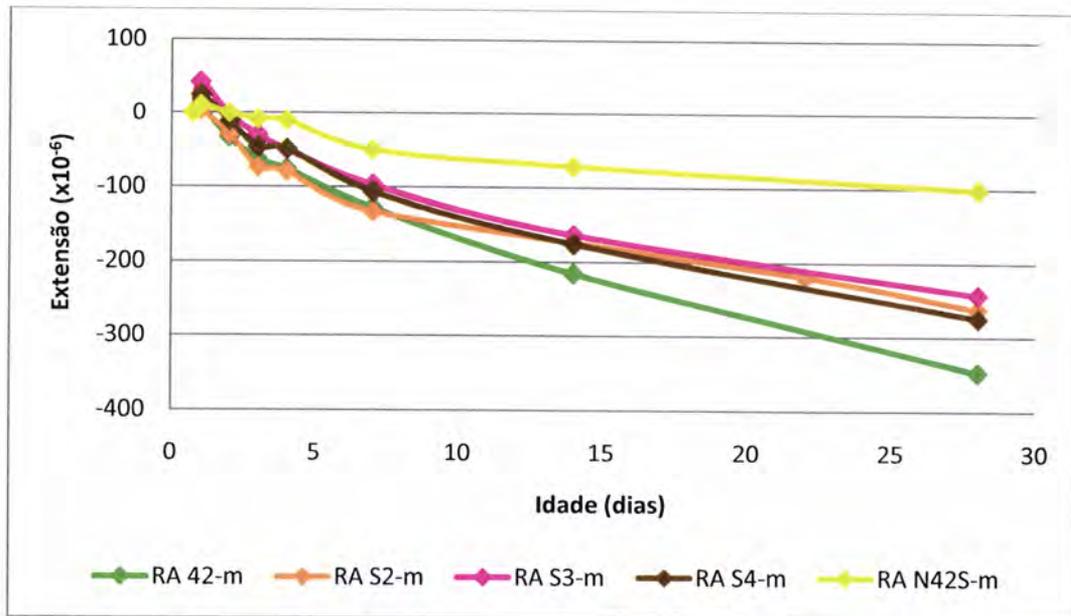


Gráfico 72 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Analisando o Gráfico 72, observa-se que a argamassa R 42, com uma razão de cimento/areia maior que as restantes argamassas em estudo, retrai mais que todas as outras. A argamassa com maior dosagem de SAP é a argamassa que tem uma retracção autogénea menor.

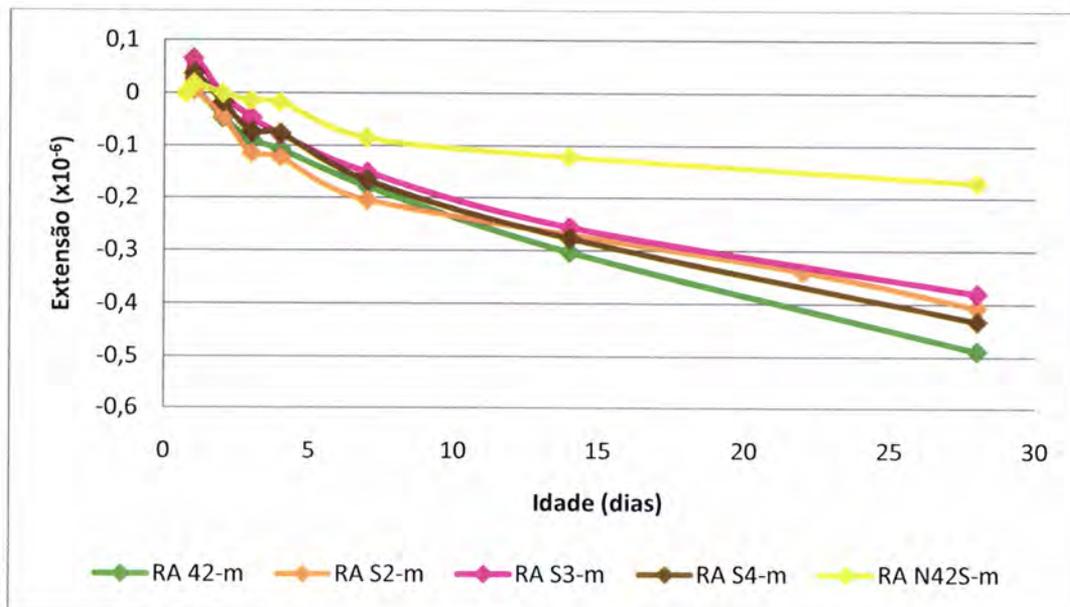


Gráfico 73 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Em relação à retracção autógena por kg de cimento, a argamassa de referência R 42, com menos agregado, quando comparada com as outras argamassas, apresenta valores mais próximos das argamassas com baixa concentração de SAP, SAP 2, SAP 3,25 e SAP 4,5. No Gráfico 73 pode-se observar o descrito anteriormente.

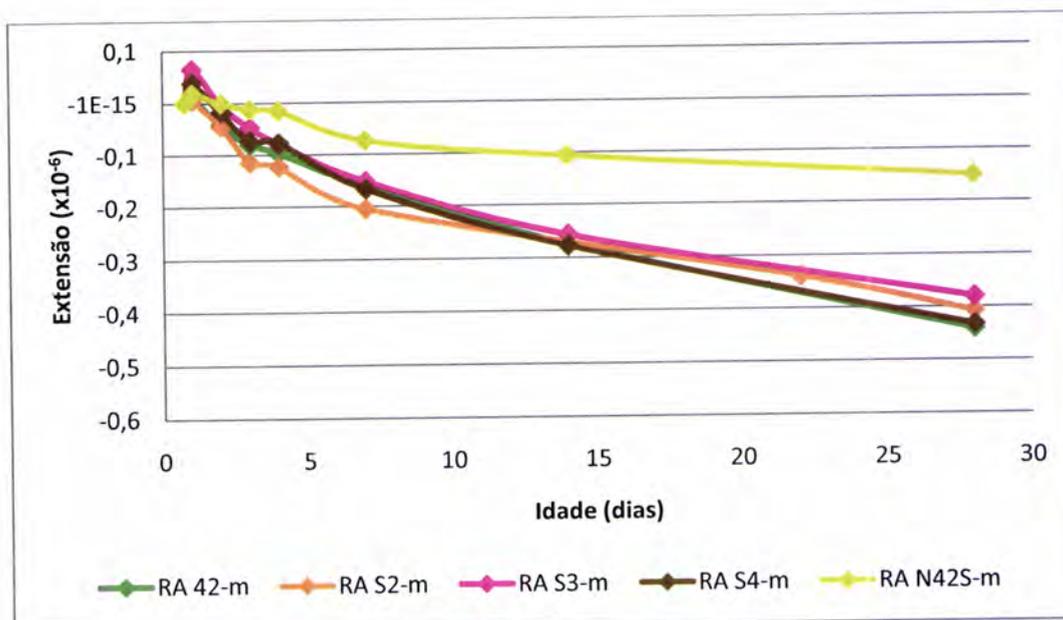


Gráfico 74 - Comparação da retracção autógena por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,49, entre R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Quando se corrigem os valores para igual volume de agregado, Gráfico 74, observa-se que a R 42 e as SAP 2, SAP 3,25 e SAP 4,5 atingem valores semelhantes. Como atrás já se tinha constatado, a RN 42 + SAP atinge valores mais baixos.

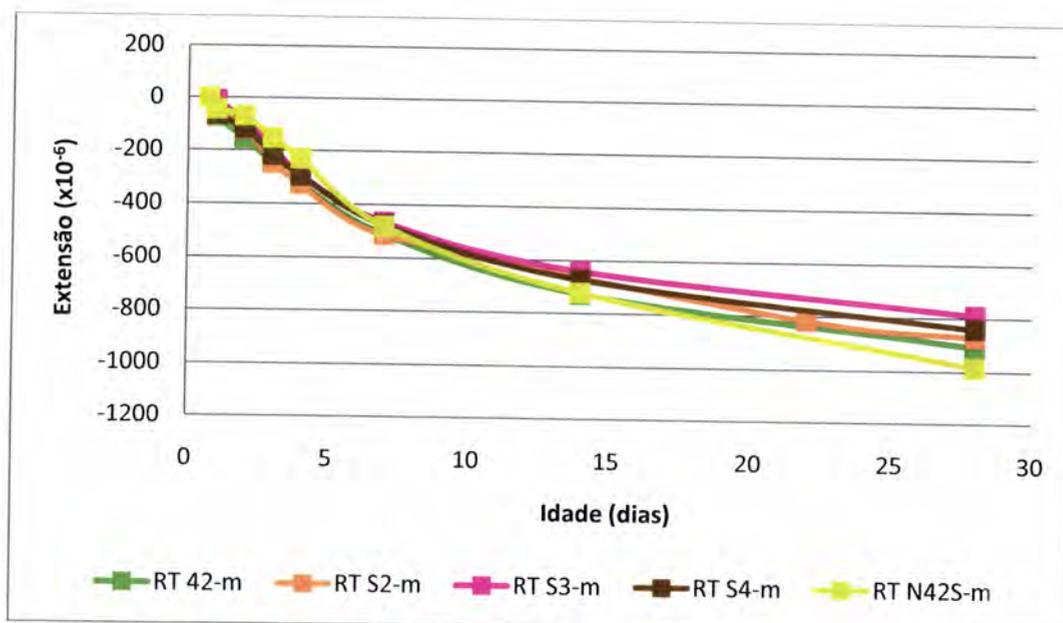


Gráfico 75 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Quando se analisa o Gráfico 75, que representa a retracção total das argamassas em estudo, observa-se que até ao sétimo dia de idade das argamassas os resultados são bastantes idênticos. No entanto, repare-se que nos primeiros dias a argamassa RN 42 + SAP é a argamassa que menos retrai. Esta tendência não se verifica até ao final do ensaio, aos 28 dias de idade, uma vez que a RN 42 + SAP é a argamassa que tem o maior valor de retracção total. A argamassa sem adição de SAP, e com uma razão cimento/areia maior que as argamassas com adição de SAP atinge valores de retracção total mais elevados, se for exceptuada a argamassa com 15 % de SAP.

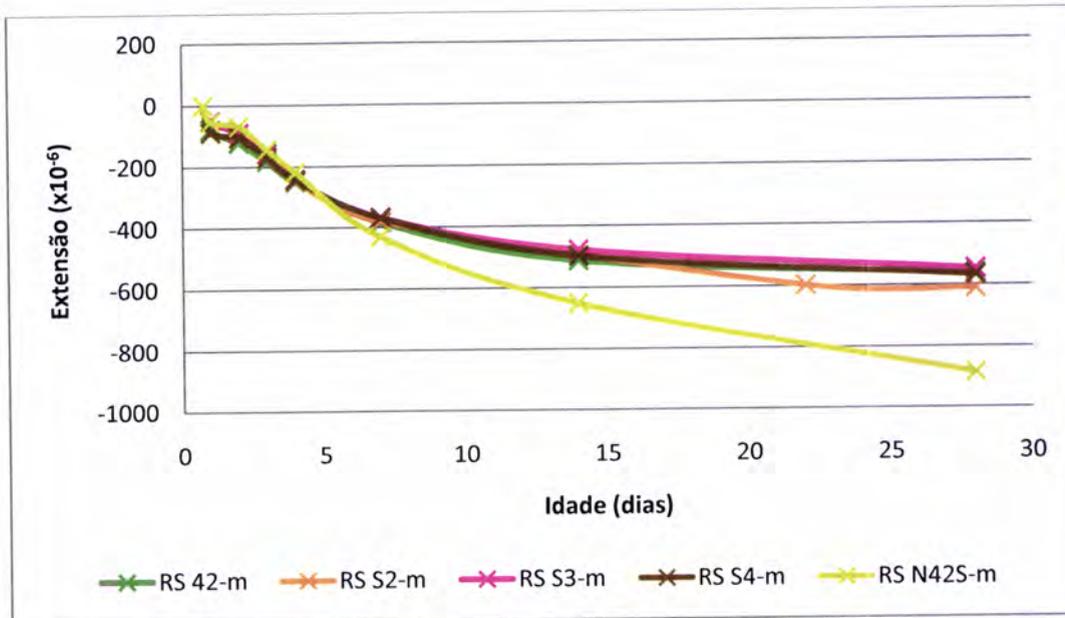


Gráfico 76 - Comparação dos valores médios da retração por secagem entre R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Estudando o comportamento das argamassas em relação à retração por secagem, observa-se no Gráfico 76 que a argamassa R 42 e as argamassas com baixa dosagem de SAP, SAP 2, SAP 3,25 e SAP 4, atingem valores próximos entre si, destacando-se apenas a argamassa RN 42 + SAP com uma retração por secagem significativamente maior que as restantes argamassas.

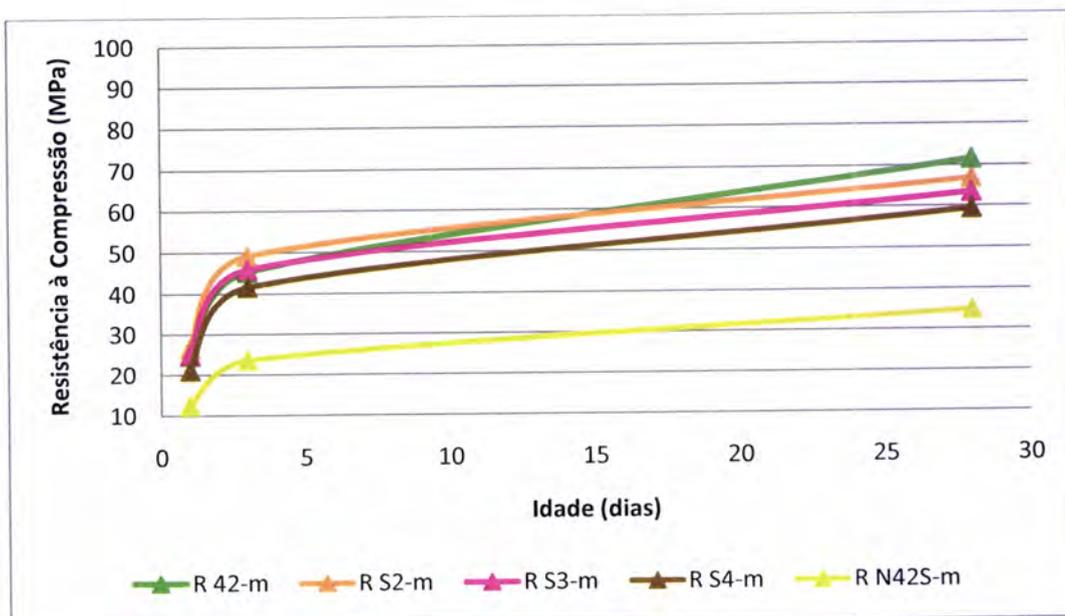


Gráfico 77 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Ao se observar o Gráfico 77, aos 28 dias quanto maior a dosagem de SAP nas argamassas, menor é a sua resistência à compressão. Todavia, nas primeiras idades, nas argamassas com baixo teor de SAP a influência negativa deste produto não é tão evidente, dada a menor dosagem de areia da argamassa de referência.

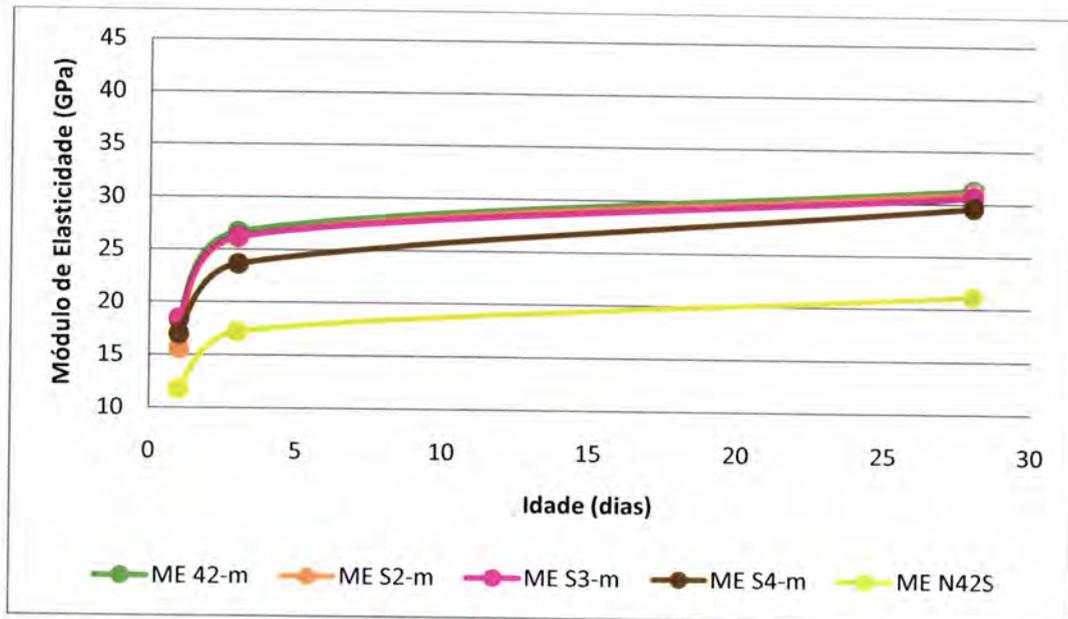


Gráfico 78 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

No Gráfico 78, representa-se a evolução do módulo de elasticidade das 5 argamassas em estudo. Observa-se que o aumento de SAP nas argamassas reduz o módulo de elasticidade obtido. Verifica-se que as baixas concentrações de SAP pouco afectam no módulo de elasticidade registado ao fim de 28 dias, quando comparado com uma argamassa com razão cimento/areia mais alta e sem adição de SAP.

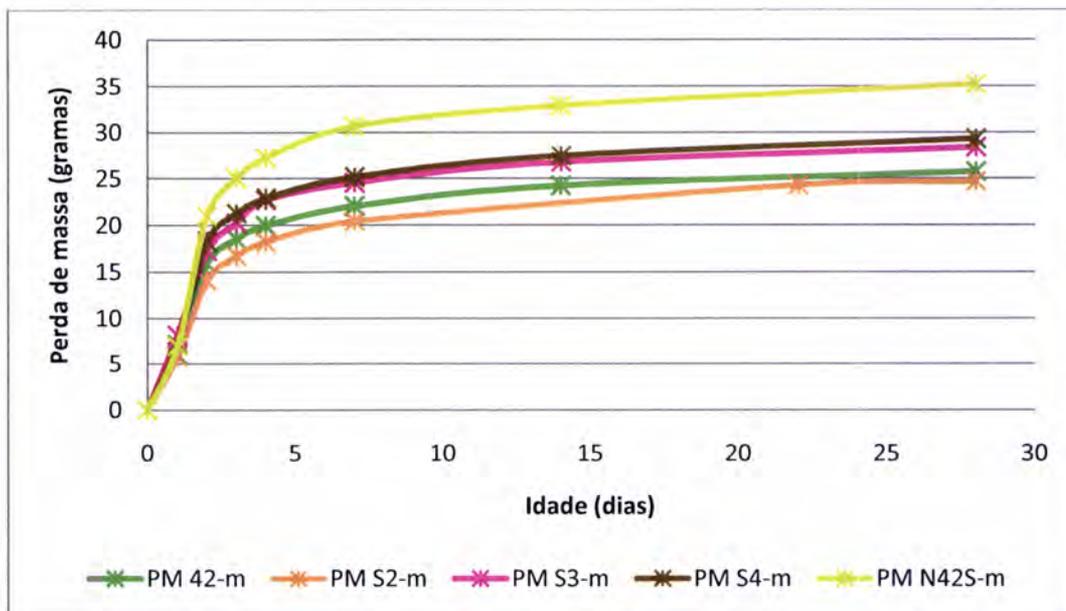


Gráfico 79 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 42, SAP 2, SAP 3,25, SAP 4,5 e RN 42 + SAP

Comparando as perdas de massa das várias argamassas no Gráfico 79, verifica-se que o aumento da adição de SAP em argamassas aumenta em geral a perda de massa das argamassas. Contrariamente ao que se observou no gráfico da perda de massa em que se comparou os resultados com a argamassa de referência RN 42, neste caso a argamassa que secou menos foi a que continha 2 % de SAP. Este resultado não é estranho, uma vez que a argamassa de referência tem menor volume de agregado do que as outras argamassas, pelo que é natural uma inversão de posições relativamente à argamassa com menor teor de SAP.

Concluindo, argamassas com maior teor de SAP na sua composição, têm uma retracção autogénea menor, mas em relação à retracção total e à retracção por secagem são as que mais retraem. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade sofrem um decréscimo em argamassas com adição de SAP, e quanto maior for o uso de SAP em argamassas menores são os valores registados na resistência à compressão e no módulo de elasticidade. As argamassas com maiores adições de SAP são as que tem uma perda de massa maior.

6.3. Efeito do Agregado Leve

O efeito da introdução de agregado leve em argamassas é avaliado neste subcapítulo. Este efeito vai ser avaliado comparando uma argamassa com adição de agregado leve, designada por ALeve, e

uma argamassa de referência, R 32,5, ambas com uma razão $A/C=0,325$, excluindo a água incorporada no agregado leve.

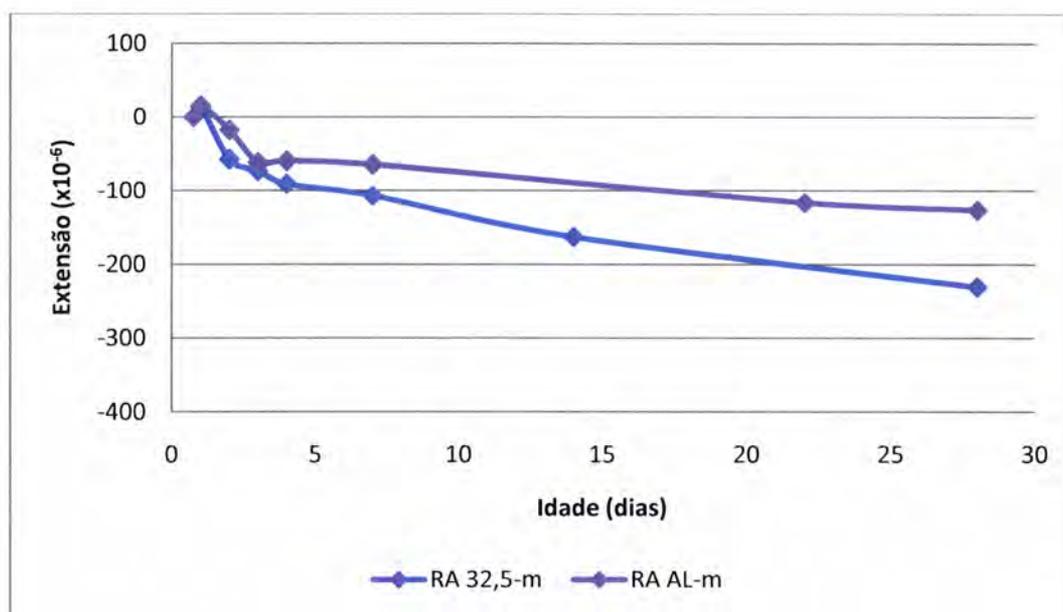


Gráfico 80 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 32,5 e ALeve

Pela análise comparativa dos resultados obtidos nas duas argamassas, representados no Gráfico 80, pode-se dizer que a argamassa com agregado leve atinge valores menores de retracção autogénea quando comparada com a argamassa sem agregado leve. Note-se que do dia 3 ao dia 7 a argamassa ALeve praticamente não retrai. Nos primeiros dias, a retracção tende a ser semelhante nas duas argamassas, mas à medida que hidratação progride, e aumenta a autodessecação, a migração da água do agregado leve para os poros tende a diminuir a retracção, como se observa no gráfico a partir dos 3 dias de idade. O afastamento entre as duas curvas terá tendência para aumentar com o tempo, desde que exista água no agregado leve. Esta tendência também se observa no gráfico.

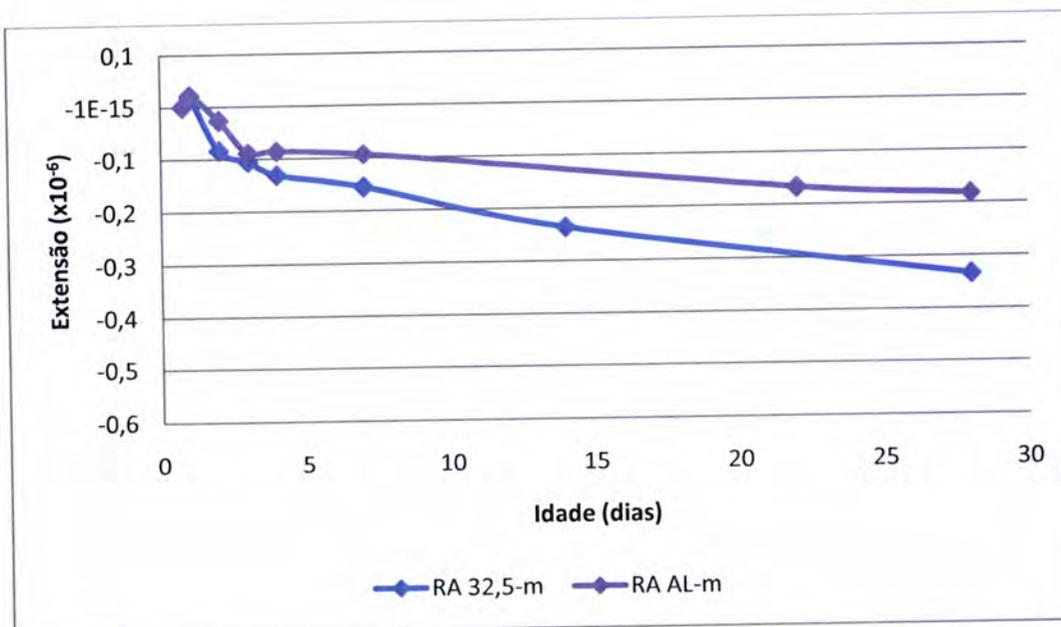


Gráfico 81 - Comparação da retração autogénea por kg de cimento entre R 32,5 e ALeve

No Gráfico 81 em que é apresentado os valores da retração autogénea por kg de cimento das argamassas R 32,5 e ALeve não se notam diferenças quando comparado com o Gráfico 80.

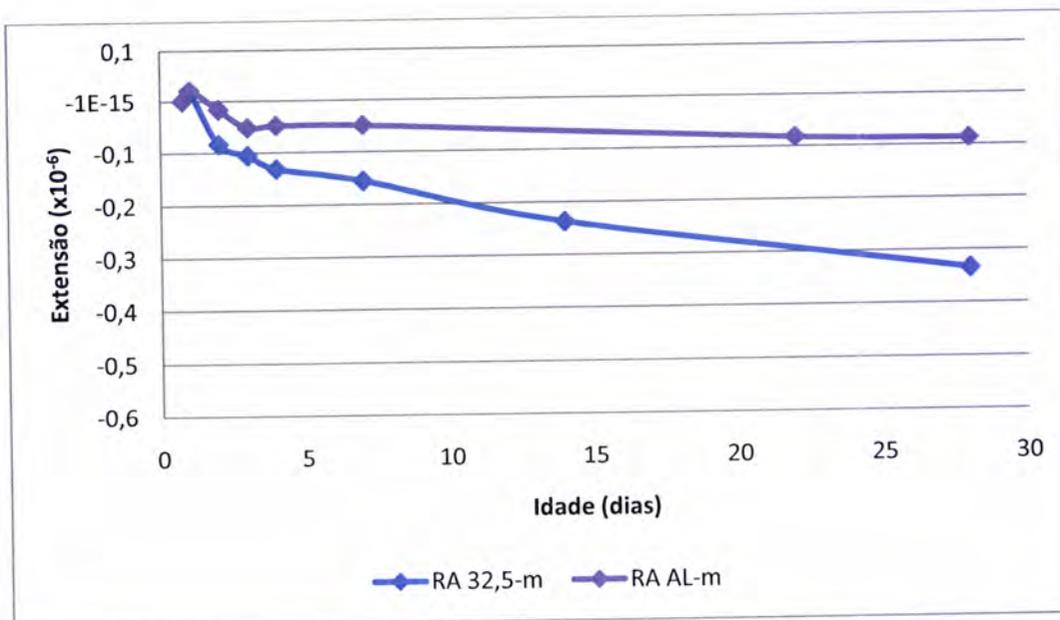


Gráfico 82 - Comparação da retração autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,529, entre R 32,5 e ALeve

Quando se corrige o volume de agregado das argamassas é mais notório o efeito favorável do agregado leve no comportamento da argamassa, como se observa pelo Gráfico 82.

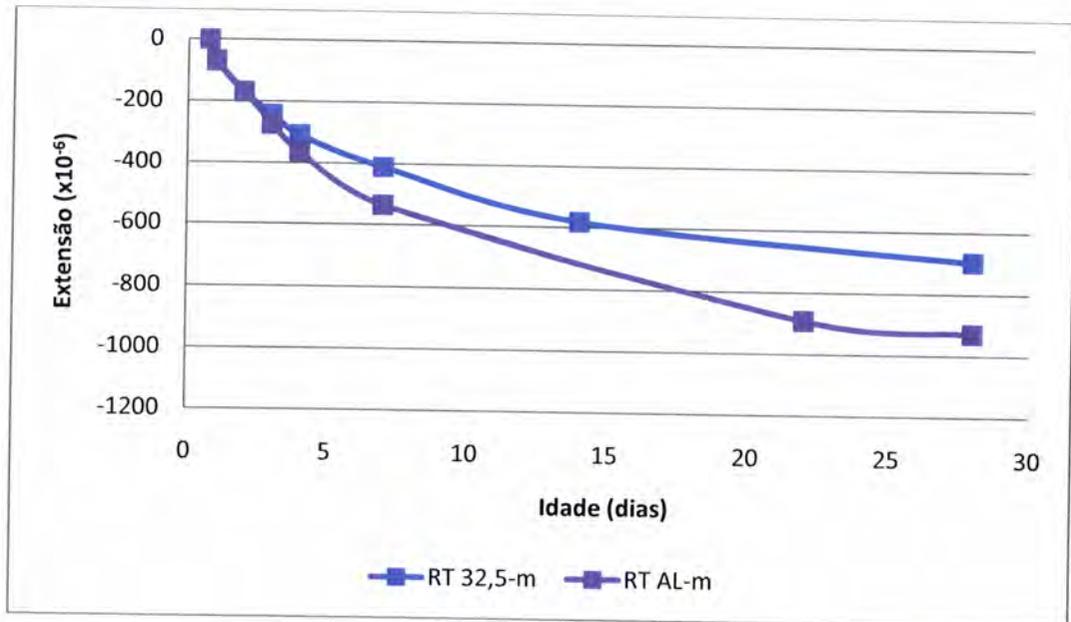


Gráfico 83 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 32,5 e ALeve

Da análise do Gráfico 83, verifica-se que a argamassa ALeve tem, a partir dos 3 dias, uma retracção total superior à argamassa R 32,5. Este efeito do agregado leve no aumento da retracção total deve-se à maior secagem e menor rigidez das argamassas em que ele é incorporado.

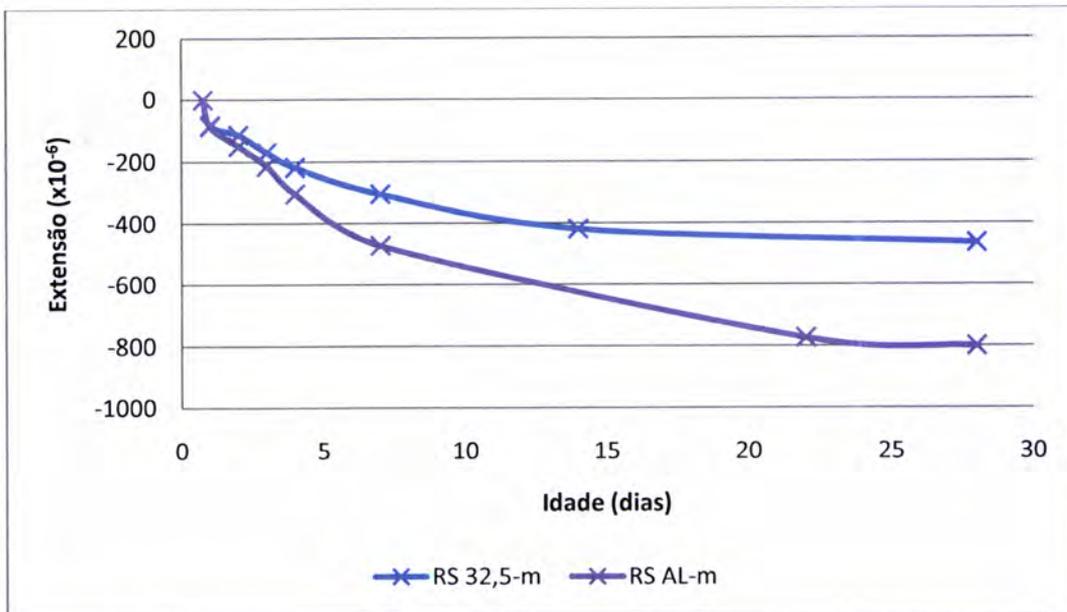


Gráfico 84 - Comparação dos valores médios da retração por secagem entre a R 32,5 e ALeve

Pela análise do Gráfico 84, pode-se afirmar que argamassas com agregados leves, ALeve, têm uma retração por secagem maior que argamassas sem agregados leves como é o caso da R 32,5.

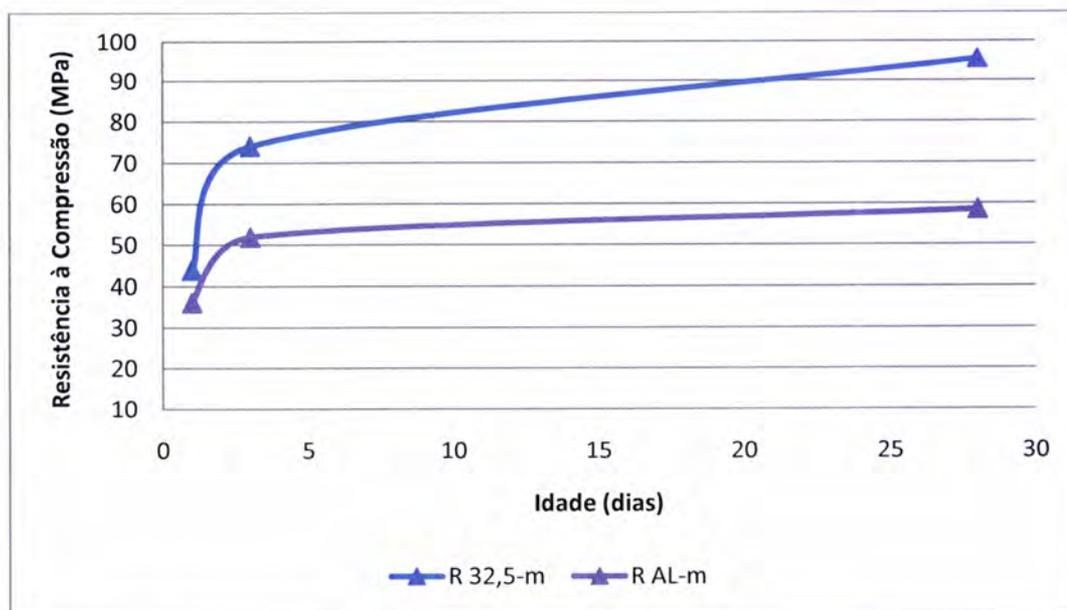


Gráfico 85 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 32,5 e ALeve

A resistência à compressão de uma argamassa com agregado leve é muito menor que uma argamassa sem agregado leve. O Gráfico 85 evidencia a afirmação anterior.

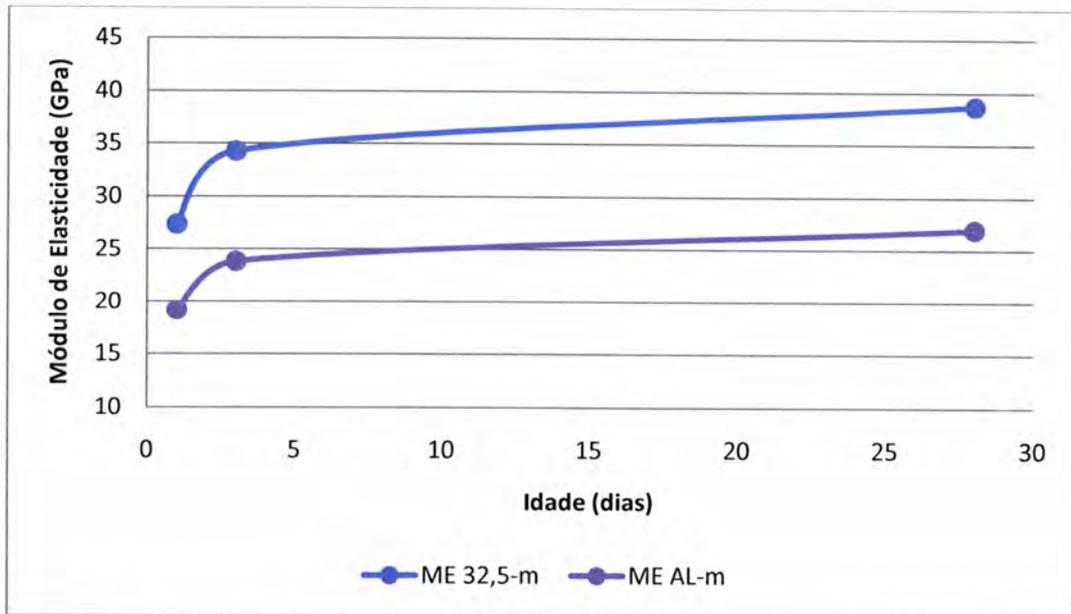


Gráfico 86 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5 e ALeve

Ao se analisar o Gráfico 86, verifica-se que a presença de agregados leves em argamassas reduz o seu módulo de elasticidade.

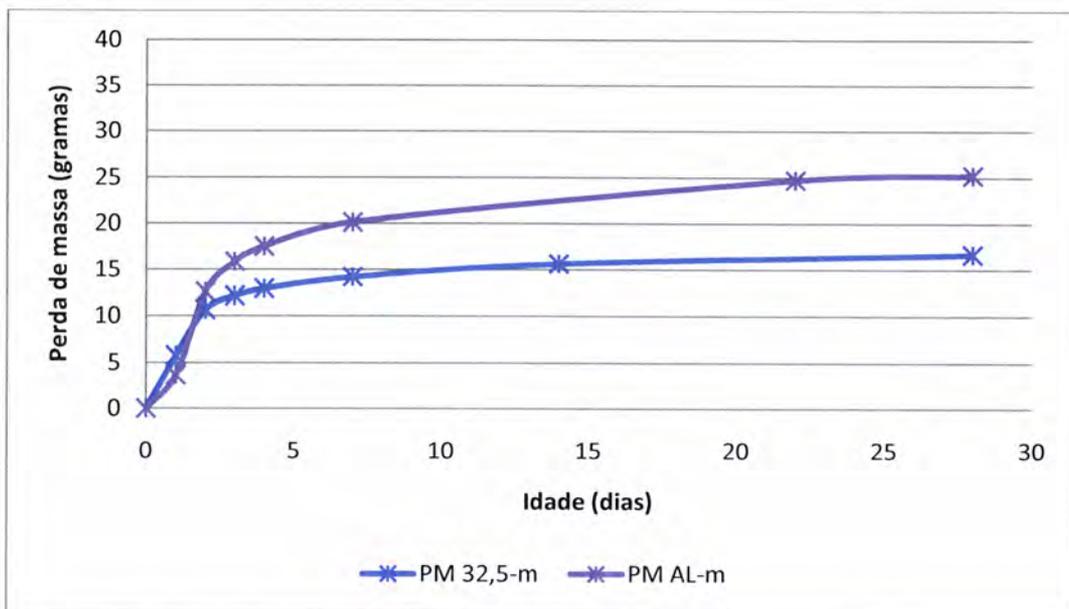


Gráfico 87 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5 e ALeve

Em conformidade com os resultados da retracção total, Gráfico 83, observa-se, no Gráfico 87, que a partir dos 3 dias inclusive, a argamassa ALeve tem uma perda de massa maior que a argamassa R 32,5.

Finalizando este subcapítulo, conclui-se que o uso de agregados leves em argamassas aumenta os valores da retracção total e por secagem, assim como também é maior a perda de massa, diminui a retracção autogénea e reduz significativamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

6.4. Efeito da Areia

O efeito do agregado pode-se tornar importante no estudo da retracção. Neste subcapítulo 6.4 comparam-se as duas argamassas de referência, que apenas diferem na quantidade de agregado.

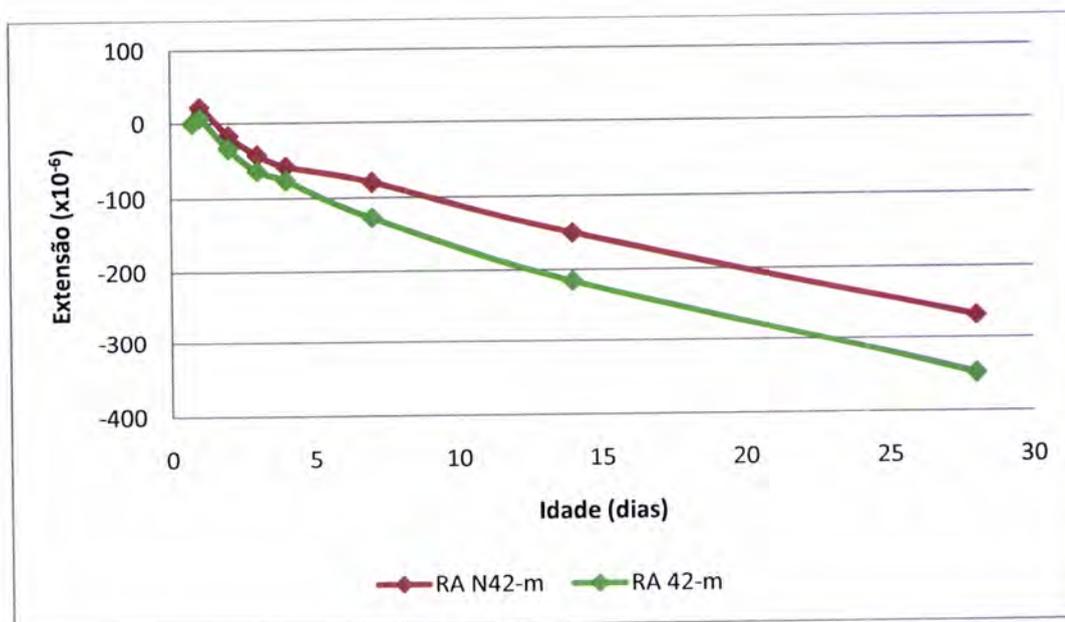


Gráfico 88 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a RN 42 e R 42

Pelo Gráfico 88, observa-se que o uso de menor volume de agregado numa argamassa aumenta a sua retracção autogénea, como esperado. Neste gráfico pode-se observar que a argamassa R 42, argamassa com menos agregado, apresenta valores de retracção autogénea maiores que a argamassa RN 42 que é uma argamassa com mais agregado na sua composição.

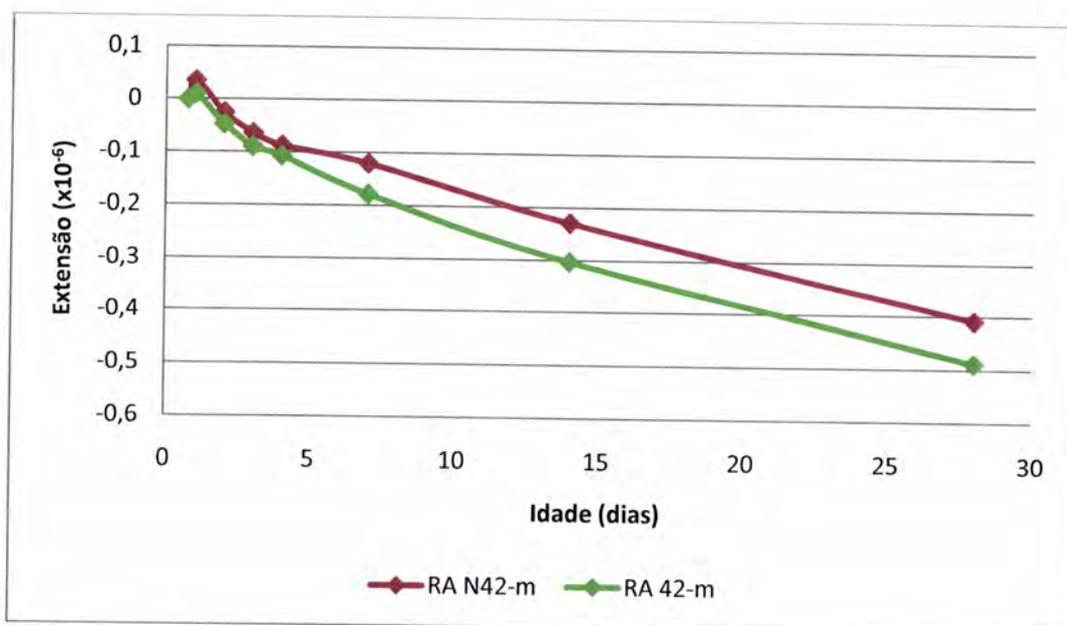


Gráfico 89 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre RN 42 e R 42

Ao se avaliar a retracção autogénea por kg de cimento entre as duas argamassas com diferentes volumes de agregado na sua composição, Gráfico 89, observa-se que as argamassas tem comportamentos semelhantes, sendo que a argamassa com uma estrutura menos rígida, R 42, ou seja com menor volume de agregado, retrai mais.

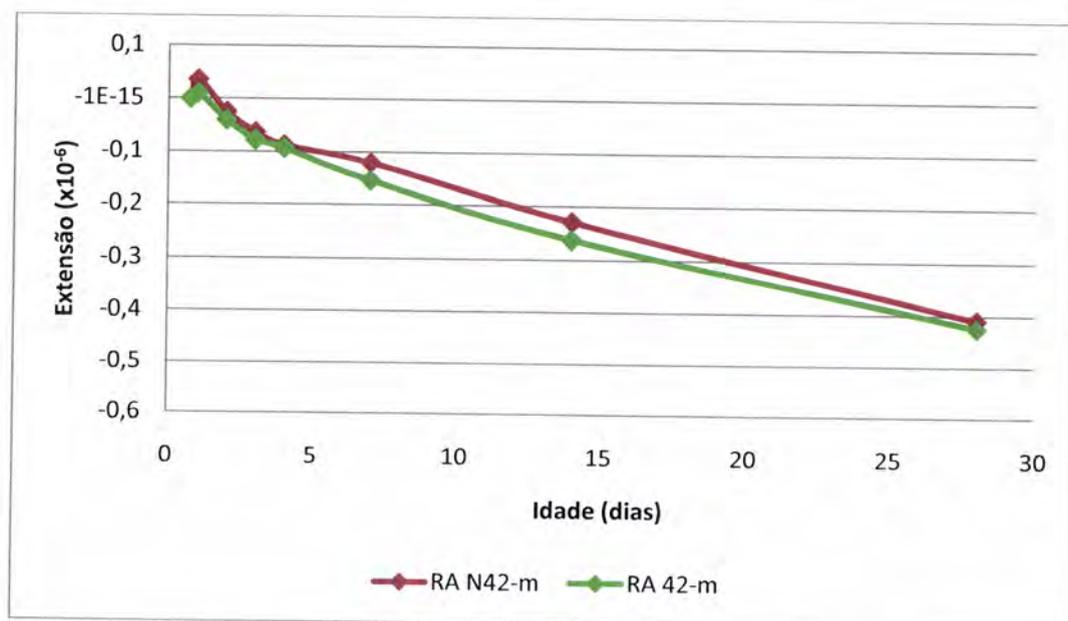


Gráfico 90 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,50, entre RN 42 e R 42

No Gráfico 90 pode-se observar que quando se corrige o volume de agregado destas duas argamassas a diferença nos resultados é muito pequena e praticamente se encontra dentro do intervalo de variação esperado entre provetes da mesma argamassa.

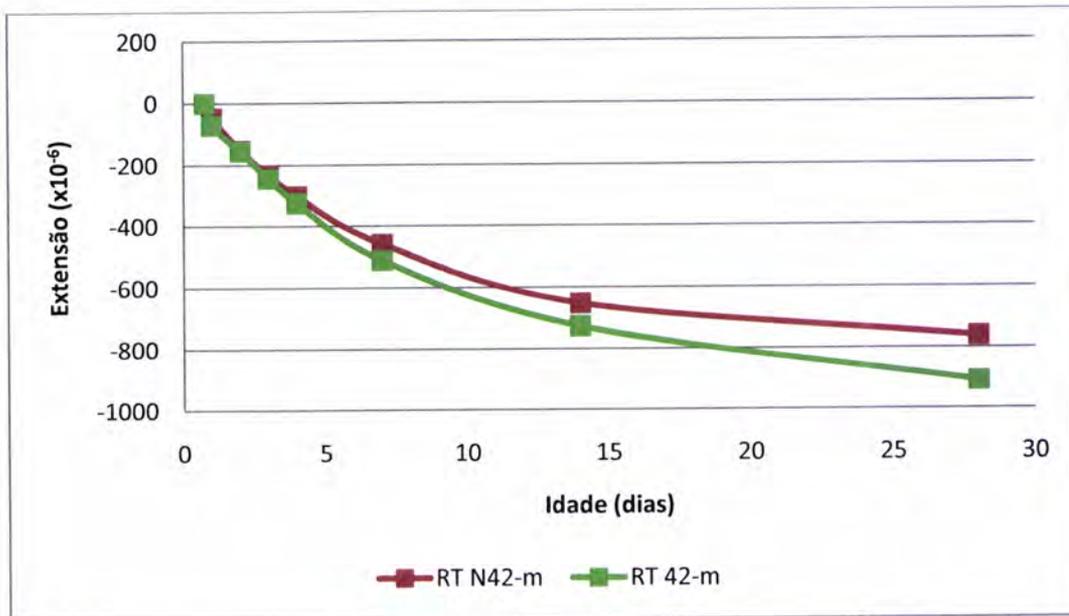


Gráfico 91 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a RN 42 e R 42

Ao se comparar a retracção total de argamassas que apenas diferem na quantidade de agregado, Gráfico 91, observa-se que quanto mais agregado se adiciona na argamassa menor é a sua retracção total.

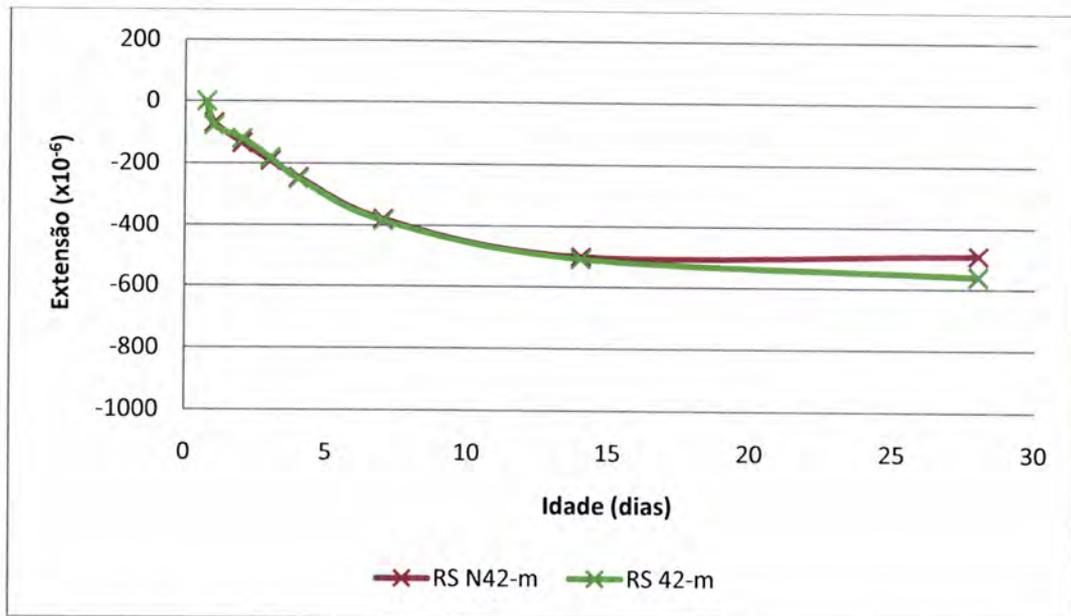


Gráfico 92 - Comparação dos valores médios da retracção por secagem entre a RN 42 e R 42

Quando se compara a retracção por secagem destas duas argamassas em estudo, Gráfico 92, conclui-se que neste tipo de retracção não há grandes diferenças, sendo mesmo assim visível aos 28 dias uma maior retracção por secagem da argamassa com menos areia, R 42.

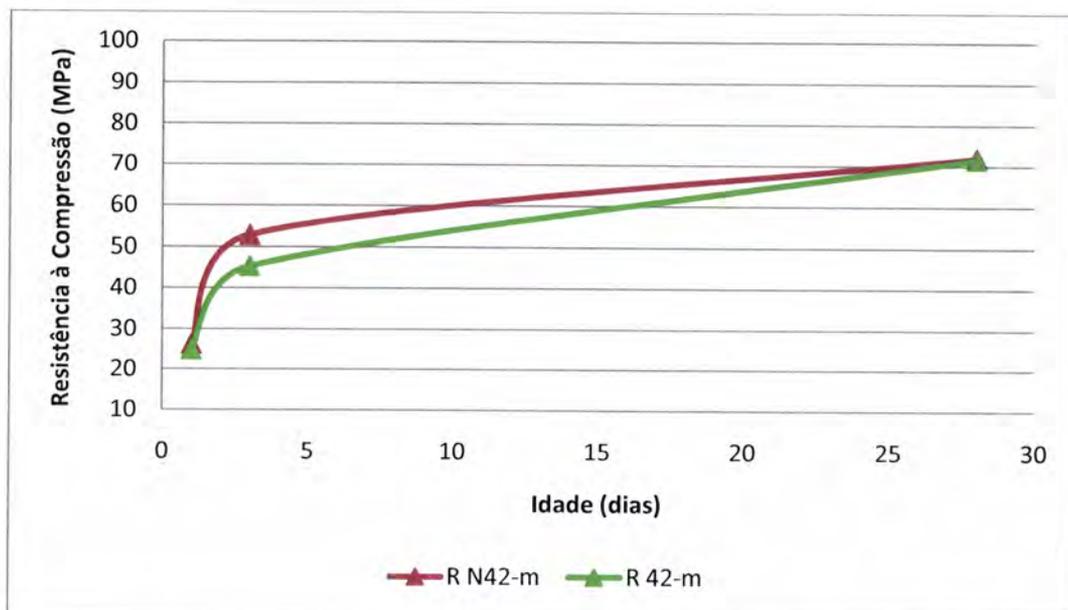


Gráfico 93 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a RN 42 e R 42

Quando se analisa a evolução da resistência à compressão destas argamassas, Gráfico 93, conclui-se que nos primeiros dias a argamassa com menos areia, R 42, tem uma resistência à compressão inferior, mas no fim do ensaio, aos 28 dias de idade, não existem diferenças significativas. Assim, para variações desta ordem de grandeza, a quantidade de agregado nas argamassas não altera muito os resultados obtidos da resistência à compressão.

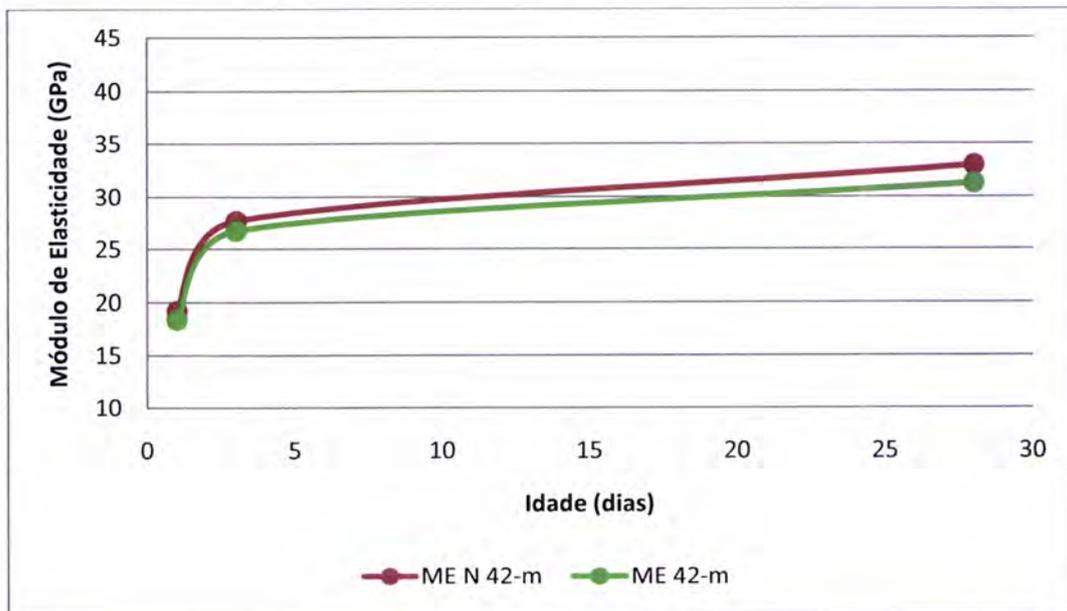


Gráfico 94 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a RN 42 e R 42

O módulo de elasticidade é ligeiramente alterado consoante a quantidade de agregado utilizada na argamassa. Pelo Gráfico 94 pode-se observar que a argamassa com menos areia na sua composição, R 42, atinge valores mais baixos que a argamassa com mais areia, RN 42.

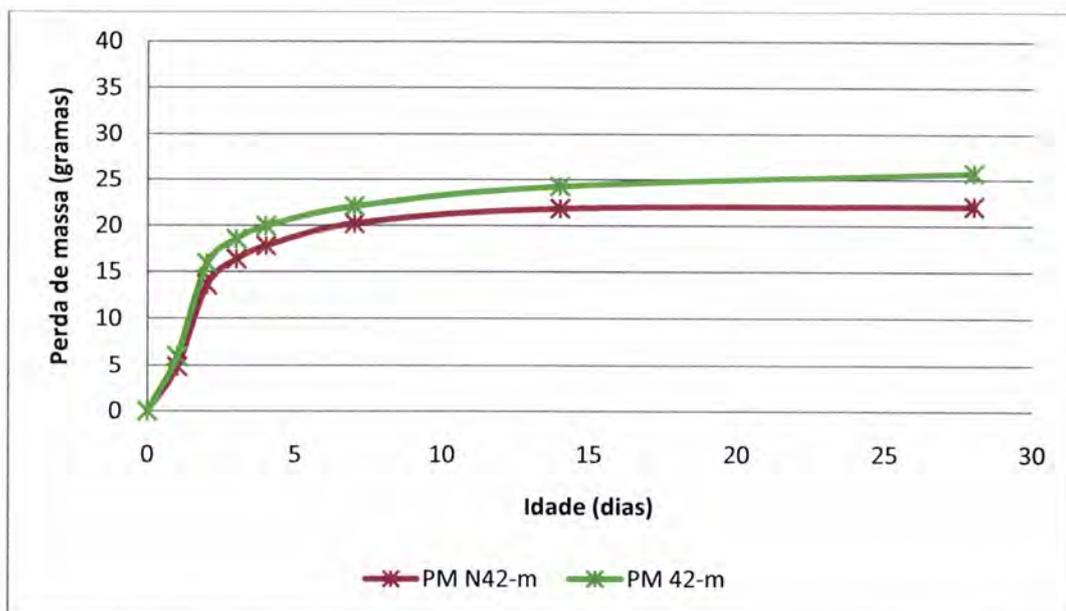


Gráfico 95 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a RN 42 e R 42

Pela análise do Gráfico 95, verifica-se que, como era esperado, a argamassa R 42 tem uma perda de massa maior que a argamassa RN 42.

Recapitulando, utilizando argamassas com maior dosagem de areia obtêm-se resultados de retração autógena, total e por secagem menores. Quanto aos valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade não existem diferenças muito significativas nos resultados obtidos, apesar da rigidez ser um pouco superior na argamassa com mais areia. A perda de massa é maior nas argamassas que têm menos areia na sua composição.

6.5. Efeito Interno da Água

Neste subcapítulo analisa-se o efeito interno da água. Para isso comparam-se 3 argamassas, uma argamassa sem adição de introdutores de água, R 32,5, uma argamassa com adição de agregados leves, ALeve, e uma argamassa com adição de SAP, R 32,5 + SAP, todas elas com razão $A/C=0,325$, se for excluída a água presente nos SAP e no agregado leve.

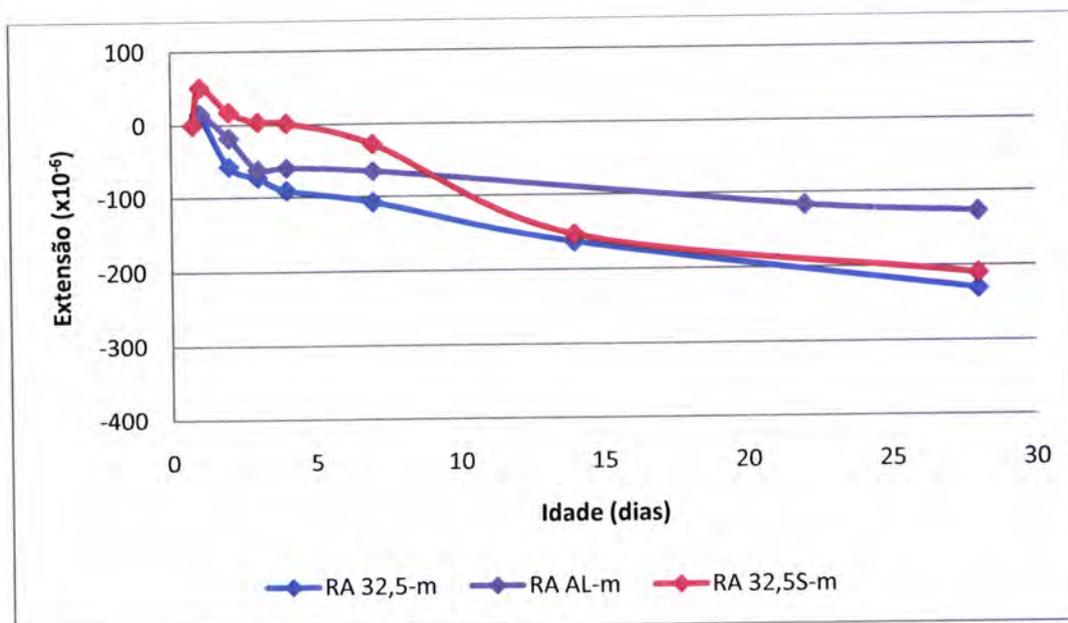


Gráfico 96 - Comparação dos resultados médios da retracção autogénea entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP

No Gráfico 96, pode-se observar que nos primeiros dias as argamassas com introdutores de água tendem a contrariar o efeito de retracção. Este efeito é facilmente observado na argamassa R 32,5 + SAP e ALeve. Note-se que a R 32,5 + SAP, provavelmente liberta água mais cedo, dada a menor dimensão das partículas e a sua maior dispersão na massa. Todavia, com o decorrer do tempo o efeito favorável do agregado leve ultrapassa o dos SAP. Isto deve-se à mais tardia libertação da água na argamassa com agregado leve e à menor disponibilidade de água nos SAP. Efectivamente, na argamassa com agregado leve existe cerca de 100 l/m³ de água adicional em relação à água livre inicial, enquanto a dosagem de SAP foi de cerca de 60 l/m³. Ao fim de 28 dias, a argamassa com agregado leve é a argamassa que menos retrai, enquanto as outras duas argamassas atingem valores próximos. Isto acontece porque a R 32,5, apesar de ter menos água disponível, é mais rígida que a R 32,5 + SAP.

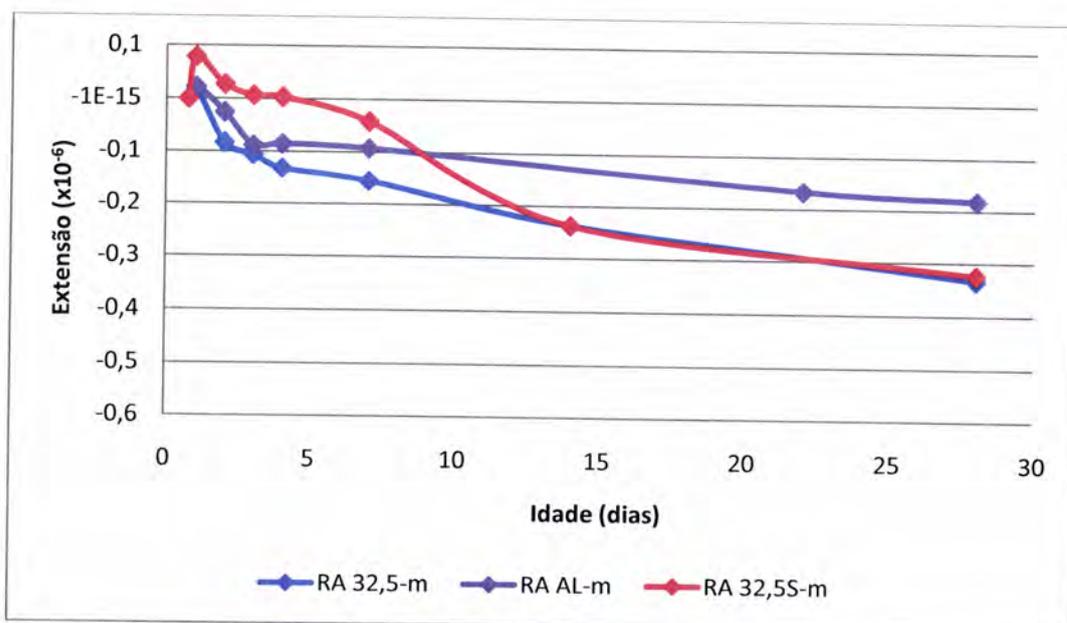


Gráfico 97 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5, AL-eve e R 32,5 + SAP

Quando se analisa a retracção autogénea por kg de cimento das argamassas em estudo, Gráfico 97, a tendência observada é idêntica.

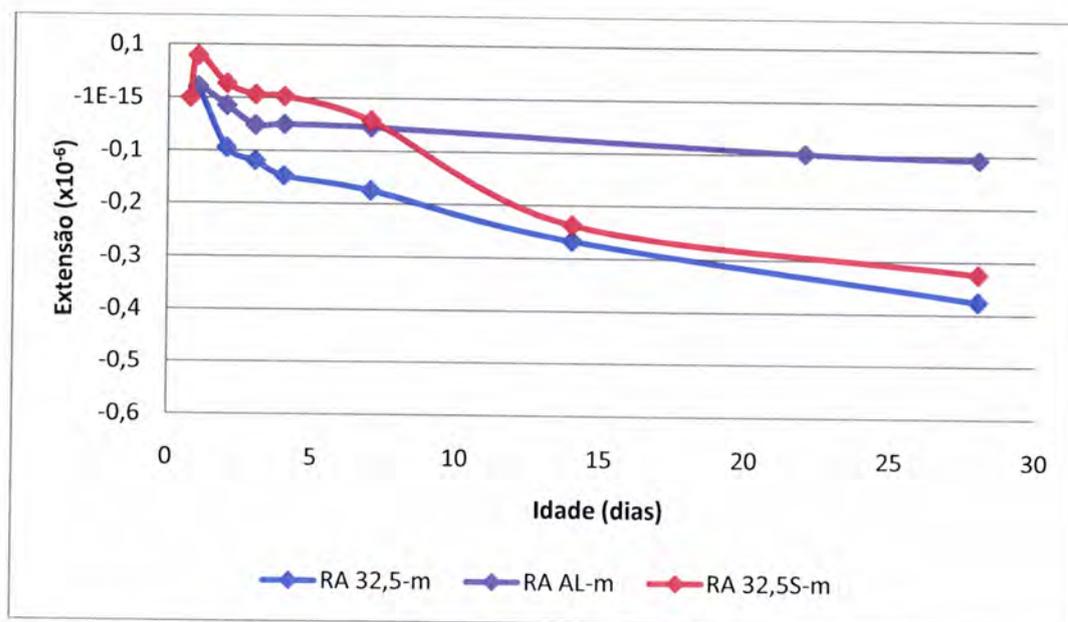


Gráfico 98 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,495, entre R 32,5, AL-eve e R 32,5 + SAP

O Gráfico 98 mostra também os valores da retracção autogénea por kg de cimento, mas com correcção do volume de agregado. Neste gráfico sobressai o efeito da água interna, mostrando que mesmo aos 28 dias os SAP têm um efeito redutor da retracção autogénea.

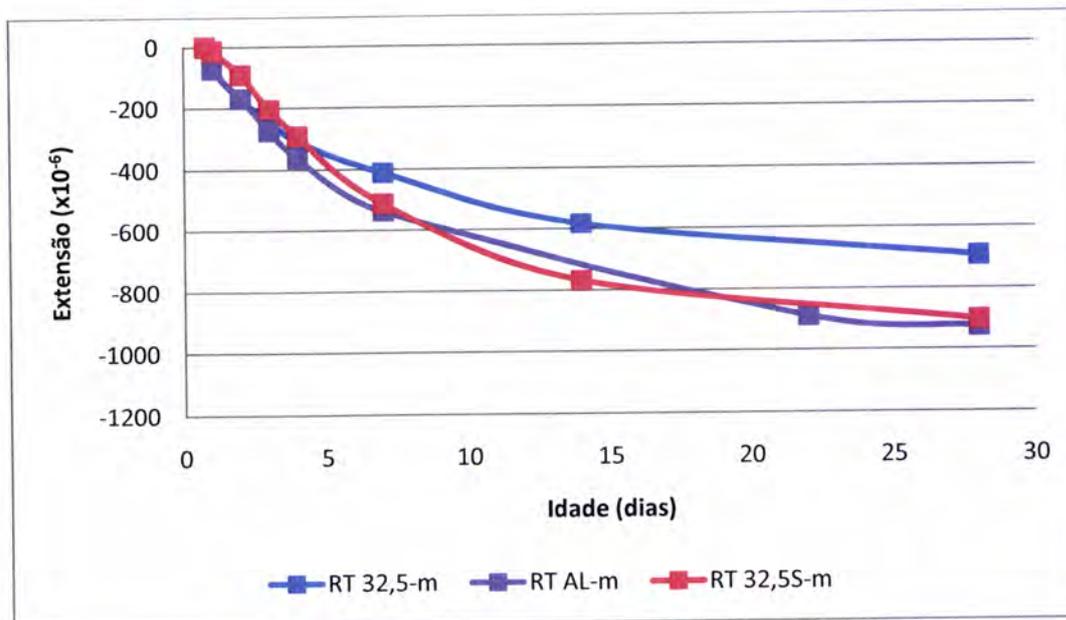


Gráfico 99 - Comparação dos resultados médios da retracção total entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP

Ao se analisar o Gráfico 99, conclui-se que as argamassas com introdutores de água têm uma retracção total superior a argamassas sem adição de introdutores de água.

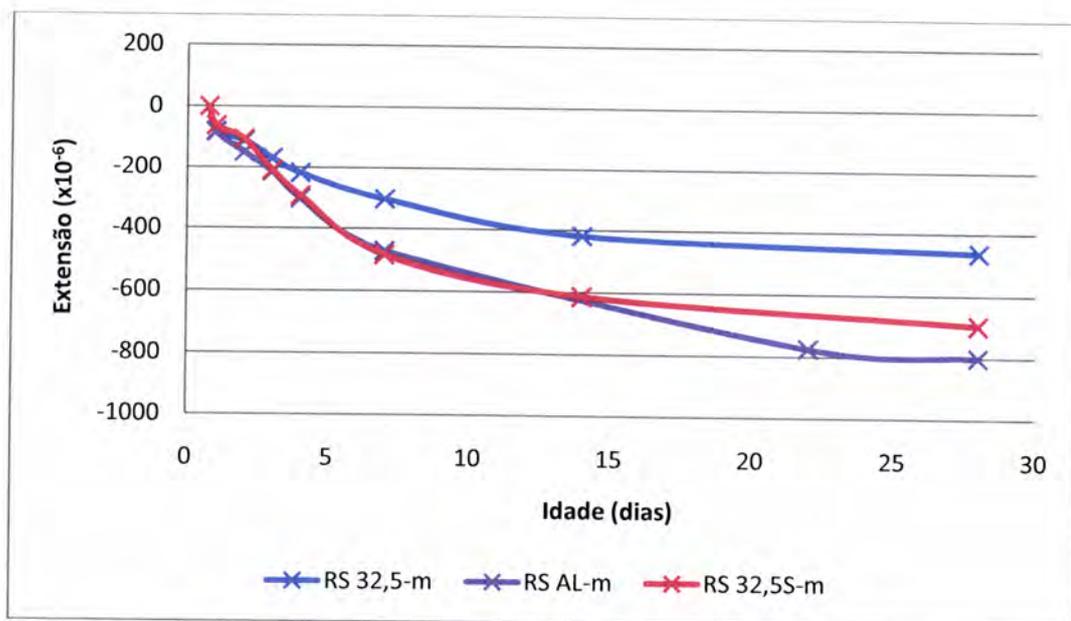


Gráfico 100 - Comparação dos valores médios da retração por secagem entre R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP

Quando se analisa a retração por secagem destas argamassas, Gráfico 100, observamos que a retração por secagem das argamassas ALeve e R 32,5 + SAP é maior que a argamassa R 32,5. A argamassa com agregado leve acaba por ter maior retração de secagem que a argamassa com SAP devido ao seu maior conteúdo de água total.

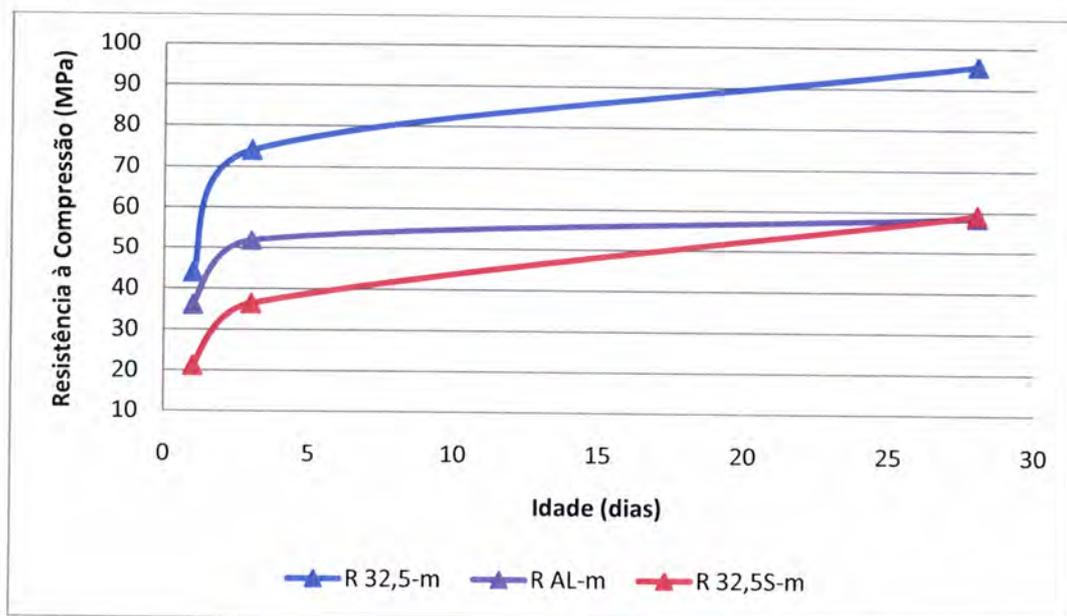


Gráfico 101 - Comparação dos valores da resistência à compressão entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP

No Gráfico 101 observa-se a evolução da resistência à compressão das argamassas em estudo e verifica-se que a adição de introdutores de água nas argamassas diminui a resistência à compressão das mesmas. Os resultados da resistência nas primeiras idades são concordantes com os gráficos anteriores, evidenciando que uma maior disponibilidade de água na argamassa com SAP, traduzida pela menor resistência. Este fenómeno é menor ao longo do tempo à medida que é consumida a água disponibilizada pelos SAP.

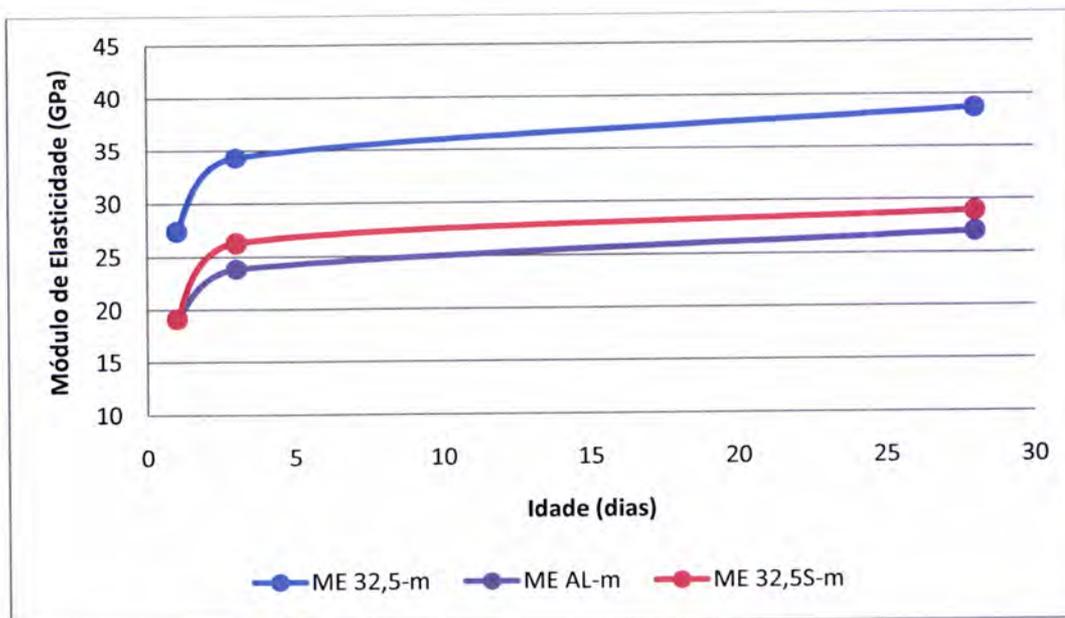


Gráfico 102 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5, ALleve e R 32,5 + SAP

Pela análise do Gráfico 102, observa-se que o módulo de elasticidade das argamassas diminui com a adição de introdutores de água, quer agregados leves ou SAP. No entanto, contrariamente ao que ocorre no ensaio de determinação da resistência à compressão, aqui o módulo de elasticidade da argamassa com SAP é superior ao módulo de elasticidade da argamassa com agregado leve. Isto deve-se à menor rigidez da parte não porosa do agregado leve, relativamente à areia natural.

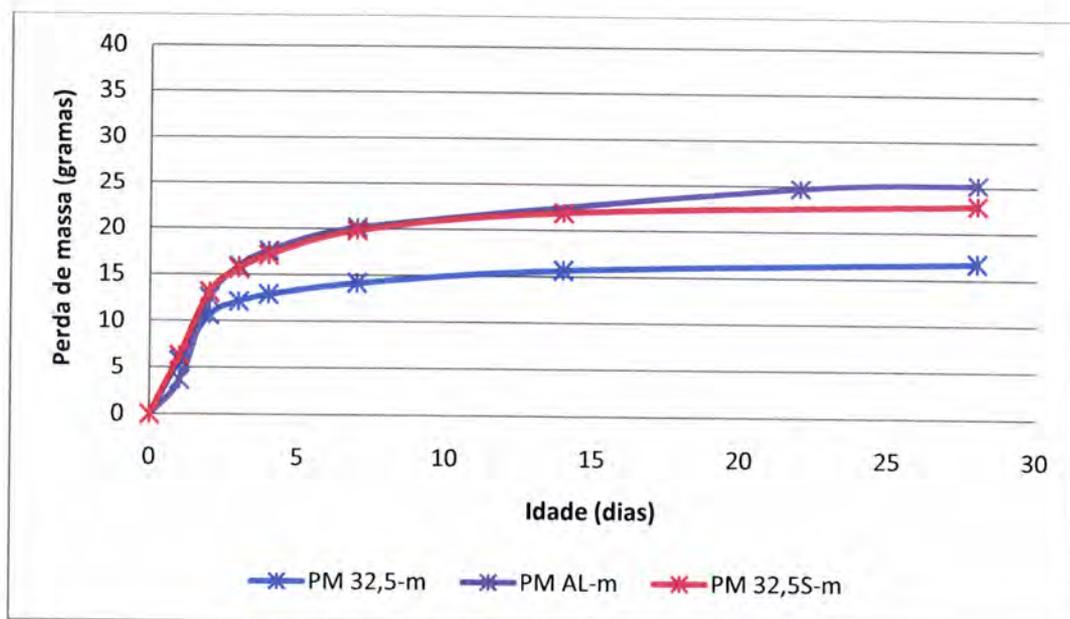


Gráfico 103 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5, ALeve e R 32,5 + SAP

São as argamassas com introdutores de água que tem maiores perdas de massa e pode-se observar isso no Gráfico 103. A maior perda de massa na argamassa com agregado leve deve-se à maior quantidade de água total.

Sintetizando, o uso de introdutores de água em argamassas causa maiores retrações totais e de secagem e a perda de massa também aumenta com estes materiais. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade das argamassas ALeve e R 32,5 + SAP é menor quando comparada com a argamassa R 32,5. Aos 28 dias, a argamassa ALeve apresenta um valor de retração autogénea claramente mais baixo que as argamassas R 32,5 e R 32,5 + SAP. Nas primeiras idades, ambos os produtos são eficazes em reduzir a retração autogénea, mas só com os SAP foi evidenciada uma clara expansão.

6.6. Referências vs argamassas com melhores resultados obtidos

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados das argamassas de referência com razão de cimento:areia 1:2, com as argamassas que obtiveram melhores resultados em termos de retração, quer autogénea quer total.

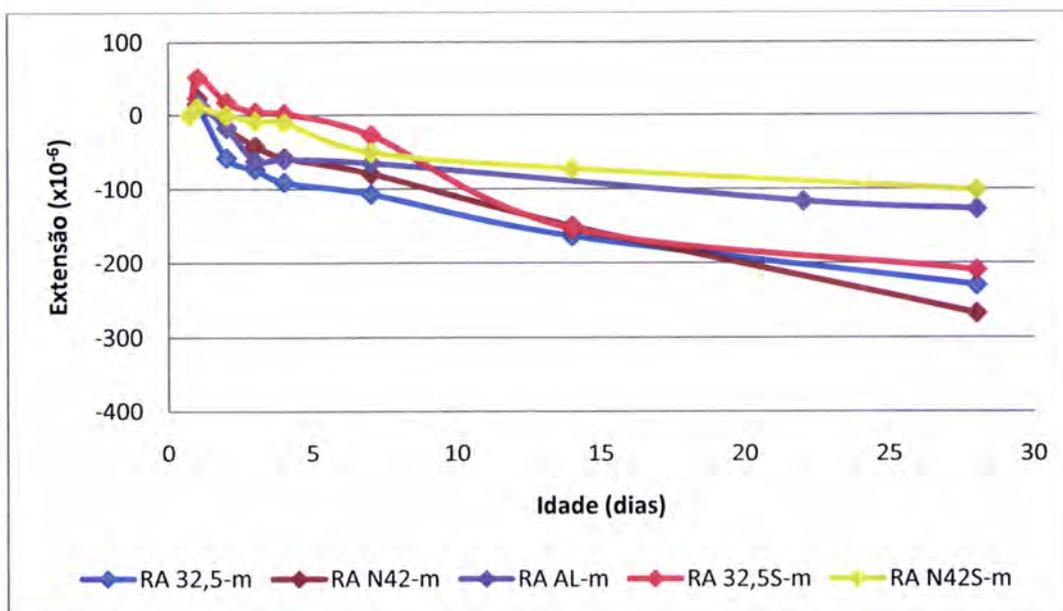


Gráfico 104 - Comparação dos valores médios da retracção autogénea entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP

Na análise do Gráfico 104 observa-se que em geral as argamassas sem introdutores de água nas suas composições, R 32,5 e RN 42, tem valores próximos e atingem valores maiores de retracção autogénea que as argamassas ALeve e RN 42 + SAP. A argamassa R 32,5 + SAP até ao dia 4 apresenta valores de expansão e a partir daí começa a retrair. Nos primeiros dias, a R 32,5 retrai mais que as outras argamassas por ter menos água, enquanto a RN 42 + SAP, por ter mais água disponível retrai menos, mas não chega a expandir. A partir do 4º dia de idade, nesta argamassa, nota-se um maior crescimento da retracção que pode estar relacionado com o início da autodessecação, por menor disponibilidade de água nas partículas de SAP, vindo então a aproximar-se os resultados desta argamassa com os da argamassa ALeve. Nesta argamassa ALeve o efeito positivo da libertação de água começa mais tarde, mas mantém-se até aos 28 dias, devido à forma como a água está armazenada e à sua maior disponibilidade. Desta forma, a argamassa com SAP, apesar de ter uma razão A/C superior, a partir dos 4 dias parece deixar de contar com um fornecimento de água tão forte como nos primeiros dias, pelo que os resultados da retracção se aproximam dos da argamassa ALeve, face à sua menor rigidez.

Comparando a argamassa RN 42 com a argamassa R 32,5 + SAP, que contém aproximadamente o mesmo volume de líquido, constata-se que a presença de SAP faz diminuir a retracção autogénea, particularmente nas primeiras idades. Esta comparação é útil, uma vez que se os resultados da retracção fossem idênticos nestas duas argamassas isso significaria que os SAP não eram eficientes, uma vez que o efeito positivo dos SAP evidenciado anteriormente seria apenas resultante do líquido presente na solução que continha o polímero e não do próprio polímero.

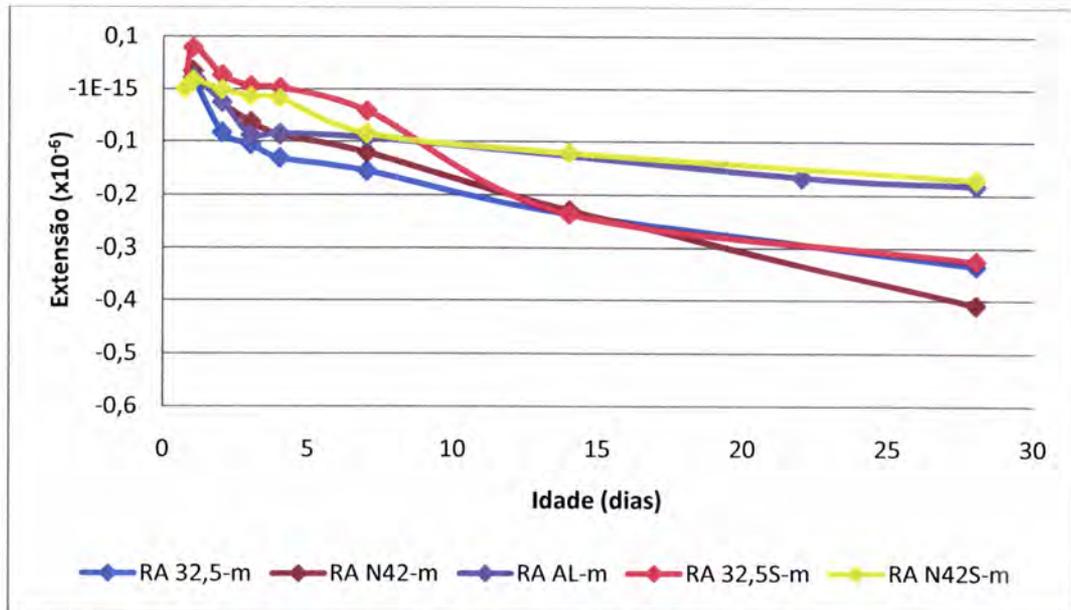


Gráfico 105 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento entre R 32,5, RN 42, AL-eve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP

No Gráfico 105, quando se avalia a retracção autogénea por kg de cimento observa-se também o que atrás já foi referido sobre o efeito dos dois introdutores de água, sendo porém mais notória a diferença de comportamento das argamassas de referência. Efectivamente, na argamassa com menor razão A/C a retracção inicial é superior, por efeito da autodessecação, mas aos 14 dias a argamassa com A/C=0,42 passa a ter valores mais elevados, devido à menor rigidez e ao eventual maior grau de hidratação. A argamassa R 32,5 + SAP atinge valores semelhantes aos da argamassa R 32,5 por ter uma estrutura mais frágil.

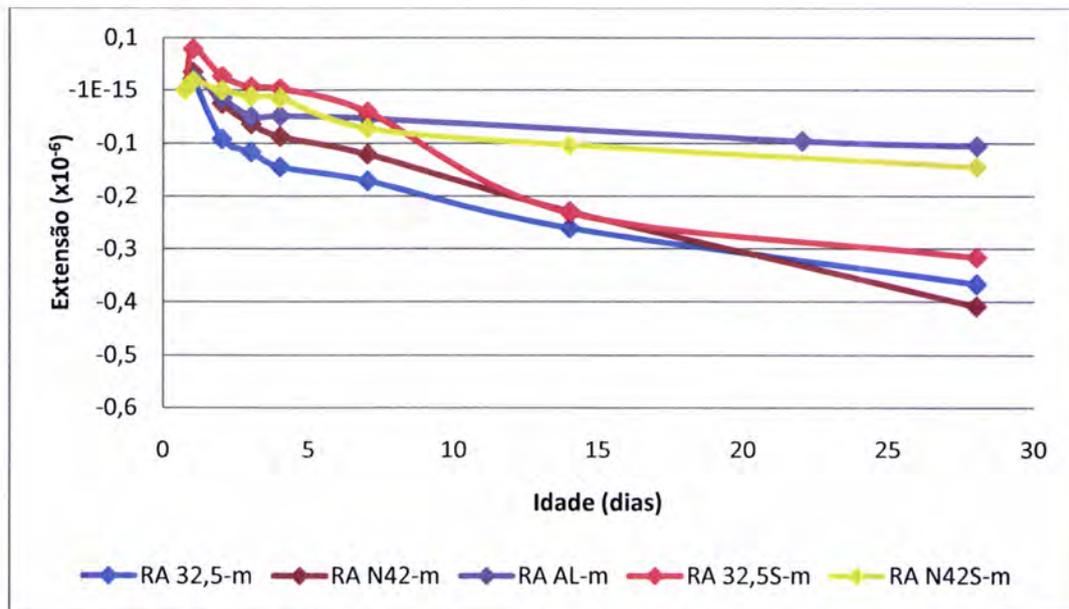


Gráfico 106 - Comparação da retracção autogénea por kg de cimento, com volume de agregado corrigido para 0,50, entre R 32,5, RN 42, ALve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP

Ao se corrigir o volume de agregado das argamassas obtém-se o Gráfico 106, que clarifica ainda mais o papel de cada factor atrás relatado, e observa-se o efeito dos SAP na argamassa R 32,5 + SAP na retracção autogénea, em comparação com a argamassa de referência R 32,5. Fica também mais evidente a eficiência dos SAP na comparação da argamassa RN 42 com a argamassa R 32,5 + SAP.

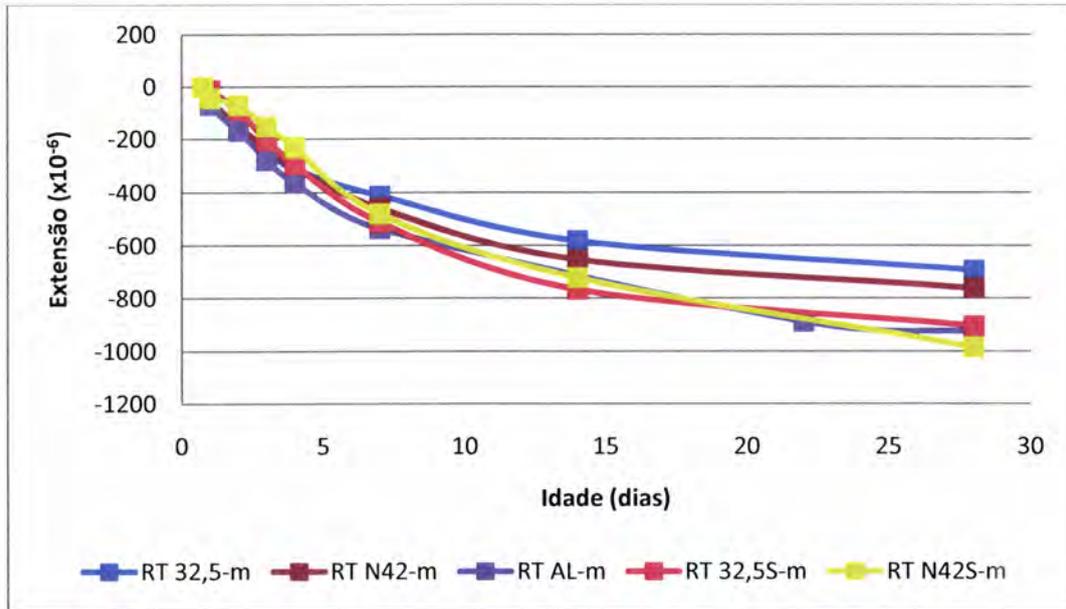


Gráfico 107 - Comparação dos valores médios da retracção total entre a R 32,5, RN 42, ALve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP

Quando se observa o gráfico com os valores da retracção total das argamassas em estudo, Gráfico 107, pode-se dizer que a retracção total aumenta com o aumento da razão A/C. Se for contabilizado o volume total de líquido, a partir dos 14 dias, inclusive, a posição relativa das curvas traduz aproximadamente esse volume. Analisando os primeiros dias de idade, pode-se verificar que a RN 42 + SAP é a argamassa que menos retrai, acabando no final do ensaio com o maior resultado de retracção, evidenciando o papel dos SAP na maior disponibilidade de água na fase inicial, mas também na maior facilidade de evaporação.

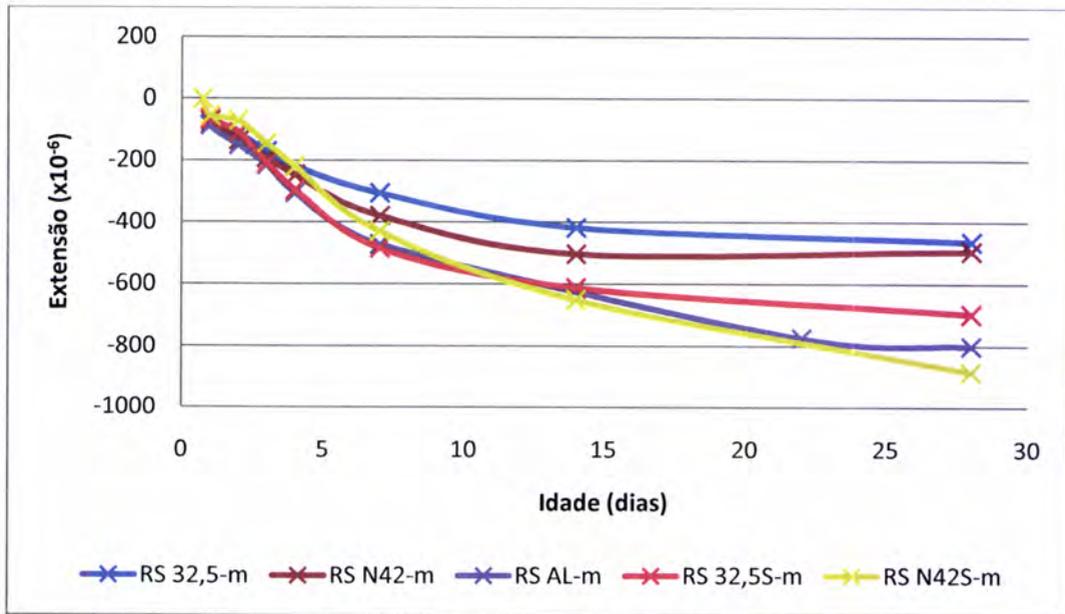


Gráfico 108 - Comparação dos valores médios da retração por secagem entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP

Ao se analisar o comportamento da retração de secagem, Gráfico 108, observa-se que as argamassas que mais retraem são as argamassas com introduzidores de água.

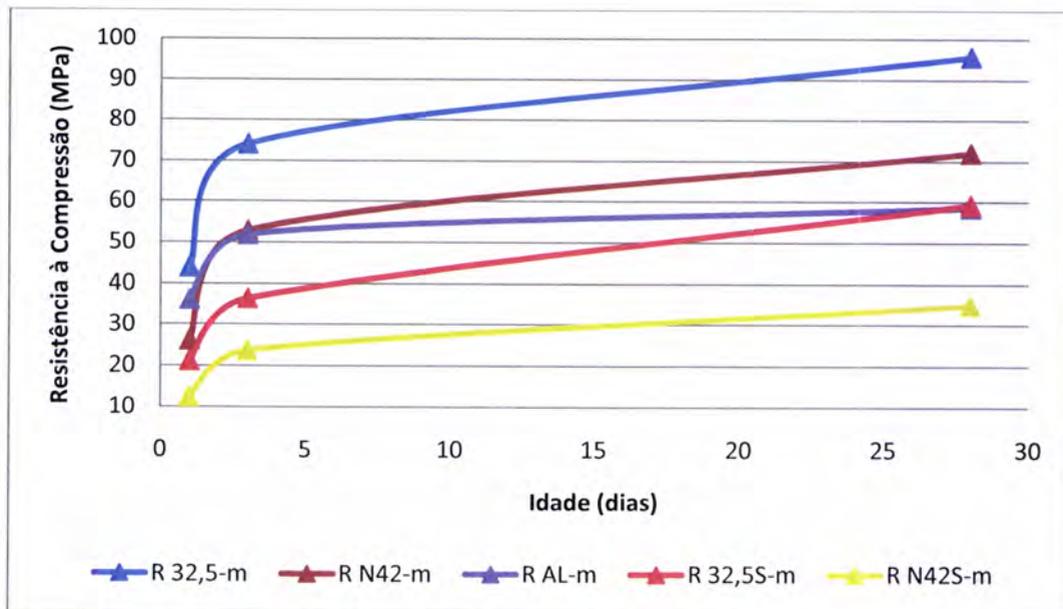


Gráfico 109 - Comparação dos valores de resistência à compressão entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP

Quando se observa os valores de resistência à compressão, Gráfico 109, observa-se que quanto mais baixa é a razão A/C maior é a resistência. Este fenómeno deve-se ao facto das estruturas com mais água terem uma estrutura mais porosa.

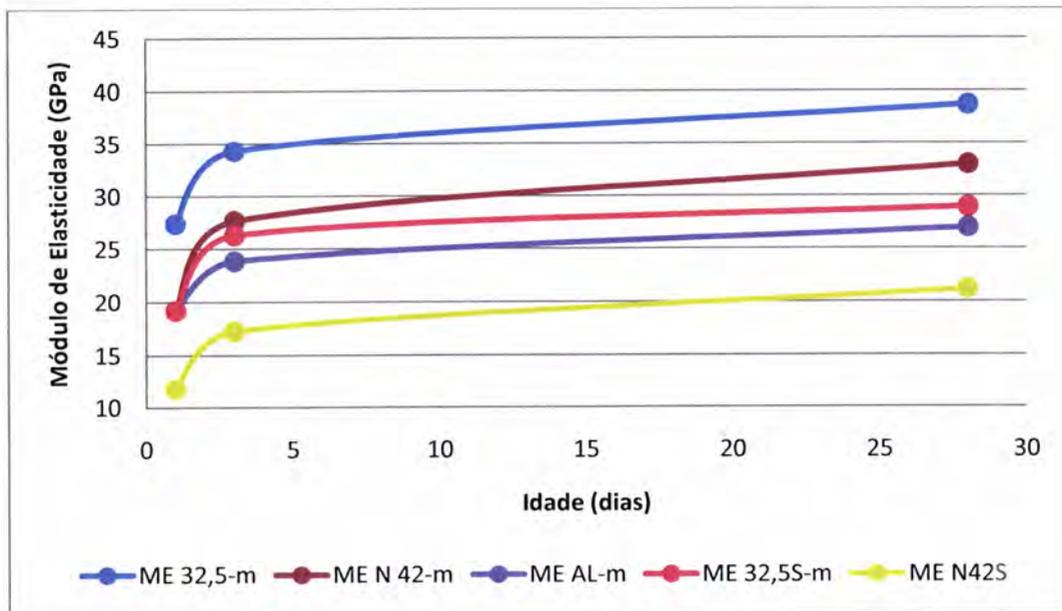


Gráfico 110 - Comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP

O Gráfico 110 refere-se à evolução do módulo de elasticidade ao longo do ensaio e observa-se que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da razão A/C e ainda diminui mais em argamassas com introdutores de água. Assim, os valores estão de acordo com o comportamento esperado face ao seu teor de água total e à natureza do agregado.

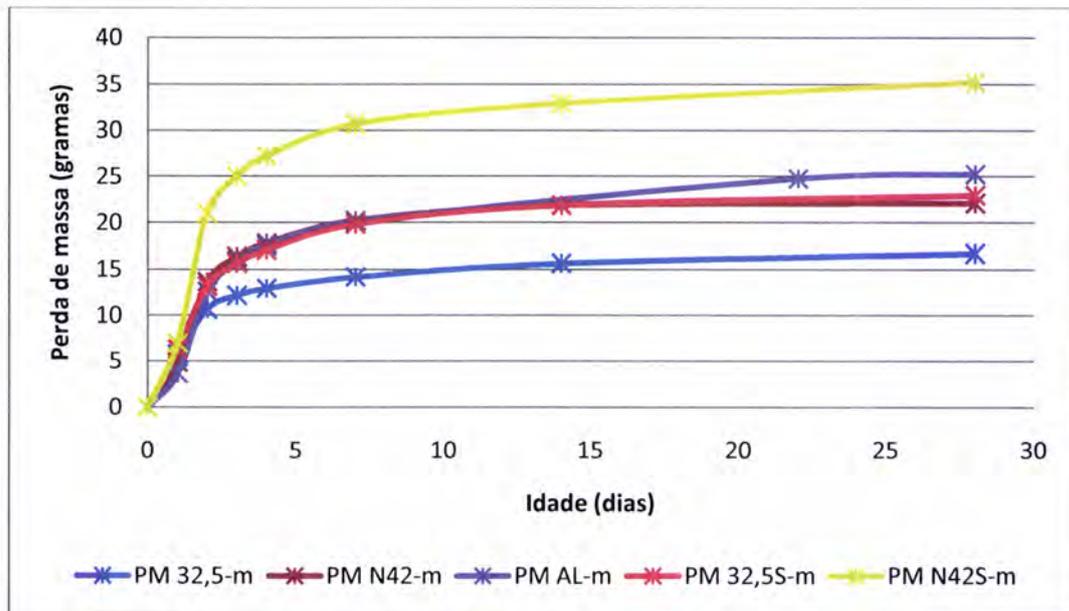


Gráfico 111 - Comparação dos resultados médios da perda de massa entre a R 32,5, RN 42, ALeve, R 32,5 + SAP e RN 42 + SAP

Relativamente à perda de massa dos provetes, pode-se dizer que ela é proporcional à razão A/C, considerando a água total presente nas argamassas, Gráfico 111. É interessante notar a semelhança da evaporação das argamassas RN 42 e R 32,5 + SAP, que contêm volume de líquido semelhante, o que mostra a importância deste parâmetro e a eficiência dos SAP na retracção autógena, sem alterar significativamente o processo de secagem. Assim, a maior retracção de secagem da argamassa com SAP, R 32,5 + SAP, comparativamente com a argamassa RN 42, deve-se principalmente à maior rigidez desta última e não ao diferente volume de evaporação, como se pode constatar pela análise das figuras anteriores.

Em suma, obtêm-se valores de retracção autógena mais baixos e de retracção total mais elevados com o uso de introdutores de água. Nas argamassas com introdutores de água a resistência diminui e o módulo de elasticidade também. A perda de massa aumenta em argamassas com maior razão A/C.

6.7. Resistência vs água/cimento mais água do adjuvante e do SAP

Neste subcapítulo analisa-se a coerência dos resultados entre a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade, excepto a argamassa ALeve por usar um diferente tipo de agregado na sua composição, e a sua relação A/C, incluindo na dosagem de água a parcela proveniente do adjuvante e do SAP.

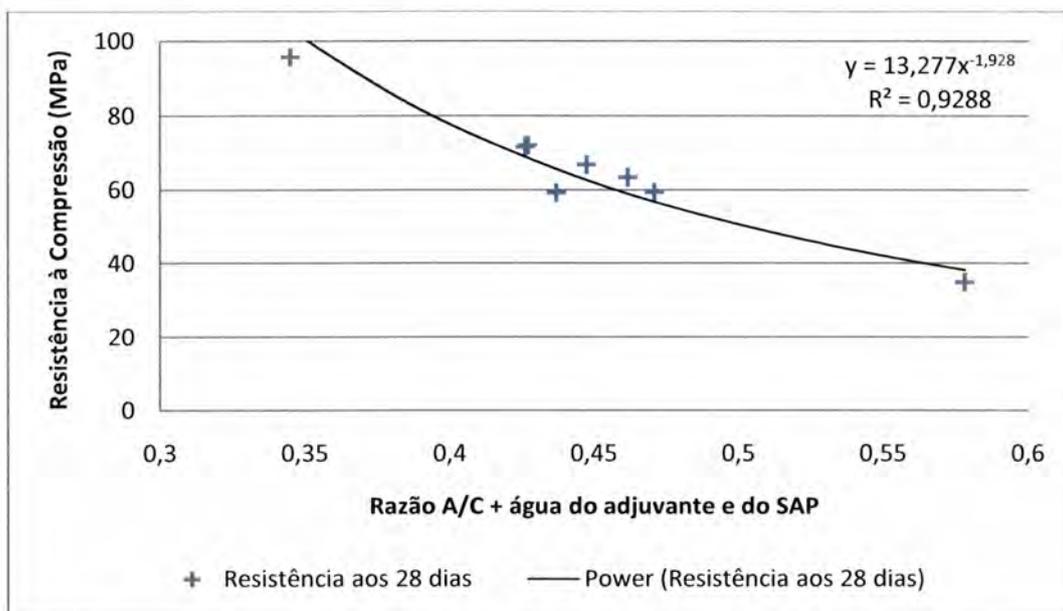


Gráfico 112 - Resistência à compressão vs razão A/C + água do adjuvante e do SAP

No Gráfico 112 pode-se observar que a resistência das argamassas apresenta a curva típica de variação com a razão A/C. Assim, pode considerar-se que a água proveniente do SAP poderá ter uma influência na resistência semelhante à água livre introduzida.

No quadro seguinte, Quadro 18, podem-se observar os valores utilizados para obtenção do gráfico anterior.

Argamassa	A/C + água adjuvante	Resistência aos 28 dias
R 32,5	0,345	95,6
RN 42	0,427	72,0
R 42	0,426	71,6
SAP 2	0,447	66,8
SAP 3,25	0,462	63,4
SAP 4,5	0,471	59,4
R 32,5 + SAP	0,437	59,2
RN 42 + SAP	0,578	34,9

Quadro 18 - Valores para avaliação da coerência dos resultados

7. Conclusões

A cura interna de materiais cimentícios com baixa razão A/C tem um papel relevante, uma vez que pode impedir a fissuração do material. O uso de introdutores de água pode estender o tempo de cura interna de argamassas e betões, resultando numa diminuição da retracção autogénea e consequentemente menor hipótese do material fissurar.

Este trabalho teve como objecto principal nove argamassas distintas, argamassas de referência e argamassas com introdutores de água, LWA e SAP. Os ensaios realizados mostraram ser muito consistentes, não só no que se refere à variação dos resultados entre provetes da mesma amassadura, mas também quando se efectuou o cruzamento de resultados de amassaduras diferentes, indicando que são uma base sólida para as análises efectuadas.

Com base neste estudo, constatou-se que os SAP fornecidos, de produção industrial por moagem de um gel e colocados posteriormente em solução aquosa, só são realmente eficazes na redução da retracção autogénea quando usados em quantidades elevadas. Nos resultados de retracção total e de secagem, o uso de SAP em maiores quantidades provocou um aumento deste tipo de retracções. O uso de SAP em pequenas quantidades não teve consequências expressivas nos resultados obtidos.

O uso de LWA em argamassas também foi eficaz na redução da retracção autogénea, em ordem de grandeza semelhante à proporcionada por SAP, mas ocorreu também aumento da retracção total, e, portanto, também da retracção de secagem.

No entanto, o uso destes introdutores de água, LWA e SAP, leva à obtenção de valores de resistência à compressão e de módulo de elasticidade significativamente mais baixos, devido principalmente à maior quantidade de água total nas argamassas.

O efeito da adição de SAP em maiores quantidades provoca uma redução significativa da trabalhabilidade.

Finalmente, importa salientar que na comparação de valores da retracção autogénea deve ser analisada a variação global da composição das misturas em análise, para se compreender o efeito de cada parâmetro, dado que a alteração da dosagem de um determinado componente afecta a dosagem dos restantes. Essa análise foi possível neste trabalho, graças à individualização da influência de cada componente, o que permitiu de forma consistente mostrar a eficiência e as limitações do uso de SAP na forma disponibilizada.

8. Sugestões para desenvolvimentos futuros

O uso de SAP em betões está ainda numa fase incipiente, que necessita de desenvolvimento industrial e trabalho experimental que evidencie mais atractividade na sua utilização do ponto de vista técnico e económico. O estudo desenvolvido debruçou-se sobre um produto em fase experimental, e submetido a uma técnica de solubilidade. O estudo de soluções que incorporem maiores concentrações de SAP pode reduzir os inconvenientes detectados neste estudo, nomeadamente a maior retração total e a menor resistência à compressão.

A utilização de LWA mostrou ser uma alternativa com potencial, pelo que o estudo de produtos de outra natureza ou com diferente granulometria é também um assunto que merece desenvolvimento.

9. Bibliografia

- [1] Jensen, O. M., Hansen, P. F., "Water-entrained cement-based materials – I. Principles and theoretical background", *Cement and Concrete Research*, 2001, 4, pp. 647-654.
- [2] Friedrich, S., "Chapter 3 – Superabsorbent polymers (SAP)", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 7p..
- [3] Filho, R. D. T., Silva, E. F., Lopes, A. N. M., "Chapter 5 – Effect of super absorbent polymers (SAP) on the workability of concrete", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 9p.
- [4] Mechtcherine, V., "Chapter 7 – Effect of SAP on the autogenous and drying shrinkage of concrete", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 19p.
- [5] Kovler, K., "Chapter 8 – Effect on the mechanical properties of concrete", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 10p.
- [6] Reinhardt, H. W., Assmann, A., "Chapter 9 – Effect of SAP on durability of concrete", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 21p.
- [7] Vieira, M. G., *Betões Auto-compactáveis: Reologia do betão no estado fresco*, Tese de doutoramento, IST-UNL, Capítulo 4, 2008.
- [8] Hobbs, DW, "Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete", *ACI Journal*, 1974; 71-30, pp. 445-450.
- [9] 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.
- [10] Bentur, A., Kovler, K., "Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems, *Materials and Structures*", Vol. 36, April 2003, pp. 183-190.
- [11] Cusson, D., Mechtcherine, V., Jensen, O. M., "Chapter 10 – Practical applications of superabsorbent polymers as a water-regulating agent in concrete and other building materials", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 6p.

[12] Jensen, O. M., Hansen, P. F., "Autogeneous deformation and RH-change in perspective", Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 12, pp. 1859-1865, 2001.

[13] Koenders, EAB, Ham, H. W. M. van der, "Mix producers and effect on reference properties", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 6p.

[14] Lura, P., Mönnig, S., "Chapter 4 – Kinetics of water migration", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 11p.

[15] Ye, G., van Breugel, K., "Chapter 6 – Effect of SAP on the Hardening Process of Binder Paste and Microstructure Development in Concrete (Porosity, morphology, connectivity)", Documento interno ainda não publicado do Technical Committee 225-SAP - Application of super absorbent polymers in concrete construction, 2009, 11p.

Normas

[16] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Pastas de cimento – Determinação da retração autogénea. Lisboa: LNEC, 2007. E 476-2007.

[17] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Betões – Determinação da retração e da expansão. Lisboa: LNEC, 1993. E 398-1993.

[18] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Ensaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica, Método de peneiração. Caparica: IPQ, 2000. NP EN 933-1:2000.

[19] IGPAI – Repartição de Normalização – Inertes para argamassas e betões – Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias. Lisboa: IGPAI, 1973. NP-954:1973.

[20] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Caparica: IPQ, 2006. NP EN 196-1:2006.

[21] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Betões – Determinação do módulo de elasticidade em compressão. Lisboa: LNEC, 1993. E 397-1993.

[22] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Cimentos – Ensaio de expansibilidade – Processo da autoclave. Lisboa: LNEC, 1979. E 229-1979.

Anexos

Anexo 1

Argamassa Referência 32,5

Data	Hora	Idade	RA 32,5 - 1				RA 32,5 - 2				RA 32,5 - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
23-Jun	12:15	18h	0,000	0,0055	614,18	8,840	8,839	623,08	8,811	8,813	623,39	8,610	8,612	
			0,011			8,838			8,815			8,614		
23-Jun	12:15	18h	0,001	0,007	616,37	8,839	8,839	626,09	8,810	8,813	626,82	8,612	8,614	
			0,013			8,838			8,815			8,615		
23-Jun	16:00	1 dia	0,001	0,0075	616,37	8,842	8,842	626,08	8,812	8,815	626,80	8,615	8,616	
			0,014			8,841			8,818			8,617		
24-Jun	16:00	2 dias	0,003	0,009	616,34	8,831	8,831	626,06	8,804	8,806	626,79	8,605	8,606	
			0,015			8,831			8,808			8,607		
25-Jun	16:10	3 dias	0,000	0,0065	616,32	8,827	8,827	626,04	8,798	8,801	626,77	8,600	8,601	
			0,013			8,826			8,803			8,602		
26-Jun	16:05	4 dias	0,001	0,007	616,3	8,824	8,824	626,03	8,796	8,798	626,76	8,598	8,599	
			0,013			8,824			8,800			8,600		
29-Jun	15:50	7 dias	0,000	0,006	616,26	8,820	8,821	625,99	8,792	8,794	626,73	8,595	8,596	
			0,012			8,821			8,796			8,596		
06-Jul	15:45	14 dias	0,001	0,007	616,17	8,812	8,812	625,90	8,784	8,786	626,65	8,588	8,588	
			0,013			8,812			8,788			8,588		
20-Jul	18:00	28 dias	0,001	0,0075	616,12	8,803	8,803	625,85	8,774	8,776	626,61	8,577	8,578	
			0,014			8,802			8,777			8,578		

Quadro A. 1 - Dados obtidos no ensaio da retração autogênea da argamassa R 32,5

Data	Hora	Idade	Padrão		RT 32,5 - 1			RT 32,5 - 2			RT 32,5 - 3		
			Leitura	Média	Massa (g)	Leitura	Média	Massa (g)	Leitura	Média	Massa (g)	Leitura	Média
23-Jun	12:15	18h	0,000	0,006	626,94	8,948	8,956	624,51	8,846	8,849	621,73	9,078	9,080
			0,012			8,964			8,851			9,082	
23-Jun	16:15	1 dia	0,000	0,006	621,02	8,937	8,945	619,17	8,834	8,837	615,74	9,069	9,071
			0,012			8,952			8,839			9,072	
24-Jun	16:15	2 dias	0,002	0,009	616,07	8,925	8,932	614,06	8,820	8,823	610,99	9,054	9,056
			0,015			8,939			8,826			9,057	
25-Jun	16:00	3 dias	0,000	0,006	614,58	8,911	8,918	612,56	8,806	8,809	609,56	9,040	9,042
			0,012			8,925			8,811			9,043	
26-Jun	16:15	4 dias	0,001	0,008	613,82	8,902	8,909	611,78	8,797	8,800	608,80	9,031	9,033
			0,014			8,916			8,802			9,034	
29-Jun	16:08	7 dias	0,000	0,007	612,56	8,884	8,892	610,51	8,780	8,783	607,57	9,013	9,015
			0,013			8,899			8,785			9,016	
06-Jul	15:45	14 dias	0,003	0,009	611,07	8,859	8,867	609,01	8,755	8,758	606,15	8,987	8,990
			0,015			8,874			8,760			8,993	
20-Jul	18:00	28 dias	0,001	0,007	610,09	8,84	8,848	607,91	8,735	8,738	605,04	8,967	8,969
			0,013			8,856			8,740			8,971	

Quadro A. 2 - Dados obtidos no ensaio da retração total da argamassa R 32,5

Idade (dias)	RA 32,5 - 1	RA 32,5 - 2	RA 32,5 - 3	RA 32,5 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	15,625	12,500	12,500	13,542
2	-59,375	-53,125	-59,375	-57,292
3	-71,875	-71,875	-75,000	-72,917
4	-90,625	-90,625	-90,625	-90,625
7	-106,250	-109,375	-106,250	-107,292
14	-165,625	-165,625	-159,375	-163,542
28	-228,125	-234,375	-228,125	-230,208

Quadro A. 3 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autógena da argamassa R 32,5

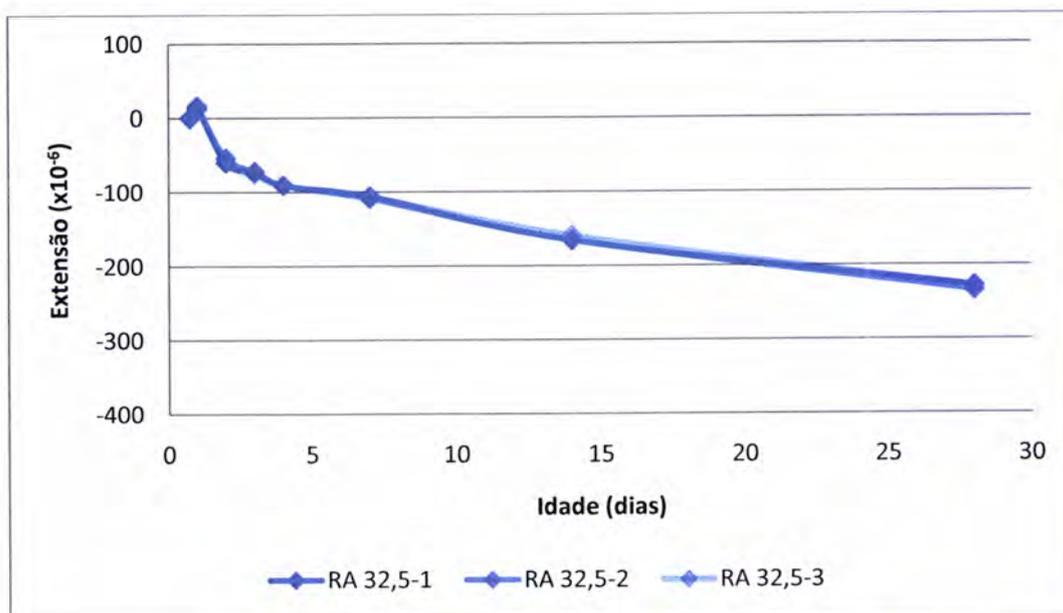


Gráfico A. 1 - Retraccção autógena da argamassa R 32,5

Idade (dias)	RT 32,5 - 1	RT 32,5 - 2	RT 32,5 - 3	RT 32,5 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-71,875	-75,000	-59,375	-68,750
2	-165,625	-175,000	-168,750	-169,792
3	-237,500	-250,000	-240,625	-242,708
4	-303,125	-315,625	-306,250	-308,333
7	-406,250	-415,625	-412,500	-411,458
14	-578,125	-587,500	-581,250	-582,292
28	-681,250	-700,000	-700,000	-693,750

Quadro A. 4 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa R 32,5

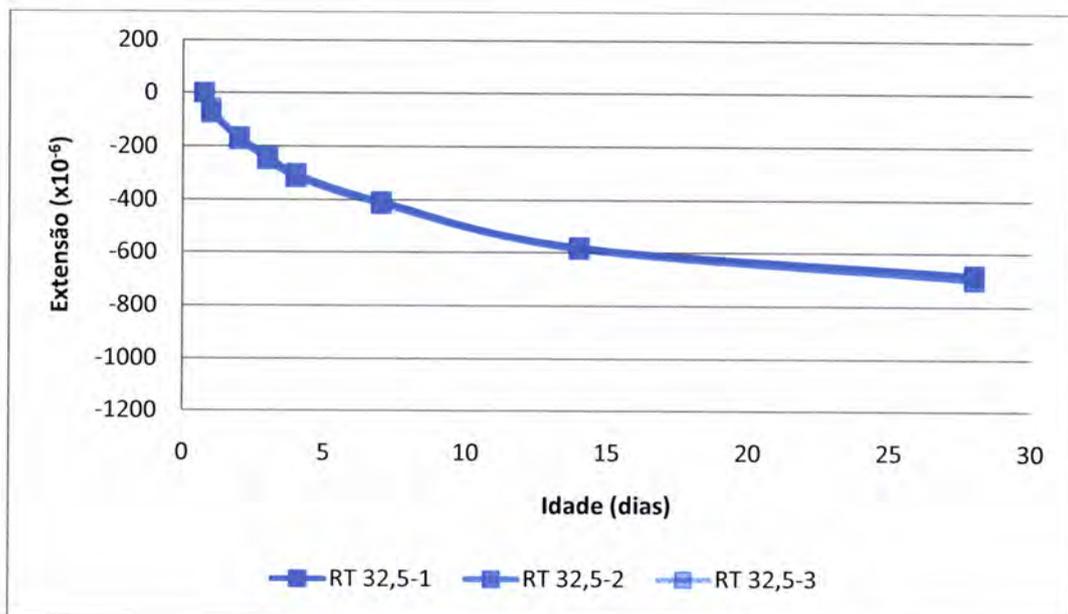


Gráfico A. 2 - Retracção total da argamassa R 32,5

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME 32,5-1	ME 32,5-2
1	6,5	44,0	27,2	27,6
3	9,0	74,1	34,8	33,8
28	10,5	95,6	39,3	38,1

Quadro A. 5 - Valores obtidos através dos ensaios mecânicos e módulo de elasticidade da argamassa R 32,5

Anexo 2

Argamassa Referência Nova 42

Data	Hora	Idade	Padrão		RA N42 - 1			RA N42 - 2			RA N42 - 3		
			Leitura	Média	Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen	
						Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média
03-Nov	10:05	18h	0,000	0,007	593,63	8,799	8,790	594,08	9,110	9,127	596,12	9,178	9,174
			0,014			8,781			9,143			9,169	
03-Nov	10:35	18h	0,002	0,009	594,34	8,795	8,787	594,77	9,107	9,124	596,98	9,175	9,172
			0,016			8,778			9,141			9,168	
03-Nov	14:30	1 dia	0,001	0,007	594,35	8,797	8,788	594,77	9,110	9,127	596,99	9,176	9,173
			0,013			8,779			9,143			9,169	
04-Nov	14:45	2 dias	0,000	0,007	594,32	8,790	8,782	594,74	9,105	9,121	596,96	9,168	9,165
			0,013			8,773			9,136			9,161	
05-Nov	14:30	3 dias	0,000	0,007	594,27	8,787	8,778	594,72	9,101	9,117	596,92	9,164	9,161
			0,014			8,769			9,133			9,158	
06-Nov	14:30	4 dias	0,002	0,009	594,24	8,786	8,777	594,68	9,100	9,117	596,88	9,162	9,160
			0,015			8,768			9,133			9,157	
09-Nov	14:20	7 dias	0,000	0,006	594,16	8,779	8,771	594,61	9,094	9,111	596,79	9,157	9,154
			0,012			8,762			9,127			9,151	
16-Nov	14:25	14 dias	0,001	0,007	564,05	8,769	8,760	594,51	9,083	9,100	596,67	9,148	9,145
			0,013			8,750			9,116			9,142	
30-Nov	14:25	28 dias	0,003	0,010	593,96	8,753	8,745	594,40	9,069	9,085	596,54	9,130	9,127
			0,017			8,736			9,101			9,124	

Quadro A. 6 - Dados obtidos no ensaio da retração autogênea da argamassa RN 42

Data	Hora	Idade	RT N42 - 1			RT N42 - 2			RT N42 - 3			
			Padrão	Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen	
					Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média
03-Nov	10:10	18h	0,000	593,00	8,924	8,922	594,11	8,896	8,977	594,16	8,945	8,952
			0,016		8,920	9,057		8,958				
03-Nov	14:30	1 dia	0,000	587,53	8,917	8,915	589,59	8,884	8,965	589,50	8,934	8,944
			0,013		8,913	9,045		8,953				
04-Nov	14:55	2 dias	0,000	578,67	8,901	8,899	580,97	8,867	8,948	580,66	8,919	8,928
			0,014		8,897	9,028		8,937				
05-Nov	14:40	3 dias	0,001	576,14	8,889	8,887	578,15	8,855	8,934	577,93	8,907	8,916
			0,014		8,885	9,013		8,925				
06-Nov	14:40	4 dias	0,002	574,75	8,880	8,878	576,63	8,844	8,923	576,57	8,898	8,907
			0,016		8,876	9,002		8,915				
09-Nov	14:30	7 dias	0,000	572,42	8,852	8,851	574,08	8,816	8,895	574,11	8,872	8,881
			0,013		8,849	8,973		8,889				
16-Nov	14:30	14 dias	0,008	570,80	8,829	8,828	572,33	8,790	8,868	572,62	8,848	8,856
			0,018		8,826	8,946		8,864				
30-Nov	14:35	28 dias	0,003	570,58	8,808	8,807	572,03	8,769	8,846	572,34	8,828	8,836
			0,016		8,806	8,923		8,844				

Quadro A. 7 - Dados obtidos no ensaio da retração total da argamassa RN 42

Idade (dias)	RA N42 - 1	RA N42 - 2	RA N42 - 3	RA N42 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	21,875	28,125	18,750	22,917
2	-15,625	-6,250	-28,125	-16,667
3	-40,625	-31,250	-53,125	-41,667
4	-56,250	-43,750	-71,875	-57,292
7	-81,250	-65,625	-90,625	-79,167
14	-156,250	-140,625	-153,125	-150,000
28	-268,750	-250,000	-284,375	-267,708

Quadro A. 8 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa RN 42

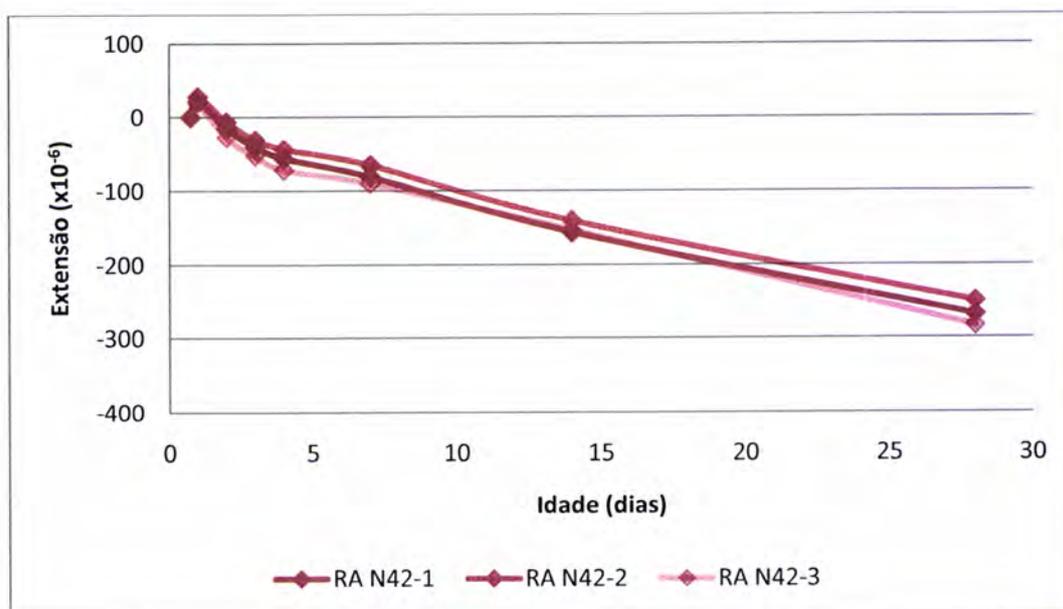


Gráfico A. 3 - Retracção autogénea da argamassa RN 42

Idade (dias)	RT N42 - 1	RT N42 - 2	RT N42 - 3	RT N42 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-34,375	-65,625	-40,625	-46,875
2	-137,500	-175,000	-140,625	-151,042
3	-215,625	-262,500	-218,750	-232,292
4	-281,250	-340,625	-287,500	-303,125
7	-437,500	-503,125	-434,375	-458,333
14	-621,875	-709,375	-628,125	-653,125
28	-728,125	-825,000	-731,250	-761,458

Quadro A. 9 - Resultados obtidos pelo cálculo da retração total da argamassa RN 42

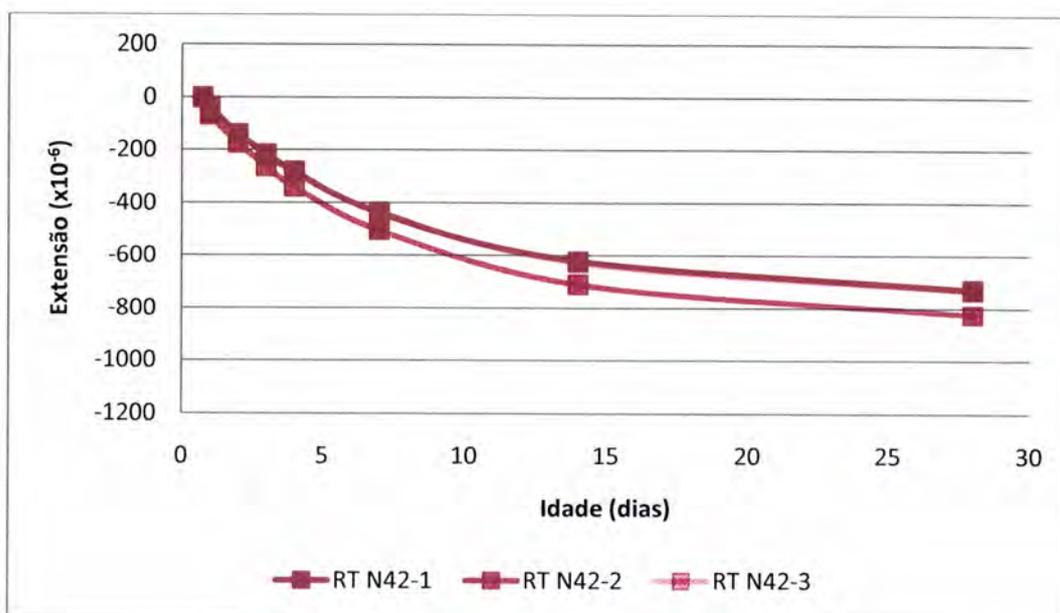


Gráfico A. 4 - Retração total da argamassa RN 42

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME N42-1	ME N42-2
1	4,6	26,2	19,2	19,2
3	7,2	52,9	27,7	27,7
28	9,2	72,0	33,9	32,1

Quadro A. 10 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa RN 42

Anexo 3

Argamassa Referência 42

Data	Hora	Idade	RA 42 - 1				RA 42 - 2				RA 42 - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
14-Jul	10:20	18h	0,002	0,0085	591,86	9,747	9,748	589,64	9,661	9,674	587,92	9,861	9,865	
			0,015			9,748			9,687			9,869		
14-Jul	11:20	18h	0,005	0,0115	592,26	9,750	9,751	589,58	9,664	9,677	588,02	9,868	9,873	
			0,018			9,752			9,690			9,877		
14-Jul	15:20	1 dia	0,005	0,0115	592,24	9,750	9,752	589,55	9,665	9,678	588,01	9,870	9,875	
			0,018			9,753			9,691			9,879		
15-Jul	15:03	2 dias	0,004	0,0105	592,22	9,743	9,745	589,53	9,657	9,670	587,98	9,862	9,867	
			0,017			9,747			9,683			9,871		
16-Jul	15:13	3 dias	0,002	0,0085	592,19	9,737	9,739	589,51	9,650	9,663	587,94	9,855	9,860	
			0,015			9,740			9,676			9,864		
17-Jul	15:10	4 dias	0,001	0,0075	592,17	9,734	9,735	589,49	9,647	9,660	587,93	9,853	9,857	
			0,014			9,736			9,673			9,861		
20-Jul	16:00	7 dias	0,001	0,0075	592,11	9,727	9,728	589,42	9,638	9,651	587,86	9,844	9,849	
			0,014			9,729			9,664			9,853		
27-Jul	15:23	14 dias	0,003	0,009	591,96	9,713	9,714	589,23	9,626	9,639	587,72	9,832	9,837	
			0,015			9,715			9,652			9,841		
10-Ago	15:00	28 dias	0,000	0,0065	591,74	9,691	9,691	589,00	9,601	9,614	587,50	9,809	9,814	
			0,013			9,691			9,627			9,818		

Quadro A. 11 - Dados obtidos no ensaio da retração autógena da argamassa R 42

Data	Hora	Idade	Padrão		RT 42 - 1			RT 42 - 2			RT 42 - 3		
			Leitura	Média	Massa (g)	Leitura	Média	Espécimen	Massa (g)	Leitura	Média	Espécimen	Massa (g)	Leitura	Média
14-Jul	10:30	18h	0,002	0,008	586,20	9,018	9,029	587,84	9,002	8,997	588,76	9,148	9,146
			0,014			9,039			8,991			9,144	
14-Jul	14:52	1 dia	0,005	0,012	580,08	9,011	9,021	582,24	8,992	8,988	582,50	9,139	9,139
			0,018			9,031			8,984			9,138	
15-Jul	14:54	2 dias	0,005	0,011	570,30	8,998	9,008	571,55	8,978	8,974	573,28	9,125	9,125
			0,017			9,017			8,970			9,124	
16-Jul	15:05	3 dias	0,003	0,010	567,58	8,981	8,991	569,07	8,963	8,959	570,56	9,108	9,108
			0,016			9,000			8,955			9,108	
17-Jul	15:15	4 dias	0,001	0,007	566,13	8,965	8,973	567,6	8,948	8,945	569,21	9,094	9,094
			0,013			8,981			8,941			9,094	
20-Jul	16:00	7 dias	0,001	0,008	563,93	8,936	8,945	565,54	8,919	8,916	567,09	9,063	9,064
			0,014			8,954			8,912			9,065	
27-Jul	15:32	14 dias	0,002	0,009	561,74	8,903	8,912	563,39	8,886	8,883	564,90	9,029	9,030
			0,015			8,920			8,879			9,030	
10-Ago	15:00	28 dias	0,001	0,007	560,16	8,872	8,881	561,81	8,855	8,852	563,45	8,999	9,000
			0,013			8,889			8,848			9,000	

Quadro A. 12 - Dados obtidos no ensaio da retração total da argamassa R 42

Idade (dias)	RA 42 - 1	RA 42 - 2	RA 42 - 3	RA 42 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	3,125	6,250	12,500	7,292
2	-31,250	-37,500	-31,250	-33,333
3	-59,375	-68,750	-62,500	-63,542
4	-75,000	-81,250	-71,875	-76,042
7	-118,750	-137,500	-125,000	-127,083
14	-215,625	-221,875	-209,375	-215,625
28	-343,750	-362,500	-337,500	-347,917

Quadro A. 13 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autógena da argamassa R 42

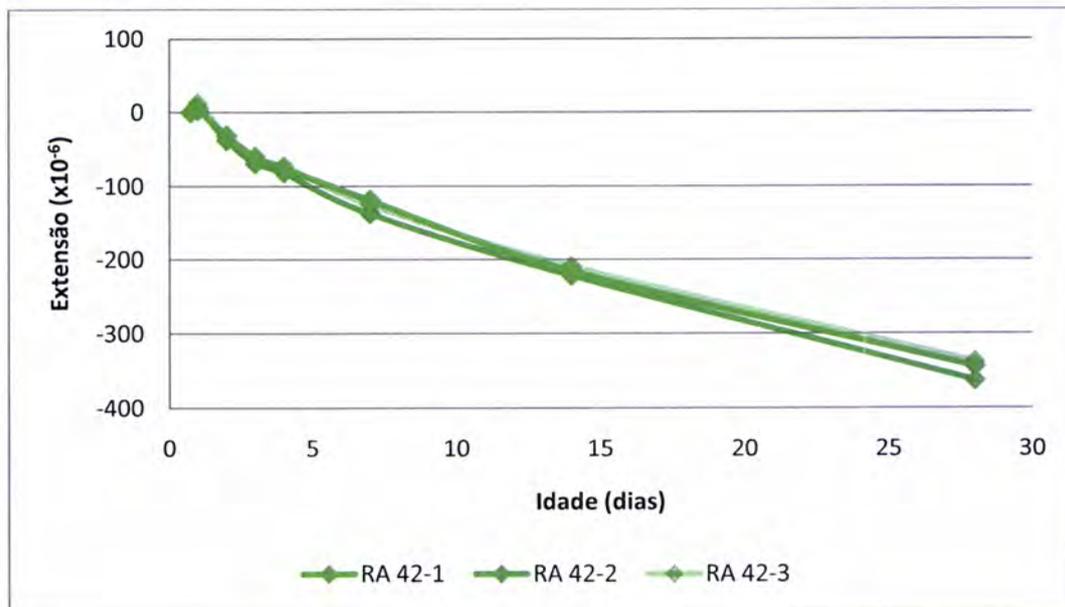


Gráfico A. 5 - Retracção autógena da argamassa R 42

Idade (dias)	RT 42 - 1	RT 42 - 2	RT 42 - 3	RT 42 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-68,750	-75,000	-68,750	-70,833
2	-150,000	-159,375	-153,125	-154,167
3	-246,875	-243,750	-246,875	-245,833
4	-340,625	-318,750	-318,750	-326,042
7	-518,750	-503,125	-509,375	-510,417
14	-734,375	-715,625	-731,250	-727,083
28	-918,750	-900,000	-909,375	-909,375

Quadro A. 14 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa R 42

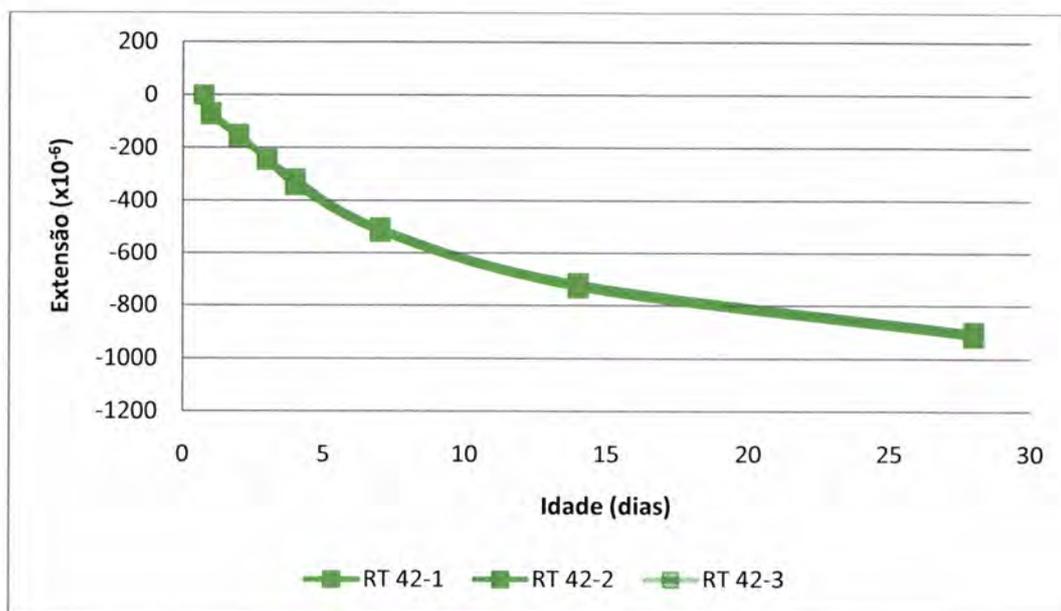


Gráfico A. 6 - Retracção total da argamassa R 42

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME 42-1	ME 42-2
1	4,0	24,8	18,0	18,7
3	6,2	45,4	27,2	26,2
28	7,9	71,6	31,2	31,4

Quadro A. 15 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa R 42

Anexo 4

Argamassa Agregado Leve

Data	Hora	Idade	Padrão		RA AL - 1		RA AL - 2		RA AL - 3				
			Leitura	Média	Massa (g)	Leitura	Média	Massa (g)	Leitura	Média	Massa (g)	Leitura	Média
04-Ago	10:15	18h	0,001	0,007	527,23	8,807	8,817	536,74	8,048	8,058	542,90	9,006	9,014
			0,013			8,827			8,068			9,021	
04-Ago	10:44	18 h	0,002	0,009	528,23	8,803	8,814	537,77	8,047	8,057	544,09	9,007	9,015
			0,015			8,824			8,067			9,022	
04-Ago	14:00	1 dia	0,002	0,009	528,22	8,806	8,817	537,77	8,049	8,059	544,10	9,010	9,017
			0,015			8,827			8,069			9,024	
05-Ago	14:05	2 dias	0,000	0,007	528,17	8,799	8,810	537,71	8,041	8,051	544,04	9,002	9,010
			0,013			8,820			8,061			9,018	
06-Ago	14:15	3 dias	0,001	0,008	528,15	8,794	8,804	537,65	8,036	8,047	543,99	8,997	9,004
			0,015			8,814			8,057			9,010	
07-Ago	14:00	4 dias	0,001	0,008	528,13	8,794	8,804	537,64	8,036	8,046	543,95	8,997	9,004
			0,014			8,814			8,056			9,010	
10-Ago	13:45	7 dias	0,000	0,007	528,04	8,793	8,803	537,52	8,034	8,045	543,87	8,995	9,002
			0,014			8,813			8,055			9,009	
25-Ago	15:52	22 dias	0,003	0,010	527,59	8,787	8,797	537,13	8,028	8,039	543,42	8,990	8,997
			0,016			8,807			8,049			9,003	
31-Ago	15:05	28 dias	0,003	0,010	527,41	8,785	8,795	536,93	8,028	8,038	543,24	8,989	8,996
			0,017			8,805			8,048			9,002	

Quadro A. 16 - Dados obtidos no ensaio da retração autogênea da argamassa ALeve

Data	Hora	Idade	RTAL - 1				RTAL - 2				RTAL - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
04-Ago	10:15	18h	0,001	0,008	534,41	8,790	8,786	544,74	8,765	8,761	533,35	8,949	8,934	
			0,014			8,782		8,756	8,919					
04-Ago	14:10	1 dia	0,001	0,008	530,94	8,780	8,776	541,41	8,754	8,750	529,23	8,937	8,922	
			0,014			8,772		8,745	8,906					
05-Ago	14:00	2 dias	0,001	0,007	522,04	8,762	8,759	532,73	8,738	8,734	520,03	8,921	8,906	
			0,013			8,755		8,730	8,891					
06-Ago	14:40	3 dias	0,000	0,007	518,73	8,745	8,742	529,38	8,721	8,717	516,76	8,903	8,888	
			0,014			8,739		8,713	8,873					
07-Ago	14:10	4 dias	0,002	0,008	517,06	8,732	8,729	527,67	8,708	8,705	515,11	8,889	8,875	
			0,014			8,726		8,701	8,860					
10-Ago	13:50	7 dias	0,002	0,009	514,45	8,704	8,701	525,06	8,680	8,677	512,56	8,863	8,848	
			0,015			8,698		8,674	8,833					
25-Ago	16:00	22 dias	0,005	0,012	509,84	8,650	8,648	520,37	8,627	8,624	508,11	8,809	8,795	
			0,019			8,645		8,621	8,781					
31-Ago	15:15	28 dias	0,004	0,011	509,30	8,643	8,641	519,83	8,618	8,616	507,61	8,803	8,790	
			0,018			8,638		8,614	8,776					

Quadro A. 17 - Dados obtidos no ensaio da retração total da argamassa ALeve

Idade (dias)	RA AL - 1	RA AL - 2	RA AL - 3	RA AL - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	18,750	12,500	15,625	15,625
2	-12,500	-25,000	-15,625	-17,708
3	-56,250	-62,500	-65,625	-61,458
4	-53,125	-62,500	-62,500	-59,375
7	-56,250	-68,750	-68,750	-64,583
22	-109,375	-121,875	-118,750	-116,667
28	-125,000	-128,125	-128,125	-127,083

Quadro A. 18 - Resultados obtidos pelo cálculo da retração autogénea da argamassa ALeve

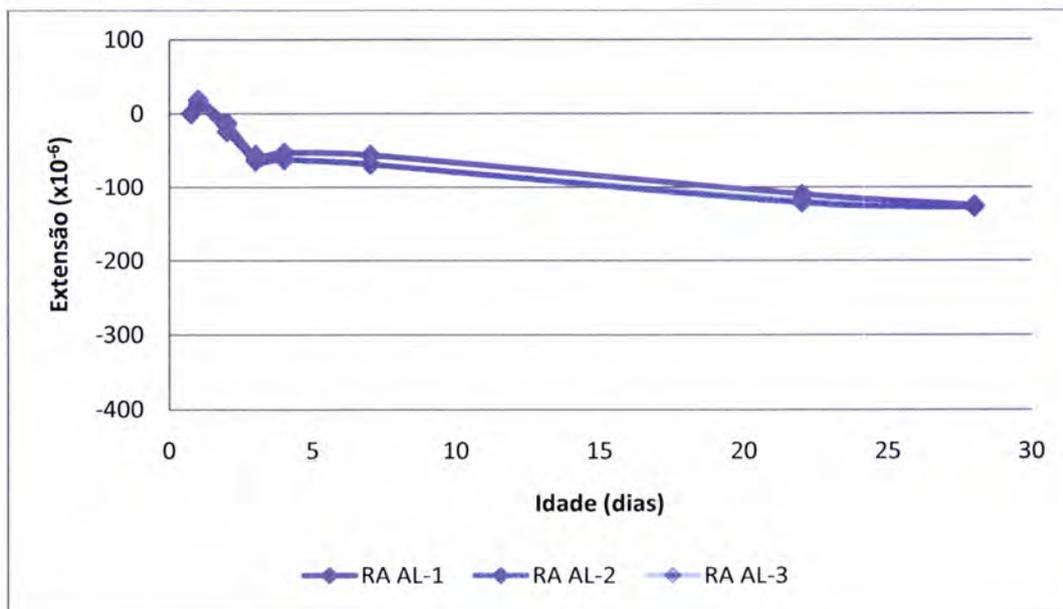


Gráfico A. 7 - Retração autogénea da argamassa ALeve

Idade (dias)	RT AL - 1	RT AL - 2	RT AL - 3	RT AL - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-62,500	-68,750	-78,125	-69,792
2	-168,750	-162,500	-171,875	-167,708
3	-271,875	-268,750	-284,375	-275,000
4	-359,375	-353,125	-375,000	-362,500
7	-537,500	-528,125	-543,750	-536,458
22	-893,750	-881,250	-896,875	-890,625
28	-931,250	-925,000	-925,000	-927,083

Quadro A. 19 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa ALeve

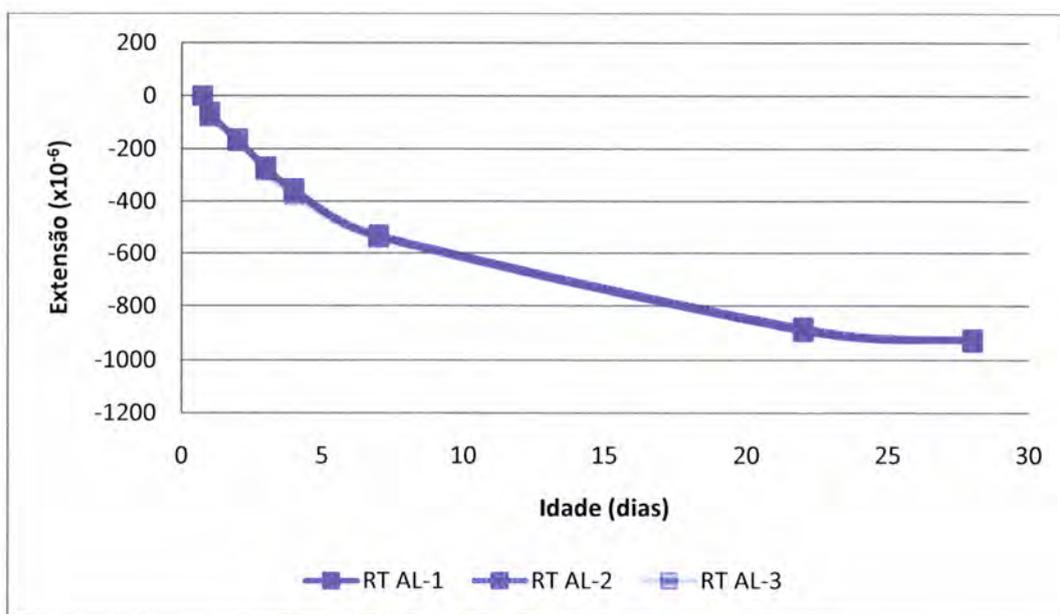


Gráfico A. 8 - Retracção total da argamassa ALeve

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME AL-1	ME AL-2
1	6,2	36,1	19,4	18,9
3	7,6	51,9	23,9	23,8
28	8,4	58,6	27,2	26,8

Quadro A. 20 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa ALeve

Anexo 5
Argamassa SAP 2

Data	Hora	Idade	RA S2 - 1				RA S2 - 2				RA S2 - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
04-Ago	10:30	18h	0,002	0,009	591,48	8,994	8,999	598,29	8,844	598,29	8,709	8,723		
			0,015			8,831		8,736						
04-Ago	10:50	18h	0,002	0,009	592,51	8,995	9,000	598,90	8,845	598,90	8,711	8,725		
			0,016			8,830		8,738						
04-Ago	16:10	1 dia	0,001	0,007	592,48	8,994	8,999	598,9	8,844	598,9	8,710	8,724		
			0,013			8,826		8,737						
05-Ago	16:05	2 dias	0,000	0,007	592,44	8,988	8,993	598,84	8,839	598,84	8,705	8,718		
			0,013			8,820		8,731						
06-Ago	16:45	3 dias	0,001	0,008	592,42	8,981	8,986	598,83	8,833	598,83	8,699	8,713		
			0,014			8,813		8,726						
07-Ago	15:00	4 dias	0,001	0,007	592,40	8,980	8,985	598,80	8,832	598,80	8,697	8,711		
			0,013			8,812		8,724						
10-Ago	16:05	7 dias	0,002	0,009	592,34	8,974	8,979	598,77	8,825	598,77	8,691	8,705		
			0,016			8,805		8,718						
25-Ago	15:41	22 dias	0,000	0,007	592,07	8,957	8,962	598,55	8,810	598,55	8,675	8,689		
			0,014			8,791		8,702						
31-Ago	15:11	28 dias	0,004	0,011	592,00	8,953	8,958	598,47	8,806	598,47	8,672	8,686		
			0,017			8,788		8,699						

Quadro A. 21 - Dados obtidos no ensaio da retração autogênea da argamassa SAP 2

Data	Hora	Idade	RT S2 -1				RT S2 -2				RT S2 -3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
04-Ago	10:35	18h	0,002	0,009	593,78	8,624	8,618	591,69	8,537	8,543	591,27	9,030	9,019	
			0,015			8,611			8,549			9,008		
04-Ago	16:00	1 dia	0,000	0,007	588,00	8,612	8,606	586,66	8,528	8,534	584,74	9,022	9,011	
			0,013			8,600			8,540			9,000		
05-Ago	16:00	2 dias	0,001	0,007	580,01	8,599	8,594	578,25	8,527	8,527	576,31	9,007	8,997	
			0,013			8,588			8,527			8,987		
06-Ago	15:35	3 dias	0,001	0,008	577,37	8,581	8,576	575,41	8,498	8,504	573,80	8,990	8,980	
			0,014			8,570			8,510			8,969		
07-Ago	15:10	4 dias	0,001	0,008	575,90	8,569	8,563	573,83	8,484	8,491	572,36	8,977	8,967	
			0,014			8,557			8,497			8,956		
10-Ago	16:13	7 dias	0,003	0,010	573,75	8,541	8,535	571,55	8,455	8,462	570,18	8,949	8,940	
			0,016			8,529			8,469			8,930		
25-Ago	15:48	22 dias	0,001	0,008	570,31	8,495	8,490	567,47	8,404	8,410	566,07	8,897	8,887	
			0,015			8,484			8,416			8,876		
31-Ago	15:19	28 dias	0,005	0,012	569,83	8,489	8,485	567,04	8,398	8,405	565,78	8,892	8,882	
			0,019			8,481			8,411			8,871		

Quadro A. 22 - Dados obtidos no ensaio da retração total da argamassa SAP 2

Idade (dias)	RA S2 - 1	RA S2 - 2	RA S2 - 3	RA S2 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	6,250	-3,125	6,250	3,125
2	-28,125	-34,375	-25,000	-29,167
3	-75,000	-81,250	-65,625	-73,958
4	-78,125	-84,375	-75,000	-79,167
7	-131,250	-140,625	-125,000	-132,292
22	-225,000	-218,750	-212,500	-218,750
28	-271,875	-262,500	-253,125	-262,500

Quadro A. 23 - Resultados obtidos pelo cálculo da retração autogénea da argamassa SAP 2

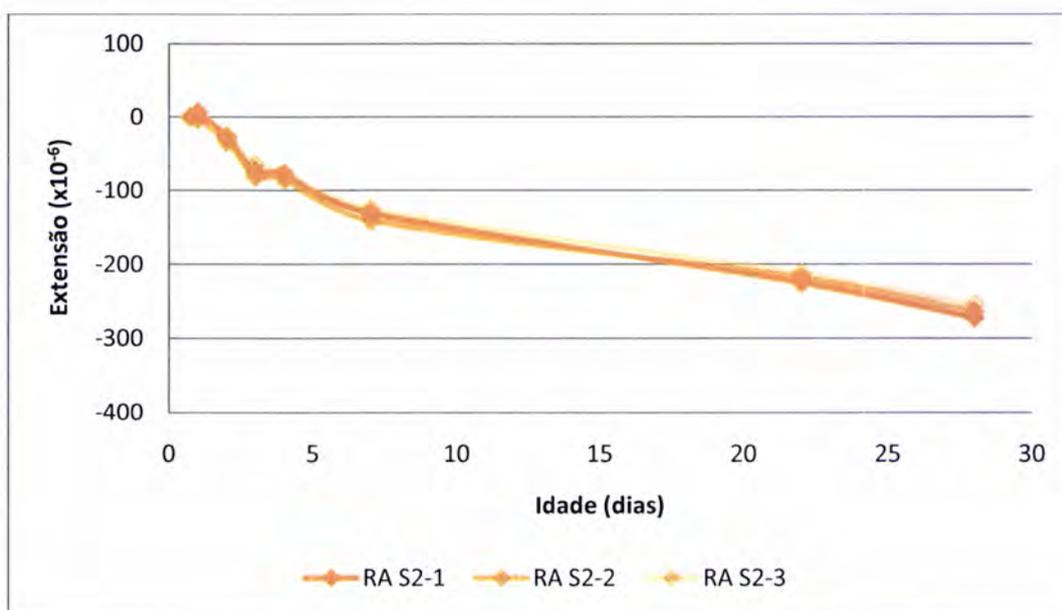


Gráfico A. 9 - Retracção autogénea da argamassa SAP 2

Idade (dias)	RT S2 - 1	RT S2 - 2	RT S2 - 3	RT S2 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-59,375	-43,750	-37,500	-46,875
2	-140,625	-90,625	-128,125	-119,792
3	-256,250	-237,500	-240,625	-244,792
4	-334,375	-321,875	-321,875	-326,042
7	-521,875	-512,500	-503,125	-512,500
22	-796,875	-828,125	-825,000	-816,667
28	-850,000	-887,500	-881,250	-872,917

Quadro A. 24 - Resultados obtidos pelo cálculo da retração total da argamassa SAP 2

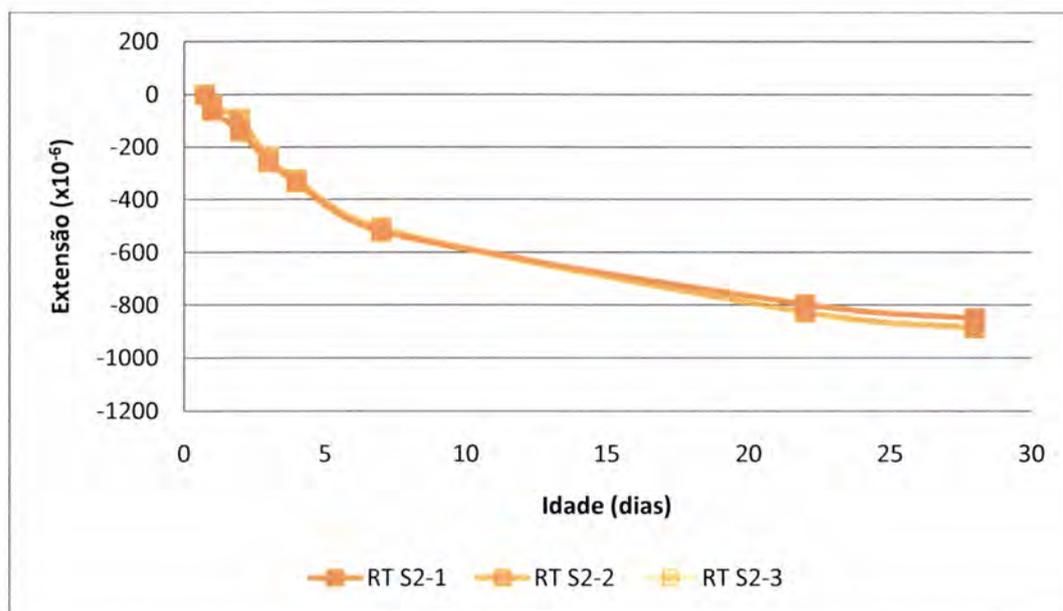


Gráfico A. 10 - Retração total da argamassa SAP 2

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME S2-1	ME S2-2
1	5,2	26,7	15,5	15,6
3	7,6	49,2	26,3	26,0
28	8,3	66,8	31,2	30,9

Quadro A. 25 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa SAP 2

Anexo 6

Argamassa SAP 3,25

Data	Hora	Idade	RA S3 - 1				RA S3 - 2				RA S3 - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
11-Ago	10:22	18h	0,004	0,011	605,28	8,762	8,765	605,87	8,785	8,764	591,59	8,964	8,962	
			0,018			8,768			8,742			8,960		
11-Ago	10:48	18h	0,007	0,014	606,42	8,750	8,757	606,87	8,768	8,754	592,40	8,960	8,958	
			0,021			8,764			8,740			8,955		
11-Ago	15:41	1 dia	0,002	0,008	606,42	8,750	8,757	606,87	8,768	8,756	592,39	8,961	8,958	
			0,014			8,764			8,743			8,955		
12-Ago	15:30	2 dias	0,000	0,007	606,38	8,742	8,750	606,84	8,761	8,748	592,36	8,952	8,950	
			0,014			8,757			8,734			8,947		
13-Ago	15:34	3 dias	0,000	0,007	606,35	8,737	8,745	606,83	8,755	8,742	592,35	8,947	8,945	
			0,013			8,752			8,729			8,943		
14-Ago	15:43	4 dias	0,000	0,007	606,35	8,734	8,742	606,81	8,752	8,739	592,32	8,943	8,942	
			0,013			8,749			8,726			8,940		
17-Ago	15:30	7 dias	0,002	0,009	606,3	8,729	8,736	606,75	8,747	8,734	592,25	8,937	8,936	
			0,015			8,743			8,721			8,934		
24-Ago	15:57	14 dias	0,000	0,008	606,21	8,717	8,725	606,67	8,736	8,723	592,13	8,925	8,924	
			0,015			8,732			8,709			8,922		
07-Set	15:22	28 dias	0,007	0,013	606,04	8,709	8,717	606,53	8,729	8,717	591,96	8,916	8,916	
			0,019			8,725			8,704			8,915		

Quadro A. 26 - Dados obtidos no ensaio da retração autogênea da argamassa SAP 3,25

Data	Hora	Idade	RT S3 - 1				RT S3 - 2				RT S3 - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
11-Ago	10:30	18h	0,012	0,019	597,07	8,818	8,815	8,728	8,712	603,07	8,750	8,748		
			0,025			8,811		8,695			8,746			
11-Ago	15:47	1 dia	0,001	0,008	590,39	8,806	8,803	8,713	8,698	594,24	8,739	8,738		
			0,015			8,799		8,683			8,736			
12-Ago	15:40	2 dias	0,001	0,008	581,34	8,793	8,790	8,700	8,685	585,49	8,724	8,723		
			0,014			8,786		8,670			8,721			
13-Ago	15:41	3 dias	0,000	0,007	578,20	8,776	8,774	8,684	8,669	582,58	8,709	8,708		
			0,014			8,771		8,654			8,706			
14-Ago	15:48	4 dias	0,001	0,008	576,29	8,761	8,759	8,667	8,653	580,76	8,693	8,692		
			0,015			8,756		8,638			8,690			
17-Ago	15:40	7 dias	0,003	0,010	573,70	8,735	8,732	8,642	8,627	578,26	8,667	8,666		
			0,016			8,729		8,611			8,664			
24-Ago	15:49	14 dias	0,001	0,008	571,37	8,705	8,702	8,611	8,596	576,02	8,637	8,636		
			0,014			8,698		8,581			8,635			
07-Ago	15:14	28 dias	0,005	0,012	569,77	8,684	8,680	8,593	8,578	574,02	8,618	8,617		
			0,018			8,676		8,562			8,616			

Quadro A. 27 - Dados obtidos no ensaio da retração total da argamassa SAP 3,25

Idade (dias)	RA S3 - 1	RA S3 - 2	RA S3 - 3	RA S3 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	37,500	46,875	40,625	41,667
2	-3,125	3,125	-6,250	-2,083
3	-31,250	-28,125	-31,250	-30,208
4	-50,000	-46,875	-53,125	-50,000
7	-96,875	-90,625	-103,125	-96,875
14	-162,500	-156,250	-171,875	-163,542
28	-243,750	-228,125	-256,250	-242,708

Quadro A. 28 - Resultados obtidos pelo cálculo da retração autogénea da argamassa SAP 3,25

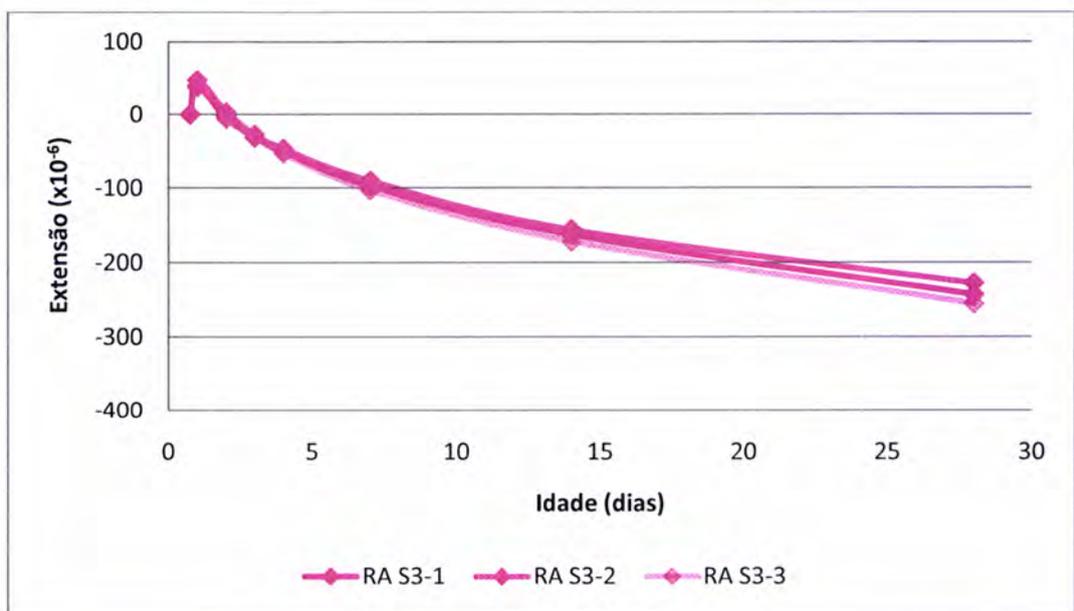


Gráfico A. 11 - Retracção autogénea da argamassa SAP 3,25

Idade (dias)	RT S3 - 1	RT S3 - 2	RT S3 - 3	RT S3 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-9,375	-18,750	0,000	-9,375
2	-87,500	-96,875	-90,625	-91,667
3	-184,375	-193,750	-181,250	-186,458
4	-284,375	-303,125	-287,500	-291,667
7	-459,375	-475,000	-459,375	-464,583
14	-637,500	-653,125	-631,250	-640,625
28	-796,875	-793,750	-775,000	-788,542

Quadro A. 29 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa SAP 3,25

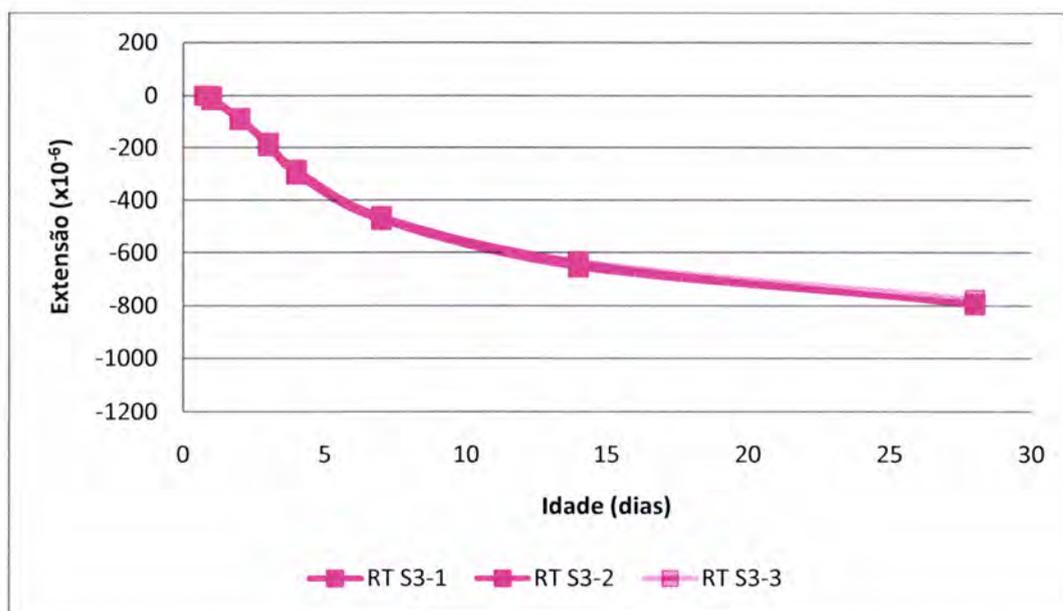


Gráfico A. 12 - Retracção total da argamassa SAP 3,25

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME S3-1	ME S3-2
1	4,4	25,0	18,7	18,2
3	6,2	45,9	26,4	26,1
28	8,5	63,4	30,4	30,9

Quadro A. 30 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa SAP 3,25

Anexo 7

Argamassa SAP 4,5

Data	Hora	Idade	Padrão		RA S4 - 1			RA S4 - 2			RA S4 - 3		
			Leitura	Média	Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen	
						Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média
08-Set	9:36	18h	0,004	0,011	583,71	9,086	9,079	585,54	8,754	8,738	589,33	8,763	8,761
			0,017			9,071			8,722			8,758	
08-Set	9:55	18h	0,006	0,013	585,16	9,085	9,078	587,02	8,754	8,739	590,61	8,764	8,761
			0,019			9,071			8,723			8,758	
08-Set	14:00	1 dia	0,002	0,009	585,16	9,084	9,077	587,01	8,754	8,739	590,60	8,765	8,762
			0,015			9,070			8,723			8,758	
09-Set	14:30	2 dias	0,001	0,008	585,11	9,079	9,072	586,95	8,747	8,732	590,56	8,759	8,755
			0,015			9,065			8,716			8,751	
10-Set	14:20	3 dias	0,004	0,011	585,07	9,076	9,069	586,90	8,743	8,729	590,50	8,755	8,752
			0,017			9,062			8,714			8,748	
11-Set	14:22	4 dias	0,001	0,008	585,03	9,073	9,066	586,87	8,740	8,725	590,46	8,752	8,748
			0,014			9,059			8,710			8,744	
14-Set	14:36	7 dias	0,002	0,009	584,92	9,065	9,058	586,76	8,733	8,718	590,35	8,744	8,740
			0,016			9,051			8,703			8,736	
21-Set	14:12	14 dias	0,004	0,011	584,73	9,056	9,049	586,59	8,724	8,710	590,13	8,734	8,730
			0,018			9,042			8,695			8,726	
06-Out	15:05	29 dias	0,004	0,011	584,24	9,039	9,033	586,18	8,708	8,694	589,71	8,718	8,714
			0,017			9,026			8,679			8,709	

Quadro A. 31 - Dados obtidos no ensaio de retração autogênea da argamassa SAP 4,5

Data	Hora	Idade	RT S4 - 1				RT S4 - 2				RT S4 - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média				
08-Set	9:42	18h	0,003	0,010	587,74	8,853	8,856	589,24	8,840	8,828	590,46	8,933	8,918	
			0,016			8,858			8,816			8,902		
08-Set	14:10	1 dia	0,003	0,009	580,56	8,841	8,844	582,65	8,830	8,818	582,73	8,922	8,907	
			0,015			8,846			8,806			8,892		
09-Set	14:24	2 dias	0,002	0,009	569,72	8,833	8,836	571,52	8,821	8,810	571,35	8,912	8,897	
			0,015			8,838			8,798			8,882		
10-Set	14:15	3 dias	0,004	0,011	566,55	8,818	8,821	568,51	8,807	8,796	568,50	8,899	8,884	
			0,017			8,824			8,784			8,868		
11-Set	14:28	4 dias	0,002	0,009	564,97	8,803	8,806	566,86	8,793	8,782	566,87	8,884	8,870	
			0,015			8,809			8,770			8,855		
14-Set	14:29	7 dias	0,002	0,009	562,71	8,774	8,777	564,43	8,763	8,752	564,77	8,857	8,842	
			0,016			8,78			8,741			8,827		
21-Set	14:07	14 dias	0,004	0,011	560,47	8,745	8,748	562,04	8,734	8,723	562,46	8,827	8,812	
			0,018			8,751			8,711			8,797		
06-Out	15:00	28 dias	0,004	0,011	558,58	8,716	8,72	560,2	8,707	8,695	560,71	8,800	8,785	
			0,017			8,724			8,683			8,770		

Quadro A. 32 - Dados obtidos no ensaio da retração total da argamassa SAP 4,5

Idade (dias)	RA S4 - 1	RA S4 - 2	RA S4 - 3	RA S4 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	18,750	25,000	28,125	23,958
2	-9,375	-15,625	-9,375	-11,458
3	-43,750	-50,000	-46,875	-46,875
4	-43,750	-53,125	-50,000	-48,958
7	-103,125	-106,250	-109,375	-106,250
14	-171,875	-171,875	-184,375	-176,042
28	-271,875	-268,750	-284,375	-275,000

Quadro A. 33 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa SAP 4,5

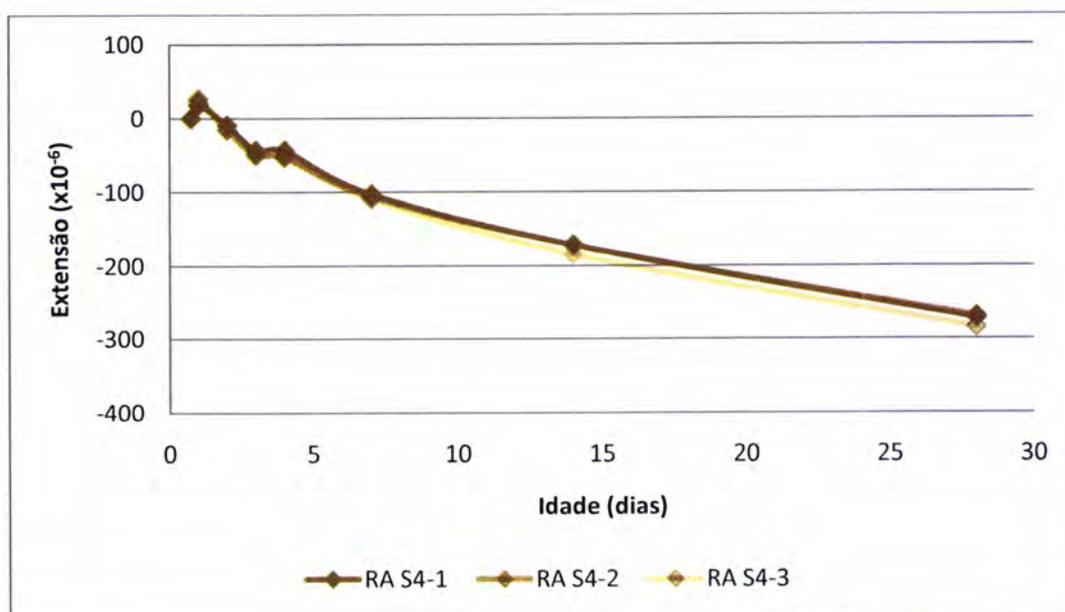


Gráfico A. 13 - Retraccção autogénea da argamassa SAP 4,5

Idade (dias)	RT S4 - 1	RT S4 - 2	RT S4 - 3	RT S4 - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-71,875	-59,375	-62,500	-64,583
2	-118,750	-109,375	-121,875	-116,667
3	-221,875	-209,375	-218,750	-216,667
4	-303,125	-284,375	-293,750	-293,750
7	-487,500	-471,875	-468,750	-476,042
14	-681,250	-668,750	-668,750	-672,917
28	-853,125	-837,500	-834,375	-841,667

Quadro A. 34 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção total da argamassa SAP 4,5

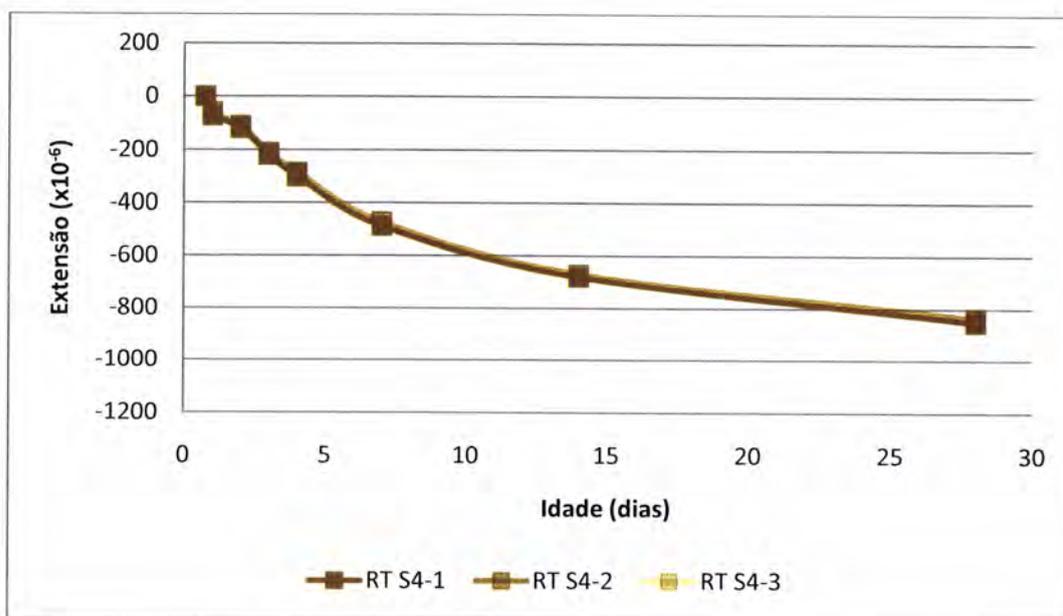


Gráfico A. 14 - Retracção total da argamassa SAP 4,5

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME S4-1	ME S4-2
1	4,3	21,0	16,8	17,1
3	6,4	41,6	23,5	23,8
28	8,1	59,4	29,6	29,6

Quadro A. 35 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa SAP 4,5

Anexo 8

Argamassa Referência 32,5 + SAP

Data	Hora	Idade	RA 32,5S - 1				RA 32,5S - 2				RA 32,5S - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
03-Nov	10:33	18h	0,001	0,008	604,74	9,432	9,445	610,43	9,491	9,486	599,40	9,262	9,265	
			0,015			9,457			9,481			9,267		
03-Nov	10:50	18h	0,001	0,008	605,83	9,433	9,446	611,28	9,491	9,486	600,00	9,261	9,264	
			0,015			9,458			9,480			9,267		
03-Nov	16:30	1 dia	0,000	0,007	605,81	9,438	9,451	611,25	9,498	9,493	599,99	9,268	9,271	
			0,013			9,464			9,488			9,274		
04-Nov	16:00	2 dias	0,000	0,007	605,77	9,434	9,447	611,22	9,493	9,487	599,94	9,263	9,267	
			0,014			9,460			9,481			9,270		
05-Nov	16:00	3 dias	0,000	0,007	605,7	9,431	9,444	611,17	9,490	9,485	599,90	9,262	9,266	
			0,014			9,457			9,479			9,269		
06-Nov	15:40	4 dias	0,001	0,008	605,66	9,432	9,445	611,12	9,490	9,485	599,85	9,263	9,266	
			0,014			9,457			9,479			9,268		
09-Nov	16:00	7 dias	0,001	0,008	605,52	9,428	9,441	611,03	9,485	9,480	599,74	9,259	9,262	
			0,015			9,453			9,475			9,264		
16-Nov	16:00	14 dias	0,004	0,010	605,39	9,409	9,423	610,88	9,468	9,463	599,61	9,239	9,242	
			0,016			9,437			9,457			9,245		
30-Nov	15:55	28 dias	0,004	0,010	605,26	9,400	9,413	610,74	9,459	9,454	599,47	9,231	9,234	
			0,016			9,426			9,448			9,237		

Quadro A. 36 - Dados obtidos no ensaio da retração autogênea da argamassa R 32,5 + SAP

Data	Hora	Idade	RT 32,5S - 1			RT 32,5S - 2			RT 32,5S - 3				
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen	
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média			
03-Nov	10:44	18h	0,002	0,009	588,92	8,894	8,881	590,76	9,014	9,009	590,67	9,215	9,152
			0,016			8,868			9,004			9,088	
03-Nov	16:30	1 dia	0,000	0,007	583,57	8,893	8,878	584,3	9,011	9,005	583,54	9,208	9,146
			0,013			8,862			8,998			9,084	
04-Nov	16:10	2 dias	0,000	0,007	576,11	8,880	8,867	577,92	8,998	8,992	576,82	9,193	9,133
			0,013			8,853			8,986			9,072	
05-Nov	16:05	3 dias	0,000	0,007	573,63	8,862	8,850	575,5	8,981	8,975	574,20	9,173	9,113
			0,014			8,837			8,969			9,053	
06-Nov	15:45	4 dias	0,001	0,008	572,24	8,850	8,838	574,05	8,968	8,962	572,78	9,158	9,099
			0,015			8,825			8,956			9,040	
09-Nov	16:10	7 dias	0,001	0,008	569,58	8,816	8,803	571,22	8,932	8,926	570,09	9,120	9,063
			0,014			8,790			8,920			9,005	
16-Nov	16:05	14 dias	0,002	0,009	567,48	8,776	8,764	569,27	8,894	8,888	567,92	9,080	9,023
			0,016			8,751			8,881			8,965	
30-Nov	16:00	28 dias	0,002	0,009	566,39	8,754	8,741	568,11	8,871	8,865	566,96	9,057	9,000
			0,015			8,727			8,859			8,943	

Quadro A. 37 - Dados obtidos no ensaio da retração total da argamassa R 32,5 + SAP

Idade (dias)	RA 32,5S - 1	RA 32,5S - 2	RA 32,5S - 3	RA 32,5S - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	43,750	56,250	53,125	51,042
2	15,625	15,625	21,875	17,708
3	-3,125	0,000	15,625	4,167
4	-3,125	-3,125	12,500	2,083
7	-31,250	-34,375	-15,625	-27,083
14	-153,125	-156,250	-150,000	-153,125
28	-215,625	-212,500	-200,000	-209,375

Quadro A. 38 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autógena da argamassa R 32,5 + SAP

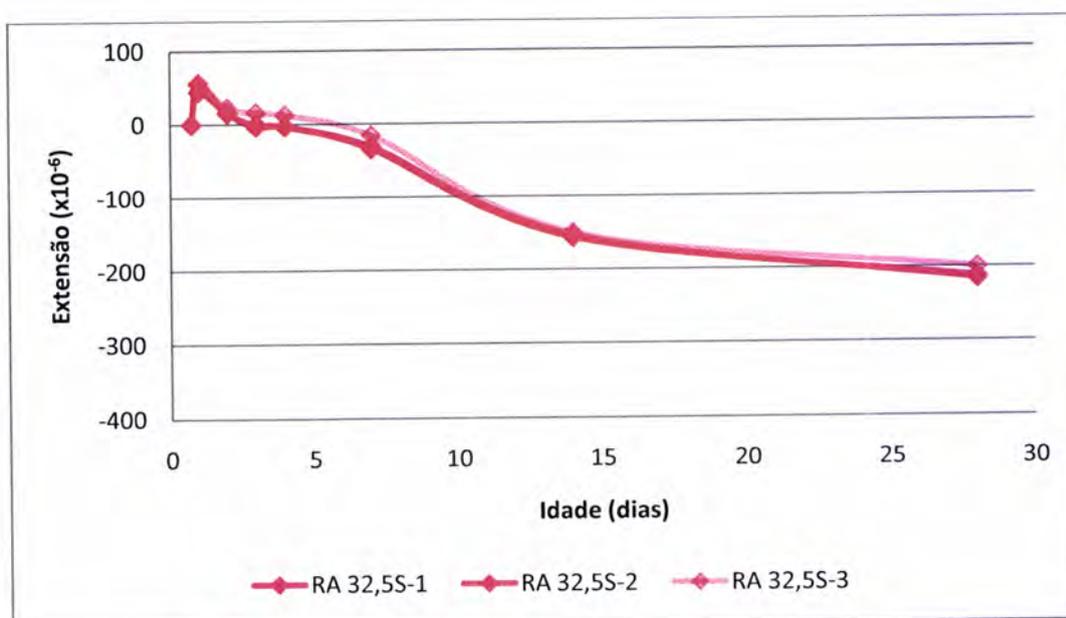


Gráfico A. 15 - Retracção autógena da argamassa R 32,5 + SAP

Idade (dias)	RT 32,5S - 1	RT 32,5S - 2	RT 32,5S - 3	RT 32,5S - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-6,250	-12,500	-18,750	-12,500
2	-75,000	-90,625	-103,125	-89,583
3	-184,375	-200,000	-228,125	-204,167
4	-265,625	-287,500	-321,875	-291,667
7	-478,125	-509,375	-546,875	-511,458
14	-734,375	-759,375	-806,250	-766,667
28	-875,000	-896,875	-943,750	-905,208

Quadro A. 39 - Resultados obtidos pelo cálculo da retração total da argamassa R 32,5 + SAP

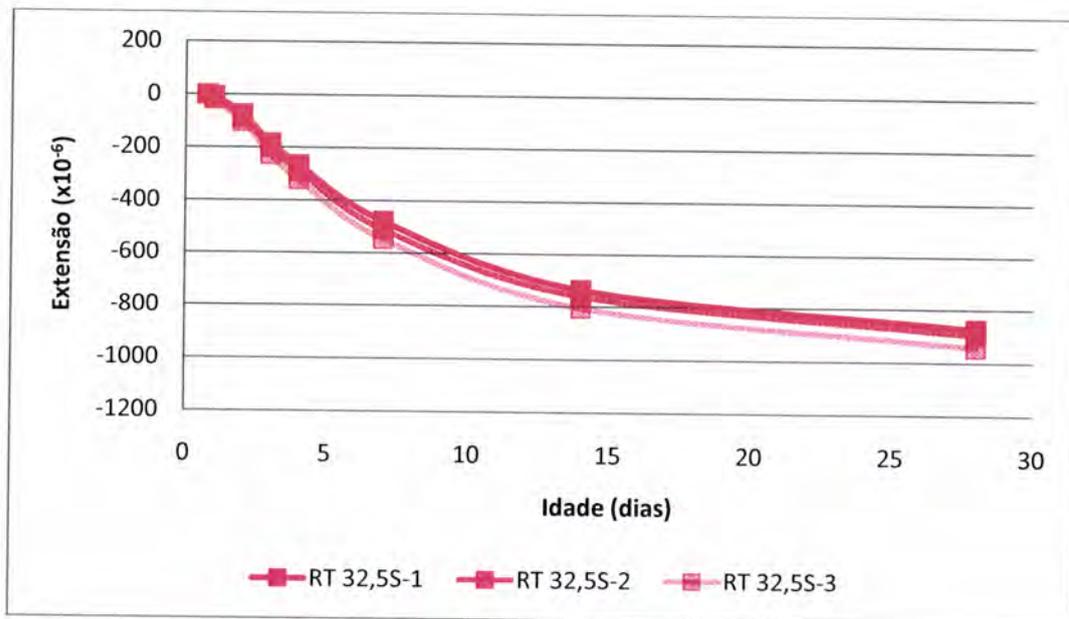


Gráfico A. 16 - Retração total da argamassa R 32,5 + SAP

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME 32,5S-1	ME 32,5S-2
1	4,2	21,2	18,7	19,6
3	6,3	36,4	25,7	26,9
28	7,2	59,2	28,6	29,3

Quadro A. 40 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa R 32,5 + SAP

Anexo 9

Argamassa Referência Nova 42 + SAP

Data	Hora	Idade	RA N42S - 1				RA N42S - 2				RA N42S - 3			
			Padrão		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		
			Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média	
10-Nov	9:40	18h	0,001	0,008	570,4	8,965	8,963	567,50	8,689	8,670	568,14	8,704	8,700	
			0,014			8,960			8,651			8,695		
10-Nov	10:10	18h	0,003	0,009	570,84	8,965	8,963	567,96	8,688	8,670	568,49	8,703	8,698	
			0,015			8,960			8,651			8,693		
10-Nov	14:50	1 dia	0,002	0,009	570,84	8,965	8,963	567,95	8,689	8,671	568,48	8,705	8,701	
			0,015			8,960			8,652			8,696		
11-Nov	15:50	2 dias	0,001	0,009	570,82	8,964	8,962	567,92	8,688	8,669	568,45	8,702	8,698	
			0,016			8,959			8,650			8,694		
12-Nov	14:55	3 dias	0,003	0,009	570,79	8,963	8,961	567,89	8,686	8,668	568,42	8,701	8,697	
			0,015			8,959			8,650			8,693		
13-Nov	14:55	4 dias	0,001	0,007	570,76	8,961	8,958	567,87	8,685	8,667	568,38	8,699	8,695	
			0,013			8,955			8,648			8,690		
16-Nov	14:50	7 dias	0,005	0,012	570,68	8,959	8,957	567,76	8,683	8,665	568,29	8,697	8,693	
			0,018			8,954			8,646			8,688		
23-Nov	14:50	14 dias	0,003	0,010	570,5	8,952	8,951	567,58	8,678	8,660	568,11	8,691	8,687	
			0,016			8,949			8,641			8,683		
07-Dez	16:10	28 dias	0,005	0,012	570,15	8,950	8,949	567,18	8,676	8,657	567,68	8,688	8,684	
			0,018			8,947			8,638			8,679		

Quadro A. 41 - Dados obtidos pelo cálculo da retração autógena da argamassa RN 42 + SAP

Data	Hora	Idade	Padrão		RT N42S - 1			RT N42S - 2			RT N42S - 3		
			Leitura	Média	Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen		Massa (g)	Espécimen	
						Leitura	Média		Leitura	Média		Leitura	Média
10-Nov	9:45	18h	0,001	0,008	569,62	9,032	9,032	569,5	9,244	9,244	563,39	9,090	9,085
			0,014			9,032			9,244			9,079	
10-Nov	15:00	1 dia	0,001	0,008	562,60	9,025	9,025	562,35	9,237	9,237	556,62	9,085	9,080
			0,015			9,024			9,237			9,075	
11-Nov	15:00	2 dias	0,003	0,009	548,05	9,021	9,021	548,75	9,233	9,234	542,65	9,083	9,078
			0,015			9,021			9,234			9,072	
12-Nov	15:05	3 dias	0,002	0,008	543,80	9,005	9,006	544,87	9,219	9,220	538,76	9,069	9,064
			0,014			9,007			9,220			9,058	
13-Nov	15:00	4 dias	0,000	0,007	541,52	8,990	8,991	542,65	9,206	9,207	536,51	9,056	9,051
			0,013			8,991			9,207			9,045	
16-Nov	15:00	7 dias	0,004	0,011	538,14	8,952	8,953	539,25	9,170	9,171	533,10	9,020	9,015
			0,017			8,954			9,172			9,010	
23-Nov	15:05	14 dias	0,003	0,010	536,14	8,913	8,914	536,86	9,128	9,130	530,81	8,981	8,976
			0,016			8,915			9,131			8,971	
07-Dez	16:15	28 dias	0,004	0,011	533,89	8,873	8,874	534,45	9,087	9,088	528,46	8,941	8,936
			0,017			8,874			9,088			8,930	

Quadro A. 42 - Resultados obtidos pelo cálculo da retração total da argamassa RN 42 + SAP

Idade (dias)	RA N42S - 1	RA N42S - 2	RA N42S - 3	RA N42S - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	3,125	9,375	18,750	10,417
2	-3,125	0,000	3,125	0,000
3	-9,375	-9,375	-6,250	-8,333
4	-15,625	-6,250	-9,375	-10,417
7	-53,125	-46,875	-50,000	-50,000
14	-78,125	-65,625	-71,875	-71,875
28	-103,125	-93,750	-106,250	-101,042

Quadro A. 43 - Resultados obtidos pelo cálculo da retracção autogénea da argamassa RN 42 + SAP

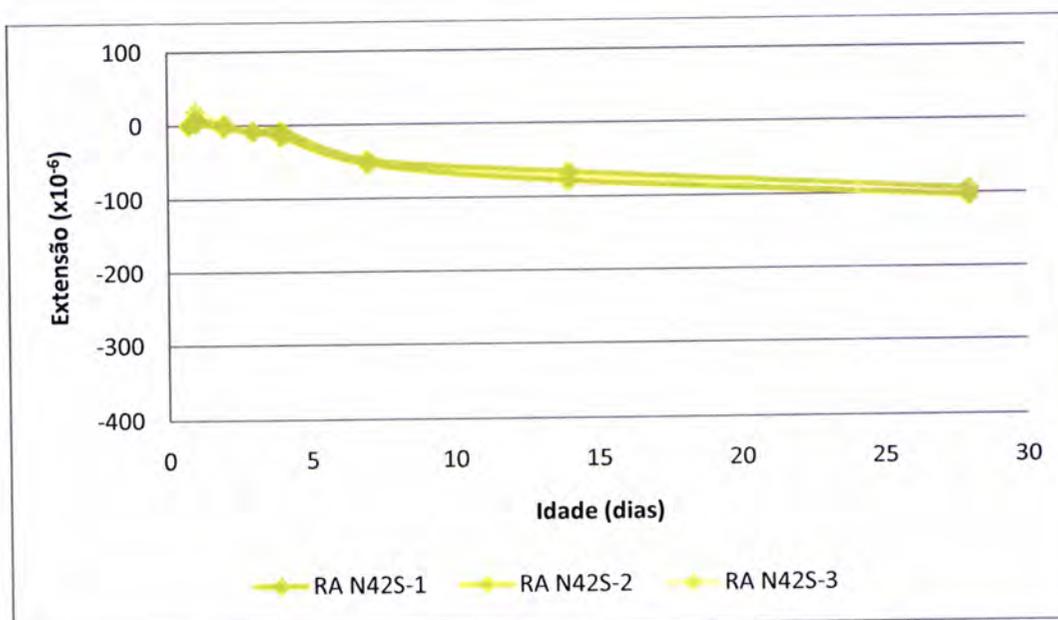


Gráfico A. 17- Retracção autogénea da argamassa RN 42 + SAP

Idade (dias)	RT N42S - 1	RT N42S - 2	RT N42S - 3	RT N42S - m
0,75	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-50,000	-46,875	-31,250	-42,708
2	-78,125	-75,000	-53,125	-68,750
3	-165,625	-156,250	-134,375	-152,083
4	-253,125	-228,125	-206,250	-229,167
7	-512,500	-475,000	-453,125	-480,208
14	-750,000	-728,125	-690,625	-722,917
28	-1009,375	-996,875	-950,000	-985,417

Quadro A. 44 - Resultados obtidos pelo cálculo da retração total da argamassa RN 42 + SAP

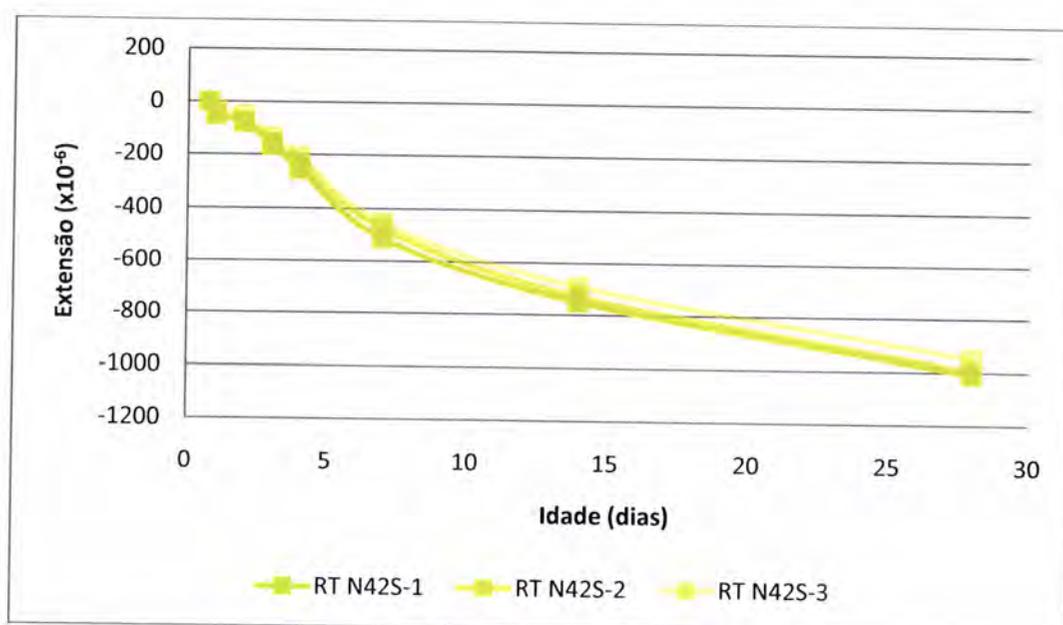


Gráfico A. 18 - Retração total da argamassa RN 42 + SAP

Idade (dias)	Flexão σ (MPa)	Compressão σ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
			ME N42S-1	ME N42S-2
1	2,5	12,5	11,8	11,7
3	4,3	23,8	17,1	17,3
28	6,3	34,9	21,2	21,2

Quadro A. 45 - Valores dos ensaios mecânicos e do módulo de elasticidade da argamassa RN 42 + SAP