

AGRADECIMENTOS

A presente Dissertação de Mestrado constitui-se como um percurso trilhado com grandes privações e sacrifícios, em que se alternaram momentos de desalento com outros de satisfação pelo trabalho conseguido. Não obstante, resultou do contributo de diversas pessoas às quais agradeço profundamente e muito me honra destacar.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Luiz António Pereira de Oliveira, pela sua importante influência na minha formação. Agradeço profundamente a sua inteira disponibilidade, apoio, exigência, pela motivação e pela discussão de ideias e críticas que me estimularam e marcaram o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

A todos os docentes que aceitaram colaborar neste estudo, pela sua disponibilidade e rigor com que me ajudaram na realização de alguns procedimentos experimentais.

Ao Miguel Gomes e ao Luís Vaz, pela compreensão, amizade e apoio, ao longo de todo o percurso académico.

Ao João Centeio, por toda a ajuda e disponibilidade que prestou ao longo deste ano.

A vocês, amigos, que estiveram ao meu lado nesta fase, obrigado pela compreensão da minha indisponibilidade, pelo bom humor sempre presente e por todo o apoio!

Aos meus queridos Pais, a quem dedico esta dissertação, por serem os meus modelos de trabalho, coragem e amor, o meu obrigado por tudo!!!

À pessoa que eu mais amo, Tânia, por todo o apoio e dedicação dada neste período académico, tendo dado uma motivação importantíssima até à finalização deste trabalho. A ti um grande beijo e um muito obrigado.

Resumo

Com o objectivo de evitar anomalias nas argamassas de revestimento, muitos investigadores têm procurado soluções para que isso não aconteça. Como tal, a adição de fibras acrílicas em argamassas pode ser vista como uma boa solução para que se evite muitas das anomalias que normalmente aparecem em matrizes cimentícias, sobretudo aquelas advindas das deformações nas primeiras idades. Foi com esse intuito que se levou a cabo este trabalho de estudar o desempenho reológico e mecânico de argamassas de revestimento reforçadas com adição de fibras acrílicas. Um plano factorial experimental 2^3 foi desenvolvido tendo em conta o comprimento, diâmetro e o volume de fibras como variáveis independentes. Este plano experimental foi realizado a partir de uma matriz cimentícia com traço 1:3 (cimento/areia) e uma relação de 0,5 água/cimento, adicionaram-se diferentes tipos de fibras acrílicas em que se fez variar o comprimento, o diâmetro e o teor de fibras adicionados. Com o intento de ser possível estudar a reologia das argamassas de revestimento, foi ensaiada uma nova matriz cimentícia, com agregados mais finos e com um traço 1:0,5 (cimento/areia) e uma relação água/cimento de 0,4.

O comportamento reológico das argamassas no estado fresco foi avaliado através dos ensaios de espalhamento (Flow Table) e através do reómetro Viskomat NT para determinação dos parâmetros relacionados a tensão de cedência e a viscosidade plástica. Para a avaliação do comportamento mecânico foram realizados ensaios no estado endurecido relativos à resistência à flexão e à compressão, ao módulo de elasticidade dinâmico, à retracção livre, à massa volúmica e à absorção de água por capilaridade.

Como resultados, verificou-se que a adição de fibras acrílicas na matriz cimentícia original influencia a reologia das argamassas devido às suas características geométricas, visto que ao serem introduzidas na matriz, modificam fortemente as características da matriz cimentícia original. Constatou-se assim que a adição de fibras que apresentam uma relação l/d muito elevada, apresentam uma menor trabalhabilidade. A resistência à flexão é influenciada pelo comprimento e volume das fibras, enquanto a resistência à compressão sofre influência da relação l/d . A absorção de água por capilaridade é sensivelmente influenciada pelo volume de fibras e pela interacção entre o comprimento, o diâmetro e o volume das fibras. Já o módulo de elasticidade dinâmico é mais fortemente influenciado pelo volume de fibras.

Com a aplicação do Método dos Planos Experimentais foi possível identificar os factores mais influentes nas propriedades estudadas e elaborar modelos matemáticos de previsão de comportamento da argamassa reforçada com fibras acrílicas.

PALAVRAS-CHAVE

Argamassas de revestimento, fibras acrílicas, reologia, comportamento mecânico, retracção.

Abstract

In order to avoid anomalies in renders mortars, many researchers have studied solutions to prevent them. How one of the proposed solutions is the fibers incorporation in renders mortars this study is developed with the acrylic fibers addition that can be seen as a good solution to avoid the anomalies that typically appear, during early ages, in cementitious matrices. It was with this in mind that this work was carried out observing the rheological and mechanical performance of render mortar reinforced with acrylic fibers. A factorial experimental plan 2^3 was developed taking into account the length, diameter and fibers volume as independent variables. This experimental plan was done with a cement-based mortar weight proportion 1:3 (cement/sand) with a water/cement ratio 0.5 was prepared with different aspect ratio and volume of acrylic fibers. The follow mortar hardened properties was determined: flexural and compressive strengths, dynamic modulus of elasticity, free mortars shrinkage, capillarity water absorption and the dry bulk density. A mortar weight proportion 1:0.5 (cement/sand) with a water/cement ratio 0.4 was specifically prepared for the mortar rheological study.

As result, it was found that the acrylic fibers addition in original cementitious matrix influence the mortar rheology due to their geometric characteristics. Since being introduced in the matrix, the fibers strongly modify the original characteristics of the cementitious matrix. It was found that a high l/d ratio of fibers lead the mortars to present a lower workability. The flexural strength is influenced by the length and volume of fibers, while the compressive strength is influenced by the l/d ratio. Water absorption by capillarity is significantly influenced by the volume of fibers and interaction between length, diameter and fibers volume. The dynamic modulus of elasticity is stronger influenced by the volume of fibers.

By applying a Factorial Experimental Plans Method it was possible to identify the most influential factors in the properties studied and elaborate mathematical models to predict the acrylic fibers reinforced mortar behavior.

Keywords

Render mortar; acrylic fibers; rheology; mechanical strengths; shrinkage.

Índice

Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas	xvi
Capítulo 1. Introdução	17
1.1. Apresentação do tema	18
1.2. Objectivos	19
1.3. Estrutura da dissertação	19
Capítulo 2. Argamassas de revestimento de alvenaria	21
2.1. Introdução	22
2.2. Considerações gerais	22
2.3. Materiais e proporções	24
2.3.1. Caracterização dos materiais	24
2.3.2. Traço	24
2.3.3. Ligantes	25
2.3.3.1. Cal hidráulica	25
2.3.3.2. Cal aérea	26
2.3.3.3. Cimento	26
2.3.3.4. Gesso	28
2.3.4. Agregados	28
2.3.5. Água de amassadura	30
2.3.6. Adjuvantes e aditivos	30
2.4. Argamassas reforçadas com fibras	31
2.4.1. Tipos de fibras	32
2.4.1.1. Fibras naturais	32
2.4.1.2. Fibras sintéticas	34
2.4.2. Matriz cimentícia	37
2.4.3. Matriz cimentícia fibrosa	37
2.5. Ensaio para caracterização de argamassas de reboco	38
2.5.1. Descrição geral	38
2.5.1.1. Consistência por espalhamento (Flow Table)	38
2.5.1.2. Massa volúmica da argamassa em pasta	39
2.5.1.3. Reologia	40
2.5.1.4. Resistência à flexão	40
2.5.1.5. Resistência à compressão	41
2.5.1.6. Massa volúmica no estado endurecido	42
2.5.1.7. Ultra-sons	43
2.5.1.8. Retracção	44
2.5.1.9. Absorção de água por capilaridade	44
2.6. Propriedades de argamassas com fibras	45
2.6.1. Reologia	45
2.6.2. Parâmetros reológicos	46
2.6.3. Influência da Matriz e da Fibra	47
2.6.4. Modelos de ensaios reológicos	50
2.7. Metodologia da planificação factorial de experiências	53
2.7.1. Método Clássico	53
2.7.2. Método do Plano Factorial de Experiências	55
2.7.2.1. Planos completos a K factores: 2^k	56
Capítulo 3. Programa Experimental	60
3.1. Introdução	61

3.2. Selecção e caracterização dos materiais utilizados	62
3.2.1. Generalidades	62
3.2.2. Ligantes	62
3.2.3. Agregados	62
3.2.4. Água de amassadura	64
3.2.5. Superplastificante	64
3.2.6. Fibras sintéticas	64
3.2.7. Equipamentos utilizados na preparação das argamassas	64
3.3. Preparação das argamassas	66
3.4. Ensaio realizados	69
3.4.1. Ensaio da argamassa no estado fresco	69
3.4.1.1. Ensaio da consistência por espalhamento (Flow Table)	70
3.4.1.2. Ensaio da massa volúmica da argamassa no estado fresco	70
3.4.1.3. Ensaio reológico	71
3.4.2. Ensaio da argamassa no estado endurecido	72
3.4.2.1. Ensaio de resistência à flexão	73
3.4.2.2. Ensaio de resistência à compressão	73
3.4.2.3. Ensaio da massa volúmica no estado endurecido	73
3.4.2.4. Ensaio de ultra-sons	74
3.4.2.5. Ensaio de absorção de água por capilaridade	75
3.4.2.6. Ensaio de retracção	75
Capítulo 4. Resultados e Discussão	77
4.1. Introdução	78
4.2. Ensaio e resultados	78
4.2.1. Respostas do Método dos Planos Experimentais	78
4.2.2. Propriedades das argamassas no estado fresco	80
4.2.3. Ensaio reológico	82
4.2.4. Propriedades das argamassas no estado endurecido	87
4.2.4.1. Resistência à flexão	87
4.2.4.2. Resistência à compressão	89
4.2.4.3. Massa volúmica no estado endurecido	91
4.2.4.4. Ensaio dos ultra-sons	92
4.2.4.5. Absorção de água por capilaridade	93
4.2.4.6. Ensaio de retracção	94
Capítulo 5. Conclusões	96
Bibliografia	
Anexos	

Índice de Figuras

Fig. 1 - Classificação de fibras	32
Fig. 2 - Aparelho manual para o teste de consistência por espalhamento (Flow Table)	39
Fig. 3 - Cone cilíndrico	39
Fig. 4 - Reómetro Viskomat NT	40
Fig. 5 - Máquina de testes de resistência à flexão	41
Fig. 6 - Representação do funcionamento do ensaio à flexão	41
Fig. 7 - Máquina de testes à compressão	42
Fig. 8 - Ensaio da massa volúmica no estado endurecido	42
Fig. 9 - Aparelho de ultra-sons Pundit	43
Fig. 10 - Aparelho de medição da retracção livre	44
Fig. 11 - Ensaio de absorção de água por capilaridade	45
Fig. 12 - Efeito do tamanho do agregado na concentração máxima de fibras	48
Fig. 13 - Efeito da quantidade de agregado graúdo na fracção volumétrica de fibras	48
Fig. 14 - Relação entre a fracção volumétrica da fibra de polipropileno e a tensão de cedência	49
Fig. 15 - Efeito do comprimento e da tensão volumétrica da fibra na tensão de cedência de argamassas	49
Fig. 16 - Relação entre água/cimento e volume de fibra	50
Fig. 17 - Curvas ilustrativas dos tipos de fluidos de acordo com o comprimento da tensão de corte	52
Fig. 18 - Representação de como a variável X_1 varia de nível, as outras são fixas	54
Fig. 19 - Curva granulométrica das areias	63
Fig. 20 - Misturadora	65
Fig. 21 - Recipiente em aço inoxidável	65
Fig. 22 - Moldes prismáticos	65
Fig. 23 - Dimensões dos moldes prismáticos	65
Fig. 24 - Compactadora	65
Fig. 25 - Balança de precisão	66
Fig. 26 - Pesagem de areia	67
Fig. 27 - Pesagem do cimento	67
Fig. 28 - Pesagem das fibras	67
Fig. 29 - Pesagem da água	67
Fig. 30 - Pesagem do superplastificante	67
Fig. 31 - Amassadura da argamassa	67
Fig. 32 - Argamassa produzida	67
Fig. 33 - Adição das fibras acrílicas à matriz cimentícia	68
Fig. 34 - Colocação da matriz cimentícia fibrosa no garrafão	68
Fig. 35 - Colocação da argamassa no molde prismático	68
Fig. 36 - Extracção dos excessos de argamassa nos moldes	68
Fig. 37 - Compactação da argamassa	69
Fig. 38 - Câmara de cura	69
Fig. 39 - Provetes na câmara de cura	69
Fig. 40 - Colocação da argamassa no molde cónico	70
Fig. 41 - Argamassa sem o molde cónico	70
Fig. 42 - Medição do espalhamento da argamassa	70
Fig. 43 - Argamassa no recipiente de ensaio da massa volúmica	71
Fig. 44 - Argamassa depois do ensaio da massa volúmica em pasta	71
Fig. 45 - Argamassa pronta para o ensaio reológico	71

Fig. 46 - Reómetro onde se ensaiam as argamassas	71
Fig. 47 - Viskomat NT	71
Fig. 48 - Perfil em Degraus (“STEPS”) do ensaio reológico	72
Fig. 49 - Perfil em Rampa (“RAMP”) do ensaio reológico	72
Fig. 50 - Ensaio à flexão	73
Fig. 51 - Máquina (ZWICK 1435) de flexão	73
Fig. 52 - Ruptura do provete no ensaio à flexão	73
Fig. 53 - Máquina de ensaio à compressão	73
Fig. 54 - Ruptura do provete	73
Fig. 55 - Provete depois do ensaio à compressão	73
Fig. 56 - Cilindro onde se ensaiam os provetes	74
Fig. 57 - Ensaio da massa volúmica	74
Fig. 58 - Colocação do transmissor e do receptor nas extremidades do provete	74
Fig. 59 - Secagem dos provetes na estufa	75
Fig. 60 - Provetes cobertos para evitar a evaporação da água	75
Fig. 61 - Provetes imersos em água	75
Fig. 62 - Provetes na sala de cura	76
Fig. 63 - Estação metereológica	76
Fig. 64 - Aparelho de medição do ensaio à retracção	76
Fig. 65 - Massa volúmica no estado fresco das argamassas estudadas	81
Fig. 66 - Curvas de cedência Torque x Velocidade (argamassas com fibras de 4 mm de comprimento e 14,4µm de diâmetro com traço volumétrico 1:3)	83
Fig. 67 - Curvas de cedência Torque x Velocidade (argamassas com fibras de 4mm de comprimento e 43µm de diâmetro com traço volumétrico 1:3)	83
Fig. 68 - Curvas de cedência Torque x Velocidade (argamassas com fibras de 12mm de comprimento e 43µm de diâmetro com traço volumétrico 1:3)	84
Fig. 69 - Curvas de cedência Torque x Velocidade (argamassas com fibras de 12mm de comprimento e 43µm de diâmetro com traço volumétrico 1:3)	84
Fig. 70 - Curvas de cedência Torque x Velocidade (argamassas com traço volumétrico 1:0,5)	86
Fig. 71 - Resistência à flexão das argamassas aos 7 dias de idade	88
Fig. 72 - Resistência à flexão das argamassas aos 28 dias de idade	89
Fig. 73 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias de idade	89
Fig. 74 - Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade	90
Fig. 75 - Massa volúmica no estado endurecido das argamassas estudadas	92
Fig. 76 - Módulo de elasticidade dinâmico	93
Fig. 77 - Coeficientes de capilaridade das argamassas aos 28 dias	93
Fig. 78 - Retracção livre das argamassas estudadas	95
Fig. 79 - Retracção livre aos 28 dias de idade	95

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Influência das areias nas propriedades das argamassas	29
Tabela 2 - Propriedades de algumas fibras naturais	33
Tabela 3 - Propriedades de algumas fibras sintéticas	36
Tabela 4 - Propriedades mecânicas e químicas de fibras acrílicas	36
Tabela 5 - Matriz de efeitos de um plano 2 ²	57
Tabela 6 - Análise granulométrica das areias utilizadas	63
Tabela 7 - Quantidades dos constituintes das argamassas produzidas	66
Tabela 8 - Quadro de respostas pelo Método dos Planos Experimentais	78
Tabela 9 - Matriz de efeitos para a flexão	78
Tabela 10 - Médias dos efeitos	79
Tabela 11 - Variância e Erro tipo	79
Tabela 12 - Relação entre o valor de Efeito e o Erro tipo	79
Tabela 13 - Propriedades das argamassas no estado fresco	80
Tabela 14 - Equações do modelo reológico de Bingham	82
Tabela 15 - Equações do modelo reológico de Herschel-Bulkley	85
Tabela 16 - Coeficiente de ductilidade das argamassas estudadas	91
Tabela 17 - Valores da massa volúmica	91